



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΡΑΔΙΟΚΑΛΥΨΗΣ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αδριανός Κατσούρης

Επιβλέπων
Χρήστος Καψάλης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2013



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Αξιολόγηση ραδιοκάλυψης σε συστήματα ασύρματων αισθητήρων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αδριανός Κατσούρης

Επιβλέπων

Χρήστος Καψάλης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την _____ 2013

Χρήστος Καψάλης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Παναγιώτης Κωττής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Γεώργιος Φικιώρης
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2013

Αδριανός Γ. Κατσούρης

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

Copyright © 2013 Αδριανός Κατσούρης

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Μιχάλη Τζιρίτα και τους ανθρώπους της Ελληνικής Αεροπορικής Βιομηχανίας κ. Ευάγγελο Λαδή, κ. Χαράλαμπο Βαγγελάτο, κ. Δημήτρη Γαλλή και κ. Άγγελο Αβρασογλου για τη δυνατότητα που μου έδωσαν να εκπονήσω την παρούσα διπλωματική εργασία στην ΕΑΒ, καθώς και για την συνεργασία που είχαμε καθ' όλη τη διάρκεια αυτής.

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω τον κ. Χρήστο Καψάλη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και για τη βοήθειά του στη εκπόνηση της εργασίας, καθώς και τους υποψήφιους διδάκτορες του Εργαστηρίου Ασυρμάτου & Επικοινωνίας Μεγάλων Αποστάσεων Λάζαρο Πραγιάτη, Τερψιχόρη Ελένη Βελιβασάκη και Χρήστο Νικολόπουλο για το ενδιαφέρον και τη βοήθειά τους, οποτεδήποτε και αν χρειάστηκε.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές μου Βασίλη, Νίκο, Θοδωρή, Νίκο, Γιώργο και άλλους, με τους οποίους περάσαμε μαζί δυσκολίες και χαρές, εντός και εκτός Πολυτεχνείου, τα τελευταία έξι χρόνια και να τους ευχηθώ υγεία και επιτυχία σε οτιδήποτε και αν κάνουν.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω, ίσως, περισσότερο από όλους, την οικογένειά μου για την συμπαράσταση και την στήριξη, ηθική και υλική, που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, καθώς και για τη μέριμνά τους για τη σωστή διαμόρφωση του χαρακτήρα μου.

Αδριανός Κατσούρης, Φεβρουάριος 2013

περίληψη

Τα δίκτυα ασύρματων αισθητήρων κερδίζουν ολοένα έδαφος, σε ένα πλήθος εφαρμογών, σε διάφορους τομείς της τεχνολογίας και της επιστήμης, λόγω της ευελιξίας, της δυνατότητας ολοκλήρωσης και των αυξημένων δυνατοτήτων επικοινωνίας που παρέχουν. Μικροί, οικονομικοί και προσαρμόσιμοι αισθητήρες, τοποθετημένοι σε κατάλληλα σημεία, δημιουργούν ένα ασύρματο δίκτυο, παραμετροποιήσιμο και εξελίξιμο σε απόλυτο βαθμό, που σκοπό έχει την παρακολούθηση συγκεκριμένων φυσικών μεγεθών ή συμβάντων και την υποβοήθηση του ανθρώπου στην εποπτεία και διαχείριση εκτάκτων καταστάσεων.

Η επιλογή των κατάλληλων προτύπων επικοινωνίας ενός δικτύου ασύρματων αισθητήρων είναι καθοριστικής σημασίας για την επιτυχία των σκοπών αυτού, μιας και επηρεάζει τόσο τις επιδόσεις, όσο και το κόστος εγκατάστασης, λειτουργίας και συντήρησης του δικτύου. Η επιλογή αυτή βασίζεται, αρχικά στις τεχνικές προδιαγραφές των υποψήφιων προς υιοθέτηση προτύπων και εν συνεχεία στην πειραματική και πρακτική επιβεβαίωση των θεωρητικών τιμών των μεγεθών που ενδιαφέρουν (ισχύς, ρυθμός μετάδοσης, διαθεσιμότητα, αξιοπιστία κ.α.). Σημαντικό ρόλο, επομένως, σε μια μελέτη εγκατάστασης ενός δικτύου ασύρματων αισθητήρων παίζει η προσομοίωση αυτού, μιας και μπορεί να γλυτώσει από περιττό κόπο, χρόνο και κόστος, καθώς και να αποτελέσει το έναυσμα για περαιτέρω διερεύνηση των διαφόρων δυνατοτήτων και περιορισμών του δικτύου αυτού.

Πλέον, με την εξέλιξη της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών υπολογιστών, είναι αρκετά εύκολη η προσομοίωση ενός οποιουδήποτε δικτύου, με αποτελέσματα που πλησιάζουν εξαιρετικά την πραγματική συμπεριφορά αυτού σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας, δίνοντας τη δυνατότητα στο χρήστη να αξιολογήσει ενδελεχώς τα διάφορα πρότυπα επικοινωνίας και να επιλέξει το καταλληλότερο για τις ανάγκες του δικτύου που μελετά.

Λέξεις κλειδιά: δίκτυο ασύρματων αισθητήρων, επιτήρηση περιοχών ενδιαφέροντος, πρότυπα ασύρματης επικοινωνίας, προσομοίωση δικτύων

abstract

Wireless Sensor Networks are gaining more ground in a multitude of applications, in various fields of technology and science, due to their flexibility, their possibility of integration and their increased communication capabilities they provide. Small in size, low cost and adaptable sensors, placed at appropriate points, can create a wireless network, absolutely customizable and progressive, which aims to monitor specific natural quantities or events and to assist humans in overseeing and managing emergencies.

Selecting the appropriate communication standards of a wireless sensor network is crucial for the success of its objectives, as this choice affects both the performance and the cost of installation, operation and maintenance of the network. This selection is based primarily on the technical specifications of the candidate for adoption standards and then on the experimental and practical verification of the theoretical values of the quantities of interest (power, data rate, availability, reliability etc.) Therefore, important role in an installation study of a wireless sensor network plays the simulation of it, as it can save engineers from unnecessary effort, time and cost and it can trigger further investigation of the different capabilities and limitations of the network.

Nowadays, with the development of computer technology, it is quite simple to simulate any network, with results very close to the actual behavior of it, in different operating conditions, enabling the user to evaluate thoroughly the different communication standards and to choose the appropriate one, for the needs of the network of study.

Key words: wireless sensor network, monitoring areas of interest, wireless communication standards, network simulation

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Εισαγωγή.....	5
ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	6
2. Δίκτυα Ασύρματων Αισθητήρων	6
2.1 Γενικά.....	6
2.2 Εφαρμογές.....	6
2.3 Χαρακτηριστικά.....	9
2.4 Πλατφόρμες Ανάπτυξης	10
2.5 Προσομοίωση των WSNs.....	11
2.6 Σχετικά Θέματα.....	12
3. White Spaces.....	13
3.1 Ορισμοί.....	13
3.2 Περί προστασίας ήδη υπαρχόντων υπηρεσιών.....	14
3.2.1 Προστασία των ραδιοηλεκτρονικών υπηρεσιών στη ζώνη 470-790 MHz.....	16
3.2.2 Προστασία των PMSE στη ζώνη 470-790 MHz	19
3.2.3 Προστασία της Ραδιοαστρονομίας στη ζώνη 608-614 MHz.....	22
3.2.4 Προστασία της Αεροναυτικής Ραδιοπλοήγησης στη ζώνη 645-790 MHz.....	24
3.2.5 Προστασία κινητών/σταθερών υπηρεσιών στις ζώνες γειτονικά των 470-790 MHz.....	24
3.3 Δυνατότητες και χαρακτηριστικά των WSDs.....	25
3.4 Εφαρμογές που μπορούν να επωφεληθούν από τα white spaces.....	29
4. WiMAX – IEEE 802.16.....	32
4.1 Ορολογία.....	32
4.2 Χρήσεις.....	32
4.2.1 Πρόσβαση στο Διαδίκτυο.....	33
4.2.2 Δίκτυο κορμού (Backhaul).....	33
4.2.3 Triple-play.....	33
4.2.4 Ανάπτυξη δικτύων WiMax σε πληγείσες περιοχές.....	34
4.3 Υλικό.....	34
4.3.1 Διασύνδεση.....	34
4.3.2 Gateways.....	35
4.3.3 Εξωτερικά modems.....	35
4.3.4 Κινητά τηλέφωνα.....	35

4.4 Τεχνικές Πληροφορίες.....	36
4.4.1 Το πρότυπο IEEE 802.16.....	36
4.4.2 Φυσικό Στρώμα.....	36
4.4.3 Έλεγχος Πρόσβασης στο Μέσο, στρώμα ζεύξης δεδομένων.....	37
4.4.4 Ανάπτυξη.....	37
4.4.5 Σύνδεση με ένα IP-based δίκτυο.....	38
4.4.6 Κατανομή του ραδιοφάσματος.....	39
4.4.7 Φασματική απόδοση.....	39
4.4.8 Εγγενείς περιορισμοί.....	40
4.4.9 Σύγκριση με το WiFi.....	40
4.4.10 Έλεγχος συμμόρφωσης.....	41
4.5 Οργανισμοί.....	41
4.6 Ανταγωνιστικές τεχνολογίες.....	42
4.7 Εξέλιξη του WiMAX.....	42
4.8 Παρεμβολές.....	43
4.9 Υλοποιήσεις εμπορικών δικτύων.....	43
5. LTE.....	45
5.1 Επισκόπηση.....	45
5.2 Ιστορική αναδρομή.....	45
5.3 Χαρακτηριστικά.....	46
5.4 Τηλεφωνικές κλήσεις.....	46
5.5 Φωνή Full-HD.....	47
5.6 Ζώνες Συχνότητων.....	48
5.7 E-UTRAN.....	48
5.7.1 Χαρακτηριστικά.....	48
5.7.2 Λόγος δημιουργίας e-UTRA.....	48
5.7.3 Αρχιτεκτονική.....	49
5.7.4 Στοιβα πρωτοκόλλων του e-UTRAN.....	49
5.7.5 Λεπτομέρειες για το Φυσικό Στρώμα (L1).....	50
5.8 LTE Advanced.....	51
5.8.1 Υπόβαθρο.....	51
5.8.2 Προτάσεις.....	51
5.8.3 Πρώτες παρουσιάσεις της τεχνολογίας.....	52
6. MIMO.....	53

6.1	Ιστορική αναδρομή	53
6.2	Λειτουργίες των MIMO.....	54
6.3	Μορφές των MIMO	55
6.3.1	Τύποι Πολλαπλών Κεραιών (Multi-antenna).....	55
6.3.2	Τύποι Πολλαπλών Χρηστών (Multi-user).....	55
6.4	Εφαρμογές των MIMO	56
6.5	Δοκιμές των MIMO.....	57
6.6	Σχετική βιβλιογραφία	57
7.	Γνωστικά συστήματα επιτήρησης	59
7.1	Λόγοι δημιουργίας συστημάτων επιτήρησης.....	59
7.2	Στόχοι/προκλήσεις έξυπνων συστημάτων επιτήρησης	59
7.3	Τεχνικές λεπτομέρειες συσκευών επιτήρησης.....	60
7.4	Τηλεπικοινωνιακό τμήμα των συστημάτων επιτήρησης.....	60
8.	Προτάσεις επί των ασύρματων συστημάτων επιτήρησης	62
	ΜΕΡΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ.....	65
9.	ICS Telecom.....	65
9.1	Λίγα λόγια για το ICS Telecom	65
9.2	Περιγραφή λειτουργιών του ICS Telecom	65
9.2.1	Τύποι αρχείων για τη δημιουργία ενός project.....	65
9.2.2	Τοποθέτηση σταθμών εκπομπής/λήψης.....	67
9.2.3	Μελέτη ραδιοκάλυψης.....	69
9.2.4	Μέθοδος δημιουργίας σεναρίων προσομοίωσης και τρόπος εργασίας	69
9.3	Μοντέλα προσομοιώσεων	71
9.3.1	Μέθοδος Deygout για την περίθλαση.....	71
9.3.2	ITU-R P.525-2: Υπολογισμός εξασθένησης ελεύθερου χώρου, 1994.....	73
9.3.3	ITU-R P.526-12 Διάδοση με περίθλαση, 2/2012.....	75
10.	Προσομοίωση σε βιομηχανική περιοχή.....	77
10.1	Downlink	80
10.1.1	WiMAX.....	80
10.1.2	LTE.....	81
10.2	Uplink.....	82
10.2.1	WiMAX.....	82
10.2.2	LTE.....	83
10.3	Σύγκριση mobile WiMAX-LTE.....	84

11. Προσομοίωση σε περιοχή συνόρων	85
11.1 Downlink	87
<i>11.1.1 WiMAX</i>	87
<i>11.1.2 LTE</i>	89
11.2 Uplink	91
<i>11.2.1 WiMAX</i>	91
<i>11.2.1 LTE</i>	93
11.3 Σύγκριση fixed WiMAX-LTE	94
12. Προσομοίωση σε νησί	95
12.1 Downlink	96
<i>12.1.1 WiMAX</i>	96
<i>12.1.2 LTE</i>	96
12.2 Uplink	97
<i>12.2.1 WiMAX</i>	97
<i>12.2.2 LTE</i>	98
12.3 Σύγκριση mobile WiMAX – LTE	100
επίλογος – μελλοντικές επεκτάσεις	101
βιβλιογραφία	102

1. Εισαγωγή

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη ενός δικτύου ασύρματων αισθητήρων (Wireless Sensor Network – WSN), το οποίο σχηματίζει ένα σύστημα επιτήρησης. Εξετάζονται διάφορες καταστάσεις λειτουργίας αυτού και επιχειρείται μια σύγκριση των χαρακτηριστικών και των επιδόσεων δύο προτύπων ασύρματων επικοινωνιών που μπορούν να υποστηρίξουν το δίκτυο αυτό: του WiMAX (mobile και fixed) και του LTE.

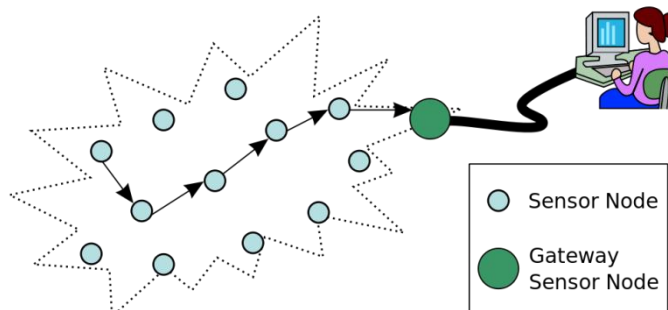
Η εργασία χωρίζεται, κατ' αρχήν, σε δύο μεγάλα τμήματα, στο θεωρητικό μέρος και στο μέρος των προσομοιώσεων. Στο θεωρητικό μέρος, στο 2^ο κεφάλαιο μελετώνται διάφορα θέματα σχετικά με τα δίκτυα ασύρματων αισθητήρων (δομή, λειτουργία, εφαρμογές), ενώ στο 3^ο κεφάλαιο αναλύονται τα προβλήματα παρεμβολών που μπορεί να προκαλέσει η χρήση των white spaces στις ήδη υπάρχουσες υπηρεσίες των συχνοτήτων 470 MHz ως 790 MHz. Στο 4^ο κεφάλαιο εξετάζονται λεπτομερώς τα χαρακτηριστικά και οι ιδιαιτερότητες του προτύπου ασύρματης επικοινωνίας WiMAX, ενώ στο 5^ο κεφάλαιο το ίδιο γίνεται και για το πρότυπο LTE. Το θεωρητικό σκέλος της εργασίας κλείνει με τα κεφάλαια 6, όπου μελετώνται κάποια θέματα σχετικά με την τεχνολογία MIMO, 7, όπου παρουσιάζεται με αδρές γραμμές ένα πρότυπο σύστημα ασύρματων αισθητήρων για την επιτήρηση διαφόρων περιοχών και 8, όπου προτείνονται συγκεκριμένες λύσεις για τη βελτίωσή του.

Στο μέρος των προσομοιώσεων, στο 9^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται το λογισμικό ICS Telecom με το οποίο διεξήχθησαν οι προσομοιώσεις και ακολούθως, στα κεφάλαια 10, 11 και 12 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αυτών, καθώς και τα συμπεράσματα από τη σύγκριση των προτύπων WiMAX και LTE, για τρία διαφορετικά σενάρια λειτουργίας ενός συστήματος ασύρματων αισθητήρων: μιας μικρής βιομηχανικής περιοχής, μιας περιοχής συνόρων και ενός νησιού.

2. Δίκτυα Ασύρματων Αισθητήρων

2.1 Γενικά

Ένα Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων (Wireless Sensor Network – WSN) αποτελείται από χωρικά κατανεμημένους αυτόνομους αισθητήρες, οι οποίοι πρέπει να παρακολουθούν διάφορες φυσικές ή περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως η θερμοκρασία, ο ήχος, η πίεση κ.α. και ακολούθως να μεταβιβάζουν συνεργατικά αυτά τα δεδομένα, μέσω του δικτύου, σε κάποιο κύριο σημείο (π.χ. ένα σταθμό βάσης-BS, ή ένα κέντρο ελέγχου-CC). Στα σύγχρονα δίκτυα επιτρέπεται η αμφίδρομη επικοινωνία, ούτως ώστε να καταστεί δυνατός ο έλεγχος του κάθε αισθητήρα. Κίνητρο για την ανάπτυξη των ασύρματων δικτύων αισθητήρων αποτέλεσαν διάφορες στρατιωτικές εφαρμογές, όπως η επιτήρηση του πεδίου της μάχης, εντούτοις σήμερα τα εν λόγω δίκτυα χρησιμοποιούνται σε πολλές βιομηχανικές και καταναλωτικές εφαρμογές, όπως η παρακολούθηση και ο έλεγχος της βιομηχανικής διαδικασίας, η παρακολούθηση της κατάστασης των μηχανημάτων κ.α.



Ένα WSN δομείται από κόμβους - από μερικούς ως εκατοντάδες ή χιλιάδες - όπου καθένας συνδέεται με έναν ή περισσότερους αισθητήρες. Κάθε τέτοιος κόμβος δικτύου τυπικά διαθέτει διάφορα τμήματα: έναν πομποδέκτη με εσωτερική ή εξωτερική κεραία, έναν μικροελεγκτή, κάποιο ηλεκτρονικό κύκλωμα για τη διασύνδεση με τους αισθητήρες και μια πηγή ενέργειας, συνήθως μια μπαταρία ή κάποιο ενσωματωμένο σύστημα συγκομιδής ενέργειας (π.χ. ηλιακά πλαίσια). Ένας κόμβος δικτύου ποικίλει σε μέγεθος και μπορεί να είναι τόσο μικρός όσο και ένας κόκκος σκόνης, αν και κάτι τέτοιο δεν έχει ακόμα πραγματοποιηθεί. Το κόστος των κόμβων είναι και αυτό μεταβλητό και εξαρτάται από την πολυπλοκότητά τους. Οι περιορισμοί στο μέγεθος και το κόστος των κόμβων δικτύου συντελούν σε αντίστοιχους περιορισμούς στους απαιτούμενους πόρους όπως η ενέργεια, η μνήμη, η υπολογιστική ισχύς και το εύρος ζώνης των επικοινωνιών. Η τοπολογία των WSNs μπορεί να ποικίλει από ένα απλό δίκτυο συνδεσμολογίας αστέρα σε ένα προηγμένο ασύρματο δίκτυο πολλαπλών συνδέσεων (multi-hop mesh network). Η τεχνική μετάδοσης των πληροφοριών μεταξύ των κόμβων του δικτύου μπορεί να είναι δρομολόγηση ή πλημμύρα.

Αξίζει, τέλος, να αναφερθεί, ότι τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων αποτελούν σήμερα έναν ενεργό τομέα της επιστημονικής και τεχνολογικής έρευνας, με πολλές ημερίδες και συνέδρια να διοργανώνονται παγκοσμίως κάθε χρόνο.

2.2 Εφαρμογές

Όπως ήδη έχει σημειωθεί, οι πιθανές εφαρμογές των WSNs είναι ποικίλες. Οι πιο σημαντικές από αυτές είναι οι εξής:

- Επιτήρηση περιοχών

Είναι μια πολύ κοινή εφαρμογή των WSNs, κατά την οποία το δίκτυο αναπτύσσεται πάνω από μια περιοχή στην οποία κάποιο φαινόμενο πρέπει να παρακολουθηθεί. Παραδείγματα αυτής της εφαρμογής μπορεί να είναι η ανίχνευση εχθρικών εισβολέων, ή η επιτήρηση των αγωγών πετρελαίου ή φυσικού αερίου. Όταν οι αισθητήρες ανιχνεύσουν κάποιο γεγονός, η πληροφορία αυτή αναφέρεται σε έναν ή περισσότερους σταθμούς βάσης, που στη συνέχεια λαμβάνει/-ουν τις κατάλληλες δράσεις (π.χ. αποστολή ενός μηνύματος στο Internet ή σε κάποιο δορυφόρο). Ομοίως, τα WSNs μπορούν να χρησιμοποιούν μια σειρά από αισθητήρες για την ανίχνευση της παρουσίας οχημάτων που κυμαίνονται από μοτοσικλέτες μέχρι τρένα.

- Παρακολούθηση περιβάλλοντος/γης

Ο όρος Δίκτυα Αισθητήρων Περιβάλλοντος (Environmental Sensor Networks – ESN) έχει εξελιχθεί για να καλύψει πολλές εφαρμογές των WSNs στο πεδίο της έρευνας της γης. Αυτό περιλαμβάνει την επιτήρηση ηφαιστειών, ωκεανών, παγετώνων, δασών κ.λπ. Μερικές από τις κυριότερες περιοχές εφαρμογών είναι οι εξής:

- ▶ Παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα: είναι ζωτικής σημασίας για την προστασία των ανθρώπων και του περιβάλλοντος από τη μόλυνση του αέρα. Η παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο των επικίνδυνων αερίων ενδιαφέρει ιδιαίτερα για συγκεκριμένες ευαίσθητες περιοχές, καθώς οι συνθήκες μπορούν να αλλάξουν δραματικά πολύ γρήγορα, με σοβαρές επιπτώσεις. Τα φυσικά μεγέθη που χρήζουν παρακολούθησης είναι η θερμοκρασία, η υγρασία και το φως, ενώ οι ουσίες που ενδιαφέρουν είναι το οξυγόνο, το μονοξείδιο και το διοξείδιο του άνθρακα, το διοξείδιο του θείου, το υδρόθειο, το μονοξείδιο και το διοξείδιο του αζώτου, η αμμωνία, το μεθάνιο, τα αιωρούμενα σωματίδια και οι αιωρούμενες οργανικές χημικές ενώσεις. Ακόμα, ενδιαφέρουν και κάποια άλλα στοιχεία, όπως η βροχόπτωση, η ταχύτητα και η κατεύθυνση του ανέμου, τα επίπεδα της υπεριώδους ακτινοβολίας και η ατμοσφαιρική πίεση. Ανάλογα με το αν οι αισθητήρες θα τοποθετηθούν σε εσωτερικό ή εξωτερικό χώρο, θα απαιτηθεί κατάλληλο κόστος αγοράς, εγκατάστασης και συντήρησης, καθώς και πρόσθετος εξοπλισμός για την παροχή ενέργειας και τη εξασφάλιση κατάλληλης αυτονομίας.
- ▶ Παρακολούθηση της μόλυνσης του αέρα: έχουν αναπτυχθεί τέτοια WSNs σε αρκετές πόλεις (Στοκχόλμη, Λονδίνο, Μπρισμπίν) με στόχο τον έλεγχο της συγκέντρωσης αερίων επικίνδυνων για τους πολίτες. Τα δίκτυα αυτά μπορούν να επωφεληθούν από ad-hoc ασύρματες ζεύξεις, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα μεταφοράς τους για επιτήρηση διαφορετικών κάθε φορά περιοχών.
- ▶ Ανίχνευση πυρκαγιάς σε δάση: ένα WSN μπορεί να εγκατασταθεί σε ένα δάσος προκειμένου να ανιχνεύει την εκδήλωση πυρκαγιάς σε αυτό. Οι αισθητήρες θα πρέπει να μπορούν να μετρούν τη θερμοκρασία, την υγρασία, τα εκλυόμενα από την πυρκαγιά αέρια και τα χαρακτηριστικά του ανέμου που επικρατεί, ώστε να υπάρξει έγκαιρη ειδοποίηση των πυροσβεστικών αρχών και διευκόλυνση του έργου τους.

- ▶ Ανίχνευση κατολισθήσεων: ένα τέτοιο σύστημα θα μπορεί να ανιχνεύσει τις μικροσκοπικές κινήσεις του εδάφους και τις αλλαγές σε διάφορες παραμέτρους που μπορούν να συμβούν πριν ή κατά τη διάρκεια μιας κατολίσθησης.
 - ▶ Παρακολούθηση της ποιότητας του νερού: αναλύονται σε πραγματικό χρόνο οι ιδιότητες του νερού σε φράγματα, ποτάμια, λίμνες και ωκεανούς, καθώς επίσης και στα υπόγεια υδατικά αποθέματα, με σκοπό την ακριβέστερη εποπτεία της κατάστασης του νερού και μάλιστα υπό συνθήκες που δε θα επέτρεπαν κάτι τέτοιο από τον άνθρωπο.
 - ▶ Πρόληψη των φυσικών καταστροφών: τα WSNs μπορούν να δράσουν αποτελεσματικά ως προς την πρόληψη των επιπτώσεων των φυσικών καταστροφών, όπως οι πλημμύρες ή οι υπερχειλίσεις ποταμών.
- Βιομηχανική παρακολούθηση
 - ▶ Παρακολούθηση της κατάστασης των μηχανημάτων: έχουν αναπτυχθεί WSNs για Συντήρηση με Βάση την Κατάσταση (Condition-Based Maintenance – CBM), καθώς προσφέρουν σημαντική μείωση στο κόστος και δημιουργούν νέες δυνατότητες. Σε ενσύρματα συστήματα, η εγκατάσταση αρκετού αριθμού αισθητήρων συχνά περιορίζεται από το κόστος της διασύνδεσης. Επίσης, πλέον μπορούν να τοποθετηθούν αισθητήρες σε δυσπρόσιτα σημεία, σε περιστρεφόμενα μηχανικά μέρη και σε επικίνδυνες ή απαγορευμένες περιοχές.
 - ▶ Καταγραφή δεδομένων: τα WSNs μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τη συλλογή δεδομένων από την παρακολούθηση πληροφοριών του περιβάλλοντος (π.χ. της θερμοκρασίας ενός ψυγείου, ή της στάθμης του νερού σε μια δεξαμενή ψύξης ενός πυρηνικού αντιδραστήρα). Το θετικό αυτών των σύγχρονων συστημάτων σε σχέση με το παρελθόν είναι η παροχή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και κατά συνέπεια η στατιστική ανάλυση των διαφόρων φαινομένων των εξεταζόμενων οντοτήτων.
 - ▶ Βιομηχανικές εφαρμογές «αίσθησης» και ελέγχου: με τις τελευταίες τεχνολογικές εξελίξεις στα WSNs (πρωτόκολλα επικοινωνιών, έλεγχος ισχύος, αξιοπιστία ζεύξεων, δυνατότητες πραγματικού χρόνου, βελτίωση ποιότητας υπηρεσιών κ.α.) γίνεται εφικτή η παροχή νέων εφαρμογών στο πεδίο της βιομηχανικής «αίσθησης» και του ελέγχου, αντικαθιστώντας μερικώς ή ενισχύοντας τα συμβατικά ενσύρματα δίκτυα αισθητήρων.
 - ▶ Παρακολούθηση των υδάτων/υδατικών λυμάτων: περιλαμβάνει την εξασφάλιση της ποιότητας των επιφανειακών ή υπόγειων υδάτων, τόσο για τους ανθρώπους, όσο και για την πανίδα, καθώς και την επιτήρηση των έργων υποδομής των υδάτων μιας χώρας. Τα μεγέθη που καθορίζουν την ποιότητα του νερού είναι η θερμοκρασία, το pH, η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα και το διαλυμένο σε αυτό οξυγόνο. Για τη μελέτη της κατανομής του δικτύου διανομής του νερού ενδιαφέρουν μεγέθη όπως τα επίπεδα ροής και πίεσης, η ανίχνευση διαρροών, τα επίπεδα του νερού καθώς και η απομακρυσμένη μέτρηση όλων αυτών. Επιπροσθέτως, για την πρόληψη φυσικών καταστροφών είναι πολύ σημαντική η έγκαιρη προειδοποίηση των αρμόδιων αρχών. Γενικότερα, η επίβλεψη των υδάτων και των παρελκόμενων με αυτά συστημάτων/φαινομένων είναι ένας τομέας πρόσφορος για την αξιοποίηση των WSNs, λόγω των αυξημένων δυνατοτήτων, της ακρίβειας των μετρήσεων και της αξιοπιστίας που αυτά διαθέτουν.

- Γεωργία

Κάνοντας χρήση των WSNs στη γεωργία διευκολύνονται οι παραγωγοί στη συντήρηση των διαφόρων συστημάτων μετρήσεων, ελέγχου και τιμολόγησης που διαθέτουν. Επίσης, μπορεί να αυτοματοποιηθεί η άρδευση των καλλιεργειών με αποτέλεσμα την αποδοτικότερη χρήση του νερού και τον περιορισμό των απωλειών/αποβλήτων.

- ▶ Παρακολούθηση θερμοκηπίων: τα WSNs μπορούν να αναπτυχθούν σε θερμοκήπια προκειμένου να βελτιώνεται ο έλεγχος της θερμοκρασίας και της υγρασίας μέσα σε αυτά και ακόμα, να ειδοποιείται ο αγρότης μέσω e-mail ή sms όταν τα επίπεδα αυτών των μεγεθών ξεπεράσουν κάποια όρια ή αντί αυτού να ενεργοποιούνται αυτόματα κάποια συστήματα (θέρμανση/ψύξη, ανεμιστήρες, εξαερισμός, εκνέφωση) για την επαναφορά των ανωτέρω μεγεθών στα κανονικά επίπεδα.

- Παρακολούθηση δομικών κατασκευών

Τα WSNs μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση των κινήσεων κτιρίων, γεφυρών, υπέργειων διαβάσεων, αναχωμάτων, σηράγγων και λοιπών κατασκευών, βοηθώντας τους μηχανικούς να επιβλέπουν την κατάσταση αυτών από μακριά, χωρίς να απαιτούνται δαπανηρές επισκέψεις, με μεγαλύτερη ακρίβεια και αυξημένη συχνότητα στις μετρήσεις. Τα μεγέθη που ενδιαφέρουν είναι το (μηχανικό) φορτίο, η μηχανική κόπωση των κατασκευών, οι δονήσεις και η εξέλιξη των ρωγμών, καθώς επίσης και οι καιρικές συνθήκες, ο άνεμος, η κυκλοφοριακή κίνηση και τα αποτελέσματα της ρύπανσης.

- Επιτήρηση έξυπνου σπιτιού

Η επιτήρηση των δραστηριοτήτων που λαμβάνουν χώρα σε ένα έξυπνο σπίτι επιτυγχάνεται με τη χρήση WSNs που αποτελούνται από αισθητήρες ενσωματωμένους σε αντικείμενα της καθημερινότητας και που εντοπίζουν αλλαγές που προκαλούνται από τον ανθρώπινο χειρισμό.

2.3 Χαρακτηριστικά

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά ενός WSN περιλαμβάνουν:

- Περιορισμένη κατανάλωση ενέργειας με τη χρήση μπαταριών ή αυτόνομης συλλογής ενέργειας
- Ευελιξία στην αντιμετώπιση αστοχίας των κόμβων
- Κινητικότητα κόμβων
- Αστοχία επικοινωνίας
- Ετερογένεια κόμβων
- Δυνατότητα επεκτασιμότητας των δικτύων
- Αντοχή σε άσχημες περιβαλλοντικές/κλιματικές συνθήκες
- Ευκολία χρήσης

Οι κόμβοι-αισθητήρες μπορούν να μοντελοποιηθούν σαν μικροί υπολογιστές, με τις απολύτως βασικές διασυνδέσεις, διεπαφές και τμήματα. Συνήθως αποτελούνται από μια

μονάδα επεξεργασίας μικρής υπολογιστικής ισχύος και μνήμης, αισθητήρες ή MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems) με ειδικά κυκλώματα ψύξης, μια συσκευή επικοινωνιών (συνήθως μικροκυματικοί πομποδέκτες ή ακόμα και οπτικοί) και μια πηγή ενέργειας (συνήθως μπαταρία). Άλλες πιθανές προσθήκες είναι κάποια συσκευή συλλογής ενέργειας, δευτερεύοντα κυκλώματα ASIC (Application-Specific Integrated Circuit) και εναλλακτικές συσκευές επικοινωνίας (π.χ. RS-232 ή USB).

Οι σταθμοί βάσης είναι ένα ή περισσότερα στοιχεία του WSN με περισσότερους υπολογιστικούς, ενεργειακούς και επικοινωνιακούς πόρους. Ενεργούν ως πύλη μεταξύ των κόμβων-αισθητήρων και του τελικού χρήστη, καθώς συνήθως προωθούν τα δεδομένα από το WSN σε ένα διακομιστή. Άλλα ειδικά στοιχεία των WSNs είναι οι δρομολογητές, που σκοπό έχουν τον υπολογισμό και τη διανομή των πινάκων δρομολόγησης.

2.4 Πλατφόρμες Ανάπτυξης

- Πρότυπα και προδιαγραφές

Πολλά πρότυπα σήμερα είτε έχουν επικυρωθεί είτε βρίσκονται υπό ανάπτυξη από διάφορους οργανισμούς όπως ο WAVE2M για τα WSNs, ενώ παράλληλα υπάρχει και μια σειρά από οργανισμούς τυποποίησης στον τομέα αυτό. Η IEEE επικεντρώνεται στο φυσικό και στο στρώμα MAC (στρώμα ζεύξης), η IETF (Internet Engineering Task Force – αρμόδια γενικώς για την ανάπτυξη και την προώθηση προτύπων Διαδικτύου) εργάζεται από το 3^ο στρώμα (στρώμα δικτύου) και πάνω (στρώματα μεταφοράς και εφαρμογής), ενώ διάφοροι άλλοι οργανισμοί (όπως π.χ. η Διεθνής ένωση Αυτοματισμού – International Society of Automation – ISA) παρέχουν «κάθετες» προτάσεις, που καλύπτουν δηλαδή όλα τα στρώματα του πρωτοκόλλου.

Στην περίπτωση των WSNs, τα διάφορα πρότυπα χρησιμοποιούνται πολύ λιγότερο από ότι σε άλλα συστήματα, πράγμα που δυσχεραίνει την απευθείας επικοινωνία μεταξύ ετερογενών συστημάτων. Ωστόσο, πρότυπα που χρησιμοποιούνται συνήθως στα WSNs είναι τα WirelessHART, IEEE 1451, ZigBee/802.15.4, ZigBee IP και 6LoWPAN (IPv6 over Low Power Wireless Personal Area Networks).

- Hardware

Μια σημαντική πρόκληση σε ένα WSN είναι η χρήση χαμηλού κόστους και μικρού μεγέθους κόμβων-αισθητήρων. Υπάρχει ένας ολοένα και αυξανόμενος αριθμός μικρών εταιριών που κατασκευάζουν υλικό για τέτοια δίκτυα, ενώ η ζήτηση στην αγορά μοιάζει με την κατάσταση που επικρατούσε στην αγορά προσωπικών υπολογιστών της δεκαετία του '70. Εκτός από την εισαγωγή νέων μεθόδων κατασκευής, η τάση είναι να βρεθούν και διάφοροι τρόποι για την συλλογή των μεταφερόμενων δεδομένων με όσο το δυνατόν χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας.

- Λογισμικό

Η ενέργεια είναι ο πιο δυσεύρετος και άρα σημαντικότερος πόρος για τις συσκευές ενός WSN, πολλώ δε μάλλον όταν καθορίζει τη διάρκεια ζωής τους. Αν συνυπολογιστεί και το δύσκολο περιβάλλον στο οποίο μπορεί να τοποθετηθούν αυτές, το εγκατεστημένο λογισμικό απαιτείται να εξασφαλίζει μεγιστοποίηση της διάρκειας ζωής, ανθεκτικότητα και ανοχή σε σφάλματα, καθώς επίσης και αυτό-ρύθμιση. Η έρευνα σχετικά με το λογισμικό αυτών των συσκευών εντοπίζεται στους τομείς των λειτουργικών συστημάτων, της ασφάλειας και της κινητικότητας.

- Λειτουργικά συστήματα (ΛΣ): για την περίπτωση WSNs, τα λειτουργικά συστήματα που χρησιμοποιούνται είναι λιγότερο πολύπλοκα από ότι συνήθως, μιας και μοιάζουν, ως επί το πλείστον, με ενσωματωμένα συστήματα. Αυτό συμβαίνει διότι τα WSNs αναπτύσσονται για συγκεκριμένο σκοπό και όχι ως γενική υπολογιστική πλατφόρμα, ενώ επίσης, λόγω της περιορισμένης κατανάλωσης ενέργειας των κόμβων, στοιχεία όπως εικονικές μηνύες κ.λπ. είναι είτε περιττά, είτε πολύ ακριβά για να εφαρμοστούν. Μερικά τέτοια ενσωματωμένα λειτουργικά συστήματα είναι το eCos και το uC/OS, ενώ πολλές φορές τα ΛΣ σχεδιάζονται με ιδιότητες πραγματικού χρόνου. Το πρώτο λειτουργικό σύστημα που σχεδιάστηκε ειδικά για WSNs είναι το TinyOS, το οποίο βασίζεται σε μοντέλα event-driven προγραμματισμού (δηλαδή, οι διάφορες λειτουργίες ενεργοποιούνται ύστερα από κάποιο γεγονός π.χ. κλικ ποντικιού κ.α.) και όχι σε multithreading (πολλαπλά νήματα-διεργασίες μέσα στη ροή της εκτέλεσης ενός προγράμματος). Όταν συμβεί κάποιο εξωτερικό γεγονός, όπως για παράδειγμα η άφιξη ενός εισερχόμενου πακέτου δεδομένων, ή κάποιο σήμα από τον αισθητήρα, το TinyOS δίνει εντολή στον κατάλληλο event handler να το χειριστεί, είτε ακριβώς εκείνη τη στιγμή, είτε αργότερα, ανάλογα με τον προγραμματισμό του TinyOS kernel. Ένα νέο ΛΣ σχετικά με τα WSNs είναι το LiteOS, το οποίο προσομοιάζει με το UNIX σε συγκεκριμένα σημεία και παρέχει υποστήριξη για τη γλώσσα προγραμματισμού C. Τέλος, το ΛΣ Contiki χρησιμοποιεί ένα απλούστερο προγραμματιστικό στυλ σε γλώσσα C, ενώ παρέχει βελτιώσεις όπως το 6LoWPAN και Protothreads (ένας μηχανισμός για ταυτόχρονο προγραμματισμό - concurrent programming).

2.5 Προσομοίωση των WSNs

Σε γενικές γραμμές, υπάρχουν δύο τρόποι για να αναπτυχθούν προσομοιώσεις για WSNs: είτε χρησιμοποιείται μια προσαρμοσμένη πλατφόρμα για την ανάπτυξη της προσομοίωσης, είτε αναπτύσσεται από τον ίδιο το χρήστη μια δική του προσομοίωση. Ως εκ τούτου, το μόνο παράδειγμα, επί του παρόντος, που επιτρέπει την προσομοίωση της πολύπλοκης συμπεριφοράς του περιβάλλοντος των WSNs είναι η Agent-based Μοντελοποίηση και Προσομοίωση (ένας τύπος υπολογιστικών μοντέλων για την προσομοίωση των δράσεων και των αντιδράσεων ενός συνόλου αυτόνομων οντοτήτων), που βασίζεται στην προσομοίωση κοινωνικών συστημάτων. Μάλιστα, έχει εκδοθεί από την IEEE ένα άρθρο που δίνει οδηγίες για την ανάπτυξη τέτοιων μοντέλων. Εκτός, όμως, από αυτού του είδους τα λογισμικά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλα, που ανήκουν στον γενικότερο τομέα των Προσομοιωτών Δικτύου (Network Simulators), όπως τα OPNET, NetSim και NS2.

2.6 Σχετικά Θέματα

- Δίκτυο καταναμημένων αισθητήρων

Εάν χρησιμοποιηθεί μια συγκεντρωτική αρχιτεκτονική σε ένα WSN και ο κεντρικός κόμβος αχρηστευθεί, τότε το υπόλοιπο δίκτυο θα καταρρεύσει. Προφανώς, η αύξηση της αξιοπιστίας του δικτύου μπορεί να πραγματοποιηθεί με την υιοθέτηση μιας αρχιτεκτονικής καταναμημένου ελέγχου. Μια τέτοια επιλογή συντελεί και σε πρόσθετα πλεονεκτήματα, όπως στη βελτιωμένη συλλογή των δεδομένων, στην παροχή εναλλακτικών/εφεδρικών διαδρομών μετάδοσης των πληροφοριών και στην καλύτερη κατανομή και αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων του δικτύου.

- Ενοποίηση δεδομένων

Οι πληροφορίες που συλλέγονται από τα WSNs συνήθως αποθηκεύονται με τη μορφή αριθμητικών δεδομένων σε κάποιο κεντρικό σταθμό βάσης. Εντούτοις, ο οργανισμός OGS (Open Geospatial Consortium) αναπτύσσει πρότυπα διαλειτουργικότητας μεταξύ των διεπαφών και κωδικοποίησης των μετα-δεδομένων (δεδομένα που περιγράφουν άλλα δεδομένα), που επιτρέπουν την ενοποίηση σε πραγματικό χρόνο της πληροφορίας που προέρχεται από ετερογενείς αισθητήρες, δίνοντας τη δυνατότητα επιτήρησης και ελέγχου της λειτουργίας ενός WSN από μόνο έναν χρήστη, μέσω ενός απλού web browser.

- Επεξεργασία εντός δικτύου

Για τη μείωση του κόστους επικοινωνίας, μερικοί αλγόριθμοι αφαιρούν τους κόμβους που παρέχουν περιττή πληροφορία και αποφεύγουν να προωθήσουν δεδομένα που είναι άχρηστα. Καθώς οι κόμβοι μπορούν να ελέγξουν τα δεδομένα που προωθούν, μπορούν κατά συνέπεια και να μετρήσουν μέσους όρους ή την κατευθυνσιμότητα, για παράδειγμα, των δεδομένων άλλων κόμβων (π.χ. γειτονικοί κόμβοι που επιτηρούν συγκεκριμένη περιοχή συχνά θα καταγράψουν όμοια δεδομένα). Αυτό το είδος του πλεονασμού δεδομένων, λόγω της χωρικής συσχέτισης μεταξύ των παρατηρήσεων των αισθητήρων, εγείρει την ανάπτυξη νέων τεχνικών εξόρυξης και συγκέντρωσης δεδομένων, εντός του δικτύου.

3. White Spaces

3.1 Ορισμοί

Με τον όρο **white spaces** καλούνται οι περιοχές συχνοτήτων του αδειοδοτημένου ραδιοηλεκτρονικού φάσματος, οι οποίες δεν χρησιμοποιούνται πλέον, λόγω της μετάβασης στην ψηφιακή τηλεόραση. Οι συχνότητες αυτές μπορούν να διατεθούν σε άλλες υπηρεσίες, μη αδειοδοτημένες (και άρα χωρίς να εξασφαλίζεται η χρήση τους), με την προϋπόθεση να μην παρεμβάλουν στις ήδη υπάρχουσες κατοχυρωμένες υπηρεσίες.

Όπως είναι γνωστό, οι εθνικοί και διεθνείς οργανισμοί τηλεπικοινωνιών αδειοδοτούν συγκεκριμένες ζώνες συχνοτήτων για συγκεκριμένες υπηρεσίες. Μεταξύ διαδοχικών ζωνών υπάρχουν κενές περιοχές συχνοτήτων για λόγους αποφυγής παρεμβολών. Υπάρχουν όμως και αχρησιμοποίητες περιοχές συχνοτήτων, που είτε δεν έχουν χρησιμοποιηθεί ποτέ, είτε έχουν ελευθερωθεί ως αποτέλεσμα τεχνολογικών αλλαγών. Ειδικότερα, η μετάβαση στην ψηφιακή τηλεόραση απελευθερώνει μεγάλες περιοχές συχνοτήτων μεταξύ 50 MHz και 800 MHz, διότι τα ψηφιακά προγράμματα μπορούν να ομαδοποιηθούν και να μεταδοθούν στο εύρος ζώνης ενός καναλιού (συχνότητας), ενώ τα αναλογικά προγράμματα όχι. Αυτό σημαίνει ότι παρόλο που απαιτούνται λιγότερα κανάλια συχνότητας, εντούτοις υπάρχει χώρος για περισσότερες μεταδόσεις και μάλιστα απελευθερώνεται φάσμα που μπορεί να διατεθεί σε άλλες υπηρεσίες.

Για λόγους πληρότητας, παρατίθενται οι ορισμοί κάποιων βασικών όρων επί του θέματος, όπως τους έχει θέσει το CEPT και η ITU-R. Έτσι λοιπόν, με τον όρο **white space** υποδεικνύεται ένα μέρος του φάσματος, που είναι διαθέσιμο για μια τηλεπικοινωνιακή εφαρμογή (υπηρεσία, σύστημα) σε δεδομένο χρόνο, σε δεδομένη γεωγραφική περιοχή σε μια μη-παρεμβολική/μη-προστατευόμενη βάση σχετικά με άλλες υπηρεσίες μεγαλύτερης προτεραιότητας σε εθνικό επίπεδο. Με τον όρο **Γνωστικό Σύστημα Ραδιοεπικοινωνιών (Cognitive Radio System – CRS)** καλείται ένα σύστημα ραδιοεπικοινωνιών που χρησιμοποιεί τεχνολογία που του επιτρέπει να αποκτήσει γνώση του επιχειρησιακού και γεωγραφικού περιβάλλοντος, των εγκαθιδρυμένων πολιτικών και της εσωτερικής κατάστασής του, ώστε να ρυθμίζει δυναμικά και αυτόνομα τις λειτουργικές του παραμέτρους και τα πρωτόκολλα με βάση την αποκτημένη γνώση, με σκοπό να επιτυγχάνει προκαθορισμένα αντικείμενα και να μαθαίνει από τα αποτελέσματα που προκύπτουν. Επίσης, **White Space Devices (WSDs)** λέγονται οι συσκευές που μπορούν να χρησιμοποιήσουν τα white spaces του φάσματος χωρίς να προκαλούν επιβλαβείς παρεμβολές σε προστατευόμενες υπηρεσίες, κάνοντας χρήση γνωστικών δυνατοτήτων. Τέλος, με τον όρο **υπάρχουσες ραδιο-υπηρεσίες/ραδιο-συστήματα** καλούνται οι επίγειες ραδιοηλεκτρονικές υπηρεσίες (Broadcasting Services), κυρίως DVB-T, τα συστήματα PMSE που περιλαμβάνουν κυρίως ασύρματα μικρόφωνα, οι υπηρεσίες RAS στην ζώνη των 608-614 MHz, οι υπηρεσίες ARNS στη ζώνη των 645-790 MHz και οι διάφορες κινητές υπηρεσίες κάτω από τα 470 MHz και πάνω από τα 790 MHz.

Όπως είναι λογικό, προτού, καταστεί εφικτή η χρήση των white spaces, υπάρχει μια σειρά από ζητήματα που πρέπει να διευθετηθούν. Αυτά είναι η προστασία των ήδη υπαρχόντων αδειοδοτημένων υπηρεσιών στις συχνότητες αυτές, η κατασκευή συσκευών που μπορούν

να λειτουργούν στις συχνότητες αυτές χωρίς να δημιουργούν προβλήματα και τέλος, η επιλογή των κατάλληλων υπηρεσιών για χρήση των white spaces.

3.2 Περί προστασίας ήδη υπάρχοντων υπηρεσιών

Τρεις είναι οι κύριες τεχνικές που έχουν προταθεί για την υποβοήθηση των WSDs ώστε να είναι σε θέση να εντοπίζουν μη κατειλημμένα κανάλια. Αυτές είναι η ανίχνευση του φάσματος (spectrum sensing), η χρήση μιας βάσης δεδομένων γεω-εντοπισμού (geo-location database) και η χρήση ενός πομπού-φάρου (beacon transmitter).

- Ανίχνευση φάσματος (spectrum sensing)

Με την τεχνική αυτή, οι WSDs προσπαθούν να ανιχνεύσουν την παρουσία προστατευμένων υπάρχοντων υπηρεσιών σε κάθε ένα από τα πιθανά διαθέσιμα κανάλια, μέσω της διεξαγωγής μετρήσεων σε κάθε υποψήφιο κανάλι. Όταν κάποιο κανάλι αναγνωριστεί ως κενό, εξετάζονται τα γειτονικά του για πιθανούς περιορισμούς στην ισχύ εκπομπής. Κάποιες όμως παθητικές υπηρεσίες (π.χ. Ραδιοαστρονομία στη ζώνη 608-614 MHz), δεν είναι δυνατόν να προστατευθούν με αυτό τον τρόπο, επομένως χρειάζεται κάποια κανάλια να εξαιρεθούν **μόνιμα** από την ανίχνευση. Εξειλιγμένες τεχνικές χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση της μεθόδου σε περιπτώσεις που τα χαρακτηριστικά των σημάτων των προς προστασία υπηρεσιών είναι γνωστά. Ευεργετικής, επίσης, σημασίας είναι η **συνεργασία μεταξύ των WSDs** για την εύρεση των διαθέσιμων καναλιών.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της ανίχνευσης φάσματος (όταν χρησιμοποιείται μόνο αυτή η τεχνική) είναι ότι **δε βασίζεται σε καμία ήδη υπάρχουσα υποδομή** (π.χ. βάση δεδομένων), πράγμα ευνοϊκό σε περιπτώσεις που δεν υπάρχει αυτή η δυνατότητα. Από την άλλη, αν είναι απαραίτητη η υιοθέτηση πολύ χαμηλών κατωφλίων ανίχνευσης, θα υπάρξει αύξηση της πολυπλοκότητας και μείωση των τελικά διαθέσιμων καναλιών.

Στην περίπτωση που βρεθεί κάποιο ελεύθερο κανάλι και ξεκινήσει τη λειτουργία της η WSD, θα πρέπει ανά τακτά χρονικά διαστήματα να γίνεται **επανέλεγχος** του καναλιού ώστε να εντοπιστεί κάποια υπηρεσία που τελικά τρέχει στο κανάλι.

Σημαντικές παράμετροι για τη μέθοδο της ανίχνευσης είναι:

- το κατώφλι ανίχνευσης,
- η περιοδικότητα επανελέγχου του καναλιού και
- η διάρκεια της δειγματοληψίας.

Γενικά υπάρχουν δύο κατηγορίες ανίχνευσης: **ανίχνευση ενέργειας** και **ανίχνευση χαρακτηριστικών**. Το κύριο πλεονέκτημα της πρώτης είναι η ανεξαρτησία από το είδος του τηλεπικοινωνιακού συστήματος που παρακολουθείται και ως εκ τούτου η δυνατότητα λειτουργίας σε κάθε νέο σύστημα. Αντίθετα, η μέθοδος αυτή απαιτεί πολύ μεγάλη ευαισθησία λόγω θορύβου και επομένως αυξάνει την πιθανότητα λανθασμένων ανιχνεύσεων. Η δεύτερη κατηγορία αφορά την αναζήτηση συγκεκριμένων χαρακτηριστικών της υπηρεσίας που ελέγχεται, όπως για παράδειγμα κάποιο φέρον σήμα πιλότο, κάποιο προοίμιο, συνεχείς ή διεσπαρμένους πιλότους σε σήματα OFDM,

συγκεκριμένη περιοδικότητα ή ακολουθία στο σήμα στο πεδίο του χρόνου ή της συχνότητας κ.α. Οι ανιχνευτές αυτής της κατηγορίας δεν αποδιαμορφώνουν το σήμα και άρα δεν έχουν πρόσβαση στην πληροφορία που μεταφέρει, μπορούν όμως να αναγνωρίσουν τον τύπο του σήματος για παράδειγμα DVB-T ή DVB-T2 και να μειώσουν το ποσοστό λάθους. Ένα μειονέκτημά τους είναι η δυσκολία προσαρμογής τους σε νέα συστήματα, κάτι που μπορεί να βελτιωθεί π.χ. με updating του software.

- Γεω-εντοπισμός

Με αυτή την προσέγγιση, οι WSDs θα υπολογίζουν τη θέση τους και θα λαμβάνουν υπόψη τους μια βάση δεδομένων γεω-εντοπισμού για να αποφασίσουν ποιες συχνότητες μπορούν να χρησιμοποιήσουν. Κρίσιμες παράμετροι για αυτό είναι η ακρίβεια προσδιορισμού της θέσης, η συχνότητα ερωτήσεων προς τη βάση δεδομένων και η ποιότητα αυτής. Για τη λειτουργία του συστήματος είναι απαραίτητη η πρόσβαση, με κάποιο τρόπο, στη βάση δεδομένων, προτού να επιτραπεί η χρήση των white spaces. Σε περίπτωση που κάποια WSD συνδεθεί σε κάποιο σημείο πρόσβασης, τότε θα μπορεί να λειτουργεί ως proxy της βάσης δεδομένων για άλλες WSDs και να ελέγχει κατά πόσο αυτές δεν παραβιάζουν τους περιορισμούς της βάσης δεδομένων (τεχνική master-slave). Επίσης, στην περίπτωση που υπάρχουν περισσότερα διαθέσιμα APs συνδεδεμένα μεταξύ τους θα μπορεί να υποβοηθείται η διαδικασία εντοπισμού της θέσης και η παροχή των κατάλληλων πληροφοριών από τη βάση δεδομένων.

- Φάροι (Beacons)

Η τεχνική αυτή αναφέρεται στην αποστολή ειδικών σημάτων από φάρους (beacons) που χρησιμοποιούνται για να υποδείξουν ποια κανάλια είναι κατειλημμένα από ήδη υπάρχουσες υπηρεσίες και ποια είναι ελεύθερα. Συνήθως, η μέθοδος αυτή δε χρησιμοποιείται από μόνη της, αλλά για την υποβοήθηση της τεχνικής ανίχνευσης φάσματος, αυξάνοντας όμως το κόστος του συστήματος. Τα σήματα των φάρων μπορούν να αξιοποιηθούν με τρεις συνήθως τρόπους:

- ▶ **Ενεργοποιημένος φάρος:** Αν ανιχνευτεί σήμα φάρου, το εξεταζόμενο κανάλι μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Απαιτείται ένα δίκτυο από beacons, ένας δέκτης beacon σε κάθε WSD και μια υποστηρικτική βάση δεδομένων.
- ▶ **Απενεργοποιημένος φάρος:** Αν ανιχνευτεί σήμα φάρου, το εξεταζόμενο κανάλι είναι κατειλημμένο και επομένως δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Οι απαιτήσεις είναι ίδιες με παραπάνω.
- ▶ **Σήμα φάρου ως κανάλι πιλότος:** Τα σήματα των φάρων χρησιμοποιούνται για την αναγνώριση των τοπικά χρησιμοποιούμενων τηλεοπτικών καναλιών, δηλαδή πολλοί φάροι μαζί μπορούν να αποτελούν μια τοπική βάση δεδομένων για την αποφυγή παρεμβολών σε τηλεοπτικές υπηρεσίες.

Όπως εγράφη και προηγουμένως, αυτές είναι οι τρεις κύριες τεχνικές για την προστασία των διαφόρων υπηρεσιών που λειτουργούν αδειοδοτημένες στις περιοχές συχνοτήτων που ενδιαφέρουν. Οι σημαντικότερες από αυτές τις υπηρεσίες είναι οι εξής:

- Τηλεοπτικές μεταδόσεις στη ζώνη 470-790 MHz

- Υπηρεσίες PMSE (οπτικοακουστικές παραγωγές) στη ζώνη 470-790 MHz
- Ραδιοαστρονομία (RAS) στις συχνότητες 608-614 MHz
- Αεροναυτική ραδιοπλοήγηση (ARNS) στη ζώνη 645-790 MHz
- Διάφορες κινητές/σταθερές υπηρεσίες σε συχνότητες γειτονικές των 470-790 MHz

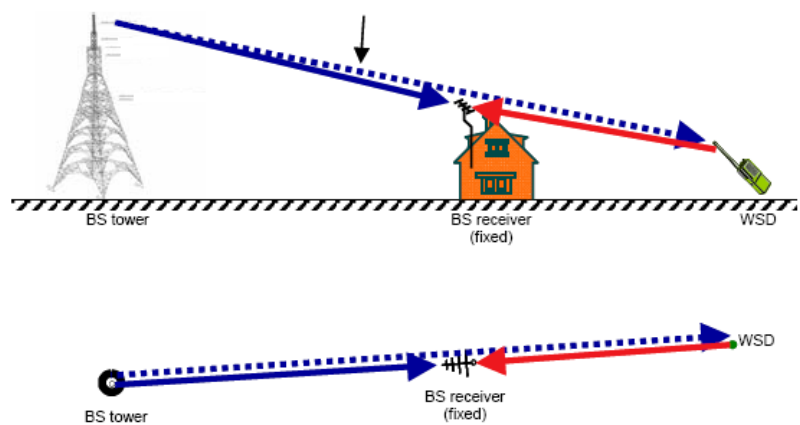
Ας δούμε, πλέον, πιο αναλυτικά τα χαρακτηριστικά των υπηρεσιών αυτών καθώς και τα πιθανά προβλήματα που μπορούν να εμφανιστούν από τη χρήση των white spaces σε αυτές.

3.2.1 Προστασία των ραδιοηλεκτρονικών υπηρεσιών στη ζώνη 470-790 MHz

Οι ραδιοηλεκτρονικές υπηρεσίες μπορούν να είναι στατικές (αγροτικές και αστικές), φορητές και χειρός.

Το συνηθέστερο πρόβλημα με τη χρήση WSDs σε εξωτερικούς χώρους είναι το ακόλουθο:

Όπως φαίνεται και στο διπλανό σχήμα, υπάρχει πιθανότητα παρεμβολής όταν ο οικιακός τηλεοπτικός δέκτης βρίσκεται ανάμεσα στο σταθμό εκπομπής και σε μια WSD. Για το λόγο αυτό, η WSD θα πρέπει να συλλέξει πληροφορίες, με βάση τις τεχνικές που προτάθηκαν προηγουμένως, ώστε να αποκλειστεί η πιθανότητα ύπαρξης στην περιοχή ενδιαφέροντος πομπών τηλεοπτικού σήματος, καθιστώντας απαραίτητη τη γνώση των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών των τηλεοπτικών σημάτων.



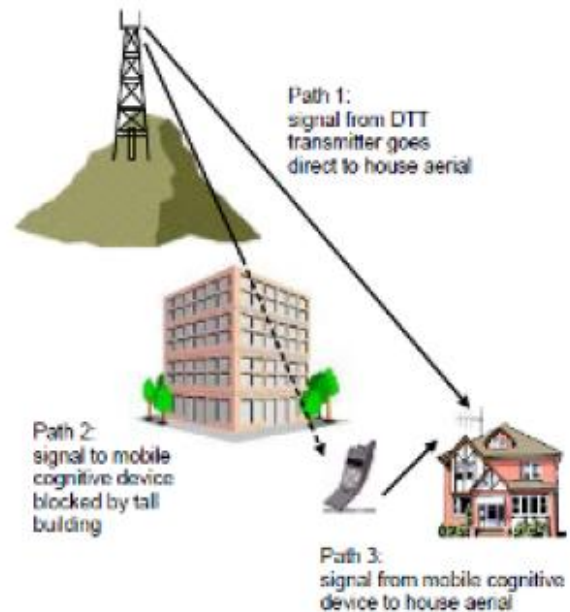
Με την **τεχνική της ανίχνευσης** του φάσματος είναι δυνατή η εύρεση των τηλεοπτικών σταθμών που λειτουργούν στην περιοχή. Για την ανίχνευση της παρουσίας τηλεοπτικών σημάτων πρέπει να υπολογιστεί ένα κατώφλι ανίχνευσης (detection threshold) δηλαδή το ελάχιστο επίπεδο σήματος λήψης της WSD, που σημαίνει ύπαρξη τηλεοπτικών εκπομπών.

Το κατώφλι λήψης, προφανώς δεν είναι σταθερό αλλά μεταβάλλεται στατιστικά ανάλογα με τη θέση της WSD και τις χρονικές μεταβολές στη διάδοση των κυμάτων. Για τους διάφορους υπολογισμούς υιοθετείται κανονική κατανομή με μέση τιμή και τυπική απόκλιση και απαιτείται αξιοπιστία 99.99% στην ανίχνευση σημάτων DTT (Digital Terrestrial Television – Επίγεια Ψηφιακή Τηλεόραση), προκειμένου να μην υπάρξουν παρεμβολές.

Η μέθοδος της ανίχνευσης μπορεί να εφαρμοστεί και για εσωτερικούς χώρους, εντός των οποίων, τα σήματα DTT εξαρτώνται από τη μεταβολή των σημάτων εξωτερικά λόγω **ανακλάσεων** από εξωτερικά αντικείμενα, από τη μεταβολή των **απωλειών διείσδυσης** στο κτίριο (Building Penetration Loss – BPL) και τέλος, από τη μεταβολή των σημάτων εσωτερικά λόγω ανακλάσεων από εσωτερικά αντικείμενα. Έπειτα από μετρήσεις, τα αποτελέσματα για τα κατώφλια ανίχνευσης σε εσωτερικούς χώρους είναι περίπου -101 dBm για σταθερές WSDs και περίπου -140 dBm για φορητές WSDs. Όπως είναι φανερό, τα

επίπεδα αυτά είναι εξαιρετικά χαμηλά, με αποτέλεσμα να δυσχεραίνει αρκετά η ανίχνευση τηλεοπτικών εκπομπών.

Ένα άλλο πρόβλημα που εμφανίζεται συχνά στις ασύρματες τηλεπικοινωνίες είναι το λεγόμενο «πρόβλημα του κρυμμένου κόμβου». Όπως φαίνεται και στο διπλανό σχήμα, η WSD είναι αδύνατο να ανιχνεύσει την ύπαρξη του τηλεοπτικού σήματος, διότι ανάμεσα σε αυτή και τον τηλεοπτικό πομπό παρεμβάλλεται κάποιο φυσικό εμπόδιο. Η λύση για το πρόβλημα αυτό είναι η υιοθέτηση πολύ χαμηλού κατωφλίου ανίχνευσης, δυσκολεύοντας έτσι ακόμα περισσότερο την ορθή ανίχνευση των τηλεοπτικών σημάτων.



Αφού εξασφαλιστεί η ορθή ανίχνευση των τηλεοπτικών σημάτων, θα πρέπει να υπολογιστούν τα όρια εκπομπής των WSDs, ώστε να μην προκαλούνται παρεμβολές, τόσο στις συχνότητες των τηλεοπτικών υπηρεσιών, όσο και σε γειτονικές συχνότητες. Για το ζήτημα αυτό υπάρχουν δύο γενικές προσεγγίσεις:

- Μέγιστη ισχύς εκπομπής ανάλογα με την τοποθεσία: υπολογίζεται η μέγιστη ισχύς εκπομπής για κάθε θέση λήψης ραδιοτηλεοπτικών υπηρεσιών καθώς και για κάθε τύπο/τάξη συσκευής
- Σταθερή μέγιστη ισχύς εκπομπής: κάποιες συσκευές (όπως φορητές και στατικές) μπορούν να εκπέμπουν με σταθερή μέγιστη ισχύ έξω από τις περιοχές που προστατεύονται. Αυτή η λύση έχει επιλεγεί από την FCC (Federal Communications Commission – ΗΠΑ)

Η πρώτη επιλογή ταιριάζει περισσότερο στην τεχνική του γεω-εντοπισμού με βάση δεδομένων. Όταν εφαρμόζεται με την τεχνική της ανίχνευσης (μόνο) οδηγεί σε πολύ ανασφαλή συμπεράσματα.

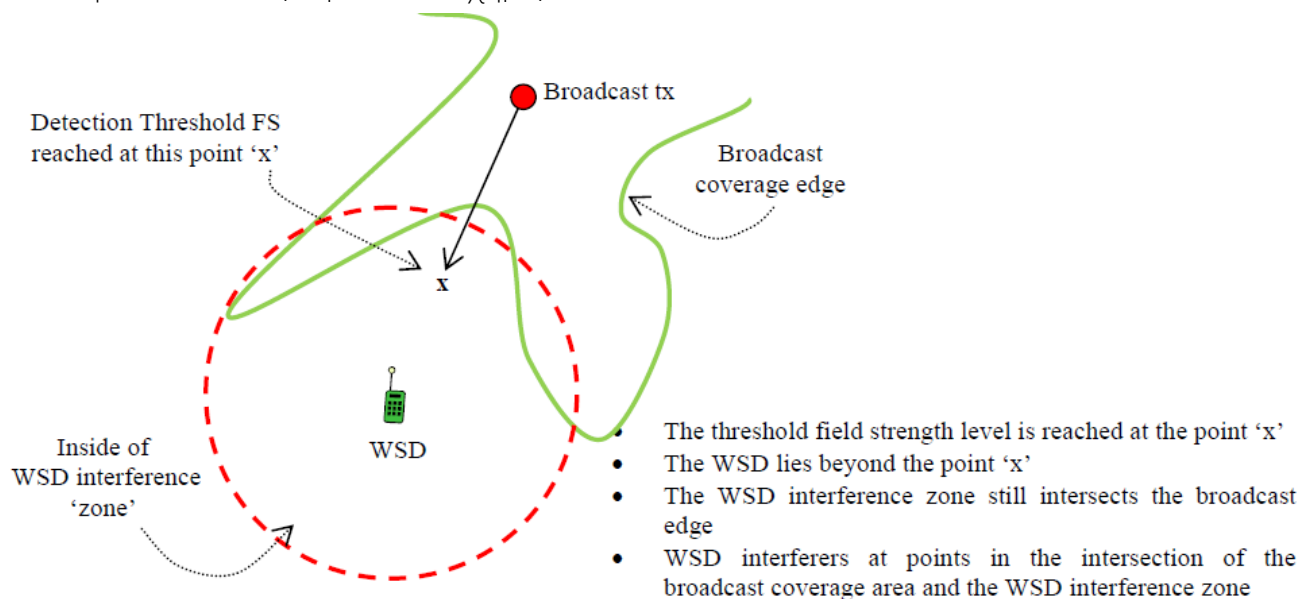
Μια αυτόνομη WSD θα πρέπει να ανιχνεύει την απουσία τηλεοπτικού σήματος τόσο στην άμεσα κοντινή της περιοχή όσο και σε μια κάποια απόσταση από αυτή. Και αν για το πρώτο υπάρχουν λύσεις (π.χ. χαμηλό κατώφλι ανίχνευσης), για το δεύτερο δεν είναι τόσο απλά τα πράγματα. Γενικά, υπάρχουν δύο λειτουργικές απαιτήσεις για τις WSDs:

- Η συσκευή δεν επιτρέπεται να λειτουργεί μέσα στην περιοχή κάλυψης ενός σταθμού εκπομπής κοινού καναλιού.
- Η συσκευή μπορεί να λειτουργεί μέσα στην περιοχή κάλυψης ενός σταθμού εκπομπής μη κοινού καναλιού, με την προϋπόθεση ότι προστατεύονται τα γειτονικά κανάλια.

Οι απαιτήσεις αυτές οδηγούν στη δημιουργία ζωνών εξαιρέσης (exclusion zones), δηλαδή υπο-περιοχών στις οποίες απαγορεύεται η λειτουργία των WSDs, εντός της περιοχής κάλυψης των τηλεοπτικών σταθμών. Ακόμα, σε περίπτωση λειτουργίας, τα όρια εκπομπής

μιας WSD πρέπει να καθορίζονται από την απόστασή της από τον εκάστοτε σταθμό εκπομπής τηλεοπτικών υπηρεσιών (όσο μικρότερη η απόσταση τόσο μικρότερη και η επιτρεπόμενη ισχύς εκπομπής των WSDs). Μια πιθανή λύση στο πρόβλημα των παρεμβολών είναι η υποβοήθηση με μια βάση δεδομένων γεω-εντοπισμού καθώς και η συνεργασία/ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ πολλών WSDs, ώστε να γίνεται ευκολότερα και ακριβέστερα η αναγνώριση των καναλιών που είναι κατειλημμένα.

Σε περίπτωση που μια WSD βρίσκεται έξω από την ακτίνα κάλυψης εκπομπών DTT είναι, προφανώς, αρκετά δύσκολο να οριστεί σωστά το κατώφλι ανίχνευσης. Οι παρεμβολές που μπορούν να προκύψουν επηρεάζουν αρνητικά τους δέκτες, σε αρκετά μεγάλες αποστάσεις από την κάθε WSD (παρακάτω σχήμα).



Η λύση είναι να αποφασιστεί (είτε αυτόνομα είτε έπειτα από συνεργασία μεταξύ των συσκευών) πότε η WSD βρίσκεται μέσα στην περιοχή κάλυψης και άρα απαγορεύεται η χρήση των τηλεοπτικών συχνοτήτων και πότε βρίσκεται εκτός της περιοχής κάλυψης, οπότε και πρέπει να υπολογιστεί η απόσταση της WSD ως τα σημεία στα όρια της περιοχής κάλυψης, ώστε να υιοθετηθούν κατάλληλοι περιορισμοί στην εκπομπή των συσκευών. Για το σκοπό αυτό απαιτείται η γνώση διαφόρων δεδομένων, όπως η θέση του πομπού DTT και των σημείων τηλεοπτικής κάλυψης, πράγμα που διευκολύνεται με τη συνεργασία μεταξύ γειτονικών WSDs.

Οδηγούμαστε, έτσι, στην υποβοήθηση μέσω της **τεχνικής του γεω-εντοπισμού**, που προϋποθέτει την ύπαρξη μιας βάσης δεδομένων, στην οποία διατηρούνται αυτές οι πληροφορίες. Πιο συγκεκριμένα, για να είναι εφικτή και αποδοτική η λειτουργία των WSDs σε μια περιοχή που υπάρχουν μεταδόσεις DTT είναι απαραίτητη η γνώση των εξής δεδομένων:

- Της ποιότητας κάλυψης της DTT σε εθνικό επίπεδο με μια κατάλληλη χωρική ανάλυση (π.χ. 100m · 100m).
- Ενός κατάλληλου κριτηρίου για την ποσοτικοποίηση και τον προσδιορισμό ενός ανεκτού επιπέδου παρεμβολών στις υπηρεσίες DTT.
- Της γεωμετρίας παρεμβολέα-«θύματος» για την οποία τα όρια εκπομπών ικανοποιούν τα ανεκτά επίπεδα παρεμβολών.

- Των κατάλληλων τιμών των λόγων προστασίας WSD-προς-DTT και τα κατώφλια υπερφόρτωσης που ορίζονται συναρτήσει του διαχωρισμού συχνοτήτων παρεμβολέα-«θύματος», ή συναρτήσει της επιθυμητής λαμβανόμενης ισχύος από DTT.
- Μιας μεθοδολογίας για τον υπολογισμό των κατάλληλων ρυθμιστικών ορίων εκπομπής των WSDs.

Σημαντική παράμετρος μέτρησης της ικανότητας εντοπισμού εκπομπών DTT είναι η **πιθανότητα εντοπισμού DTT**, δηλαδή, η πιθανότητα με την οποία ένας δέκτης DTT θα λειτουργεί σωστά σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία, με άλλα λόγια η πιθανότητα με την οποία το μέσο επιθυμητό επίπεδο σήματος είναι αρκούντως μεγαλύτερο από ένα ελάχιστο απαιτούμενο επίπεδο. Το μέγεθος αυτό χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό δικτύων DTT και μειώνεται παρουσία παρεμβολών, με αποτέλεσμα να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως κριτήριο προσδιορισμού των κατάλληλων ρυθμιστικών ορίων εκπομπής των WSDs που λειτουργούν σε συχνότητες DTT. Οι διάφοροι υπολογισμοί που απαιτούνται θα πρέπει, όπως εγράφη και προηγουμένως, να πραγματοποιηθούν, τόσο για την παρεμβολή κοινού καναλιού, όσο και για την παρεμβολή γειτονικών καναλιών, ώστε να μη δημιουργείται κανένα απολύτως πρόβλημα στις τηλεοπτικές υπηρεσίες.

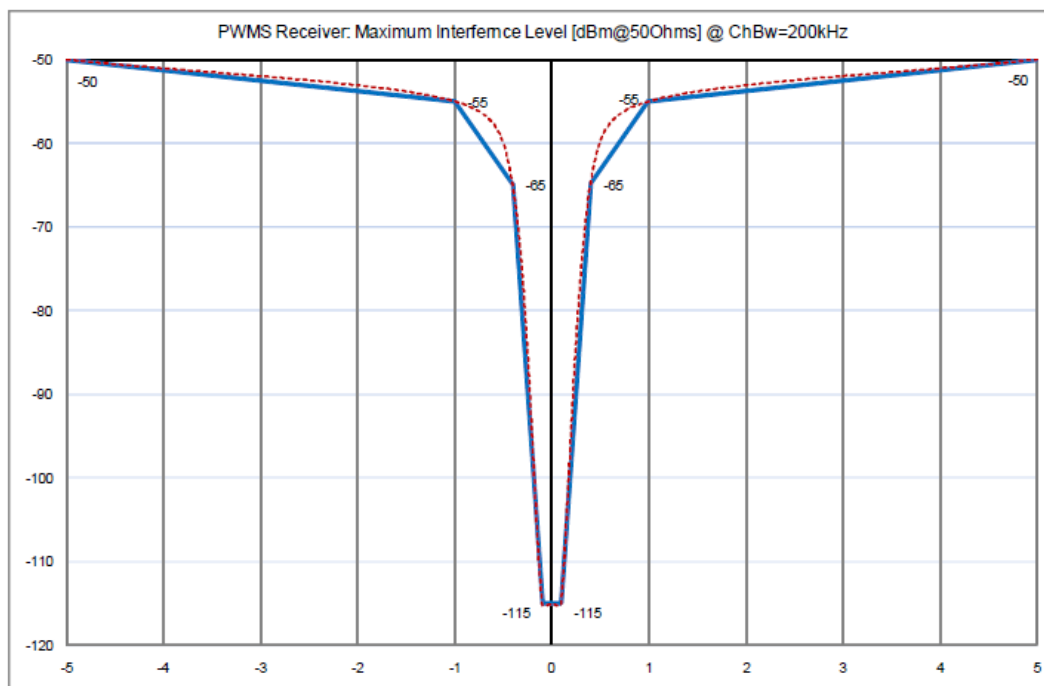
Συνοψίζοντας, είδαμε ότι η προστασία των ραδιοτηλεοπτικών υπηρεσιών απαιτεί το συνδυασμό των τεχνικών ανίχνευσης και γεω-εντοπισμού, προκειμένου να εντοπιστούν πιθανές ραδιοτηλεοπτικές εκπομπές στις περιοχές ανάπτυξης WSNs, να υπολογιστούν τα μέγιστα επίπεδα επιτρεπόμενης ισχύος εκπομπής των WSNs και με αυτό τον τρόπο να ξεπεραστούν τα όποια προβλήματα μπορεί να προκύψουν.

3.2.2 Προστασία των PMSE στη ζώνη 470-790 MHz

Ο όρος PMSE καλύπτει πολλά διαφορετικά ασύρματα συστήματα παραγωγής οπτικοακουστικών εκδηλώσεων (συναυλίες, συνεντεύξεις, θεατρικές παραστάσεις κ.λπ.) που λειτουργούν σε ένα πλήθος ζωνών συχνότητας. Για θέματα προστασίας παρεμβολών ενδιαφέρουν, κυρίως, οι συσκευές που χρησιμοποιούν τη ζώνη 470-862 MHz (PWMS – Professional Wireless Microphone Systems), στις οποίες περιλαμβάνονται τα ασύρματα μικρόφωνα (συνήθως χειρός ή σώματος), συστήματα In-Ear Monitoring (IEM) και άλλα συστήματα ήχου συμπεριλαμβανομένων σταθερών σημείου-προς-σημείο ζεύξεων για συνεισφορά στην τροφοδοσία των προγραμμάτων. Τα σημερινά συστήματα αυτού του τύπου χρησιμοποιούν αναλογική διαμόρφωση FM, προκειμένου να μεταδοθεί με αξιοπιστία υψηλής ποιότητας ήχος, με τη χρήση κεραιών, φορητών ή σταθερών, ύψους 1.5m – 10m ή ακόμα και 30m κατά περίπτωση.

Ένας τυπικός αναλογικός FM δέκτης PMSE έχει ευαισθησία περίπου -110 dBm και επίπεδο RF σιγής (RF squelch threshold – ο ήχος δεν ακούγεται) περίπου -95 dBm. Το ελάχιστο απαιτούμενο επίπεδο σήματος για ήχο υψηλής ποιότητας είναι συνήθως -95 dBm με απαιτούμενο λόγο C/I 20 dB για τον σημερινό αναλογικό FM εξοπλισμό (εύρος ζώνης 50-200 kHz). Τα ψηφιακά συστήματα (με RF εύρος ζώνης μέχρι και 600 kHz) μπορούν να λειτουργούν με χαμηλότερα επίπεδα σήματος ανάλογα με το σχήμα διαμόρφωσης. Η παρεμβολή που επιτρέπεται από τις WSDs θα πρέπει να είναι κάτω από τα -115 dBm στο δέκτη PMSE, όπως προτείνεται στη σύσταση ETSI TR 102 546.

Ακόμη, στη σύσταση ETSI TR 103 058 δίδεται η παρακάτω μάσκα για τα μέγιστα επίπεδα παρεμβολής σε ένα δέκτη PMSE εύρους ζώνης 200 kHz.



Για τον καθορισμό των μέγιστων επιτρεπόμενων επιπέδων της ισχύος εκπομπής των WSDs που λειτουργούν σε μια περιοχή, χωρίς να δημιουργούνται προβλήματα στις επικοινωνίες PMSE θα πρέπει να εξεταστούν τρία κύρια στοιχεία.. Αυτά είναι το ποσοστό προστασίας του εκάστοτε συστήματος PMSE, οι απώλειες ισχύος μεταξύ μιας WSD και ενός δέκτη PMSE (του «θύματος», δηλαδή, των παρεμβολών) καθώς και η απομόνωση των κεραιών λόγω της διαφοράς στην κατευθυντικότητα και την πόλωση μεταξύ τους.

Προκειμένου να χρησιμοποιηθεί η **τεχνική της ανίχνευσης**, αυτό που θα πρέπει να τονιστεί ιδιαίτερα είναι ότι μια WSD μπορεί μόνο να ανιχνεύσει τον πομπό PMSE και όχι τον δέκτη, που είναι και το «θύμα» που χρειάζεται προστασία. Για το πρόβλημα αυτό έχουν προταθεί δύο λύσεις, η πρώτη αφορά στον εμπειρικό προσδιορισμό του κατωφλίου ανίχνευσης χρησιμοποιώντας τη μεθοδολογία επίλυσης του προβλήματος του κρυμμένου κόμβου, ενώ η δεύτερη αφορά στο θεωρητικό υπολογισμό του κατωφλίου, χρησιμοποιώντας τη φυσική γεωμετρία της εκάστοτε εφαρμογής PMSE.

Ανάλογα με το σενάριο εφαρμογής PMSE, προκύπτει μεγάλη διαφοροποίηση στα αποτελέσματα που εξάγονται σχετικά με το κατώφλι ανίχνευσης (διατηρώντας σταθερά τα μέγιστα επίπεδα παρεμβολής στα -115 dBm), αυτό, όμως, που παίζει μεγάλο ρόλο είναι η διαφορά των απωλειών διάδοσης ανάμεσα στη **ζεύξη παρεμβολής** (από την WSD προς το δέκτη PMSE) και στη **ζεύξη ανίχνευσης** (από τον πομπό PMSE προς την WSD). Αν ληφθούν υπόψη παροδικές διαλείψεις Rayleigh, τότε το κατώφλι ανίχνευσης πρέπει να είναι πάρα πολύ χαμηλό, χαμηλότερο και από το επίπεδο θορύβου των WSDs, κάτι που κάνει αυτή την τεχνική της ανίχνευσης πρακτικά ανέφικτη. Σημειώνεται, τέλος, ότι είναι απαραίτητος και ο τακτικός επανέλεγχος του περιβάλλοντος (κάθε 2 δευτερόλεπτα, όπως προτείνει η FCC), μιας και είναι πολύ διαφορετική η ανίχνευση σημάτων PMSE από σήματα

DTT, διότι τα δεύτερα βασίζονται σε δέκτες ευρείας ζώνης και για την ανίχνευσή τους συνήθως αναζητείται κάποιο χαρακτηριστικό τους, ενώ τα σήματα PMSE είναι απλά, αναλογικά διαμορφωμένα κατά FM και ανιχνεύεται είτε η στενής ζώνης ενέργειά τους, είτε ένα σήμα πιλότος.

Για τη εφαρμογή της τεχνικής του γεω-εντοπισμού με πρόσβαση σε μια βάση δεδομένων τα πιθανά σενάρια εφαρμογών PMSE μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κύριες κατηγορίες:

- Σταθερές εγκαταστάσεις: θέατρα, στούντιο κ.α. Οι εφαρμογές PMSE χρησιμοποιούνται πολύ συχνά ή και καθημερινά.
- Προσωρινές εγκαταστάσεις: εκθέσεις, αθλητικά γεγονότα, συνεντεύξεις.

Γίνεται αντιληπτό ότι μόνο στην πρώτη κατηγορία είναι δυνατή η εφαρμογή της τεχνικής του γεω-εντοπισμού, με δημιουργία περιοχών προστασίας γύρω από τις εφαρμογές PMSE, στις οποίες απαγορεύεται η λειτουργία των WSDs.

Η τεχνική του φάρου εκπομπής, μπορεί, επίσης, να δώσει κάποια βοήθεια στην αποφυγή παρεμβολών. Πιο συγκεκριμένα, με την τεχνική του απενεργοποιημένου φάρου μπορεί να δημιουργηθεί μια «φούσκα προστασίας» γύρω από περιοχές εφαρμογών PMSE, μειονεκτεί όμως στο ότι απαιτεί αρκετή ισχύ RF και κάποιο φάσμα, πράγμα που ελαττώνει τη συνολική φασματική απόδοση και δημιουργεί ακόμα μια πηγή παρεμβολών. Οι άλλες δύο τεχνικές (του ενεργοποιημένου φάρου και της χρήσης του σήματος του φάρου ως πιλότο) έχουν περισσότερα προβλήματα και για το λόγο αυτό δεν συνιστώνται.

Μια λύση στα ανωτέρω προβλήματα πιθανών παρεμβολών, που κερδίζει συνεχώς έδαφος διεθνώς, είναι η απόδοση κάποιων καναλιών που δεν χρησιμοποιούνται από υπηρεσίες DTT προς χρήση μόνο σε εφαρμογές PMSE (**safe-harbor channels**, δεν επιτρέπεται σε αυτά να λειτουργούν WSDs). Μερικές επιλογές υλοποίησης αυτής της πολιτικής είναι οι εξής:

- Ένα ή περισσότερα σταθερά κανάλια μπορούν να διατεθούν σε μια χώρα ή μια περιοχή – απίθανο λόγω της φύσης του σχεδιασμού των υπηρεσιών τηλεόρασης σχετικά με την κατανομή του φάσματος.
- Ένα ή περισσότερα κανάλια των οποίων η θέση αλλάζει σύμφωνα με την ύπαρξη εκπομπών DTT σε κάθε περιοχή.
- Ένας δυναμικά αυξομειούμενος αριθμός καναλιών – μπορεί να προσαρμόζεται σύμφωνα με το χώρο, το χρόνο και τις περιστάσεις.

Η τεχνική safe-harbor μπορεί να χρησιμοποιηθεί και με γεω-εντοπισμό και με ανίχνευση. Ανεξάρτητα από την περίπτωση, όμως, καλό θα είναι να υπάρχει σε κάθε εφαρμογή PMSE έστω ένα safe-harbor.

Συνοψίζοντας τα προηγούμενα, προκύπτει ότι η τεχνική της **βάσης δεδομένων γεω-εντοπισμού** φαίνεται η πιο ταιριαστή λύση για την αποφυγή παρεμβολών σε εφαρμογές PMSE. Η τεχνική της ανίχνευσης δεν ενδείκνυται, διότι το φαινόμενο της **πολυδιαδρομικής διάδοσης** προκαλεί τυχαίες διαλείψεις στα σήματα, ενώ παράλληλα οι WSD μπορούν να ανιχνεύσουν μόνο τα σήματα από τους πομπούς PMSE και όχι τους δέκτες οι οποίοι τελικά υποφέρουν από τις παρεμβολές. Επίσης, η τεχνική του φάρου (beacon) χρειάζεται πόρους (συχνότητα, ισχύς) οι οποίοι καθιστούν και αυτή την επιλογή ασύμφορη. Όμως, φαίνεται

ότι η εισαγωγή ενός τουλάχιστον safe-harbor αποτελεί μια σημαντική βοήθεια, ειδικά σε περιπτώσεις μη προγραμματισμένης χρήσης εφαρμογών PMSE.

3.2.3 Προστασία της Ραδιοαστρονομίας στη ζώνη 608-614 MHz

Μια άλλη αδειοδοτημένη υπηρεσία που επηρεάζεται από τη λειτουργία των WSDs είναι η Ραδιοαστρονομία (Radio astronomy – RAS), η οποία καταλαμβάνει τη ζώνη 608-614 MHz (κανάλι 38). Προκειμένου να αποφευχθούν οι παρεμβολές, είναι απαραίτητη η μελέτη των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών της υπηρεσίας αυτής, όπως αυτά προκύπτουν από τη σύσταση της ITU-R RA. 769-2. Έτσι, έχουμε τον παρακάτω πίνακα:

Τρόπος παρατήρησης	Επίπεδα προστασίας
Single dish	-253 dB (W/m ² Hz) με χρόνο ολοκλήρωσης 2000 s
	-259.3 dB (W/m ² Hz) με χρόνο ολοκλήρωσης 10 h
VLBI (Very Long Baseline Interferometry)	-212 dB (W/m ² Hz) με χρόνο ολοκλήρωσης 10 μs
Συμβολομετρία	-236 dB(W/m ² Hz) με χρόνο ολοκλήρωσης 1 s

Όπως και προηγουμένως, ενδιαφέρει τόσο η παρεμβολή στο ίδιο κανάλι (Παρεμβολή κοινού καναλιού – CCI) με τη Ραδιοαστρονομία, όσο και η παρεμβολή στα γειτονικά κανάλια αυτής (Παρεμβολή γειτονικών καναλιών – ACI).

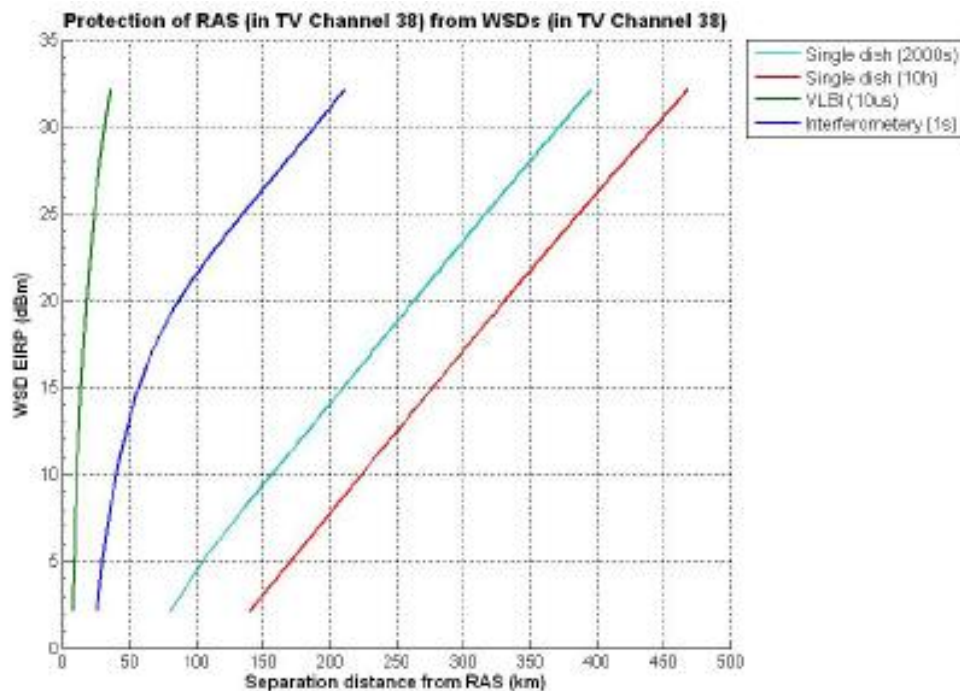
Για την πρώτη περίπτωση, λαμβάνοντας υπόψη το υποτιθέμενο εύρος ζώνης των WSDs στα 5 MHz, η μέγιστη πυκνότητα ροής ισχύος στις περιοχές RAS είναι:

Τρόπος παρατήρησης	Επίπεδα προστασίας
Single dish	-186 dB(W/m ²) με χρόνο ολοκλήρωσης 2000 s
	-192.3 dB(W/m ²) με χρόνο ολοκλήρωσης 10 h
VLBI (Very Long Baseline Interferometry)	-145 dB(W/m ²) με χρόνο ολοκλήρωσης 10 μs
Συμβολομετρία	-169 dB(W/m ²) με χρόνο ολοκλήρωσης 1 s

Αυτές οι τιμές μπορούν να μετατραπούν στις ακόλουθες τιμές της μέγιστης έντασης του παρεμβαλλόμενου πεδίου (είναι δηλαδή τα μέγιστα επιτρεπόμενα επίπεδα ισχύος εκπομπής των WSDs):

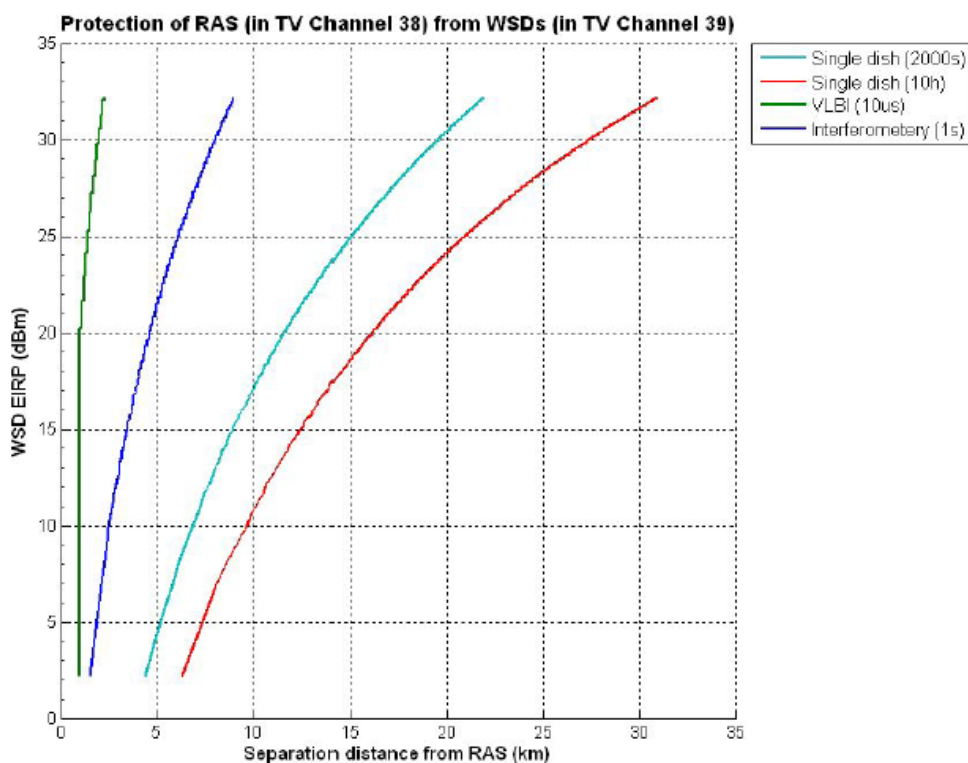
Τρόπος παρατήρησης	Επίπεδα προστασίας
Single dish	-40.2 dBμV/m με χρόνο ολοκλήρωσης 2000 s
	-46.5 dBμV/m με χρόνο ολοκλήρωσης 10 h
VLBI (Very Long Baseline Interferometry)	+0.79 dBμV/m με χρόνο ολοκλήρωσης 10 μs
Συμβολομετρία	-23.2 dBμV/m με χρόνο ολοκλήρωσης 1 s

Η λύση που προτείνεται για την αποφυγή παρεμβολών κοινού καναλιού είναι ο χωρικός διαχωρισμός μεταξύ των περιοχών RAS και των WSDs. Από τις παραπάνω τιμές, προκύπτουν οι παρακάτω αποστάσεις διαχωρισμού για κάθε περίπτωση εφαρμογής RAS



Για τη δεύτερη περίπτωση, σημαντικό ρόλο στους υπολογισμούς παίζει ο λόγος ACLR (Adjacent Channel Leakage Ratio – Λόγος Διαρροής Γειτονικού Καναλιού – το κλάσμα της συνολικής εκπεμπόμενης ισχύος μιας WSDs προς την ισχύ που εκπέμπεται σε κανάλια γειτονικά του ενδιαφέροντος). Η χρήση του ACLR επιτρέπει τη μελέτη παρεμβολών μόνο για τα κανάλια 37 και 39 (πλησίον του 38 δηλαδή), ενώ για τα υπόλοιπα απαιτείται διαφορετικός τρόπος μελέτης.

Έτσι, οι ελάχιστες αποστάσεις διαχωρισμού για τα κανάλια 37 και 39 αποτυπώνονται στον εξής πίνακα:



Προκύπτει, επομένως, ότι οι αποστάσεις διαχωρισμού για κάθε περίπτωση εξαρτώνται κυρίως από το είδος των παρατηρήσεων RAS καθώς και από την εκπεμπόμενη ισχύ των WSDs. Σχετικά με τη χρήση του καναλιού 38 προτείνονται τα εξής:

- Για αυτόνομες WSDs: το κανάλι 38 θα πρέπει να **εξαιρεθεί** εντελώς από τα διαθέσιμα προς χρήση από τις WSDs
- Για WSDs ελεγχόμενες από μια βάση δεδομένων γεω-εντοπισμού, λόγω του μεγάλου μήκους των αποστάσεων διαχωρισμού, προτείνεται είτε κεντρικός Ευρωπαϊκός έλεγχος, σύμφωνα με τα αποτελέσματα των παραπάνω πινάκων, είτε διακρατικές συμφωνίες.

Σχετικά με τη χρήση των καναλιών 37 και 39 συστήνονται τα παρακάτω:

- Για αυτόνομες WSDs: τα κανάλια 37 και 39 θα πρέπει να **εξαιρεθούν** εντελώς από τα διαθέσιμα προς χρήση από τις WSDs
- Για WSDs ελεγχόμενες από μια βάση δεδομένων γεω-εντοπισμού, προτείνονται περιοχές περιορισμού της χρήσης τους με βάση τα αποτελέσματα των πινάκων.

3.2.4 Προστασία της Αεροναυτικής Ραδιοπλοήγησης στη ζώνη 645-790 MHz

Σύμφωνα με τη σύσταση No.5.312 RR, η ζώνη 645-862 MHz έχει αποδοθεί στην αεροναυτική ραδιο-πλοήγηση (Aeronautical Radionavigation – ARNS). Μερικοί τύποι αυτής της υπηρεσίας είναι οι εξής:

- Συστήματα ραδιοπλοήγησης μικρής ακτίνας (RSBN)
- Δευτερεύοντα ραντάρ ελέγχου εναέριας κυκλοφορίας, περιλαμβανομένων επίγειων ραντάρ και αερομεταφερόμενων πομπών
- Πρωτεύοντα ραντάρ αεροδρομίου και πορείας για ATC (Air Traffic Control – Έλεγχος εναέριας Κυκλοφορίας)

Σύμφωνα με τη σύσταση CEPT EU13 έχουν προταθεί, από θεωρητικής πλευράς, τα ακόλουθα για την προστασία των εφαρμογών ARNS:

- Για συστήματα RLS1 (πρωτεύοντα ραντάρ εδάφους), αναμένεται ότι η τεχνική της ανίχνευσης, όπως η Δυναμική Επιλογή Συχνότητας (Dynamic Frequency Selection – DFS) που εφαρμόζεται στα συστήματα 5 GHz WAS/RLAN, μπορεί να είναι εφαρμόσιμη στις WSDs.
- Για επίγειους δέκτες ραντάρ RSBN, η υλοποίηση της τεχνικής ανίχνευσης είναι δυσκολότερη διότι οι WSDs θα πρέπει να μπορούν να ανιχνεύουν σήματα RSBN που εκπέμπονται από αεροσκάφη που βρίσκονται σε ύψος μέχρι και 10000m. Παρόλα αυτά είναι εφικτό να δημιουργηθούν περιοχές προστασίας γύρω από τους δέκτες, στις οποίες δε θα επιτρέπονται οι WSDs.
- Για συστήματα RLS2 (δευτερεύοντα ραντάρ), η ίδια τακτική με τα RSBN θα πρέπει να εφαρμοστεί για τους επίγειους δέκτες. Για τους αερομεταφερόμενους δέκτες χρειάζεται περισσότερη έρευνα.
- Η χρήση της τεχνικής του γεω-εντοπισμού για την προστασία της ARNS εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως την πιθανότητα καταχώρησης στη βάση δεδομένων επαρκών παραμέτρων (πληροφοριών) λειτουργίας των εφαρμογών ARNS για χρήση τους από τις WSDs.

3.2.5 Προστασία κινητών/σταθερών υπηρεσιών στις ζώνες γειτονικά των 470-790 MHz

Επιπρόσθετα με την προστασία των υπηρεσιών στη ζώνη 470-790 MHz, οι WSDs πρέπει να προστατεύουν και τις ήδη υπάρχουσες υπηρεσίες στις γειτονικές αυτών ζώνες. Η ζώνη **790-862 MHz** αναμένεται να χρησιμοποιηθεί ευρέως για **δίκτυα κινητών επικοινωνιών** πολύ σύντομα. Η ζώνη 450-470 MHz ήδη χρησιμοποιείται σήμερα από κινητά συστήματα συμπεριλαμβανομένης της IMT (Interactive Machine Translation – Διαδραστική Μετάφραση Μηχανής) σε μερικές Ευρωπαϊκές χώρες.

- Προστασία υπηρεσιών που χρησιμοποιούν τη ζώνη 790-862 MHz

Η ζώνη 790-862 (πιο συγκεκριμένα οι συχνότητες 791-821 MHz που χρησιμοποιούνται για το downlink) αναμένεται κατά κύριο λόγο να χρησιμοποιηθεί από συστήματα IMT που βασίζονται στο πρότυπο 3GPP LTE. Για το λόγο αυτό οι τερματικοί σταθμοί LTE πρέπει να θεωρηθούν πιθανά θύματα παρεμβολών από τις WSDs που λειτουργούν κάτω από τα 790 MHz. Η επίδραση των παρεμβολών σε σταθμούς βάσης ECN (Electronic Communication Network – Δίκτυο Ηλεκτρονικών Επικοινωνιών για τράπεζες) που λειτουργούν στις συχνότητες 832-862 MHz θεωρείται αμελητέα.

Έπειτα από μελέτες που έχουν διεξαχθεί από την ECC (Electronic Communications Committee – Επιτροπή Ηλεκτρονικών Επικοινωνιών) του CEPT, προκύπτει ότι η μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύς παρεμβολής στην κεραία του «θύματος» είναι περίπου -102.37 dBm. Η τιμή αυτή, ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της κάθε εφαρμογής μεταφράζεται σε τιμές ισχύος εκπομπής των WSDs, από -35.71 dBm ως 46.92 dBm. Όπως φαίνεται, τα όρια αυτά κυμαίνονται σε μεγάλο εύρος τιμών, με αποτέλεσμα να είναι απαραίτητη μια πιο εξειδικευμένη μελέτη για τον ακριβέστερο προσδιορισμό τους.

- Προστασία υπηρεσιών που χρησιμοποιούν τη ζώνη 450-470 MHz

Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και για τις συχνότητες των 450-470 MHz. Τη ζώνη αυτή καταλαμβάνουν υπηρεσίες PMR (Private Mobile Radio – Ιδιωτικές Κινητές Επικοινωνίες) και PAMR (Public Access Mobile Radio – Κινητές Επικοινωνίες Δημόσιας Πρόσβασης). Οι μελέτες της ECC εδώ, θέτουν ανώτατο όριο παρεμβαλλόμενης ισχύος τα -22 dBm. Η λύση που προτείνεται εδώ, είναι ο χωρικός διαχωρισμός μεταξύ των WSDs και των δεκτών PMR/PAMR, που κυμαίνεται από τα 2.2 m ως τα 692 m, ανάλογα με την ισχύ εκπομπής των WSDs.

3.3 Δυνατότητες και χαρακτηριστικά των WSDs

Έχουν μελετηθεί διάφορες πιθανές κατηγορίες συσκευών, σενάρια λειτουργίας και γνωστικές τεχνικές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τις WSDs με σκοπό την εύρεση των απαιτήσεων προστασίας των υπαρχόντων υπηρεσιών. Η χρήση και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των συσκευών αυτών διαφέρουν μεταξύ τους, ανάλογα με το αν χρησιμοποιούνται από έναν πάροχο δικτυακών υπηρεσιών, από έναν ιδιώτη καταναλωτή ή αν αποτελούν μέρος ενός ad-hoc δικτύου. Για το λόγο αυτό, προβλέπονται τρεις γενικές κατηγορίες WSDs:

- Προσωπικές/φορητές

- Οικιακές συσκευές/συσκευές γραφείου
- Ιδιωτικά και δημόσια Σημεία Πρόσβασης (Access Points)

Για τις δύο πρώτες κατηγορίες συσκευών προβλέπεται ότι θα λειτουργούν σε χαμηλό ύψος, περίπου 1.5 m, παρόλο που μπορεί να χρησιμοποιηθούν και σε μεγαλύτερα ύψη (π.χ. στο εσωτερικό κτιρίων). Για την τρίτη κατηγορία συσκευών αναμένεται ότι θα λειτουργούν σε αρκετά υψηλότερα σημεία, για παράδειγμα 10 m ως 30 m.

Οι προσωπικές/φορητές συσκευές θα πρέπει να είναι τέτοιου (μικρού) μεγέθους που να μπορούν να φέρονται από μεμονωμένους χρήστες, όπως π.χ. σε κινητά τηλέφωνα, media players και laptops. Οι πιθανές εφαρμογές είναι ευρύτατες (Internet, online video/audio streaming, επικοινωνία συσκευής με συσκευή για ηλεκτρονικές πληρωμές και εφαρμογές εντοπισμού κ.α.). Οι συσκευές θα μπορούν να περιλαμβάνουν πομποδέκτες και για συχνότητες εκτός της ζώνης των 470-790 MHz και θα πρέπει να λειτουργούν οπουδήποτε μπορούν να πάνε οι χρήστες τους (σπίτια, γραφεία, δρόμοι, MMM, αυτοκίνητα κ.λπ.).

Οι οικιακές συσκευές/συσκευές γραφείου θα είναι σχεδιασμένες να βρίσκονται σε ένα μέρος, όπως π.χ. τηλεοράσεις, συσκευές εγγραφής βίντεο κ.α. Με τη χρήση των white spaces είναι δυνατή η παροχή βίντεο υψηλής ποιότητας καθώς επίσης και ο διαμοιρασμός ή η μεταφορά περιεχομένου που βρίσκεται τοπικά αποθηκευμένο στο σπίτι ή στο γραφείο. Χαρακτηριστικά παραδείγματα εφαρμογών είναι η παροχή τηλεοπτικών υπηρεσιών με χρήση επαναληπτών σε περιοχές που λόγω της ψηφιακής μετάβασης δεν καλύπτονται πλέον, καθώς και η απομακρυσμένη μέτρηση (remote metering).

Τέλος, σχετικά με την Τρίτη κατηγορία συσκευών, είναι πιθανό, μελλοντικά, να υπάρχουν ιδιωτικά σημεία πρόσβασης σαν τα σημερινά WiFi APs, που θα εκμεταλλεύονται τις μειωμένες απώλειες διάδοσης λόγω χαμηλότερων συχνοτήτων και θα προσφέρουν μεγαλύτερη ακτίνα κάλυψης, π.χ. μέσα σε κτίρια. Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν τέτοια συστήματα για την παροχή Internet σε απομακρυσμένες ή αγροτικές περιοχές ή ακόμα και σε αστικά περιβάλλοντα. Οι σταθμοί βάσης αυτών των συστημάτων θα είναι σταθεροί και θα συνδέονται με το δίκτυο κορμού μέσω π.χ. οπτικών ινών ή ακόμα και με ασύρματες σημείου-προς-σημείο ζεύξεις χρησιμοποιώντας τα white spaces.

Για την αντιμετώπιση των παρεμβολών, ανάμεσα στα άλλα, είναι ευεργετικός και ο καθορισμός των χαρακτηριστικών εκπομπής των WSDs. Ακόμη, δεν είναι δυνατός ο ακριβής προσδιορισμός των τεχνολογιών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, όμως φαίνεται ότι οι τεχνικές OFDM, καθώς και συστήματα TDD ή FDD, είναι οι πιο αποδοτικές και αξιόπιστες επιλογές, καθώς υπάρχει ήδη η σχετική εμπειρία από τη χρήση τους εδώ και αρκετά χρόνια σε διάφορες άλλες εφαρμογές.

Η ισχύς εκπομπής εξαρτάται από το σκοπό και τη χρήση κάθε WSD, αλλά για μικρές αποστάσεις θα πρέπει να κυμαίνεται από 10 mW ως 50 mW, ενώ για μεγαλύτερες από 1 W ως 10 W. Διακρίνονται δύο κύριες προσεγγίσεις σχετικά με το αν η ισχύς εκπομπής είναι σταθερή ή μεταβλητή:

- Ισχύς εξόδου ανάλογα με την τοποθεσία: η επιτρεπόμενη ισχύς εξόδου εξαρτάται από την τοποθεσία, την συχνότητα και τύπο συσκευής, υλοποίηση που απαιτεί τη χρήση του γεω-εντοπισμού.
- Σταθερή ισχύς εξόδου: κάποια είδη συσκευών (π.χ. φορητές) έχουν προκαθορισμένα όρια εκπομπών, πιθανώς διαφορετικά για κάθε κανάλι. Αυτή η λύση έχει υιοθετηθεί από την FCC (Federal Communications Committee – Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών).

Η πρώτη επιλογή αυξάνει την πολυπλοκότητα και απαιτεί πολύ μεγάλο πλήθος δεδομένων (π.χ. λεπτομερή μοντέλα της επιφάνειας του εδάφους), όμως επιτρέπει αύξηση της ισχύος εκπομπής με αποτέλεσμα αποδοτικότερη αξιοποίηση του φάσματος, σε σχέση με τη δεύτερη επιλογή.

Τρία είναι τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά εκπομπής των WSDs, που επηρεάζουν την πιθανότητα παρεμβολών:

- **In-block power limit:** Όταν μια WSD λειτουργεί σε ένα κενό κανάλι, το in-block power limit καθορίζει πόση ισχύς μπορεί να εκπέμπεται στο εύρος ζώνης αυτού του καναλιού. Όταν ένα κανάλι γειτονικό στο κενό είναι κατειλημμένο από μια προστατευόμενη υπηρεσία, το in-band power limit μπορεί να συσχετιστεί με το επίπεδο ισχύος των σημάτων των γειτονικών καναλιών.
- **Out-of-block power limit:** Αυτό καθορίζει πόση ισχύς μπορεί να γίνει ανεκτή σε κανάλια γειτονικά στο κενό κανάλι. Αυτό το όριο επίσης μπορεί να συνδεθεί με το αν και που υπάρχουν προστατευμένες υπηρεσίες σε γειτονικά κανάλια και ποια είναι τα επίπεδα ισχύος των σημάτων αυτών.
- **Bandwidth:** Το εύρος ζώνης των WSDs, μέσα στο οποίο γίνεται η μετάδοση, καθορίζει την πυκνότητα ισχύος, η οποία με τη σειρά της επηρεάζει την πιθανή επίδραση πάνω στις προστατευμένες υπηρεσίες

Όπως εγράφη και προηγουμένως, τρεις είναι οι βασικές τεχνικές αντιμετώπισης των παρεμβολών που δημιουργούνται από την πιθανή χρήση των white spaces. Εξετάζοντας τις τεχνικές αυτές από τη σκοπιά των WSDs, μπορούμε να καταλήξουμε σε συμπεράσματα σχετικά με το κατά πόσο είναι πρακτικά εφικτή κάθε μια τεχνική. Έτσι, σχετικά με την τεχνική της ανίχνευσης, σημειώνεται ότι η ευαισθησία των WSDs για DTT μεταδόσεις είναι περίπου -20 dBm. Τεχνικές και πρακτικές δυσκολίες (πολύ μεγάλο εύρος συχνοτήτων ανίχνευσης και εκπομπής/λήψης, μη ομοιοκατευθυντική κεραία κ.α.) οδηγούν σε μειωμένη αποδοτικότητα κεραίας, της τάξης των -10 dBi. Επίσης, αρνητικό ρόλο παίζουν ο παραγόμενος από τα εσωτερικά κυκλώματα της WSD ηλεκτρονικός θόρυβος, καθώς και ο «ανθρώπινος» ηλεκτρονικός θόρυβος (man-made noise – λόγω των διαφόρων ασύρματων επικοινωνιών του ανθρώπου) που έχει αποδειχτεί ότι επηρεάζουν τη λήψη DVB-T και DVB-H σημάτων. Λόγω αυτών, καθώς και άλλων παραγόντων, η πρακτική υλοποίηση της τεχνικής της ανίχνευσης οδηγεί σε μειωμένη ευαισθησία των WSDs και μάλιστα της τάξης των δεκάδων dB. Συνοψίζοντας όλα τα παραπάνω, προκύπτει ότι η τεχνική της ανίχνευσης από μόνη της δε δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα, επομένως θα πρέπει οι WSDs να χρησιμοποιούν ένα συνδυασμό τεχνικών, κάτι που χρειάζεται όμως περαιτέρω έρευνες.

Για την εφαρμογή της τεχνικής του γεω-εντοπισμού με πρόσβαση σε μια βάση δεδομένων υπάρχουν κάποιες γενικές απαιτήσεις από τις WSDs, όπως:

- Η μετάδοση της θέσης (συμπεριλαμβανομένου του ύψους), της ακρίβειάς της και του τύπου της συσκευής
- Η λήψη από τη βάση δεδομένων των ελεύθερων συχνοτήτων των πιθανών περιοχών στις οποίες μπορεί να βρεθεί η WSD, τα επιτρεπόμενα όρια εκπομπής, το χρονικό διάστημα μέσα στο οποίο θα πρέπει να ξαναζητηθούν τα δεδομένα αυτά και στην περίπτωση που υπάρχει και η τεχνική του εντοπισμού, οτιδήποτε σχετίζεται με αυτό.

Επίσης, είναι απαραίτητο μια WSD να σταματήσει αμέσως τη μετάδοση αν:

- δεν μπορέσει να επικοινωνήσει με τη βάση δεδομένων μέχρι το πέρας της δοθείσας χρονικής περιόδου
- δεν μπορέσει να βρει με ακρίβεια τη θέση της
- κινηθεί εκτός της περιοχής για την οποία έχει λάβει δεδομένα

Αν συμβεί κάτι από τα παραπάνω, πριν αρχίσει ξανά να μεταδίδει, θα πρέπει να επικοινωνήσει οπωσδήποτε με τη βάση δεδομένων.

Στην περίπτωση ιεραρχικής πολιτικής master/slave υπάρχουν πρόσθετες απαιτήσεις. Μια master WSD θα πρέπει:

- Να επικοινωνεί με τις slave WSDs
- Να εξάγει την ακριβή θέση των slave WSDs
- Να λειτουργεί σαν proxy για τη βάση δεδομένων ως προς τις slave WSDs
- Να ελέγχει τη λειτουργία των slave WSDs σχετικά με το κανάλι, το εύρος ζώνης και τη μέγιστη επιτρεπόμενη εκπεμπόμενη ισχύ τους.

Επίσης, μια master WSD θα πρέπει να σταματήσει αμέσως τη μετάδοσή της και τη μετάδοση και των slave WSDs αν δεν μπορέσει να επικοινωνήσει με τη βάση δεδομένων μέχρι το πέρας της ορισθείσας χρονικής περιόδου.

Μια slave WSD θα πρέπει να:

- Επικοινωνεί ανά πάσα στιγμή με τη master WSD
- Λαμβάνει οδηγίες για τις ελεύθερες συχνότητες και τη μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύ εκπομπής

Επίσης δε θα πρέπει να μεταδίδει αν δεν λάβει τις απαραίτητες πληροφορίες από τη master WSD.

Εκτός από τις διαφορετικές λειτουργικές απαιτήσεις των ίδιων των WSDs, υπάρχουν και πολλές επιλογές για τη διαχείριση της βάσης δεδομένων γεω-εντοπισμού. Ανάλογα με το πόσο κεντρικός είναι ο έλεγχος αυτής, έχουν προταθεί τα εξής:

- Μια ανοικτή βάση δεδομένων για όλη τη χώρα ή την Ευρώπη – δύσκολη στην εφαρμογή λόγω διαφορετικών εθνικών κανονισμών
- Πολλαπλές ανοικτές βάσεις – πλεονέκτημα η αυξημένη διαθεσιμότητα, μειονέκτημα η πιθανή χρέωση των υπηρεσιών
- Ιδιόκτητες κλειστές βάσεις – π.χ. ενός κατασκευαστή WSDs
- Μοντέλο «κέντρου πληροφόρησης» (“clearinghouse”): Υπάρχουν πολλοί πάροχοι βάσεων δεδομένων οι οποίοι συλλέγουν τα δεδομένα που χρειάζονται για τη δημιουργία τους και κατόπιν τις διαθέτουν στις WSDs

Τέλος, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ο συνδυασμός των τεχνικών του εντοπισμού και του γεω-εντοπισμού αποτελεί την πιο ελπιδοφόρα τακτική προκειμένου να μη δημιουργούνται παρεμβολές. Για να υλοποιηθεί αυτός ο συνδυασμός, όμως, θα πρέπει να προηγηθούν:

- Η αναγνώριση της τοποθεσίας της WSD (βάση δεδομένων)
- Η αναγνώριση των ελεύθερων συχνοτήτων και του επιτρεπόμενου EIRP (βάση δεδομένων)
- Η διασταύρωση της διαθεσιμότητας των ελεύθερων συχνοτήτων (ανίχνευση)

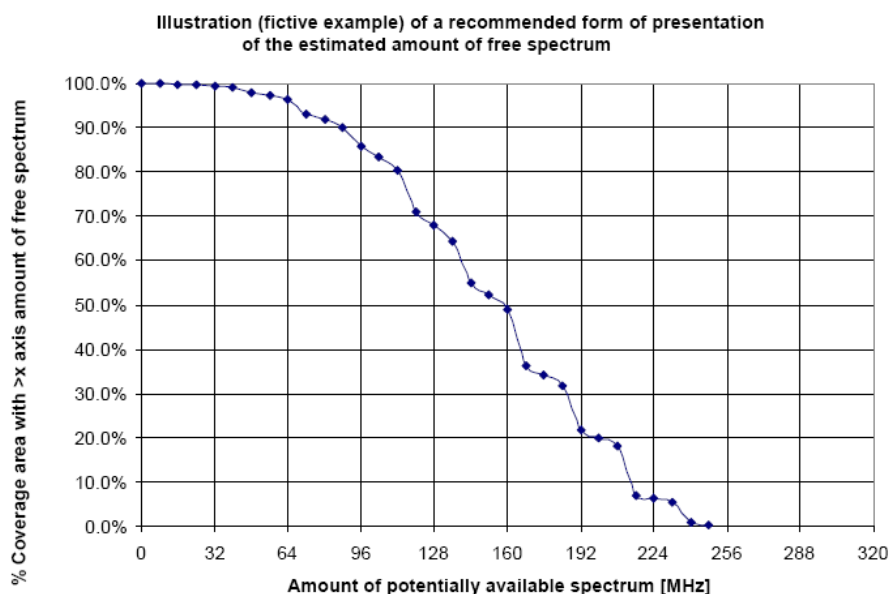
Μετά το πέρας αυτών των διαδικασιών, η έναρξη της μετάδοσης επιτρέπεται μόνο μετά από επιβεβαίωση τόσο από τη βάση δεδομένων, όσο και από τη διαδικασία της ανίχνευσης.

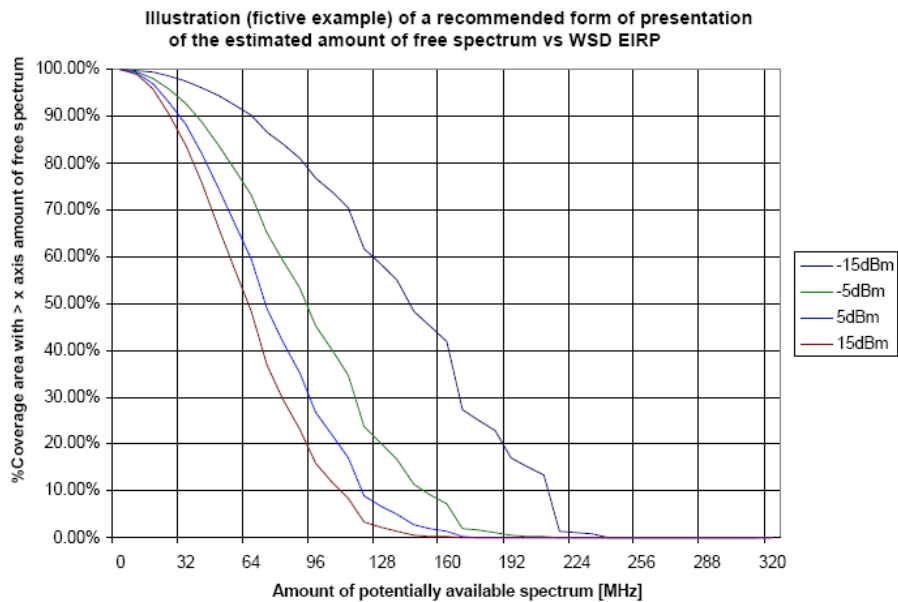
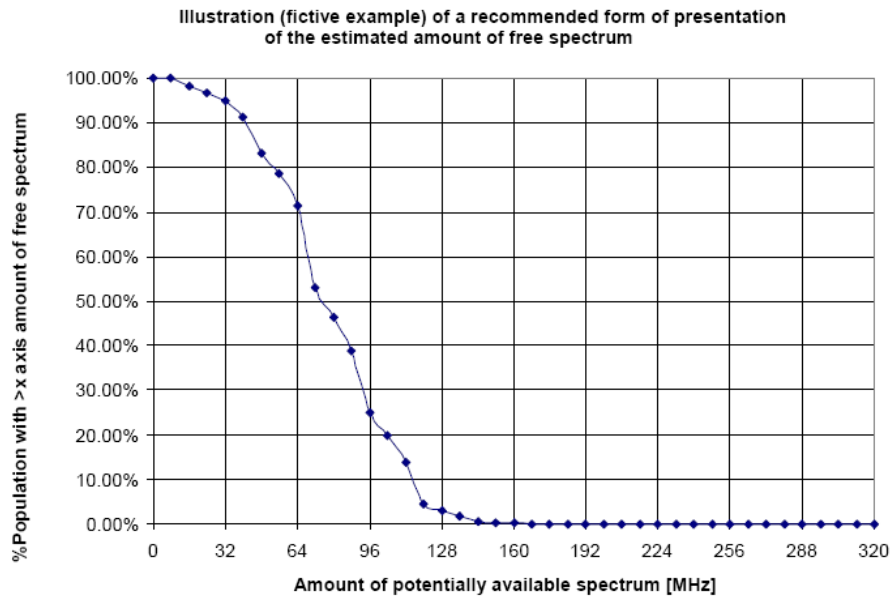
Για την τεχνική του φάρου (beacon) δεν έχει προταθεί κάτι συγκεκριμένο σχετικά με τη χρήση αυτής της τεχνικής από μόνη της. Όπως εγράφη και προηγουμένως, όμως, η τεχνική του απενεργοποιημένου φάρου πιθανώς να έχει οφέλη στην προστασία των εφαρμογών PMSE.

3.4 Εφαρμογές που μπορούν να επωφεληθούν από τα white spaces

- Εκτιμώμενο ποσό φάσματος των white spaces στη ζώνη 470-790 MHz δυνητικά διαθέσιμο σε γνωστικές ραδιο-συσκευές

Για να έχει αξία οποιαδήποτε μελέτη σχετικά με τη χρήση των white spaces, είναι αναγκαίος ο υπολογισμός του τελικά διαθέσιμου ποσού φάσματος που μπορεί να αξιοποιηθεί πρακτικά. Υπάρχουν πολλοί παράγοντες που καθορίζουν το εύρος του διαθέσιμου φάσματος όπως, η τεχνολογία των WSDs, η τοπολογία της περιοχής, οι περιορισμοί των γειτονικών καναλιών DTT, η ύπαρξη ή μη των υπόλοιπων υπηρεσιών (PMSE, RAS, ARNS, κινητές/σταθερές υπηρεσίες) κ.α. Τα παρακάτω διαγράμματα που δημιουργήθηκαν από την ECC αποτυπώνουν την σχέση της ποσότητας του εύρους του φάσματος αυτού με το ποσοστό κάλυψης της περιοχής, το ποσοστό του πληθυσμού και την ισχύ εκπομπής των WSDs. Σημειώνεται ότι δεν έχει μελετηθεί η επίδραση των παρεμβολών των υπάρχοντων υπηρεσιών προς τις WSDs, επομένως, τα αποτελέσματα είναι πιο αισιόδοξα από ό,τι πρέπει.





- Απόπειρες χρήσης των κενών συχνοτήτων.

Όπως εγράφη και προηγουμένως, έχουν υπάρξει διάφορες προτάσεις για τη χρήση των κενών. Στις ΗΠΑ, οι συχνότητες για αναλογική τηλεοπτική μετάδοση ήταν από 54 MHz ως 806 MHz (54-72, 76-88, 174-216, 470-608 και 614-806). Με τη διακοπή του αναλογικού σήματος και τη μετάβαση στην ψηφιακή τηλεόραση, στις 12/6/2009, οι τηλεοπτικοί σταθμοί υποχρεώθηκαν να λειτουργούν σε συχνότητες μεταξύ των 54 MHz και 698 MHz (κανάλια 2-52). Από τότε άρχισαν να προσφέρονται στους καταναλωτές υπηρεσίες ασύρματης ευρυζωνικής μετάδοσης στις κενές πλέον συχνότητες. Από μόνες τους αυτές οι συχνότητες δεν είναι δυνατόν να καλύψουν ευρυζωνικές υπηρεσίες που ήδη παρέχονται από διάφορους παρόχους με τηλεφωνικές σταθερές γραμμές. Για να μπορέσουν να ανταγωνιστούν τις υπηρεσίες αυτών των παρόχων θα συνδυαστούν τις white-space συχνότητες με αυτές του Wi-Fi. Όμως, κυρίως θεατρικοί παραγωγοί και παραγωγόι αθλητικών γεγονότων προσπάθησαν να ακυρώσουν ή να καθυστερήσουν αυτή την

απόφαση, υποστηρίζοντας ότι έτσι θα προκαλούνταν παρεμβολή στις δικές τους εκπομπές σημάτων (π.χ. ασύρματα μικρόφωνα για συναυλίες). Παρόλα αυτά, η FCC (Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών των ΗΠΑ) απέρριψε τα επιχειρήματα αυτά λέγοντας ότι έχει δοκιμαστεί πλήρως η νέα αυτή τεχνολογία και πως με τους νεότερους κανονισμούς, η πιθανότητα παρεμβολών ελαχιστοποιείται.

Σημαντικό ρόλο στη χρησιμοποίηση και την αποδοτικότερη αξιοποίηση των κενών συχνοτήτων παίζει η White Spaces Coalition (WSC), μια ένωση οκτώ εταιριών των ΗΠΑ, που σκοπό έχει τη διάθεση των συχνοτήτων αυτών για παροχή ασύρματου ευρυζωνικού Internet με ταχύτητες πρόσβασης πάνω από 80 Mbps και για μικρής κλίμακας δικτύωση από 400 Mbps ως 800 Mbps. Οι εταιρίες αυτές είναι οι εξής: Microsoft, Google, Dell, HP, Intel, Philips, Earthlink και Samsung Electro-Mechanics.

Σχετικά με τις WSD, το 2007, η FCC εξέδωσε ανακοίνωση με την οποία υποστήριζε ότι κατά τη δοκιμή 2 τέτοιων συσκευών κατασκευασμένων από τη Microsoft, δεν κατέστη δυνατή η αξιόπιστη ανίχνευση των τηλεοπτικών εκπομπών, με αποτέλεσμα να μην επιτραπεί η χρήση τους. Από την άλλη η Microsoft υποστήριξε ότι πραγματοποίησε δοκιμές με τα ίδια κριτήρια και με τις ίδιες συσκευές και επετεύχθη η ανίχνευση των τηλεοπτικών σημάτων σε ποσοστό 100%. Επίσης, υποστήριξε ότι μετά από έλεγχο, οι συσκευές που εξετάστηκαν από την FCC, βρέθηκαν να έχουν ζημιές στο σύστημα σάρωσης συχνοτήτων.

Στις 24/2/2010 στο Wilmington, στη Βόρεια Καρολίνα των ΗΠΑ, όπου ήταν η περιοχή δοκιμών για την ψηφιακή τηλεοπτική μετάβαση, παρουσιάστηκε ένα νέο δημοτικό ασύρματο δίκτυο που χρησιμοποιεί τα white-spaces για διάφορες υπηρεσίες (κάμερες διαχείρισης κυκλοφορίας, συστήματα ασφαλείας, συστήματα επιτήρησης ενέργειας, έλεγχος στάθμης και ποιότητας νερού, δωρεάν Wi-Fi) και το οποίο, μετά από ένα μήνα δοκιμών, πιστοποιήθηκε ότι δεν προκαλεί παρεμβολές στο τηλεοπτικό σήμα.

Επίσης, στις 29/6/2011, στο Cambridge του Ηνωμένου Βασιλείου, διεξήχθη μια από τις μεγαλύτερες εμπορικές δοκιμές σχετικά με το white-space's Wi-Fi. Η Microsoft, χρησιμοποιώντας τεχνολογία από την Adaptrum και υποστηριζόμενη από μια ένωση ISP's και εταιριών τεχνολογίας όπως οι Nokia, BSkyB, BBC και BT μαζί με δικτυακό υλικό που παρείχε η Neul, παρουσίασε ένα σύστημα live streaming HD video από μια συσκευή Xbox μέσω ευρυζωνικού Internet καθώς και μια αμφίδρομη βιντεοκλήση μέσω μιας κοινής ζεύξης μεταξύ δύο Xbox/Kinect κονσολών. Αυτές οι εφαρμογές διεξήχθησαν κάτω από ένα ιδιαίτερα δύσκολο περιβάλλον διάδοσης με εξασθένιση μεγαλύτερη των 120 dB, διαμέσου ψηλών κτιρίων, δέντρων πυκνού φυλλώματος, τοίχων, επίπλων, ανθρώπων κλπ. καθώς και υπό την (αρνητική) επίδραση φαινομένων πολυόδευσης.

4. WiMAX – IEEE 802.16

Το WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access – Παγκόσμια Διαλειτουργικότητα για Μικροκυματική Πρόσβαση) είναι ένα πρότυπο ασύρματων επικοινωνιών σχεδιασμένο να παρέχει ρυθμούς μετάδοσης της τάξης των 30-40 Mbps. Με την αναβάθμιση του 2011 παρέχονται ρυθμοί μετάδοσης μέχρι 1 Gbps για σταθερούς σταθμούς. Το όνομα «WiMAX» δημιουργήθηκε από το WiMAX Forum, το οποίο ιδρύθηκε τον Ιούνιο του 2001 για την προώθηση της πιστότητας και της διαλειτουργικότητας του προτύπου. Το φόρουμ αυτό περιγράφει το WiMAX ως μια τεχνολογία βασισμένη σε πρότυπα, που δίνει τη δυνατότητα παροχής ασύρματης ευρυζωνικής πρόσβασης μέχρι το last mile, σαν εναλλακτική λύση της ενσύρματης πρόσβασης και του DSL. Η ακτίνα κάλυψής του υπερβαίνει τα 30 μέτρα (ακτίνα του WiFi) και φτάνει μέχρι τα 50 km.

4.1 Ορολογία

Ο όρος WiMAX αναφέρεται σε διαλειτουργικές υλοποιήσεις της οικογένειας προτύπων ασύρματων δικτύων IEEE 802.16 που έχουν επικυρωθεί από το WiMAX Forum. Ομοίως, ο όρος WiFi, αναφέρεται σε διαλειτουργικές υλοποιήσεις των προτύπων ασύρματων LANs (WLANs) IEEE 802.11, που είναι πιστοποιημένα από την WiFi Alliance. Η πιστοποίηση από το WiMAX Forum επιτρέπει στους πωλητές να πωλούν σταθερής ή κινητής φύσης προϊόντα πιστοποιημένα ως WiMAX, εξασφαλίζοντας έτσι ένα επίπεδο διαλειτουργικότητας με άλλα πιστοποιημένα προϊόντα, εφ' όσον ταιριάζουν με το ίδιο προφίλ λειτουργίας, όπως θα δούμε παρακάτω.

Το αρχικό πρότυπο IEEE 802.16 (τώρα ονομάζεται «Fixed WiMAX»), δημοσιεύτηκε το 2001, και υιοθέτησε μέρος της τεχνολογίας του WiBro, μιας υπηρεσίας που διατέθηκε στην Κορέα. Το Mobile WiMAX (αρχικά βασισμένο στο πρότυπο 802.16e-2005) είναι η αναθεώρηση που αναπτύχθηκε σε πολλές χώρες και η βάση μελλοντικών αναθεωρήσεων, όπως της 802.16m-2011.

Το WiMAX μερικές φορές αναφέρεται ως «WiFi με στεροειδή» και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μια σειρά εφαρμογών, από ευρυζωνικές συνδέσεις, ως δίκτυο κορμού κυψελωτών δικτύων, hotspots κλπ. Είναι παρόμοιο με το WiFi, αλλά μπορεί να εξυπηρετήσει τη χρήση σε πολύ μεγαλύτερες αποστάσεις. Το WiMAX σε κυψελωτές συσκευές μπορεί συνήθως να φθάσει ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων περίπου 10 με 20 Mbps. Είναι εξαιρετικά ασυνήθιστο να φθάσει περισσότερο από αυτό, αλλά σε ορισμένες περιοχές, είναι δυνατόν.

4.2 Χρήσεις

Το εύρος ζώνης και η ακτίνα κάλυψης του WiMAX το καθιστούν κατάλληλο για τις ακόλουθες πιθανές εφαρμογές:

- Παροχή ευρυζωνικής συνδεσιμότητας σε μια μεγάλη ποικιλία φορητών/κινητών συσκευών κατά μήκος πόλεων και χωρών.
- Παροχή ασύρματης εναλλακτικής λύσης για την ενσύρματη και ψηφιακή συνδρομητική γραμμή (DSL) για ευρυζωνική πρόσβαση «last mile».

- Παροχή υπηρεσιών δεδομένων, τηλεπικοινωνιών (VoIP) και IPTV (triple play).
- Παροχή μιας πηγής σύνδεσης στο Internet, ως μέρος ενός σχεδίου επιχειρησιακής συνέχειας.
- Έξυπνα δίκτυα (smart grids) και απομακρυσμένη μέτρηση (remote metering).

4.2.1 Πρόσβαση στο Διαδίκτυο

Το WiMAX μπορεί να προσφέρει σταθερή ή κινητή πρόσβαση στο Internet σε ολόκληρες πόλεις ή χώρες. Σε πολλές περιπτώσεις, αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον ανταγωνισμό μεταξύ των αγορών οι οποίες κατά κανόνα είχαν πρόσβαση μόνο μέσω ενός υπάρχοντος κατεστημένου φορέα DSL (ή κάτι παρόμοιο). Λαμβάνοντας υπόψη, δε, το σχετικά χαμηλό κόστος που σχετίζεται με την εγκατάσταση του δικτύου WiMAX (σε σύγκριση με τα δίκτυα 3G, HSDPA, xDSL, FTTx ή HFC), είναι πλέον οικονομικά βιώσιμη λύση για την παροχή ευρυζωνικού Internet σε απομακρυσμένες περιοχές.

4.2.2 Δίκτυο κορμού (Backhaul)

Το mobile WiMAX ήταν υποψήφιος αντικατάστασης των τεχνολογιών κυψελωτής κινητής τηλεφωνίας, όπως των GSM και CDMA, ή ως επικάλυψη για την αύξηση της χωρητικότητας των ήδη εγκατεστημένων δικτύων αυτών. Το fixed WiMAX θεωρείται, επίσης, ως μια ασύρματη τεχνολογία κορμού για δίκτυα 2G, 3G, 4G τόσο στις αναπτυγμένες όσο και τις αναπτυσσόμενες χώρες.

Στη Βόρεια Αμερική, το δίκτυο κορμού για τις αστικές περιοχές συνήθως παρέχεται μέσω ενός ή περισσότερων συνδέσεων καλωδίων χαλκού, ενώ οι απομακρυσμένες κυψελωτές περιοχές μερικές φορές εξυπηρετούνται μέσω δορυφόρου. Σε άλλες περιοχές, το δίκτυο κορμού αστικών και αγροτικών περιοχών αποτελείται συνήθως από μικροκυματικές ζεύξεις. Το WiMAX έχει πιο μεγάλες απαιτήσεις εύρους ζώνης για το δίκτυο κορμού από παλαιότερες κυψελωτές εφαρμογές. Κατά συνέπεια, η χρήση ασύρματων μικροκυματικών δικτύων κορμού είναι σε άνοδο στη Βόρεια Αμερική και οι υπάρχουσες μικροκυματικές συνδέσεις σε όλες τις περιοχές αναβαθμίζονται. Συνήθως παρέχονται χωρητικότητες μεταξύ 34 Mbps και 1 Gbps με καθυστερήσεις της τάξης του 1 ms. Σε πολλές περιπτώσεις, οι πάροχοι συγκεντρώνουν τα δεδομένα χρησιμοποιώντας ασύρματη τεχνολογία και στη συνέχεια προωθούν την κίνηση σε δίκτυα οπτικών ινών, όπου αυτό είναι συμφέρον.

4.2.3 Triple-play

Το WiMAX υποστηρίζει τις τεχνολογίες που κάνουν δυνατή την παροχή triple-play υπηρεσιών (όπως Ποιότητα Υπηρεσιών-QoS και Multicasting).

Στις 7 Μαΐου του 2008 στις Ηνωμένες Πολιτείες, η Sprint Nextel, η Google, η Intel, η Comcast, η Bright House και η Time Warner ανακοίνωσαν τη συγκέντρωση κατά μέσο όρο 120 MHz του ραδιοφάσματος και την συμμετοχή τους στην Clearwire για τη διάθεση της υπηρεσίας. Η νέα αυτή εταιρεία ελπίζει να επωφεληθεί από τις προσφορές συνδυασμένων υπηρεσιών και των πόρων του δικτύου ως εφιαλτήριο επιβολής έναντι των ανταγωνιστών της. Οι εταιρείες ενσύρματων ζεύξεων θα παρέχουν υπηρεσίες οπτικοακουστικών μέσων

επικοινωνίας με άλλους εταίρους, ενώ θα έχουν πρόσβαση στο ασύρματο δίκτυο, ως ένας πάροχος κινητού εικονικού δικτύου, για την παροχή υπηρεσιών triple-play.

Ορισμένοι αναλυτές αμφισβήτησαν πως η συμφωνία θα λειτουργήσει: αν και η σύγκλιση σταθερών-κινητών υπηρεσιών είναι πλέον ένας αναγνωρισμένος παράγοντας στη βιομηχανία, προηγούμενες προσπάθειες δημιουργίας συμπράξεων μεταξύ εταιριών ασύρματων και ενσύρματων υπηρεσιών έχουν γενικά αποτύχει να οδηγήσουν σε σημαντικά οφέλη για τους συμμετέχοντες. Άλλοι αναλυτές επισήμαναν ότι καθώς οι ασύρματες επικοινωνίες εξελίσσονται σε υπηρεσίες μεγαλύτερου εύρους ζώνης, αναπόφευκτα ανταγωνίζονται πιο άμεσα τις καλωδιακές και DSL υπηρεσίες, οδηγώντας τους ανταγωνιστές σε συνεργασία. Επίσης, καθώς τα ασύρματα ευρυζωνικά δίκτυα αναπτύσσονται πυκνότερα και μετακυλίνονται οι χρηστικές συνήθειες, η ανάγκη για επέκταση του δικτύου κορμού και των υπηρεσιών οπτικοακουστικών μέσων θα αυξηθεί, με αποτέλεσμα να πολλαπλασιαστούν οι πιθανότητες επιβολής τους επί της απήχησης των ενσύρματων υπηρεσιών.

4.2.4 Ανάπτυξη δικτύων WiMax σε πληθείσες περιοχές

Η πρόσβαση μέσω WiMAX χρησιμοποιήθηκε για να υποβοηθηθούν οι προσπάθειες επικοινωνίας στην περιοχή Ατσε της Ινδονησίας, μετά το τσουνάμι το Δεκέμβριο του 2004. Όλη η επικοινωνιακή υποδομή στην περιοχή, εκτός από τους ραδιοερασιτέχνες, καταστράφηκε, καθιστώντας τους επιζώντες ανήμπορους να επικοινωνήσουν με ανθρώπους έξω από την πληχθείσα περιοχή και το αντίστροφο. Το WiMAX παρείχε ευρυζωνική πρόσβαση που βοήθησε στην αναγέννηση των επικοινωνιών από και προς το Ατσε.

Επίσης, εξοπλισμός WiMAX παραχωρήθηκε από την Intel Corporation για να βοηθήσει την Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών (FCC) και την Ομοσπονδιακή Υπηρεσία Διαχείρισης Εκτάκτων Καταστάσεων (FEMA) στις προσπάθειές επικοινωνίας τους με τις περιοχές που επλήγησαν από τον τυφώνα Κατρίνα. Στην πράξη, εθελοντές χρησιμοποίησαν κυρίως ad-hoc δίκτυα mesh, εφαρμογές VoIP, καθώς και μια δορυφορική ζεύξη σε συνδυασμό με WiFi στο τοπικό δίκτυο.

4.3 Υλικό

4.3.1 Διασύνδεση

Οι συσκευές που παρέχουν δυνατότητα σύνδεσης σε δίκτυο WiMAX είναι γνωστές ως σταθμοί συνδρομητή (Subscriber Stations - SS). Οι φορητές μονάδες περιλαμβάνουν συσκευές επικοινωνίας παρόμοιες με τα κυψελωτά smartphones, περιφερειακά υπολογιστών (κάρτες PC ή USB dongles) και ενσωματωμένες συσκευές σε φορητούς υπολογιστές, οι οποίοι σήμερα είναι διαθέσιμοι για υπηρεσίες WiFi. Επιπλέον, δίνεται όλο και μεγαλύτερη έμφαση από τους παρόχους στις καταναλωτικές ηλεκτρονικές συσκευές, όπως κονσόλες παιχνιδιών, MP3 players και άλλες παρόμοιες συσκευές. Σημειώνεται επίσης, ότι το WiMAX μοιάζει περισσότερο με το WiFi από ό,τι με άλλες κυψελωτές τεχνολογίες 3G.

Ο ιστότοπος του WiMAX Forum παρέχει μια λίστα των πιστοποιημένων συσκευών, η οποία όμως δεν είναι πλήρης, καθώς πιστοποιημένα modules είναι ενσωματωμένα σε συσκευές MID (Mobile Internet Devices), φορητούς υπολογιστές κ.α.

4.3.2 Gateways

Τα gateways του WiMAX είναι διαθέσιμα τόσο σε εσωτερικές όσο και σε εξωτερικές εκδόσεις από διάφορους κατασκευαστές. Πολλές από αυτές που προσφέρονται από κατασκευαστές όπως η Vecima Networks, η Alvarion, η Airspan, η ZyXEL, η Huawei, και η Motorola, είναι stand-alone αυτοεγκαθιστώμενες εσωτερικές μονάδες. Τέτοιες συσκευές συνήθως τοποθετούνται κοντά στο παράθυρο του πελάτη με το καλύτερο σήμα και διαθέτουν:

- Ένα ενσωματωμένο σημείο πρόσβασης WiFi για την παροχή σύνδεσης στο Internet μέσω WiMAX σε πολλαπλές συσκευές σε όλο το σπίτι ή την επιχείρηση
- Θύρες Ethernet για την απευθείας σύνδεση σε υπολογιστή ή DVR και
- Μία ή δύο υποδοχές αναλογικού τηλεφώνου για τη σύνδεση μιας τηλεφωνικής γραμμής και την αξιοποίηση του VoIP.

Τα gateways εσωτερικών χώρων, προφανώς, είναι βολικά, αλλά οι αυξημένες απώλειες διάδοσης σημαίνουν ότι ο συνδρομητής μπορεί να χρειαστεί να είναι πολύ πιο κοντά στο σταθμό βάσης WiMAX σε σχέση με επαγγελματικά εγκαταστημένες εξωτερικές μονάδες.

Οι τελευταίες, έχουν, περίπου, το μέγεθος ενός φορητού υπολογιστή και η εγκατάστασή τους μοιάζει με την εγκατάσταση ενός οικιακού δορυφορικού δέκτη (πιάτου). Μια εξωτερική μονάδα υψηλότερου κατευθυντικού κέρδους, γενικά, θα έχει ως αποτέλεσμα πολύ μεγαλύτερη ακτίνα κάλυψης και διαπερατότητα (throughput), αλλά με προφανή μείωση στην κινητικότητα της μονάδας.

4.3.3 Εξωτερικά modems

Μέσω USB καθίσταται δυνατή η σύνδεση σε ένα δίκτυο WiMAX μέσα από μια οντότητα που ονομάζεται dongle. Γενικά, αυτές οι συσκευές συνδέονται σε ένα φορητό υπολογιστή και τυπικά διαθέτουν ομοιοκατευθυντικές κεραίες χαμηλότερου κέρδους σε σύγκριση με άλλες συσκευές, μιας και χρησιμοποιούνται συνήθως σε περιοχές με καλή κάλυψη.

4.3.4 Κινητά τηλέφωνα

Η HTC ανακοίνωσε το πρώτο WiMAX κινητό τηλέφωνο, το Max 4G, στις 12 Νοεμβρίου του 2008. Η συσκευή ήταν διαθέσιμη μόνο σε ορισμένες αγορές της Ρωσίας στο δίκτυο Yota. Η HTC και η Sprint Nextel κυκλοφόρησαν το δεύτερο WiMAX κινητό τηλέφωνο, το EVO 4G, στις 23 Μαρτίου του 2010 στο συνέδριο της CTIA στο Las Vegas. Η συσκευή, που ξεκίνησε να διατίθεται εμπορικά στις 4 Ιουνίου του 2010, είναι ικανή να λειτουργήσει τόσο σε δίκτυα EV-DO (3G) όσο και σε δίκτυα WiMAX (4G), και επίσης να μεταφέρει ταυτόχρονα δεδομένα και φωνή. Η Sprint Nextel ανακοίνωσε στην CES του 2012 ότι δεν θα προσφέρει πλέον συσκευές τεχνολογίας WiMAX, λόγω της οικονομικής κατάστασης και αντ' αυτού, μαζί με

την Clearwire, θα αναπτύξουν ένα δίκτυο 4G, αποφασίζοντας να χρησιμοποιήσουν την τεχνολογία LTE 4G.

4.4 Τεχνικές Πληροφορίες

4.4.1 Το πρότυπο IEEE 802.16

Το WiMAX, πλέον, βασίζεται στο πρότυπο της IEEE 802.16e-2005, που εγκρίθηκε το Δεκέμβριο του 2005. Είναι συμπλήρωμα του IEEE 802.16-2004 και έτσι το πραγματικό πρότυπο είναι το 802.16-2004, όπως τροποποιήθηκε από το 802.16e-2005. Έτσι, οι προδιαγραφές αυτές θα πρέπει να θεωρηθούν από κοινού.

Το IEEE 802.16e-2005 βελτιώνει το IEEE 802.16-2004 στα εξής:

- Προσθήκη υποστήριξης για την κινητικότητα (soft- και hard-handovers μεταξύ των σταθμών βάσης). Αυτό θεωρείται ως μια από τις πιο σημαντικές πτυχές του 802.16e-2005 και είναι η ίδια η βάση του mobile WiMAX.
- Κλιμάκωση του FFT ως προς το εύρος ζώνης του καναλιού, ώστε να διατηρηθεί η απόσταση μεταξύ των φερόντων σταθερή έναντι των διαφορετικών τιμών εύρους ζώνης καναλιού (τυπικά 1.25 MHz, 5 MHz, 10 MHz ή 20 MHz). Αυτό συντελεί στην υψηλότερη αποδοτικότητα του φάσματος σε μεγάλα εύρους κανάλια, καθώς και στη μείωση του κόστους σε στενού εύρους κανάλια, κάτι που είναι επίσης γνωστό ως Scalable OFDMA (SOFDMA). Στο πρότυπο ορίζονται και άλλα μεγέθη εύρους ζώνης καναλιού που δεν είναι πολλαπλάσια του 1.25 MHz, αλλά επειδή ο επιτρεπόμενος αριθμός υποφερόντων FFT είναι μόνο 128, 512, 1024 και 2048, τα άλλα αυτά μεγέθη δεν θα έχουν ακριβώς την ίδια απόσταση μεταξύ των φερόντων, πράγμα που μπορεί να μην είναι η βέλτιστη επιλογή για τις εφαρμογές. Η απόσταση μεταξύ των φερόντων, τυπικά, είναι 10,94 kHz.
- Προηγμένα σχήματα διαφορισμού κεραίας και HARQ
- Συστήματα προσαρμοσμένων κεραιών (AAS) και τεχνολογίας MIMO
- Πυκνότερη υπο-καναλοποίηση, βελτιώνοντας έτσι τη διεύθυνση σε εσωτερικό χώρο
- Εισαγωγή κωδικοποίησης Turbo και Low-Density Parity Check (LDPC)
- Εισαγωγή υπο-καναλοποίησης στο downlink, επιτρέποντας στους διαχειριστές να θυσιάσουν την κάλυψη για τη χωρητικότητα ή το αντίστροφο
- Προσθήκη μιας επιπλέον κλάσης QoS για εφαρμογές VoIP.

Το SOFDMA (που χρησιμοποιείται στο 802.16e-2005) και το OFDM256 (802.16d) δεν είναι συμβατά μεταξύ τους και ως εκ τούτου ο εξοπλισμός θα πρέπει να αντικατασταθεί, αν κάποιος πάροχος θέλει αργότερα να μετακινηθεί προς κάποιο πρότυπο αργότερα (π.χ. από το fixed WiMAX στο mobile WiMAX).

4.4.2 Φυσικό Στρώμα

Η αρχική έκδοση του προτύπου στο οποίο βασίζεται το WiMAX (IEEE 802.16) όριζε ένα φυσικό στρώμα στην περιοχή 10 έως 66 GHz. Το πρότυπο 802.16a, που αναθεωρήθηκε το 2004 στο πρότυπο 802.16-2004, προσέθεσε προδιαγραφές για την περιοχή από 2 έως 11 GHz. Το πρότυπο 802.16-2004 αναθεωρήθηκε στο 802.16e-2005, το 2005 και χρησιμοποιεί

πρόσβαση κλιμακούμενης ορθογώνιας πολυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας (SOFDM), η οποία είναι μια μέθοδος κωδικοποίησης ψηφιακών δεδομένων σε πολλαπλές φέρουσες συχνότητες. Το OFDM έχει εξελιχθεί σε ένα αρκετά δημοφιλές σχήμα ψηφιακής επικοινωνίας ευρείας ζώνης, είτε ασύρματης είτε ενσύρματης και χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπως η ψηφιακή τηλεόραση και το ψηφιακό ραδιόφωνο, σε αντίθεση με τη σταθερή ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (OFDM) του προτύπου σε 802.16d, η οποία διαθέτει 256 υποφέροντα (εκ των οποίων τα 200 χρησιμοποιούνται). Πιο εξελιγμένες εκδόσεις, συμπεριλαμβανομένης της 802.16e, διαθέτουν, επίσης, υποστήριξη πολλαπλών κεραιών MIMO. Αυτό συνεπάγεται πιθανά οφέλη όσον αφορά την κάλυψη, τη δυνατότητα αυτό-εγκατάστασης, την κατανάλωση ενέργειας, την επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων και την αποδοτικότητα του εύρους ζώνης. Σημειώνεται δε, ότι το WiMax είναι η πιο ενεργειακά αποδοτική προ-4G τεχνική μεταξύ του LTE και του HSPA+.

4.4.3 Έλεγχος Πρόσβασης στο Μέσο, στρώμα ζεύξης δεδομένων

Το στρώμα MAC του WiMAX χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο προγραμματισμού για τον οποίο ο σταθμός συνδρομητή χρειάζεται να ανταγωνιστεί μόνο μία φορά για την αρχική είσοδο στο δίκτυο. Αφού συμβεί αυτό, στον σταθμό συνδρομητή αποδίδεται μία θυρίδα πρόσβασης από τον σταθμό βάσης. Η χρονοθυρίδα αυτή, μπορεί να διευρύνεται και να συρρικνώνεται, αλλά εξακολουθεί να είναι ανατεθειμένη στο σταθμό συνδρομητή, πράγμα που σημαίνει ότι οι άλλοι συνδρομητές δεν μπορούν να τη χρησιμοποιήσουν. Εκτός του ότι είναι σταθερός κάτω από υπερφόρτωση και υπερκάλυψη, ο αλγόριθμος προγραμματισμού μπορεί επίσης να είναι περισσότερο αποδοτικός ως προς το εύρος ζώνης. Επίσης, επιτρέπει στο σταθμό βάσης να ελέγχει τις παραμέτρους της ποιότητας των υπηρεσιών (QoS) με την εξισορρόπηση των αναθέσεων των χρονικών σχισμών ανάμεσα στις ανάγκες των εφαρμογών του συνδρομητή.

4.4.4 Ανάπτυξη

Ως πρότυπο που προορίζεται για να ικανοποιήσει τις ανάγκες της επόμενης γενιάς δικτύων δεδομένων (4G), το WiMAX χαρακτηρίζεται από τη δυναμική διαμόρφωση αλγόριθμου ριπής, προσαρμόσιμη στο φυσικό περιβάλλον μέσα στο οποίο ταξιδεύει το σήμα RF. Το σχήμα διαμόρφωσης, δηλαδή, επιλέγεται να είναι όσο πιο αποδοτικό φασματικά (περισσότερα bits ανά σύμβολο OFDM/SOFDMA), όταν οι ριπές έχουν υψηλή ισχύ σήματος και υψηλό λόγο σήματος προς θόρυβο συν παρεμβολή (CNIR), αφού τότε μπορούν να αποκωδικοποιηθούν πιο εύκολα χρησιμοποιώντας τεχνικές ψηφιακής επεξεργασίας σήματος (DSP). Σε αντίθετη περίπτωση, λειτουργώντας, δηλαδή, σε ένα λιγότερο ευνοϊκό περιβάλλον επικοινωνίας, το σύστημα αυτόματα αλλάζει σε ένα πιο ανθεκτικό τρόπο λειτουργίας (προφίλ ριπής), το οποίο σημαίνει λιγότερα bits ανά σύμβολο OFDM/SOFDMA, με το πλεονέκτημα ότι η ισχύς ανά bit είναι υψηλότερη και ως εκ τούτου απλουστεύει η ακριβής επεξεργασία του σήματος.

Τα προφίλ ριπής χρησιμοποιούνται αντιστρόφως ανάλογα (δυναμικοί αλγόριθμοι) με την εξασθένιση του σήματος, εννοώντας ότι η διαπερατότητα μεταξύ των πελατών και του σταθμού βάσης καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από την απόσταση. Η μέγιστη απόσταση επιτυγχάνεται με τη χρήση της πιο ανθεκτικής ρύθμισης ριπής, δηλαδή, με το προφίλ που

απαιτεί περισσότερα σύμβολα (δηλαδή, ένα μεγαλύτερο τμήμα του πλαισίου MAC) να αποδοθούν για τη μετάδοση ενός συγκεκριμένου ποσού δεδομένων, από ό,τι εάν ο πελάτης ήταν πλησιέστερα προς τον σταθμό βάσης. Το πλαίσιο MAC του πελάτη και τα ατομικά προφίλ ριπής τους καθορίζονται σαφώς, όπως επίσης και η κατανομή του χρόνου. Ωστόσο, ακόμη και αν αυτό γίνεται αυτόματα, στην πράξη θα πρέπει να αποφευχθούν περιβάλλοντα υψηλών παρεμβολών και πολυόδευσης ώστε να μην προκαλείται μείωση στη διαπερατότητα και δυσλειτουργία στο δίκτυο.

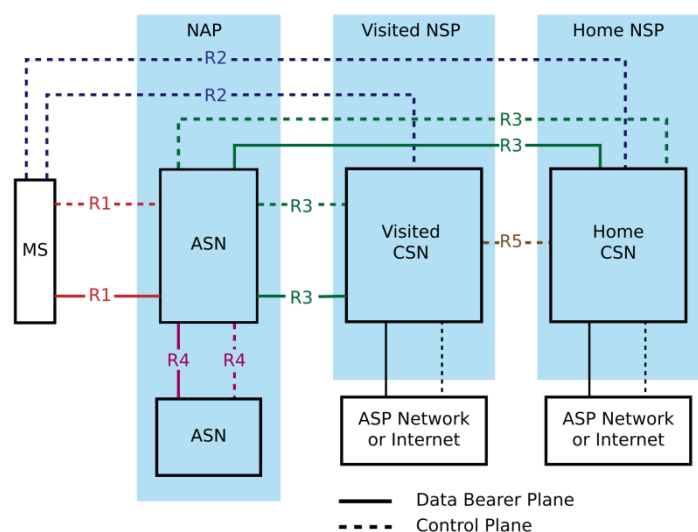
Το σύστημα είναι πολύπλοκο να αναπτυχθεί καθώς είναι απαραίτητη η παρακολούθηση όχι μόνο της ισχύος του σήματος και του CNIR (όπως σε συστήματα όπως το GSM), αλλά επίσης και το πώς οι διαθέσιμες συχνότητες θα αποδοθούν δυναμικά (με συνέπεια δυναμικές αλλαγές στο διαθέσιμο εύρος ζώνης). Αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει σε άτακτα αποδοθείσες συχνότητες, με αργούς χρόνους απόκρισης ή με απώλεια πλαισίων. Για το λόγο αυτό, το σύστημα πρέπει να σχεδιαστεί από την αρχή σε συμφωνία με την ομάδα παραγωγής του σταθμού βάσης, ώστε να προβλεφθεί με ακρίβεια η χρήση των συχνοτήτων, οι παρεμβολές, και η γενικότερη λειτουργικότητα του προϊόντος.

4.4.5 Σύνδεση με ένα IP-based δίκτυο

Το WiMAX Forum έχει προτείνει μια αρχιτεκτονική που ορίζει τον τρόπο που ένα δίκτυο WiMAX μπορεί να συνδεθεί με ένα δίκτυο βασισμένο σε IP (IP-based), η οποία επιλέγεται από τους φορείς που λειτουργούν ως πάροχοι υπηρεσιών Διαδικτύου (Internet Service Providers – ISPs). Παρ' όλα αυτά οι σταθμοί βάσης WiMAX παρέχουν δυνατότητες σύνδεσης και με άλλα είδη αρχιτεκτονικών, όπως με δίκτυα μεταγωγής πακέτου για κινητές επικοινωνίες.

Η πρόταση του WiMAX Forum ορίζει μια σειρά από στοιχεία, καθώς και μερικές από τις διασυνδέσεις μεταξύ αυτών, που στο παρακάτω σχήμα ονομάζονται από R1 έως R5:

- SS/MS: ο σταθμός συνδρομητή/ ο κινητός σταθμός
- ASN: το δίκτυο υπηρεσιών πρόσβασης
- BS: ο σταθμός βάσης, μέρος του ASN
- ASN-GW: το ASN Gateway, μέρος του ASN
- CSN: το δίκτυο υπηρεσιών σύνδεσης
- HA: ο πράκτορας οικείων, μέρος του CSN
- AAA: ο διακομιστής πιστοποίησης, εξουσιοδότησης και λογιστικής, μέρος του CSN
- NAP: ο πάροχος πρόσβασης στο δίκτυο
- NSP: ο πάροχος υπηρεσιών δικτύου



Αξίζει να σημειωθεί ότι η αρχιτεκτονική λειτουργίας μπορεί να σχεδιαστεί με διάφορες διαμορφώσεις υλικού. Για παράδειγμα, η αρχιτεκτονική είναι αρκετά ευέλικτη ώστε να επιτρέπει την εξυπηρέτηση απομακρυσμένων/κινητών σταθμών ποικίλης κλίμακας καθώς και σταθμών βάσης διαφορετικού μεγέθους, όπως femto-, pico-, mini- και macro-BSs.

4.4.6 Κατανομή του ραδιοφάσματος

Δεν υπάρχει ενιαία παγκοσμίως αδειοδοτημένη περιοχή στο ΗΜ φάσμα για το WiMAX, ωστόσο το WiMAX Forum έχει δημοσιεύσει τρία αδειοδοτημένα προφίλ φάσματος: στα 2.3 GHz, στα 2.5 GHz και στα 3.5 GHz, σε μια προσπάθεια να διευκολυνθεί η τυποποίηση και η μείωση του κόστους.

Στις ΗΠΑ, το μεγαλύτερο τμήμα είναι διαθέσιμο γύρω από τα 2.5 GHz και έχει ήδη ανατεθεί, κυρίως στην Sprint Nextel και στην Clearwire. Στον υπόλοιπο κόσμο, οι πιο πιθανές ζώνες συχνοτήτων που θα χρησιμοποιηθούν θα είναι αυτές που έχουν εγκριθεί από το WiMAX Forum, με την περιοχή των 2.3 GHz να είναι πιο σημαντική στην Ασία. Ορισμένες χώρες της ηπείρου αυτής, όπως η Ινδία και η Ινδονησία θα χρησιμοποιήσουν ένα μείγμα των περιοχών των 2.5 GHz, των 3,3 GHz και άλλων συχνοτήτων. Η πακιστανική εταιρία Wateen Telecom χρησιμοποιεί την περιοχή των 3.5 GHz.

Επίσης, ζώνες της αναλογικής τηλεόρασης (στα 700 MHz) θα καταστούν διαθέσιμες για το WiMAX, αλλά προηγείται η πλήρης καθιέρωση της ψηφιακής τηλεόρασης, καθώς και πιθανές άλλες υπηρεσίες που διεκδικούν το φάσμα αυτό. Στις ΗΠΑ, η δημοπρασία της FCC για αυτό το φάσμα ξεκίνησε τον Ιανουάριο του 2008, με το μεγαλύτερο μέρος του φάσματος να αποδίδεται στη Verizon Wireless και το επόμενο μεγαλύτερο στην AT&T. Και οι δύο αυτές εταιρείες έχουν δηλώσει την πρόθεσή τους να υποστηρίξουν το LTE, μια τεχνολογία που ανταγωνίζεται άμεσα το WiMAX. Η επίτροπος της ΕΕ Viviane Reding έχει προτείνει την ανακατανομή του φάσματος στην περιοχή των 500-800 MHz για ασύρματες επικοινωνίες, συμπεριλαμβανομένου του WiMAX.

Τα προφίλ του WiMAX καθορίζουν το μέγεθος του καναλιού, την επιλογή TDD ή FDD και άλλα χαρακτηριστικά απαραίτητα για τη διαλειτουργικότητα των προϊόντων. Τα τρέχοντα σταθερά προφίλ ορίζονται τόσο για TDD, όσο και για FDD. Σε αυτό το σημείο, όλα τα προφίλ mobile WiMAX χρησιμοποιούν μόνο TDD. Τα προφίλ του fixed WiMAX έχουν μεγέθη καναλιού 3.5 MHz, 5 MHz, 7 MHz και 10 MHz. Τα προφίλ του mobile WiMAX έχουν μεγέθη 5 MHz, 8.75 MHz και 10 MHz. Σημειώνεται ότι το πρότυπο 802.16 επιτρέπει πολύ μεγαλύτερη ποικιλία μεγεθών καναλιού, αλλά μόνο τα παραπάνω υποσύνολα υποστηρίζονται ως προφίλ WiMAX.

Από τον Οκτώβριο του 2007, ο Τομέας Ραδιοεπικοινωνιών της ITU (ITU-R) αποφάσισε να συμπεριλάβει την τεχνολογία WiMAX στο σύνολο προτύπων IMT-2000. Αυτό επιτρέπει στους ιδιοκτήτες του φάσματος (ειδικά στη ζώνη των 2.5 έως 2.69 GHz σε αυτό το στάδιο) να χρησιμοποιούν εξοπλισμό WiMAX σε κάθε χώρα που αναγνωρίζει το IMT-2000.

4.4.7 Φασματική απόδοση

Ένα από τα σημαντικά πλεονεκτήματα των προηγμένων ασύρματων συστημάτων όπως το WiMAX είναι η αυξημένη φασματική απόδοση. Για παράδειγμα, το πρότυπο 802.16-2004 (fixed) έχει φασματική απόδοση 3.7 bps/Hz, ενώ άλλα ασύρματα συστήματα 3.5G-4G προσφέρουν παρόμοιες φασματικές αποδόσεις. Το αξιοσημείωτο πλεονέκτημα του WiMAX προέρχεται από το συνδυασμό SOFDMA με τεχνολογίες έξυπνων κεραιών. Αυτό πολλαπλασιάζει την ενεργή φασματική απόδοση του συστήματος μέσω της πολλαπλής επαναχρησιμοποίησης των συχνοτήτων και των έξυπνων τοπολογιών του δικτύου. Η άμεση χρήση της οργάνωσης του πεδίου συχνοτήτων απλοποιεί το σχεδιασμό χρησιμοποιώντας MIMO-AAS (Adaptive Antenna Steering – Προσαρμοστική Διεύθυνση Κεραίας) σε σύγκριση με μεθόδους CDMA/WCDMA, με συνέπεια αποτελεσματικότερα συστήματα.

4.4.8 Εγγενείς περιορισμοί

Όπως είναι φυσιολογικό, το WiMAX δεν μπορεί να υποστηρίξει ταχύτητες μεταφοράς 70 Mbps σε αποστάσεις της τάξης των 50 χιλιομέτρων. Όπως όλες οι ασύρματες τεχνολογίες, το WiMAX μπορεί να λειτουργήσει είτε σε υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης, είτε σε μεγαλύτερες αποστάσεις, αλλά όχι και τα δύο μαζί. Η λειτουργία στη μέγιστη εμβέλεια των 50 km αυξάνει το ποσοστό εσφαλμένων ψηφίων (Bit Error Rate – BER) και ως συνέπεια επιτυγχάνεται μικρότερος ρυθμός μετάδοσης. Αντίθετα, μειώνοντας την απόσταση (σε κάτω από 1 km) επιτρέπει σε μια συσκευή να λειτουργεί σε υψηλότερες ταχύτητες.

Η ανάπτυξη ενός συστήματος WiMAX στο Περθ της Αυστραλίας έδειξε ότι οι χρήστες στα άκρα των κυψελών με τερματικά εσωτερικών χώρων είδαν ταχύτητες της τάξης των 1-4 Mbps, ενώ οι χρήστες που βρίσκονταν κοντινότερα παρατήρησαν ταχύτητες έως και 30 Mbps.

Όπως σε όλα τα ασύρματα συστήματα, το διαθέσιμο εύρος ζώνης μοιράζεται μεταξύ των χρηστών ενός συγκεκριμένου τομέα, με αποτέλεσμα η επίδοση να μειώνεται με την αύξηση των ενεργών χρηστών σε έναν τομέα. Ωστόσο, με τον κατάλληλο σχεδιασμό της χωρητικότητας και τη χρήση της Ποιότητας Υπηρεσιών του WiMAX μπορεί να οριστεί η ελάχιστη εγγυημένη διαπερατότητα (throughput) για κάθε χρήστη. Στην πράξη, οι περισσότεροι χρήστες θα εξυπηρετούνται με ταχύτητες 4-8 Mbps και πρόσθετες κάρτες επέκτασης του δικτύου θα προστίθενται στο σταθμό βάσης ώστε να αυξηθεί ο αριθμός των χρηστών που μπορούν να εξυπηρετηθούν, ανάλογα με τις ανάγκες.

4.4.9 Σύγκριση με το WiFi

Η σύγκριση μεταξύ WiMAX και WiFi είναι συχνή, διότι και οι δύο τεχνολογίες σχετίζονται με την ασύρματη συνδεσιμότητα και την πρόσβαση στο Διαδίκτυο.

- Το WiMAX είναι ένα σύστημα για μακρινές αποστάσεις, που χρησιμοποιεί αδειοδοτημένο ή μη φάσμα για να προσφέρει σύνδεση σε ένα δίκτυο, στις περισσότερες περιπτώσεις, το Διαδίκτυο.
- Το WiFi χρησιμοποιεί μη αδειοδοτημένο φάσμα για να παρέχει πρόσβαση σε ένα τοπικό δίκτυο.
- Το WiFi είναι πιο δημοφιλές στις συσκευές των τελικών χρηστών.

- Το WiFi τρέχει το πρωτόκολλο CSMA/CA του στρώματος MAC, το οποίο είναι μη προσανατολισμένο στη σύνδεση (connectionless-oriented), ενώ το WiMAX λειτουργεί σε ένα στρώμα MAC προσανατολισμένο στη σύνδεση (connection-oriented).
- Το WiMAX και το WiFi έχουν εντελώς διαφορετικούς μηχανισμούς παροχής ποιότητας υπηρεσιών (QoS):
 - ▶ Το WiMAX χρησιμοποιεί ένα μηχανισμό QoS με βάση τις συνδέσεις μεταξύ του σταθμού βάσης και της συσκευής του χρήστη. Κάθε σύνδεση βασίζεται σε συγκεκριμένους αλγόριθμους χρονοπρογραμματισμού.
 - ▶ Το WiFi χρησιμοποιεί τη μέθοδο του ανταγωνισμού: όλοι οι σταθμοί συνδρομητών που επιθυμούν να περάσουν δεδομένα μέσω ενός ασύρματου σημείου πρόσβασης (AP) ανταγωνίζονται για την προτίμηση του AP σε μια βάση τυχαίας διακοπής. Αυτό μπορεί να προκαλέσει σε σταθμούς συνδρομητών που βρίσκονται μακριά από το AP την επανειλημμένη διακοπή τους από τους κοντινότερους σταθμούς, μειώνοντας σημαντικά τη διαπερατότητά τους.
- Τόσο το πρότυπο 802.11 (που περιλαμβάνει το WiFi), όσο και το πρότυπο 802.16 (που περιλαμβάνει το WiMAX) ορίζουν Peer-to-Peer (P2P) και ad-hoc δίκτυα, όπου ο τελικός χρήστης επικοινωνεί με τους χρήστες ή τους διακομιστές σε ένα άλλο τοπικό δίκτυο (LAN) χρησιμοποιώντας το σημείο πρόσβασης ή το σταθμό βάσης του. Ωστόσο, το πρότυπο 802.11 υποστηρίζει, επίσης, άμεση ad-hoc και Peer-to-Peer δικτύωση μεταξύ συσκευών του τελικού χρήστη χωρίς κάποιο σημείο πρόσβασης, ενώ οι συσκευές του τελικού χρήστη στο πρότυπο 802.16 πρέπει να είναι εντός της εμβέλειας του σταθμού βάσης.

Παρ' όλο που το WiFi και το WiMAX είναι σχεδιασμένα για διαφορετικές καταστάσεις, εντούτοις είναι τεχνολογίες συμπληρωματικές μεταξύ τους. Οι πάροχοι δικτύου WiMAX συνήθως παρέχουν μια Μονάδα Συνδρομητή WiMAX, η οποία συνδέεται με το μητροπολιτικό δίκτυο WiMAX και προσφέρει σύνδεση WiFi στο σπίτι ή την επιχείρηση για τις τοπικές συσκευές (π.χ. φορητοί υπολογιστές, WiFi τηλέφωνα, smartphones). Αυτό δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να τοποθετήσει τη Μονάδα Συνδρομητή WiMAX στην καλύτερη δυνατή τοποθεσία (όπως ένα παράθυρο), ενώ παράλληλα εξακολουθεί να είναι σε θέση να χρησιμοποιήσει το δίκτυο WiMAX από οποιοδήποτε μέρος εντός του χώρου του.

4.4.10 Έλεγχος συμμόρφωσης

Η γλώσσα δοκιμής προδιαγραφών TTCN-3 χρησιμοποιείται για τη διεξαγωγή των δοκιμασιών συμμόρφωσης για τις εφαρμογές WiMAX. Η σουίτα δοκιμής του WiMAX έχει αναπτυχθεί από ειδική ομάδα ειδικών του Ευρωπαϊκού Ινστιτούτου Προτυποποίησης Τηλεπικοινωνιών – ETSI (STF 252).

4.5 Οργανισμοί

- WiMAX Forum

Το WiMAX Forum είναι ένας μη κερδοσκοπικός οργανισμός που δημιουργήθηκε για να προωθήσει την υιοθέτηση WiMAX συμβατών προϊόντων και υπηρεσιών. Ο σημαντικότερος ρόλος του είναι να πιστοποιεί τη διαλειτουργικότητα των προϊόντων WiMAX. Εκείνα που

περνούν τις δοκιμές συμμόρφωσης και διαλειτουργικότητας φέρουν την πιστοποίηση "WiMAX Forum Certified" και μπορούν να εμφανίζουν αυτό το σήμα. Μερικοί κατασκευαστές ισχυρίζονται ότι τα προϊόντα τους είναι "WiMAX-ready", "WiMAX-compliant», ή «pre-WiMAX», αν δεν είναι επισήμως πιστοποιημένα ως WiMAX Forum Certified.

Ένας άλλος ρόλος του WiMAX Forum είναι να προωθεί τη διάδοση της γνώσης σχετικά με το WiMAX. Για το σκοπό αυτό διαθέτει πιστοποιημένο πρόγραμμα κατάρτισης που προσφέρεται σήμερα στα αγγλικά και τα γαλλικά, καθώς και μια σειρά εκδηλώσεων για τα μέλη του και τη βιομηχανία γενικότερα.

- WiMAX Spectrum Owners Alliance (WiSOA)

Η WiSOA ήταν η πρώτη παγκόσμια οργάνωση που αποτελείται αποκλειστικά από τους ιδιοκτήτες του φάσματος WiMAX με στόχο την ανάπτυξη της τεχνολογίας WiMAX σε αυτές τις ζώνες. Η WiSOA επικεντρώθηκε στη ρύθμιση, στην εμπορευματοποίηση και στην ανάπτυξη του WiMAX φάσματος στα 2.3-2.5 GHz και στα 3.4-3.5 GHz. Τον Απρίλιο του 2008 η WiSOA συγχωνεύθηκε με την Wireless Broadband Alliance, μια ευρύτερη κοινοπραξία πολλών εταιριών τηλεπικοινωνιών, που στοχεύει στην ανάπτυξη και την καλύτερη δυνατή αξιοποίηση των νέων τεχνολογιών.

- Telecommunications Industry Association (TIA)

Το 2011, η TIA δημοσίευσε τρία τεχνικά πρότυπα (TIA-1164, TIA-1143, και TIA-1140), που καλύπτουν την εναέρια διεπαφή και θέματα δικτύωσης κορμού των συστημάτων WiMAX High-Rate Data Packet (HRPD) που χρησιμοποιούν ένα κινητό σταθμό/τερματικό πρόσβασης (MS/AT) με έναν πομπό.

4.6 Ανταγωνιστικές τεχνολογίες

Εντός της αγοράς, ο κύριος ανταγωνισμός του WiMAX προέκυψε από τα ήδη υπάρχοντα, ευρέως διαδεδομένα ασύρματα συστήματα όπως το UMTS, το CDMA2000, το WiFi και τα συστήματα mesh networking. Στο μέλλον, ο ανταγωνισμός θα προκύψει από την εξέλιξη των κυψελωτών συστημάτων επικοινωνιών σε συστήματα 4G, υψηλού εύρους ζώνης, με χαμηλό latency, με δίκτυα all-IP που θα παρέχουν και υπηρεσίες φωνής. Η παγκόσμια μετακίνηση προς το 4G από τα GSM/UMTS και AMPS/TIA (συμπεριλαμβανομένου του CDMA2000) είναι το πρότυπο 3GPP Long Term Evolution (LTE). Το πρότυπο LTE ολοκληρώθηκε το Δεκέμβριο του 2008, με την πρώτη εμπορική υλοποίηση να πραγματοποιείται από την TeliaSonera στο Όσλο και τη Στοκχόλμη, το Δεκέμβριο του 2009. Από τότε, το LTE έχει εμφανίσει αυξημένη υιοθέτηση από τις εταιρείες κινητής τηλεφωνίας σε όλο τον κόσμο. Ρόλο σε αυτό παίζει και το γεγονός ότι σε ορισμένες περιοχές του κόσμου, η ευρεία διαθεσιμότητα του UMTS και η γενική επιθυμία για τυποποίηση των επικοινωνιών συντέλεσε στη μη απόδοση φάσματος για το WiMAX: τον Ιούλιο του 2005, η κατανομή των συχνοτήτων για το WiMAX σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης σταμάτησε.

4.7 Εξέλιξη του WiMAX

Το πρότυπο IEEE 802.16m-2011 είναι η βασική τεχνολογία για το WiMAX 2. Το πρότυπο αυτό υποβλήθηκε στην ITU με στόχο να υιοθετηθεί ως πρότυπο κατηγορίας IMT-Advanced και είναι ένας από τους σημαντικότερους υποψηφίους για την πιστοποίηση αυτή. Το WiMAX Release 2 παρέχει προς τα πίσω συμβατότητα με το Release 1, δίνοντας τη δυνατότητα στους παρόχους WiMAX να μετακινηθούν στο νέο πρότυπο απλά αναβαθμίζοντας τις κάρτες δικτύου ή το λογισμικό. Προκειμένου αυτή η μετάβαση να γίνει όσο το δυνατόν ομαλότερα, έχει δημιουργηθεί η ομάδα WiMAX 2 Collaboration Initiative.

Μεταξύ των πολλών βελτιώσεων που διαθέτει σε σχέση με προηγούμενα πρότυπα, τα συστήματα IEEE 802.16m μπορούν να μεταφέρουν τέσσερις φορές πιο γρήγορα δεδομένα από ότι το WiMAX Release 1. Σχετικές δοκιμές και προσομοιώσεις έδειξαν ότι με τη χρήση κεραιοσυστημάτων MIMO 4x2 σε μια μικροκυψέλη σε αστικό περιβάλλον, με ένα μόνο κανάλι, εύρους ζώνης 20 MHz TDD, διαθέσιμο για το σύστημα, το πρότυπο 802.16m μπορεί να υποστηρίξει ρυθμούς μετάδοσης 120 Mbps στο downlink και 60 Mbps στο uplink ανά περιοχή ταυτόχρονα.

4.8 Παρεμβολές

Σχετικά με το μείζον θέμα των παρεμβολών, μια δοκιμή που διεξήχθη το 2009 από το SUIRG (Satellite Users Interference Reduction Group) με την υποστήριξη του Πολεμικού Ναυτικού των ΗΠΑ, το Παγκόσμιο Φόρουμ VSAT, και αρκετές οργανώσεις-μέλη κατέληξε στο συμπέρασμα ότι προκύπτουν παρεμβολές σε απόσταση 12 χιλιομέτρων, όταν χρησιμοποιούνται τα ίδια κανάλια για συστήματα WiMAX και για δορυφορικές επικοινωνίες στη ζώνη C (4-8 GHz).

4.9 Υλοποιήσεις εμπορικών δικτύων

Από τον Οκτώβριο του 2010, το WiMAX Forum υποστηρίζει ότι έχουν αναπτυχθεί πάνω από 592 δίκτυα WiMAX (mobile και fixed), σε πάνω από 148 χώρες, που καλύπτουν πάνω από 621 εκατομμύρια συνδρομητές, ενώ ο αριθμός αυτός έφτασε, το Φεβρουάριο του 2011, τους 823 εκατομμύρια συνδρομητές, με τις εκτιμήσεις να κάνουν λόγο για πάνω από 1 δισεκατομμύριο συνδρομητές μέχρι το τέλος του έτους.

Η πρώτη χώρα στην οποία δημιουργήθηκε δίκτυο WiMAX για εμπορικούς σκοπούς ήταν η Νότια Κορέα, κατά το 2ο τρίμηνο του 2006 και μέχρι το τέλος του 2008 υπήρχαν 350.000 συνδρομητές. Η περιοχή Ασίας-Ειρηνικού έχει, πλέον, ξεπεράσει την περιοχή της Βόρειας Αμερικής από πλευράς αριθμού συνδρομητών ευρυζωνικών ασύρματων 4G υπηρεσιών. Υπάρχουν περίπου 1.7 εκατομμύρια προ-WiMAX και WiMAX πελάτες στην Ασία - 29% της συνολικής αγοράς - σε σύγκριση με τα 1.4 εκατομμύρια στις ΗΠΑ και τον Καναδά.

Σχετικά με την Ελλάδα, ο ΟΤΕ έχει αναπτύξει δύο μεγάλα πιλοτικά δίκτυα WiMAX στην Αττική και στο Όρος Άθως, όμως δεν έχει ανακοινωθεί αν και πότε θα ξεκινήσει η εμπορική διάθεση αυτής της τεχνολογίας σε εθνικό επίπεδο.

Σε παγκόσμιο επίπεδο, από τις αρχές του 2010 WiMAX διαφάνηκε η αμφιταλάντευση μεταξύ του WiMAX και των άλλων διαθέσιμων τεχνολογιών, αν και η πρόσβαση στη Βόρεια Αμερική παρουσίασε υστέρηση. Η εταιρία Yota, ο μεγαλύτερος φορέας εκμετάλλευσης δικτύου WiMAX στον κόσμο το τέταρτο τρίμηνο του 2009, ανακοίνωσε το Μάιο του 2010, ότι θα κινηθεί προς την ανάπτυξη νέων δικτύων LTE και στη συνέχεια θα αλλάξει τα υπάρχοντα δίκτυα της. Τέλος, μια μελέτη που δημοσιεύθηκε το Σεπτέμβριο του 2010 από την Blycroft Publishing εκτίμησε ότι περίπου 800 συμβάσεις διαχείρισης από 364 επιχειρήσεις σε όλο τον κόσμο προσφέρουν ενεργά υπηρεσίες WiMAX (δηλαδή υπάρχει εμπορική διάθεση και όχι απλά αδειοδότηση).

5. LTE

Το LTE είναι ένα πρότυπο για ασύρματη επικοινωνία υψηλών ταχυτήτων δεδομένων για κινητά τηλέφωνα και τερματικά. Βασίζεται στα συστήματα **GSM/EDGE** και **UMTS/HSPA**, αυξάνοντας τη χωρητικότητα και την ταχύτητά τους με τη χρήση, μεταξύ άλλων, νέων τεχνικών διαμόρφωσης και κωδικοποίησης. Αναπτύσσεται από το **3GPP** (3rd Generation Partnership Project) και πρόκειται να είναι το πρώτο πλήρως παγκόσμιο τηλεφωνικό πρότυπο, αν και λόγω των διαφορετικών ζωνών συχνοτήτων σε κάθε ήπειρο, μόνο τα πολυζωνικά (multi-band) κινητά θα έχουν τη δυνατότητα χρήσης του παντού. Αν και εμπορικά, προωθείται σαν υπηρεσία 4ης γενιάς (4G), εντούτοις δεν ικανοποιεί τις τεχνικές απαιτήσεις του 3GPP που ορίζονται από την ITU-R στη λίστα χαρακτηριστικών IMT-Advanced, πράγμα που επιτυγχάνεται με το πρότυπο **LTE Advanced**.

5.1 Επισκόπηση

Το LTE (**Long Term Evolution**) είναι ένα πρότυπο για ασύρματη επικοινωνία δεδομένων, εξέλιξη των GSM/UMTS, που στοχεύει στην αύξηση της χωρητικότητας και της ταχύτητας μετάδοσης πληροφορίας των δικτύων κινητών επικοινωνιών. Αυτό υλοποιείται, αφ' ενός μεν με τη χρήση νέων τεχνικών και σχημάτων διαμόρφωσης και ψηφιακής επεξεργασίας σήματος (Digital Signal Processing – DSP), αφ' ετέρου δε με τον επανασχεδιασμό και την απλοποίηση της αρχιτεκτονικής του δικτύου προς ένα σύστημα βασισμένο σε IP (IP-based) με σημαντική μείωση της καθυστέρησης. Οι ασύρματες διεπαφές LTE είναι ασύμβατες με τα δίκτυα 2ης και 3ης γενιάς, επομένως θα πρέπει να λειτουργούν σε ξεχωριστό μέρος του φάσματος συχνοτήτων. Το LTE έχει τη δυνατότητα παροχής ρυθμών 300 Mbps στο downlink, 75 Mbps στο uplink και καθυστέρηση μετάδοσης μικρότερη από 5 ms, ενώ μπορεί να μεταδώσει multi-cast και broadband streams. Επίσης, υποστηρίζει υψηλότερες ταχύτητες χρηστών (κινητικότητα), κλιμακούμενο εύρος ζώνης (από 1.4 MHz ως 20 MHz), αμφιδρόμηση διαίρεσης συχνότητας (FDD) και αμφιδρόμηση διαίρεσης χρόνου (TDD). Η αρχιτεκτονική του IP-based δικτύου του LTE (EPC – Evolved Packet Core), που σχεδιάστηκε για να αντικαταστήσει το GPRS Core Network, υποστηρίζει αδιάλειπτη μετάδοση φωνής και δεδομένων, από ότι οι σταθμοί βάσης (base stations/cell towers) παλαιότερης τεχνολογίας, όπως GSM, UMTS και CDMA2000. Η απλούστερη αυτή αρχιτεκτονική μειώνει το λειτουργικό κόστος (π.χ. κάθε κυψέλη μπορεί να υποστηρίξει 4 φορές περισσότερα δεδομένα και φωνή σε σχέση με το HSPA).

5.2 Ιστορική αναδρομή

Το LTE προτάθηκε το 2004 στην Ιαπωνία και ολοκληρώθηκε το 2008 μετά από συνεργασία πολλών κατασκευαστών και εταιριών. Το πρώτο εμπορικά διαθέσιμο σύστημα λειτούργησε το 2009 στη Σουηδία και στη Νορβηγία σαν σύνδεση δεδομένων με ένα USB modem. Αν και αρχικά οι πάροχοι CDMA σχεδίαζαν την αναβάθμιση σε ανταγωνιστικά πρότυπα (UMB, WiMax), λόγω της παγκόσμιας αποδοχής του, το 2011 ξεκίνησαν υπηρεσίες LTE και στη βόρεια Αμερική. Η εξέλιξη του LTE, το LTE Advanced προτυποποιήθηκε το Μάρτιο του 2011 και αναμένεται να ξεκινήσει να λειτουργεί εμπορικά το 2013.

5.3 Χαρακτηριστικά

Στόχος του LTE είναι η αναβάθμιση του προτύπου 3G UMTS σε 4G και η απλοποίηση της αρχιτεκτονική του συστήματος, από ένα δίκτυο συνδυασμού μεταγωγής κυκλώματος και μεταγωγής πακέτου σε ένα flat δίκτυο **all-IP**. Η εναέρια διεπαφή (air interface) του LTE είναι το **E-UTRAN**, του οποίου τα κύρια χαρακτηριστικά είναι:

- Μέγιστος ρυθμός download 299.6 Mbps και upload 75.4 Mbps, ανάλογα με την κατηγορία του εξοπλισμού του χρήστη (κεραίες MIMO 4x4 και εύρος ζώνης καναλιού 20 MHz). Έχουν οριστεί 5 διαφορετικές τάξεις τερματικών, από μια τάξη προσανατολισμένη περισσότερο στην κινητή τηλεφωνία σε μια τάξη τερματικών πολύ υψηλών ρυθμών μετάδοσης. Όλες οι τάξεις μπορούν να επεξεργαστούν σήματα εύρους ζώνης 20 MHz.
- Χαμηλή καθυστέρηση μετάδοσης (<5ms) και μικρή διάρκεια έναρξης της σύνδεσης και διαπομπής
- Βελτιωμένη υποστήριξη κινητικότητας χρηστών, ακόμη και για ταχύτητες 350 km/h ή 500 km/h
- OFDMA για το downlink, SC-FDMA (Single-Carrier FDMA) για το uplink για εξοικονόμηση ενέργειας
- Υποστήριξη FDD, TDD και half-duplex FDD
- Υποστήριξη όλων των ζωνών συχνοτήτων των συστημάτων 3G
- Αυξημένη ευελιξία φάσματος: δυνατότητα επιλογής εύρους ζώνης μεταξύ των τιμών 1.4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz και 20 MHz
- Υποστήριξη κυψελών μεγάλης ποικιλίας μεγέθους: από φεμτο-κυψέλες και πικο-κυψέλες με ακτίνα μερικών δεκάδων μέτρων ως μακροκυψέλες ακτίνας 100 km. Για αγροτικές περιοχές οι οποίες θα χρησιμοποιούν χαμηλότερες συχνότητες, 5 km είναι η βέλτιστη ακτίνα κυψελών, 30 km για λογική απόδοση και 100 km για αποδεκτή απόδοση. Σε αστικά και προαστιακά περιβάλλοντα, όπου θα χρησιμοποιούνται υψηλότερες συχνότητες (π.χ. 2.6 GHz στην Ευρωπαϊκή Ένωση) για την υποστήριξη υψηλών ταχυτήτων κινητικότητας mobile broadband, οι κυψέλες μπορούν να είναι ακτίνας 1 km ή και λιγότερο
- Υποστήριξη τουλάχιστον 200 ενεργών χρηστών δεδομένων σε κάθε κανάλι εύρους 5 MHz
- Απλοποιημένη αρχιτεκτονική: η πλευρά δικτύου του E-UTRAN απαρτίζεται μόνο από eNodeBs
- Υποστήριξη διαλειτουργικότητας και συνύπαρξης με ήδη υπάρχοντα πρότυπα (π.χ. GSM/EDGE, UMTS και CDMA2000). Οι χρήστες θα πρέπει να μπορούν να ξεκινήσουν μια κλήση ή τη μεταφορά δεδομένων σε μια περιοχή που καλύπτεται από LTE και αν η κάλυψη δεν είναι ικανοποιητική να συνεχίζουν την επικοινωνία τους χωρίς καμία δική τους παρέμβαση χρησιμοποιώντας GSM/GPRS ή W-CDMA-based UMTS ή ακόμα 3GPP2 δίκτυα όπως cdmaOne ή CDMA2000.
- Ραδιοεπαφή μεταγωγής πακέτων
- Υποστήριξη **MBSFN (Multicast-Broadband Single Frequency Network)**. Με αυτό είναι δυνατή η παροχή Mobile TV χρησιμοποιώντας την υποδομή LTE, τεχνολογία ανταγωνιστική με το πρότυπο DVB-H.

5.4 Τηλεφωνικές κλήσεις

Το πρότυπο LTE υποστηρίζει μόνο μεταγωγή πακέτου σε all-IP δίκτυα, αντίθετα με τα πρότυπα GSM, UMTS και CDMA2000, τα οποία για τις κλήσεις υποστηρίζουν μεταγωγή κυκλώματος (CS – Circuit Switching), πράγμα που απαιτεί τον επανασχεδιασμό αυτού του τμήματος του δικτύου. Προς τούτο έχουν προταθεί τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις:

- VoLTE (Voice Over LTE): βασίζεται στο Υποσύστημα Πολυμέσων IP (IMS – IP Multimedia Subsystem)
- CSFB (Circuit Switched Fallback): με αυτή την προσέγγιση, το LTE απλά παρέχει υπηρεσίες δεδομένων και όταν χρειάζεται να ξεκινήσει ή να ληφθεί μια τηλεφωνική κλήση επιστρέφουμε στη μεταγωγή κυκλώματος. Αυτή η επιλογή πλεονεκτεί στην ευκολία υλοποίησης από πλευράς υποδομών, διότι απαιτεί μόνο την αναβάθμιση του MSC (Mobile Switching Center) και όχι την ανάπτυξη IMS, μειονεκτεί όμως στο ότι η καθυστέρηση της διαδικασίας έναρξης της κλήσης είναι αρκετά μεγάλη
- SVLTE (Simultaneous Voice and LTE): εδώ, το κινητό/τερματικό λειτουργεί ταυτόχρονα υπό LTE (για υπηρεσίες δεδομένων) και υπό CS (για τηλεφωνικές υπηρεσίες). Αυτή η επιλογή εξαρτάται αποκλειστικά από τη συσκευή του χρήστη (δεν έχει ειδικές απαιτήσεις από το δίκτυο ούτε απαιτεί την ανάπτυξη IMS) και ως εκ τούτου πιθανώς να αυξηθεί το κόστος και η κατανάλωση ενέργειας αυτής.

Μια άλλη λύση είναι η χρήση υπηρεσιών περιεχομένου Over-the-top (OTT – μεταφορά βίντεο και ήχου χωρίς οι ISPs να μπορούν να το ελέγξουν ή να το κατανεύσουν) όπως το Skype και το Google Talk για τις τηλεφωνικές κλήσεις. Αυτή η λύση όμως δύσκολα θα επιλεγεί, διότι οι τηλεφωνικές κλήσεις αποτελούν την κύρια πηγή εσόδων των παρόχων και ως εκ τούτου δεν θα επιτρέψουν να τις διαχειρίζεται κάποιος άλλος.

Οι περισσότεροι υποστηρικτές του LTE προτιμούσαν την επιλογή του VoLTE από την αρχή, όμως τεχνικές δυσκολίες και περιορισμοί του δικτύου οδήγησαν πολλούς παρόχους στο να προτιμήσουν τη λύση του VoLGA (Voice over LTE Generic Access) σαν ενδιάμεση. Η ιδέα ήταν να χρησιμοποιηθούν οι ίδιες βασικές αρχές με το GAN (Generic Access Network) που καθορίζει τα πρωτόκολλα με τα οποία ένα κινητό τερματικό μπορεί να πραγματοποιεί τηλεφωνικές κλήσεις μέσω μιας ιδιωτικής σύνδεσης Internet, συνήθως WLAN. Αυτή η επιλογή όμως δεν έτυχε μεγάλης υποστήριξης διότι το VoLTE (το IMS) υπόσχεται πιο ευέλικτες υπηρεσίες, παρά το υψηλό κόστος αναβάθμισης όλου του δικτύου και την απαίτηση για Single Radio Voice Call Continuity (SRVCC), προκειμένου να υπάρχει ομαλή μετάβαση σε δίκτυο 3G σε περιπτώσεις που η κάλυψη του LTE φτωχή.

Παρόλο που το VoLTE έχει προτυποποιηθεί για το μέλλον, η απαίτηση για τηλεφωνικές κλήσεις σήμερα έχει οδηγήσει τους παρόχους LTE στην υιοθέτηση του CSFB σαν προσωρινή λύση, δηλαδή κατά τη διάρκεια τηλεφωνικών κλήσεων τα κινητά LTE επιστρέφουν σε δίκτυα 2G ή 3G.

5.5 Φωνή Full-HD

Το ινστιτούτο Fraunhofer πρότεινε και ανέπτυξε φωνητικές κλήσεις “Full-HD”, δηλαδή εύρους βασικής ζώνης από 20 Hz ως 20 kHz (το πλήρες φάσμα που μπορεί να ακούσει το ανθρώπινο αυτί), σε αντίθεση με προηγούμενα συστήματα “HD voice” εύρους βασικής ζώνης 7 kHz ή τα συνηθισμένα συστήματα με εύρος βασικής ζώνης 3.5 kHz. Για να

πραγματοποιηθούν τέτοιες κλήσεις θα πρέπει να υποστηρίζουν αυτή την τεχνολογία τόσο οι συσκευές των χρηστών, όσο και το δίκτυο.

5.6 Ζώνες Συχνοτήτων

Το LTE μπορεί να κάνει χρήση πολλών διαφορετικών ζωνών συχνοτήτων: στη Βόρεια Αμερική πρόκειται να χρησιμοποιηθούν οι ζώνες των 700/800 MHz και 1700/1900 MHz, στην Ευρώπη οι ζώνες των 800, 1800, 2600 MHz, στην Ασία οι ζώνες των 1800 και 2600 MHz και στην Αυστραλία η ζώνη των 1800 MHz, με αποτέλεσμα να απαιτείται τα κινητά να είναι multi-band για να λειτουργούν παγκοσμίως. Επίσης, στη Βραζιλία δοκιμάζεται μια ειδική έκδοση του LTE στα 450 MHz κυρίως για τις αγροτικές περιοχές.

5.7 E-UTRAN

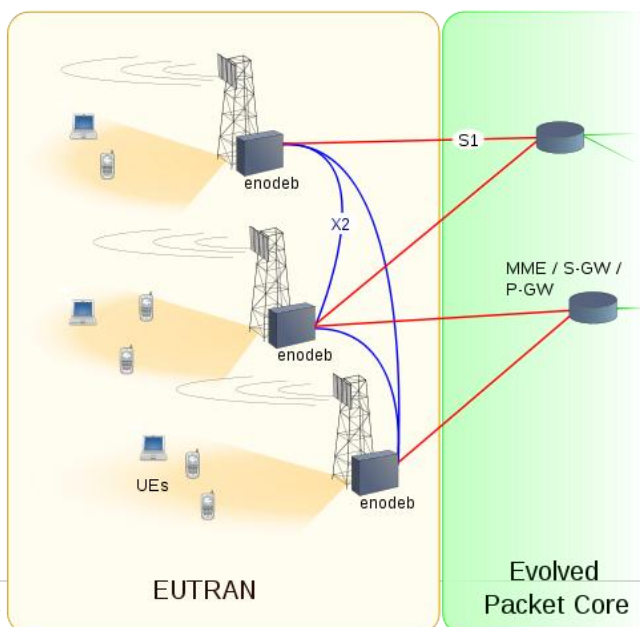
e-UTRAN (evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network – εξελιγμένο UMTS Δίκτυο Επίγειας Ασύρματης Πρόσβασης) είναι η εναέρια διεπαφή του LTE του 3GPP για τα δίκτυα κινητών επικοινωνιών, που πρόκειται να αντικαταστήσει τις τεχνολογίες UMTS, HSDPA και HSUPA και το οποίο παρέχει υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης, μικρότερη καθυστέρηση διάδοσης και βελτιωμένη μεταφορά πακέτων δεδομένων, χρησιμοποιώντας OFDMA για το downlink και SC-FDMA για το uplink.

5.7.1 Χαρακτηριστικά

- Για το LTE, μέγιστος ρυθμός downlink, με εύρος ζώνης 20 MHz ανά κανάλι, 150.8 Mbps για κεραιοσυστήματα 2x2 και 299.6 Mbps για κεραιοσυστήματα 4x4. Το LTE Advanced υποστηρίζει συστήματα MIMO 8x8 με μέγιστο ρυθμό downlink 2998.6 Mbps σε κανάλια των 100 MHz
- Μέγιστος ρυθμός uplink, στο LTE, 75.4 Mbps για κανάλια εύρους ζώνης 20 MHz και στο LTE Advanced 1497.8 Mbps για κανάλια των 100 MHz
- Αυξημένη φασματική απόδοση, περίπου 2-5 φορές μεγαλύτερη από το 3GPP (HSPA) release 6

5.7.2 Λόγος Δημιουργίας e-UTRA

Παρόλο που το UMTS, με τα HSDPA και HSUPA, καθώς και το HSPA+ (εξέλιξη του HSPA) προσφέρουν υψηλούς ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων, η απαίτηση για ασύρματη πρόσβαση αναμένεται να συνεχίσει να αυξάνεται σημαντικά στα επόμενα χρόνια λόγω της αυξημένης προσφοράς και ζήτησης τέτοιων υπηρεσιών, καθώς και λόγω του διαρκούς μειούμενου τελικού κόστους στον χρήστη. Αυτή η αύξηση απαιτεί όχι μόνο ταχύτερα δίκτυα και ασύρματες διεπαφές, αλλά και



υψηλότερη απόδοση από άποψη κόστους και φάσματος σε σχέση με τα ήδη υπάρχοντα πρότυπα. Για το λόγο αυτό η κοινοπραξία 3GPP έθεσε τις απαιτήσεις για μια νέα ασύρματη διεπαφή (e-UTRAN) και ένα εξελιγμένο δίκτυο κορμού (SAE – System Architecture Evolution), ώστε να είναι δυνατή η παροχή **quadruple play** υπηρεσιών (κινητή τηλεφωνία, υψηλής ταχύτητας διαδραστικές εφαρμογές, μεταφορά μεγάλου όγκου δεδομένων και feature-rich IPTV), με υποστήριξη αυξημένης κινητικότητας χρηστών.

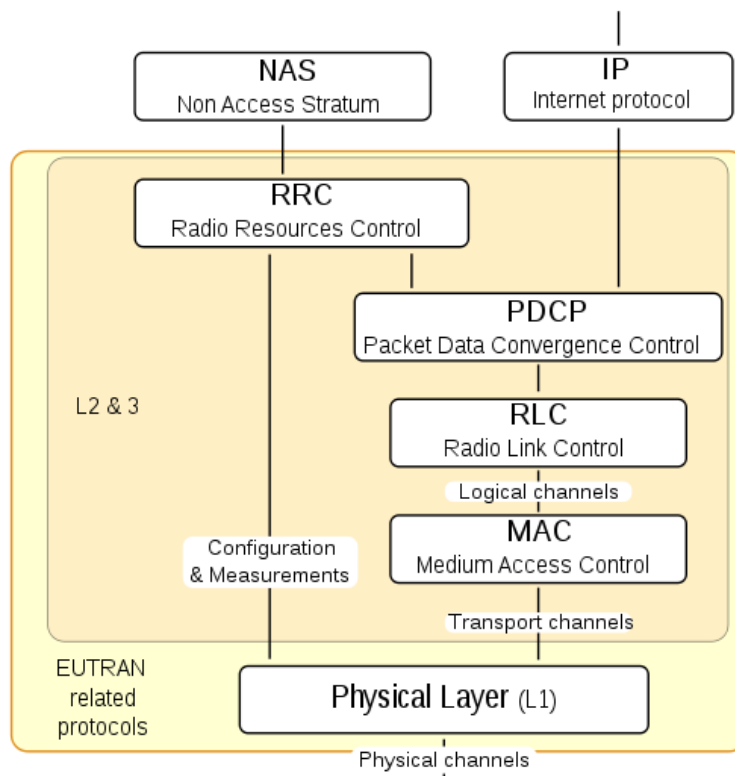
5.7.3 Αρχιτεκτονική

Το e-UTRAN αποτελείται μόνο από eNodeBs στην πλευρά του δικτύου. Κάθε eNodeB έχει παρόμοιο ρόλο με το NodeB και το RNC (Radio Network Controller – Ελεγκτής Ασύρματου Δικτύου) μαζί στο UTRAN, στοχεύοντας στην ταχύτερη λειτουργία του δικτύου. Τα eNodeBs συνδέονται μεταξύ τους μέσω της διεπαφής X2 και με το δίκτυο κορμού μεταγωγής πακέτων μέσω της διεπαφής S1, όπως φαίνεται στο προηγούμενο σχήμα.

5.7.4 Στοιβά πρωτοκόλλων του e-UTRAN

Αποτελείται από:

- **Φυσικό στρώμα:** μεταφέρει όλη την πληροφορία από τα κανάλια μεταφοράς του υποστρώματος MAC, μέσω της ασύρματης διεπαφής. Φροντίζει για την ACM (Adaptive Coding and Modulation – Προσαρμοστική Κωδικοποίηση και Διαμόρφωση), τον έλεγχο ισχύος, την αναζήτηση κυψελών (για αρχικό συγχρονισμό και διαδικασίες διαπομπής) και άλλες μετρήσεις για το στρώμα RRC.
- **MAC:** το υπόστρωμα MAC προσφέρει τα λογικά κανάλια στο υπόστρωμα RLC τα οποία πολυπλέκει στα κανάλια μεταφοράς του φυσικού στρώματος, διαχειρίζεται τη διόρθωση λαθών HARQ, χειρίζεται την προτεραιότητα των λογικών καναλιών για την ίδια συσκευή χρήστη και το δυναμικό προγραμματισμό επικοινωνίας μεταξύ των συσκευών των χρηστών.
- **RLC:** ρόλος του υποστρώματος RLC (Radio Link Control – Έλεγχος Ασύρματης Ζεύξης) είναι να μεταφέρει τις PDUs (Protocol Data Units – Μονάδες Δεδομένων Πρωτοκόλλου). Μπορεί να λειτουργήσει με 3 διαφορετικούς τρόπους ανάλογα με την παρεχόμενη αξιοπιστία και μπορεί να παρέχει: διόρθωση λαθών ARQ, θρυμματισμό/επανένωση των PDUs, αναδιάταξη της σειράς μεταφοράς αυτών, ανίχνευση αντιγράφων κ.λπ.
- **PDCP (Packet Data Convergence Control – Έλεγχος Σύγκλισης Πακέτων Δεδομένων):** αναλαμβάνει τη μεταφορά των δεδομένων του στρώματος RRC με κωδικοποίηση και



προστασία ακεραιότητας. Για το στρώμα IP, αναλαμβάνει επίσης τη μεταφορά των IP πακέτων, με συμπίεση επικεφαλίδας ROHC, κωδικοποίηση και ανάλογα με τον τύπο λειτουργίας του RLC, αναδιάταξη της σειράς παράδοσης, ανίχνευση αντιγράφων και επαναμεταφορά των SDUs (Service Data Unit – Μονάδα Δεδομένων Υπηρεσίας) του κατά τη διάρκεια της διαπομπής.

- **RRC** (Radio Resources Control – Έλεγχος Ασύρματων Πόρων): μεταξύ άλλων φροντίζει για τις πληροφορίες του συστήματος μετάδοσης που σχετίζονται με το Στρώμα Πρόσβασης (Access Stratum – AS), δηλαδή το στρώμα δικτύου του UMTS και τη μεταφορά των μηνυμάτων του Στρώματος Μη-Πρόσβασης (Non-Access Stratum – NAS), δηλαδή του στρώματος ζεύξης του UMTS, την σελιδοποίηση, την εγκατάσταση και διακοπή της σύνδεσης RRC, τη διαχείριση των κλειδιών ασφαλείας, την διαπομπή, τις μετρήσεις της συσκευής του χρήστη που σχετίζονται με την κινητικότητα του, την ποιότητα της υπηρεσίας (QoS) κ.α.

Γειτονικά στρώματα των παραπάνω είναι τα:

- **NAS**: είναι το πρωτόκολλο μεταξύ της συσκευής χρήστη (**user equipment**) και του **MME** (**Mobility Management Entity – Οντότητα Διαχείρισης Κινητικότητας**) στην πλευρά του δικτύου. Μεταξύ άλλων ελέγχει την αυθεντικότητα της συσκευής χρήστη, την ασφάλεια και δημιουργεί μέρος των μηνυμάτων σελιδοποίησης.
- **IP** (**Internet Protocol**).

5.7.5 Λεπτομέρειες για το Φυσικό Στρώμα (L1)

Το e-UTRAN χρησιμοποιεί διαμόρφωση OFDM, κεραιοσυστήματα MIMO ανάλογα με την κατηγορία του τερματικού και μπορεί να χρησιμοποιηθεί διαμόρφωση δέσμης (beamforming) στη ζεύξη downlink για υποστήριξη περισσότερων χρηστών, παροχή υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης και χαμηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις των συσκευών. Στο uplink το LTE χρησιμοποιεί OFDMA και μια προκωδικοποιημένη έκδοση του OFDM που λέγεται SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access), ανάλογα με το κανάλι, προκειμένου να αντισταθμιστούν τα μειονεκτήματα του απλού OFDM, το οποίο έχει πολύ υψηλό λόγο μέγιστης προς μέσης ισχύος (PARP – Peak-to-Average Power Ratio) και ως εκ τούτου απαιτεί ακριβότερο και μη αποδοτικό ενεργειακά εξοπλισμό (απόλυτα γραμμικούς ενισχυτές ισχύος). Για το uplink, στα releases 8 και 9 υποστηρίζονται τα Multi-User MIMO και Spatial Division Multiple Access (SDMA), ενώ στο release 10 εισάγεται η υποστήριξη για Single-User MIMO. Τόσο στο OFDM όσο και στο SC-FDMA, ένα κυκλικό πρόθεμα προστίθεται στα προς μετάδοση σύμβολα, με μήκος είτε 4.7 μs, είτε 16.6 μs, ανάλογα με το κανάλι μετάδοσης, το μέγεθος της κυψέλης και το περιβάλλον διάδοσης.

Το LTE υποστηρίζει τόσο FDD όσο και TDD (το οποίο συνδυάζεται με TD-SCDMA – Time-Division Synchronous Code Division Multiple Access) και μάλιστα το hardware τόσο των κινητών όσο και των σταθμών βάσης μπορεί να είναι ίδιο για απλότητα και οικονομία.

Στο πεδίο του χρόνου, τα πλαίσια έχουν μήκος 10 ms και αποτελούνται από 10 υπο-πλαίσια του 1 ms το καθένα. Για υπο-πλαίσια μη MBMS (Multimedia Broadcast Multicast Service), ο διαχωρισμός συχνοτήτων των υπο-φερόντων είναι 15 kHz. Δώδεκα από αυτά τα υπο-φέροντα μαζί σχηματίζουν ένα μπλοκ πόρων (resource block - RB). Σε ένα

τερματικό LTE μπορεί να αποδοθεί στο downlink ή στο uplink τουλάχιστον ένα μπλοκ πόρων κατά τη διάρκεια ενός υπο-πλαίσιου.

Όλα τα δεδομένα προς μετάδοση στο στρώμα L1 κωδικοποιούνται με κώδικες turbo και με εσωτερική παρεμβολή κωδίκων turbo QPP. Στο downlink χρησιμοποιείται HARQ με 8 (FDD) ή μέχρι 15 (TDD) διαδικασίες και στο uplink μέχρι 8 διαδικασίες.

5.8 LTE Advanced

Πρόκειται για ένα εντελώς νέο πρότυπο κινητών επικοινωνιών, μια σημαντική αναβάθμιση του LTE, που προτάθηκε ως υποψήφιο σύστημα 4G στην ITU-T στο τέλος του 2009, εγκρίθηκε ότι πληροί τις απαιτήσεις IMT-Advanced και τελειοποιήθηκε από το 3GPP το Μάρτιο του 2011.

5.8.1 Υπόβαθρο

Το πρότυπο LTE, το οποίο περιγράφηκε ως 3.9G (πέρα από 3G αλλά πριν το 4G), εξελίχθηκε σε μια κατάσταση όπου πλέον οι αλλαγές στα χαρακτηριστικά του περιορίζονται σε διορθώσεις bugs, με αποτέλεσμα να μη μπορεί να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις του 4G, όπως ρυθμοί μεταφοράς της τάξης του 1 Gbps. Το 3GPP ξεκίνησε να εργάζεται πάνω στον ορισμό ενός συστήματος 4G με το release 9, σύμφωνα με το οποίο ένα σύστημα 4^{ης} γενιάς θα πρέπει να υποστηρίζει προς τα πίσω συμβατότητα με το LTE, ταχύτερη εναλλαγή μεταξύ ενεργειακών καταστάσεων και βελτιωμένη απόδοση στα όρια των κυψελών.

5.8.2 Προτάσεις

Ο στόχος του 3GPP LTE Advanced είναι να φτάσει και να ξεπεράσει τις απαιτήσεις της ITU. Το LTE Advanced θα πρέπει να είναι συμβατό με τον αρχικό εξοπλισμό LTE και να λειτουργεί στις ίδιες συχνότητες. Το μεγάλο του πλεονέκτημα είναι η ικανότητα να εκμεταλλεύεται δίκτυα αναβαθμισμένης τοπολογίας (βελτιστοποιημένα ετερογενή δίκτυα μαζί με μακροκυψέλες, πικοκυψέλες και φεμτοκυψέλες και νέους κόμβους αναμετάδοσης) ώστε να προσφέρεται μεγαλύτερη χωρητικότητα και κάλυψη καθώς και υψηλότεροι ρυθμοί μετάδοσης χρησιμοποιώντας κανάλια εύρους ζώνης μέχρι και 100 MHz. Οι προτάσεις σχετικά με το LTE Advanced μπορούν να κατηγοριοποιηθούν στα εξής:

- Υποστήριξη σταθμών βάσης με κόμβους αναμετάδοσης
- Εκπομπή και μετάδοση Συντονισμένων Πολλαπλών Σημείων (Coordinated Multipoint)
- Εξοπλισμός χρήστη με διπλή κεραία πομπού για SU-MIMO και MIMO διαφορισμού
- Κλιμακούμενο εύρος ζώνης, μεγαλύτερο των 20 MHz ως 100 MHz
- Ομαδοποίηση φερόντων από γειτονικές ή μη περιοχές του φάσματος
- Βελτιστοποίηση της εναέριας διεπαφής σε τοπική κλίμακα
- Καλύτερη υποστήριξη της κινητικότητας των χρηστών σε μικρής ή μεγαλύτερης ακτίνας δίκτυα
- Ευέλικτη χρήση του φάσματος
- Γνωστικές ραδιοεπικοινωνίες (Cognitive Radio)
- Αυτόματη και αυτόνομη ρύθμιση και λειτουργία του δικτύου
- Αυτόνομος έλεγχος και μετρήσεις του δικτύου και των συσκευών

- Ενισχυμένη προ-κωδικοποίηση και FEC (Forward Error Correction)
- Διαχείριση και αντιμετώπιση παρεμβολών
- Ασύμμετρη κατανομή του φάσματος για το FDD
- Υβριδική λειτουργία OFDMA και SC-FDMA στο uplink
- Αυξημένη συνεργασία μεταξύ των eNodeBs
- Μεθοδολογίες Αυτο-Οργανωμένων Δικτύων (Self-Organized Networks – SONs)
- Υποστήριξη πολλαπλών φερόντων

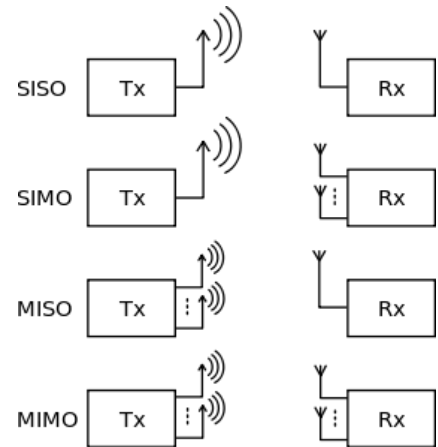
Το LTE Advanced μπορεί να κάνει χρήση κεραιοσυστημάτων MIMO 8x8 και σχήματος διαμόρφωσης 128 QAM, με ενοποιημένο εύρος ζώνης 100 MHz για παροχή ρυθμών μετάδοσης περίπου 3.3 Gbps ανά τομέα του σταθμού βάσης κάτω από ιδανικές συνθήκες.

5.8.3 Πρώτες παρουσιάσεις της τεχνολογίας

Το Φεβρουάριο του 2007, η ιαπωνική εταιρία τηλεπικοινωνιών NTT DoCoMo ανακοίνωσε την ολοκλήρωση της δοκιμής δικτύου 4G, όπου πέτυχε μέγιστο ρυθμό μετάδοσης περίπου 5 Gbps στο downlink χρησιμοποιώντας κανάλια εύρους ζώνης 100 MHz προς ένα κινητό σταθμό κινούμενο με ταχύτητα 10 km/h. Το Φεβρουάριο του 2011 στο Mobile World Congress, η Agilent Technologies παρουσίασε τις πρώτες βιομηχανικές λύσεις LTE-Advanced τόσο για την παραγωγή του σήματος όσο και για την ανάλυσή του. Τέλος, στις 9 Οκτωβρίου του 2012, η ρώσικη εταιρία τηλεπικοινωνιών Yota ξεκίνησε για πρώτη φορά την εμπορική εφαρμογή της τεχνολογίας, σε 11 σταθμούς βάσης της γύρω από τη Μόσχα. Ωστόσο συμβατές συσκευές χρήστη (smartphones, usb dongles κ.λπ.) δεν πρόκειται να είναι διαθέσιμα μέχρι το πρώτο εξάμηνο του 2013.

6. MIMO

Ο όρος MIMO, από τα αρχικά των λέξεων Multiple-Input and Multiple-Output (Πολλαπλή Είσοδος και Πολλαπλή Έξοδος), αναφέρεται στη χρήση πολλαπλών κεραιών, τόσο στον πομπό, όσο και στο δέκτη για τη βελτίωση της επίδοσης ενός ασύρματου τηλεπικοινωνιακού συστήματος. Αποτελεί μια μορφή της τεχνολογίας των έξυπνων κεραιών (smart antennas) στο πεδίο της διαφορικής λήψης χώρου (space/antenna diversity) και τα τελευταία χρόνια έχει προσελκύσει την προσοχή των επιστημόνων και των κατασκευαστών, διότι προσφέρει σημαντική αύξηση στη διαπερατότητα και την ακτίνα κάλυψης ενός συστήματος, χωρίς να απαιτείται κάποια αύξηση στο εύρος ζώνης ή στην ισχύ εκπομπής. Αυτό επιτυγχάνεται με την κατανομή της ίδιας συνολικής ισχύος εκπομπής επί των κεραιών και την εκμετάλλευση, αφ' ενός μεν του κέρδους διάταξης (array gain) που προκύπτει, βελτιώνοντας τη φασματική απόδοση, αφ' ετέρου δε του κέρδους διαφορισμού (diversity gain) που βελτιώνει την αξιοπιστία της ζεύξης (μειωμένη εξασθένηση). Λόγω των ιδιοτήτων αυτών, η τεχνολογία MIMO είναι ένα σημαντικό μέρος των σύγχρονων προτύπων ασύρματης επικοινωνίας, όπως είναι τα 802.11n (Wi-Fi), LTE, WiMAX και HSPA+, καθώς και κάθε νέου προτύπου που θα προκύψει στο μέλλον.



6.1 Ιστορική αναδρομή

- Αρχικές ιδέες

Οι πρώτες ιδέες σχετικά με τα MIMO αναφέρονται στις εργασίες των A.R. Kaye και D.A. George (1970), των Branderburg και Wyner (1974), και του W. Van Etten (1975, 1976). Επίσης, οι Jack Winters και Jack Salz των Bell Laboratories δημοσίευσαν διάφορες σχετικές εργασίες για εφαρμογές beamforming το 1984 και το 1986. Οι Arogyaswami Paulraj (Stanford University) και Thomas Kailath (Stanford University) εισήγαγαν την έννοια της χωρικής πολυπλεξίας (Spatial Multiplexing) με τη χρήση MIMO το 1993. Το δίπλωμα ευρεσιτεχνίας τους στις ΗΠΑ, το 1994, έδωσε έμφαση σε εφαρμογές της τεχνολογίας αυτής σε συστήματα ασύρματης μετάδοσης. Το 1996, οι Greg Raleigh και Gerard Foschini πρότειναν νέες προσεγγίσεις για την τεχνολογία MIMO, λαμβάνοντας υπόψη μια διαμόρφωση όπου οι πολλαπλές κεραίες εκπομπής «συστεγάζονται» σε ένα πομπό για τη βελτίωση της διαπερατότητας. Τα Bell Labs ήταν τα πρώτα που παρουσίασαν ένα εργαστηριακό πρωτότυπο, το 1998, όπου η χωρική πολυπλεξία είναι η κύρια τεχνολογία για τη βελτίωση της απόδοσης των συστημάτων MIMO.

- Ασύρματα πρότυπα

Στον εμπορικό τομέα, η εταιρία Iospan Wireless ανέπτυξε το πρώτο εμπορικό σύστημα το 2001, που χρησιμοποιούσε MIMO με τεχνολογία OFDMA (MIMO-OFDMA) και υποστήριζε τόσο coding diversity (διαφορισμός κωδικοποίησης), όσο και χωρική πολυπλεξία. Το 2005, η

εταιρία Airgo Networks ανέπτυξε μια εφαρμογή ενός προτύπου, πρόγονου του IEEE 802.11n, ενώ το 2006, αρκετές εταιρείες (συμπεριλαμβανομένων των Broadcom, Intel και Marvell), δημιούργησαν μια εφαρμογή MIMO-OFDM με βάση ένα προ-πρότυπο του 802.11n. Την ίδια χρονιά, άλλες εταιρείες (Beceem Communications, Samsung, Runcom Technologies κ.λπ.) ανέπτυξαν MIMO-OFDMA λύσεις που βασίζονται στο πρότυπο IEEE 802.16e (mobile WiMAX). Όλα τα επερχόμενα συστήματα 4G θα χρησιμοποιούν επίσης τεχνολογία MIMO, με τις ταχύτητες μετάδοσης να φτάνουν πάνω από 1 Gbps.

6.2 Λειτουργίες των MIMO

Οι τρόποι λειτουργίας των MIMO μπορούν να υποδιαιρεθούν σε τρεις βασικές κατηγορίες: προκωδικοποίηση, χωρική πολυπλεξία και διαφορισμός κωδικοποίησης. Η **προκωδικοποίηση**, ορισμένη αυστηρά, είναι η διαμόρφωση δέσμης πολλαπλών ροών (multi-stream beamforming). Γενικότερα, θεωρείται μια εντελώς χωρική επεξεργασία που συμβαίνει στον πομπό. Κατά τη διαμόρφωση δέσμης, το ίδιο σήμα εκπέμπεται από καθεμία από τις κεραιές εκπομπής με κατάλληλη (διαφορετική για κάθε κεραιά) φάση και μερικές φορές κέρδος, έτσι ώστε η ισχύς του σήματος να μεγιστοποιείται στην είσοδο του δέκτη. Τα οφέλη της διαμόρφωσης δέσμης είναι η αύξηση της απολαβής του λαμβανόμενου σήματος, κάνοντας τα σήματα που εκπέμπονται από διαφορετικές κεραιές να αθροίζονται εποικοδομητικά, και η μείωση της επίδρασης της πολυδιαδρομικής διάδοσης. Σε περίπτωση απουσίας σκέδασης, η διαμόρφωση δέσμης έχει ως αποτέλεσμα ένα καλά καθορισμένο διάγραμμα ακτινοβολίας, αλλά σε ένα τυπικό περιβάλλον λειτουργίας αυτό δε συμβαίνει. Όταν ο δέκτης έχει πολλαπλές κεραιές, η διαμόρφωση δέσμης από τον πομπό δεν μπορεί να μεγιστοποιήσει ταυτόχρονα το επίπεδο του σήματος σε όλες τις κεραιές λήψης και έτσι χρησιμοποιείται προκωδικοποίηση πολλαπλών ροών (multi-stream beamforming). Σημειώνεται, τέλος, ότι η προκωδικοποίηση απαιτεί τη γνώση των Πληροφοριών Κατάστασης Καναλιού (Channel State Information – CSI) στον πομπό.

Η **χωρική πολυπλεξία** απαιτεί τη διαμόρφωση των κεραιών κατά MIMO. Έτσι, ένα σήμα υψηλού ρυθμού μετάδοσης χωρίζεται σε πολλαπλές ροές χαμηλότερου ρυθμού μετάδοσης, με καθεμιά εξ' αυτών να μεταδίδεται από διαφορετική κεραιά εκπομπής στο ίδιο κανάλι συχνότητας. Εάν αυτά τα σήματα φθάσουν στο κεραιοσύστημα του δέκτη με αρκούντως διαφορετικές «χωρικές υπογραφές», ο δέκτης μπορεί να διαχωρίσει αυτές τις ροές σε (σχεδόν) παράλληλους διαύλους, ανάλογα, βέβαια και με τον προγραμματισμό που έχει γίνει. Η χωρική πολυπλεξία είναι μια πολύ ισχυρή τεχνική για την αύξηση της χωρητικότητας σε διαύλους υψηλότερου λόγου σήματος-προς-θόρυβο (SNR) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ή χωρίς τη γνώση του διαύλου. Ο μέγιστος αριθμός των χωρικών ροών περιορίζεται από τον αριθμό των κεραιών στον πομπό ή στο δέκτη. Η χωρική πολυπλεξία μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί και για την ταυτόχρονη μετάδοση προς πολλαπλούς δέκτες, τεχνική που είναι γνωστή ως Πολλαπλή Πρόσβαση Διαίρεσης Χώρου (Space Division Multiple Access – SDMA) ή multi-user MIMO.

Οι τεχνικές **διαφορισμού κωδικοποίησης** χρησιμοποιούνται όταν δεν υπάρχει γνώση του διαύλου στον πομπό. Στις μεθόδους αυτές μεταδίδεται μια ενιαία ροή (σε αντίθεση με τις πολλαπλές ροές στη χωρική πολυπλεξία), αλλά το σήμα είναι κωδικοποιημένο με τη χρήση τεχνικών κωδικοποίησης χώρου-χρόνου. Το σήμα εκπέμπεται από καθεμία από τις κεραιές

εκπομπής με πλήρως ή μερικώς ορθογώνια κωδικοποίηση. Η κωδικοποίηση διαφορισμού εκμεταλλεύεται την ανεξάρτητη εξασθένιση των πολλαπλών διαύλων για την ενίσχυση της ποικιλομορφίας του σήματος και επειδή δεν υπάρχει γνώση του καναλιού, δεν υφίσταται και διαμόρφωση δέσμης ή κέρδος διάταξης.

Εκτός από τη μεμονωμένη εφαρμογή των προαναφερθεισών λειτουργιών, μπορούν, βεβαίως, να υπάρξουν και συνδυασμοί αυτών, ανάλογα με τις συνθήκες. Όταν το κανάλι είναι γνωστό στον πομπό, η χωρική πολυπλεξία μπορεί να συνδυαστεί με προκωδικοποίηση, ενώ, όταν είναι επιθυμητή η αξιοπιστία στην κωδικοποίηση, η χωρική πολυπλεξία μπορεί να συνδυαστεί με την κωδικοποίηση διαφορισμού.

6.3 Μορφές των MIMO

6.3.1 Τύποι Πολλαπλών Κεραίων (Multi-antenna)

Η τεχνολογία των πολλαπλών κεραιών (multi-antenna MIMO ή single-user MIMO) έχει ήδη αναπτυχθεί και εφαρμοστεί σε ορισμένα πρότυπα, π.χ. στο 802.11n.

- Οι τύποι SISO (Single Input Single Output)/SIMO (Single Input Multiple Output)/MISO (Multiple Input Single Output) είναι εκφυλισμένες περιπτώσεις MIMO
 - ▶ Στην περίπτωση SISO, ούτε ο πομπός ούτε δέκτης έχουν πολλαπλές κεραίες.
 - ▶ Στην περίπτωση SIMO, ο πομπός έχει μια μοναδική κεραία.
 - ▶ Στην περίπτωση MISO, ο δέκτης έχει μία μοναδική κεραία.
- Κύριες τεχνικές single-user MIMO
 - ▶ Bell Laboratories Layered Space-Time (BLAST), Gerard. J. Foschini (1996)
 - ▶ Per Antenna Rate Control (PARC), Varanasi, Guess (1998), Chung, Huang, Lozano (2001)
 - ▶ Selective Per Antenna Rate Control (SPARC), Ericsson (2004)
- Συνήθεις περιορισμοί
Η χωρική απόσταση μεταξύ των κεραιών απαιτείται να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη, αυτό όμως δεν είναι τόσο εύκολο να επιτευχθεί στο δέκτη (π.χ. κινητά τηλέφωνα), αν και διερευνώνται προηγμένες τεχνικές σχεδιασμού κεραιών και νέοι αλγόριθμοι για τη μείωση των επιπτώσεων του προβλήματος της στενότητας χώρου.

6.3.2 Τύποι Πολλαπλών Χρηστών (Multi-user)

Κατά τη μορφή αυτή, διαφορετικοί μεταξύ τους χρήστες θεωρούνται ως χωρικά κατανομημένες πηγές εκπομπής και αντιμετωπίζονται ως μια ενιαία οντότητα από το σύστημα, με κόστος, φυσικά, την κατακόρυφη αύξηση της πολυπλοκότητας αυτού. Αντίθετα, κατά τη μορφή single-user MIMO, κάθε χρήστης είναι διαφορετική οντότητα και η τεχνική MIMO αφορά στην ύπαρξη πολλαπλών κεραιών στην συσκευή κάθε χρήστη.

Τα αποτελέσματα της έρευνας σχετικά με την τεχνολογία multi-user MIMO έχουν, μόλις πρόσφατα, αρχίσει να εμφανίζονται. Ενώ η περίπτωση full multi-user MIMO (ή network MIMO) μπορεί να έχει μεγαλύτερες δυνατότητες, πρακτικά, η έρευνα για την περίπτωση (partial) multi-user MIMO (ή multi-user και multi-antenna MIMO) είναι πιο έντονη.

- Multi-user MIMO (MU-MIMO)

- ▶ Στα πρόσφατα πρότυπα των 3GPP και WiMAX, η τεχνική MU-MIMO αντιμετωπίζεται ως μία από τις υποψήφιες τεχνολογίες προς υιοθέτηση από έναν αριθμό εταιρειών, συμπεριλαμβανομένων των Samsung, Intel, Qualcomm, Ericsson, TI, Huawei, Philips, Alcatel-Lucent και Freescale. Για τις εταιρίες αυτές, καθώς και για άλλες που δραστηριοποιούνται στην αγορά της κινητής τηλεφωνίας, η τεχνική MU-MIMO είναι πιο εφικτή για τα κινητά τηλέφωνα λόγω της χαμηλής πολυπλοκότητας αυτών, με τη χρήση ενός μικρού αριθμού κεραιών λήψης, ενώ η τεχνική SU-MIMO ταιριάζει καλύτερα σε πιο σύνθετες συσκευές χρήστη, με περισσότερες κεραιές, για την επίτευξη υψηλότερου επιπέδου διαπερατότητας (throughput).
- ▶ Η τεχνική PU²RC (Per-User Unitary Rate Control) επιτρέπει στο δίκτυο να διαθέσει κάθε κεραία σε διαφορετικό χρήστη, αντί της διάθεσης όλων των κεραιών σε ένα μόνο χρήστη, στην περίπτωση single-user MIMO. Το δίκτυο μπορεί να μεταδώσει δεδομένα με βάση συγκεκριμένους τρόπους χωρικής κωδικοποίησης των δεσμών ή με τη χρήση μιας εικονικής κεραίας. Ο αποτελεσματικός προγραμματισμός των χρηστών, όπως π.χ. η σύζευξη χωρικά διακριτών χρηστών, συζητείται, επίσης, για την απλούστευση των ασύρματων δικτύων από άποψη πρόσθετων απαιτήσεων για ασύρματους πόρους και πολυπλοκότερης διαδικασίας τροποποίησης των πρωτοκόλλων.
- ▶ Enhanced multi-user MIMO: Χρησιμοποιεί προηγμένες τεχνικές προ- και από-κωδικοποίησης
- ▶ Ο όρος SDMA αντιπροσωπεύει είτε την πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης χώρου, είτε την πολλαπλή πρόσβαση super-διαίρεσης, όπου η λέξη super τονίζει ότι δεν χρησιμοποιείται ορθογώνια διαίρεση όπως η διαίρεση συχνότητας ή χρόνου, αλλά μη ορθογώνιες προσεγγίσεις, όπως κωδικοποίηση επαλληλίας.
- Cooperative MIMO (CO-MIMO)
Χρησιμοποιεί κατανομημένες κεραιές που ανήκουν σε άλλους χρήστες.
- Δρομολόγηση MIMO
Ο όρος «δρομολόγηση MIMO» αναφέρεται στη δρομολόγηση προς μια ομάδα χρηστών σε κάθε βήμα, όπου ο αριθμός των κόμβων κάθε ομάδας είναι μεγαλύτερος ή ίσος του ένα. Η δρομολόγηση MIMO διαφέρει από τη συμβατική (SISO) δρομολόγηση, κατά την οποία γίνεται προσπέλαση ενός μόνο κόμβου σε κάθε βήμα.

6.4 Εφαρμογές των MIMO

Οι τεχνικές χωρικής πολυπλεξίας κάνουν τους δέκτες πολύ σύνθετους και συνεπώς, συνήθως συνδυάζονται με διαμόρφωση OFDM ή πολλαπλή πρόσβαση OFDMA, όπου τα προβλήματα που δημιουργούνται από την πολυδιαδρομική διάδοση αντιμετωπίζονται αποτελεσματικά. Το πρότυπο IEEE 802.16e ενσωματώνει MIMO-OFDMA, ενώ το πρότυπο IEEE 802.11n χρησιμοποιεί MIMO-OFDM. Η τεχνολογία MIMO σχεδιάζεται επίσης να χρησιμοποιηθεί σε πρότυπα κινητών ραδιοεπικοινωνιών, όπως στα πρόσφατα 3GPP και 3GPP2. Στα πρότυπα του 3GPP, HSPA+ και LTE χρησιμοποιείται τεχνολογία MIMO, με έμφαση στην τεχνική multi-user MIMO. Η τεχνολογία MIMO μπορεί, επίσης, να χρησιμοποιηθεί και σε ενσύρματα συστήματα επικοινωνιών. Ένα παράδειγμα είναι το πρότυπο οικιακής δικτύωσης ITU-T G.9963, το οποίο αναφέρεται σε ένα σύστημα επικοινωνιών μέσω γραμμών ηλεκτρικής ισχύος και στο οποίο χρησιμοποιούνται τεχνικές MIMO για τη μετάδοση πολλαπλών σημάτων σε πολλαπλά καλώδια εναλλασσόμενου ρεύματος (φάση, ουδέτερος και γείωση).

6.5 Δοκιμές των MIMO

Οι δοκιμές ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος που φέρει κάποια τεχνολογία MIMO επικεντρώνονται, αρχικά, στα σύστημα του πομπού και του δέκτη. Οι τυχαίες φάσεις των σημάτων των υπο-φερόντων μπορούν να παράγουν στιγμιαία επίπεδα ισχύος που προκαλούν συμπίεση στον ενισχυτή (μείωση του κέρδους αυτού λόγω μη γραμμικότητας), με συνέπεια να προκαλείται παραμόρφωση και τελικά, αυξημένος ρυθμός εσφαλμένων συμβόλων. Σήματα με υψηλό PAR (peak-to-average ratio) μπορεί να προκαλέσουν στους ενισχυτές απρόβλεπτη συμπίεση κατά τη μετάδοση. Τα σήματα OFDM είναι, γενικώς, πολύ δυναμικά και τα προβλήματα συμπίεσης μπορεί να είναι δύσκολο να ανιχνευθούν λόγω της ομοιότητας του θορύβου με τη φύση των σημάτων.

Η γνώση της ποιότητας του καναλιού είναι, επίσης, κρίσιμης σημασίας. Ένας εξομοιωτής καναλιού (channel emulator) μπορεί να προσομοιώσει τον τρόπο λειτουργίας μιας συσκευής στα άκρα των κυψελών, μπορεί να προσθέσει θόρυβο ή να προσομοιώσει το πώς θα είναι το κανάλι όταν η συσκευή έχει κάποια ταχύτητα. Για την πλήρη αξιολόγηση της απόδοσης ενός δέκτη απαιτείται και ένας βαθμονομημένος πομπός, όπως μια γεννήτρια σήματος φορέα (Vector Signal Generator – VSG), έτσι ώστε, μαζί με τον εξομοιωτή καναλιών να είναι δυνατός ο έλεγχος του δέκτη κάτω από μια ποικιλία διαφορετικών συνθηκών. Αντιστρόφως, η απόδοση του πομπού κάτω από ένα πλήθος διαφορετικών συνθηκών μπορεί να αξιολογηθεί χρησιμοποιώντας έναν εξομοιωτή καναλιού και ένα βαθμονομημένο δέκτη, όπως έναν αναλυτή σήματος φορέα (Vector Signal Analyzer – VSA).

Η κατανόηση του καναλιού επιτρέπει τον χειρισμό της φάσης και του πλάτους του σήματος που εκπέμπει κάθε πομπός. Προκειμένου να σχηματιστεί μια δέσμη (beam) σωστά, ο πομπός πρέπει να γνωρίζει τα χαρακτηριστικά του διαύλου. Αυτή η διαδικασία, που ονομάζεται εκτίμηση καναλιού (channel estimation), συνίσταται στην αποστολή ενός γνωστού σήματος προς την κινητή συσκευή, που της επιτρέπει να δημιουργήσει μια εικόνα του περιβάλλοντος του διαύλου. Η κινητή συσκευή, ακολούθως, στέλνει πίσω τα χαρακτηριστικά του διαύλου στον πομπό. Ο πομπός, πλέον, μπορεί να επιλέξει τη σωστή φάση και να προσαρμόσει το πλάτος των σημάτων για να σχηματίσει την καλύτερη δυνατή δέσμη προς τον δέκτη. Αυτή η τεχνική ονομάζεται σύστημα MIMO κλειστού βρόχου. Για τη διαμόρφωση μιας δέσμης, είναι απαραίτητη η προσαρμογή των φάσεων και των πλατών των σημάτων κάθε εκπομπού. Σε ένα διαμορφωτή δέσμης βελτιστοποιημένο για χωρικό διαφορισμό ή για χωρική πολυπλεξία, κάθε στοιχείο της κεραίας μεταδίδει ταυτόχρονα ένα σταθμισμένο συνδυασμό δύο συμβόλων δεδομένων.

6.6 Σχετική βιβλιογραφία

- Κύριες έρευνες

Σχετικά με την τεχνολογία MIMO έχουν δημοσιευτεί αρκετές εργασίες τα τελευταία χρόνια, καθώς η τεχνολογία αυτή αποτελεί μια πολύ ικανοποιητική λύση για τα προβλήματα μετάδοσης στο χώρο των ασύρματων (και όχι μόνο) επικοινωνιών. Οι Gerard J. Foschini και Michael J. Gans, καθώς και οι Foschini και Emre Telatar (Bell Laboratories) έδειξαν, κατά τα

τέλη του περασμένου αιώνα, ότι η χωρητικότητα του διαύλου (ένα θεωρητικό άνω όριο για απόδοση του συστήματος) για ένα σύστημα MIMO αυξάνεται καθώς αυξάνεται ο αριθμός των κεραιών, ανάλογα με τον ελάχιστο αριθμό των κεραιών εκπομπής και λήψης. Αυτό το βασικό εύρημα στην θεωρία της πληροφορίας είναι αυτό που οδήγησε στην έξαρση της έρευνας σε αυτόν τον τομέα. Μάλιστα, οι ειδικοί των κινητών επικοινωνιών προβλέπουν τη χρήση της τεχνολογίας MIMO σε περίπου 500 εκατομμύρια υπολογιστές, ταμπλέτες και smartphones μέχρι το 2016.

- Άλλες εφαρμογές

Δεδομένης της φύσης των MIMO, η τεχνολογία αυτή δεν περιορίζεται στην ασύρματη επικοινωνία, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την επικοινωνία μέσω ενσύρματης γραμμής. Για παράδειγμα, έχει προταθεί ένας νέος τύπος τεχνολογίας DSL (Gigabit DSL), που βασίζεται σε πολλαπλά κανάλια MIMO.

7. Γνωστικά συστήματα επιτήρησης

Όπως είδαμε στο 2^ο κεφάλαιο, ένα από τα πεδία εφαρμογής των δικτύων ασύρματων αισθητήρων είναι η επιτήρηση περιοχών ενδιαφέροντος. Γενικά, τέτοια συστήματα αποτελούνται από κατάλληλα τοποθετημένες, αυτόνομες, γνωστικές συσκευές που συλλέγουν δεδομένα είτε συνεχώς, είτε λόγω κάποιου γεγονότος και ακολούθως ειδοποιούν τις γειτονικές τους συσκευές με την τεχνική της «πλημμύρας», στέλνουν τα δεδομένα που συνέλλεξαν στο κέντρο ελέγχου (Control Center - CC) και αν δεν υπάρχει η δυνατότητα επικοινωνίας με το CC, αποθηκεύουν τα δεδομένα αυτά μέχρι να τα περισυλλέξουν οι αρμόδιες αρχές. Τα συστήματα αυτά έχουν τη δυνατότητα να λειτουργήσουν σε διάφορες περιοχές και καταστάσεις (MMM, κτίρια, σύνορα κ.λπ.), ενώ εκμεταλλευόμενα τις τελευταίες εξελίξεις της τεχνολογίας, σε ό,τι αφορά τη συλλογή, επξεργασία και μεταφορά των δεδομένων, μπορούν να αποτελέσουν μια αξιόπιστη υποβοήθηση στην παρακολούθηση και στον έλεγχο σημείων και γεγονότων ενδιαφέροντος.

7.1 Λόγοι δημιουργίας συστημάτων επιτήρησης

Κατά καιρούς έχουμε όλοι γίνει μάρτυρες διαφόρων περιστατικών επικίνδυνων για τη δημόσια ασφάλεια (πλημμύρες, σεισμοί, χιονοστιβάδες, αεροπορικά δυστυχήματα, τρομοκρατικές επιθέσεις). Έτσι, είναι επιτακτική η ανάγκη της παρακολούθησης και της διαχείρισης των πάσης φύσεως εκτάκτων καταστάσεων, ούτως ώστε αφ' ενός μεν να προληφθούν, αφετέρου δε να αντιμετωπιστούν εγκαίρως, μειώνοντας, κατά το δυνατόν, τις επιπτώσεις τους. Τα συμβατικά συστήματα παρακολούθησης αποτελούνται, κυρίως, από CCTVs, που εξετάζονται αφότου συμβεί κάτι, πράγμα που συνεπάγεται μεγάλο χρόνο και κόστος για την επεξεργασία, εξέταση και διατήρηση του τεράστιου αυτού όγκου φωτογραφιών ή βίντεο, ενώ, παράλληλα, δεν παρέχουν προστασία απέναντι στην υποκλοπή κρίσιμων δεδομένων και στην καταπάτηση προσωπικών ελευθεριών και ιδιωτικότητας.

7.2 Στόχοι/προκλήσεις έξυπνων συστημάτων επιτήρησης

Βασικές απαιτήσεις από τα έξυπνα συστήματα επιτήρησης είναι η ανάπτυξη δικτύων κλιμακούμενης και αρθρωτής αρχιτεκτονικής, που δεν απαιτούν ανθρώπινη παρέμβαση λειτουργώντας αυτόνομα, ως επί το πλείστον, και που καλύπτουν μεγάλη γκάμα εφαρμογών για την παρακολούθηση χώρων και για την επισήμανση απειλών για τη δημόσια ασφάλεια. Με την χρήση της τελευταίας τεχνολογίας είναι δυνατή η κατασκευή γνωστικών συσκευών επιτήρησης με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Καταγραφή και εκπομπή δεδομένων μόνο όταν αντιληφθούν κάποιο πιθανώς επικίνδυνο γεγονός (π.χ. έκρηξη)
- Διατήρηση των πληροφοριών που συνέλλεξαν πριν και μετά το συμβάν
- Ειδοποίηση του κέντρου ελέγχου και διάδοση της πληροφορία ενεργοποίησής τους σε γειτονικές συσκευές για μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα του συμβάντος. Επανάληψη της διαδικασίας αυτής για κάθε ενεργοποιημένη συσκευή (μέθοδος πλημμύρας)

- Δυνατότητα ελέγχου των συσκευών αυτών από το κέντρο έλεγχου για την παροχή πρόσθετων δεδομένων και για την πραγματοποίηση επιπλέον ενεργειών
- Αντοχή σε ακραίες συνθήκες λειτουργίας και σε βίαια συμβάντα (έκρηξη, νερό κ.λπ.)
- Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας
- Δυνατότητα αυτό-οργάνωσης

7.3 Τεχνικές λεπτομέρειες συσκευών επιτήρησης

Οι συσκευές επιτήρησης (MDs – Monitoring Devices) είναι το κύριο στοιχείο ενός συστήματος επιτήρησης. Απαιτείται να διαθέτουν αρθρωτή αρχιτεκτονική για την αλλαγή των δομικών τους μονάδων, προκειμένου να προσαρμόζονται στο περιβάλλον λειτουργίας και να κάνουν χρήση ήδη υπάρχοντων υπολογιστικών και τηλεπικοινωνιακών υποδομών. Αυτές οι δομικές μονάδες προστίθενται σε ένα ενσωματωμένο σύστημα και πακετάρονται για να λειτουργούν κατά τον επιθυμητό τρόπο. Μια τέτοια, τυπική, συσκευή αποτελείται από τις παρακάτω μονάδες:

- Μονάδα αισθητήρων/ενεργοποίησης: ελέγχει και μετρά διάφορες φυσικές ποσότητες που σχετίζονται με την ύπαρξη κάποιας απειλής (θερμοκρασία, ήχος, καπνός). Ανάλογα με τον προγραμματισμό που έχει γίνει, μόλις κάποιος αισθητήρας αντιληφθεί κάποιο χαρακτηριστικό γεγονός (π.χ. άνοδος θερμοκρασίας πάνω από ένα προκαθορισμένο όριο), η συσκευή ενεργοποιείται.
- Υπολογιστική μονάδα: αποτελείται από έναν μικροεπεξεργαστή/μικροελεγκτή και μια μνήμη και εκτός από την επεξεργασία των σημάτων των αισθητήρων και των πομποδεκτών, η μονάδα αυτή ελέγχει ολόκληρη την MD.
- Μονάδα επικοινωνιών: αποτελείται από έναν ή περισσότερους πομποδέκτες, ανάλογα με τη διαμόρφωση που έχει γίνει και εκτός από την επικοινωνία με τις υπόλοιπες συσκευές και το κέντρο έλεγχου, αναλαμβάνει και τις εργασίες των πρωτοκόλλων επικοινωνίας, μειώνοντας το φόρτο εργασίας του επεξεργαστή.
- Μονάδα θέσης: χρησιμοποιεί διάφορα συστήματα εντοπισμού θέσης (π.χ. GPS, Galileo, GLONASS) και αναλαμβάνει τη συνεργασία της συσκευής με γειτονικές της για τον ακριβή προσδιορισμό των θέσεων αυτών, αποτελώντας, ειδικά στην περίπτωση της τεχνικής του γεω-εντοπισμού, σημαντικότατο στοιχείο του κυκλώματος.
- Μονάδα ενέργειας: τροφοδοτεί τα ηλεκτρονικά υποσυστήματα με ισχύ και είναι συνήθως είτε κάποια μπαταρία, είτε κάποιο φωτοβολταϊκό πλαίσιο.
- Μονάδα καταγραφής εικόνας-ήχου: χρησιμοποιείται για την καταγραφή βίντεο από την περιοχή του συμβάντος, ανάλογα με τις εντολές που έχει δεχθεί η MD από το κέντρο ελέγχου.

7.4 Τηλεπικοινωνιακό τμήμα των συστημάτων επιτήρησης

Τα βασικά στοιχεία του τηλεπικοινωνιακού μέρους των έξυπνων συστημάτων επιτήρησης είναι τα εξής:

- Οι συσκευές επιτήρησης (MDs), που επιτηρούν τον χώρο τους
- Κέντρα Ελέγχου/Σταθμοί Βάσης (CCs/BSs), που λαμβάνουν τα σήματα συναγερμού, συλλέγουν τα δεδομένα από τις όλες τις συσκευές του χώρου ενδιαφέροντος, τις ελέγχουν και οπτικοποιούν, μέσω κατάλληλων GUIs, όλες αυτές τις πληροφορίες για την εξέτασή τους από τους χειριστές του συστήματος.

- Επαναλήπτες και πρόσθετος τηλεπικοινωνιακός εξοπλισμός, που χρησιμεύουν στην εγκατάσταση και τη διατήρηση της επικοινωνίας μεταξύ των MDs και των CCs και διασφαλίζουν την συμβατότητα μεταξύ των διαφορετικών τηλεπικοινωνιακών διεπαφών.

Για τη διασύνδεση μεταξύ των διαφόρων στοιχείων ενός συστήματος ασύρματων αισθητήρων μπορεί να γίνει χρήση πολλών τύπων δικτύων, τόσο για λόγους επάρκειας τηλεπικοινωνιακών μέσων, όσο και για ειδικούς λόγους που σχετίζονται με την εκάστοτε εφαρμογή. Συνήθως επιλέγονται τα πρότυπα Ethernet, WiFi και WiMAX, το καθένα για τις ιδιαιτερότητες και τις δυνατότητές του. Η ενσύρματη δικτύωση μέσω Ethernet, όπου αυτό είναι εφικτό, μεταξύ γειτονικών συσκευών επιτήρησης, αλλά και μεταξύ των σταθμών βάσης εξασφαλίζει αξιόπιστη μετάδοση και μεγάλες ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων. Οι ασύρματες ζεύξεις τοπικής κλίμακας WiFi εξυπηρετούν την επικοινωνία μεταξύ γειτονικών συσκευών και την ανταλλαγή πληροφοριών εύκολα και γρήγορα μιας και η τεχνολογία αυτή ενδείκνυται για τη δημιουργία ad-hoc δικτύων. Τέλος, για την επικοινωνία των κόμβων μιας περιοχής με κάποιο κέντρο ελέγχου/σταθμό βάσης χρησιμοποιείται το πρότυπο WiMAX, αφού απαιτείται αρκετή ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων ταυτόχρονα με τη δυνατότητα επικοινωνίας με πιθανώς απομακρυσμένες και δύσκολα προσβάσιμες περιοχές. Εκτός αυτών, μια διαφανής υπηρεσία τρέχει σε κάθε MD στο στρώμα δικτύου, διασφαλίζοντας ότι τα πακέτα δεδομένων IP θα μεταφερθούν ακόμα και στην περίπτωση που κάποια από τις τρεις προαναφερθείσες υποδομές δικτύου δεν είναι διαθέσιμη. Η υπηρεσία αυτή, που καθιστά τις συσκευές επιτήρησης και routers, αυτόματα, επαναδρομολογεί τα πακέτα IP χρησιμοποιώντας την πρώτη διαθέσιμη ζεύξη, επιτρέποντας της επικοινωνία μεταξύ των MDs ύστερα από κάποιο συμβάν, οπότε και υπάρχει η πιθανότητα κάποιο εκ των προαναφερθέντων δικτύων να είναι μη προσβάσιμο.

8. Προτάσεις επί των ασύρματων συστημάτων επιτήρησης

Όπως έχει ήδη γραφεί, τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούν τις διάφορες εκδόσεις του προτύπου 802.16, ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες λειτουργίας, για την επικοινωνία των σταθμών βάσης με την περιοχή ενδιαφέροντος. Έτσι, για την περίπτωση κινούμενων αισθητήρων (π.χ. πάνω σε κινούμενο όχημα είτε επίγειο, είτε θαλάσσιο) χρησιμοποιείται το πρότυπο 802.16e, δηλαδή το mobile WiMAX, το οποίο λειτουργεί στην περιοχή των 2.5 GHz, ενώ για την περίπτωση των στατικών αισθητήρων (π.χ. στατικές κάμερες επιτήρησης) γίνεται χρήση του προτύπου 802.16d, δηλαδή του fixed WiMAX, το οποίο λειτουργεί στην περιοχή των 3.5 GHz.

Το πρώτο πράγμα που γίνεται αμέσως αντιληπτό είναι ότι και στις δύο περιπτώσεις, γίνεται χρήση αρκετά υψηλών συχνοτήτων, τουλάχιστον σε σχέση με άλλες παρόμοιες υπηρεσίες, ευρέως διαδεδομένες, όπως είναι το ραδιόφωνο, η τηλεόραση και η κινητή τηλεφωνία. Όπως είναι γνωστό από τη θεωρία της διάδοσης των ΗΜ κυμάτων, όσο χαμηλότερη είναι η συχνότητα ενός ΗΜ κύματος, τόσο λιγότερο εξασθενεί το σήμα, για δεδομένη απόσταση. Με άλλα λόγια, για την ίδια ισχύ εκπομπής και λήψης, ένα ΗΜ κύμα χαμηλότερης συχνότητας θα διαδοθεί σε μεγαλύτερη απόσταση. Όλα αυτά συνοψίζονται στην παρακάτω γνωστή εξίσωση του Friis,

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \Rightarrow P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{c}{4\pi R f} \right)^2 \frac{1}{f^2}$$

όπου:

P_r , είναι η ισχύς λήψης του δέκτη,

P_t , είναι η ισχύς εκπομπής του πομπού,

G_t , είναι η απολαβή της κεραίας του πομπού,

G_r , είναι η απολαβή της κεραίας του δέκτη,

λ , είναι το μήκος κύματος,

R , είναι η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη,

c , είναι η ταχύτητα του φωτός και

f , είναι η συχνότητα του ΗΜ κύματος.

Επομένως, μια μείωση στη συχνότητα του ΗΜ κύματος θα έχει, κατ' αρχήν, θετική επίδραση στην επικοινωνία μεταξύ πομπού και δέκτη. Επίσης, εκτός από την ισχύ λήψης, σε μια ασύρματη επικοινωνία ενδιαφέρει πάρα πολύ και το διαθέσιμο εύρος ζώνης, πόσο μάλλον όταν μιλάμε για ένα σύστημα επιτήρησης, το οποίο απαιτεί αρκετά υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, όπως π.χ. για τη μετάδοση βίντεο πραγματικού χρόνου κ.λπ. Η σχέση που συνδέει τα δύο αυτά μεγέθη (εύρος ζώνης και ρυθμός μετάδοσης) είναι η επίσης γνωστή σχέση των Shannon-Hartley,

$$C = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

όπου,

C , είναι η χωρητικότητα του καναλιού, ή αλλιώς ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων,

B , είναι το εύρος ζώνης του καναλιού και

S/N , είναι ο σηματοθορυβικός λόγος, δηλαδή η ισχύς του σήματος, προς την ισχύ του λευκού προσθετικού γκαουσιανού θορύβου.

Από τη σχέση αυτή προκύπτει ότι, με την αύξηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης, αυξάνεται με ανάλογο τρόπο και η μέγιστη δυνατή ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων, αν ο σηματοθορυβικός λόγος κρατηθεί σταθερός. Με άλλα λόγια, διατηρώντας σταθερό το εύρος ζώνης του σήματος και αυξάνοντας το σηματοθορυβικό λόγο, αυξάνεται (με μη ανάλογο, όμως, τρόπο) ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων.

Προκειμένου τα δύο αυτά θεωρητικά συμπεράσματα να έχουν πρακτική σημασία, θα πρέπει να βρεθούν περιοχές συχνοτήτων, οι οποίες θα ικανοποιούν ταυτόχρονα ορισμένες βασικές απαιτήσεις. Έτσι, αναζητούνται συχνότητες οι οποίες θα είναι χαμηλότερες από τις προαναφερθείσες, θα παρέχουν τη δυνατότητα χρησιμοποίησης του ίδιου εύρους ζώνης με αυτές και βέβαια δεν θα παρεμβάλουν σε ήδη υπάρχουσες υπηρεσίες που λειτουργούν σε αυτές, εφ' όσον μιλάμε για συστήματα επιτήρησης που λειτουργούν σε εκτεταμένες περιοχές. Λόγω της μετάβασης από την αναλογική στην ψηφιακή τηλεόραση απελευθερώνονται διάφορες περιοχές συχνοτήτων (white spaces), πράγμα που σημαίνει ότι είναι πιθανή η χρήση αυτών για άλλες δραστηριότητες, μη αδειοδοτημένες και ως εκ τούτου διεκδικήσιμες από τον οποιονδήποτε. Λόγω του αυξημένου παγκόσμιου ενδιαφέροντος, τα τελευταία χρόνια, για την υλοποίηση συστημάτων που εκμεταλλεύονται τα white spaces, γίνεται αντιληπτό ότι η περιοχή των 800-850 MHz, δίπλα, δηλαδή, από τις διεθνώς αδειοδοτημένες συχνότητες για την κινητή τηλεφωνία 2G (GSM-900 MHz), είναι μια εξαιρετική επιλογή για τη λειτουργία ενός συστήματος επιτήρησης. Αυτό προκύπτει, αφ' ενός επειδή ικανοποιούνται οι προηγούμενες βασικές απαιτήσεις, αφ' ετέρου διότι διευκολύνεται η υλοποίηση ενός τέτοιου συστήματος, μιας και το υλικό που απαιτείται δεν χρειάζεται σημαντικές τροποποιήσεις από το hardware των κινητών τηλεφώνων 2^{ης} γενιάς.

Το παζλ ολοκληρώνεται, αν σκεφτεί κανείς ότι ένα έτοιμο εμπορικά σύστημα επικοινωνιών που μπορεί να εφαρμοστεί άμεσα σε αυτές τις συχνότητες, με μικρό κόστος και αυξημένες σε σχέση με το WiMAX δυνατότητες είναι το πρότυπο LTE. Με βάση τον παρακάτω πίνακα, ο οποίος παρουσιάζει τις τυπικές τιμές των τεχνικών προδιαγραφών του LTE, του mobile WiMAX και του fixed WiMAX, μπορεί να γίνει μια άμεση σύγκριση των χαρακτηριστικών των προτύπων αυτών.

	LTE (800 MHz)		Mobile WiMax (2.5 GHz)		Fixed WiMax (3.5 GHz)	
	Σταθμός βάσης	Συσκευή χρήστη	Σταθμός βάσης	Συσκευή χρήστη	Σταθμός βάσης	Συσκευή χρήστη
Απολαβή κεραίας (dB)	18	0	16	2	17	8
Ευαισθησία (dBm)	-123	-105	-105	-95	-97	-95
Μέγιστη ισχύς εξόδου (dBm)	46	23	43	23	35	20
Πολλαπλή πρόσβαση	SC-FDMA (Uplink) OFDMA (Downlink)		SOFDMA		SOFDMA	
Τύπος αμφιδρόμησης	FDD/TDD		TDD		FDD/TDD	
Κινητικότητα χρηστών (km/h)	-	350	-	120	-	-

Ανάλογα με το αν πρόκειται για ένα κινητό ή ένα στατικό σύστημα επιτήρησης, το LTE συγκρίνεται με το mobile και το fixed WiMAX αντίστοιχα. Τόσο η λειτουργία του LTE σε χαμηλότερες συχνότητες, όσο και οι καλύτερες προδιαγραφές του υλικού που διαθέτει, το καθιστούν την πρώτη επιλογή για τη βελτίωση των WSNs επιτήρησης. Το πιο εμφανές πλεονέκτημά του είναι ότι μπορεί να λειτουργήσει με χαμηλότερα επίπεδα ισχύος λήψης (λόγω της χαμηλότερης ευαισθησίας που διαθέτει) και ως εκ τούτου εξασφαλίζεται η λειτουργία του υπό δυσμενέστερες συνθήκες διάδοσης, σε σχέση με τα πρότυπα του WiMAX. Στο θέμα αυτό βοηθά επιπλέον και η λειτουργία του σε χαμηλότερες ζώνες συχνοτήτων, όπως είδαμε και προηγουμένως. Βεβαίως, ένα πιθανό μειονέκτημα του LTE είναι η υψηλότερη ισχύς εκπομπής των σταθμών βάσης του, κάτι που, όμως, μπορεί να ερμηνευθεί τόσο αρνητικά (πιο ενεργοβόρο και άρα πιο ασύμφορο οικονομικά), όσο και θετικά (η υψηλότερη ισχύς εκπομπής συνεπάγεται μεγαλύτερη ακτίνα κάλυψης).

Προφανώς, το κριτήριο για το αν αξίζει η όχι να γίνει η μετάβαση από το WiMAX στο LTE είναι η πειραματική επαλήθευση των θεωρητικών προβλέψεων, καθώς και η ανάλυση των οικονομικών παραγόντων που συνοδεύουν μια τέτοια αλλαγή. Έστω, όμως και σε ακαδημαϊκό επίπεδο, για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας, η μακροσκοπική σύγκριση των επιδόσεων και των δυνατοτήτων των δύο αυτών συστημάτων ασύρματων επικοινωνιών, αποτελεί το πρώτο και σημαντικότερο βήμα, προς μια πιο ενδελεχή και λεπτομερειακή μελέτη ραδιοκάλυψης για συγκεκριμένες περιοχές και συνθήκες λειτουργίας, προκειμένου να υλοποιηθεί πρακτικά ένα τέτοιο σύστημα επιτήρησης.

Συνοψίζοντας τα προηγούμενα κεφάλαια του θεωρητικού μέρους της εργασίας, έχοντας ως βάση τα συνήθη WSNs για την επιτήρηση περιοχών, αναλύθηκαν ενδελεχώς οι λεπτομέρειες, τεχνικές και μη, κάποιων βασικών θεμάτων που αφορούν τα δίκτυα ασύρματων αισθητήρων, τα white spaces του ΗΜ φάσματος στην περιοχή των τηλεοπτικών συχνοτήτων καθώς και τα πρότυπα ασύρματων επικοινωνιών WiMAX και LTE, με έμφαση στις (ολοένα και ανερχόμενες) τεχνικές MIMO. Από την ανάλυση των θεμάτων αυτών, δημιουργήθηκαν κάποιες προτάσεις για τη βελτίωση των επιδόσεων των συστημάτων επιτήρησης. Πλέον, μπορούμε να προχωρήσουμε στις προσομοιώσεις κάποιων απλών καταστάσεων λειτουργίας, ούτως ώστε να αξιολογηθούν οι επιπτώσεις της εφαρμογής των προτάσεων αυτών και να συγκριθούν οι επιδόσεις του συστήματος με ή χωρίς τις αλλαγές. Η διαδικασία αυτή θα πραγματοποιηθεί με το λογισμικό ICS Telecom®, το οποίο μπορεί να υπολογίσει και να εμφανίσει με τρόπο περιεκτικό και κατανοητό τη ραδιοκάλυψη για ένα σύστημα επιτήρησης ασύρματων αισθητήρων.

9. ICS Telecom

9.1 Λίγα λόγια για το ICS Telecom

Το ICS Telecom® είναι ένα ολοκληρωμένο πακέτο λογισμικού για τη μελέτη και τον σχεδιασμό ασύρματων τηλεπικοινωνιακών δικτύων. Αναπτύσσεται από την εταιρία ATDI και έχει τη δυνατότητα προσομοίωσης δικτύων διαφορετικού τύπου (κινητή τηλεφωνία, τηλεόραση, ραδιόφωνο, δεδομένα, ραντάρ, μικροκυματικές και δορυφορικές ζεύξεις, συστήματα τηλεμετρίας και αεροναυτικής, θαλάσσιες επικοινωνίες), μεγέθους (από pico-cells ως macro-cells), εσωτερικών ή εξωτερικών χώρων, κ.α. και όλα αυτά λαμβάνοντας υπ' όψη πλήθος παραμέτρων, όπως το μοντέλο διάδοσης, τον τύπο και το υψόμετρο του εδάφους, τον αριθμό των χρηστών, τα χαρακτηριστικά της υπηρεσίας, το διάγραμμα ακτινοβολίας των κεραιών κ.λπ. Με βάση τα παραπάνω, το ICS Telecom μπορεί να πραγματοποιήσει ενδεικτικά τα εξής:

- Μελέτη ραδιοκάλυψης για το πεδίο και την ισχύ λήψης
- Μελέτη παρεμβολών
- Εύρεση βέλτιστων σημείων τοποθέτησης κεραιών
- Μελέτη μικροκυματικών ζεύξεων
- Μελέτη κατανομής συχνοτήτων
- Διαστασιολόγηση παραμέτρων δικτύου
- Βελτιστοποίηση δικτύου
- Προβολή μηκοτομών

Ο χρήστης διαθέτει πολύ μεγάλο πλήθος επιλογών, ενώ τα αποτελέσματα πλησιάζουν την πραγματικότητα σε πολύ μεγάλο βαθμό, ανάλογα με τον τύπο και τις ιδιαιτερότητες της εφαρμογής που μελετάται. Είναι χαρακτηριστικό ότι αρκετές εταιρίες (MEGA CHANNEL, ANTENNA, ALPHA, INTRACOM, EADS κ.λπ.) καθώς και υπουργεία (Επικρατείας, Μεταφορών-Επικοινωνιών, Δημόσιας Τάξης) το έχουν χρησιμοποιήσει για τη διεξαγωγή διαφόρων μελετών. Ως εκ τούτου, η παρούσα διπλωματική εργασία διευκολύνεται και επεκτείνεται σε μεγάλο βαθμό, κάνοντας χρήση ενός λογισμικού τέτοιου κύρους και αξιοπιστίας που εξασφαλίζει επιστημονικά ορθά και ακριβή αποτελέσματα.

9.2 Περιγραφή λειτουργιών του ICS Telecom

9.2.1 Τύποι αρχείων για τη δημιουργία ενός project

Όπως έχει ήδη γραφεί, το ICS Telecom μπορεί να διεξάγει πλήθος προσομοιώσεων και να παρουσιάσει τα αποτελέσματά τους με τρόπο φιλικό στο χρήστη και ταυτόχρονα περιεκτικό και επιστημονικά ακριβή. Για το σκοπό αυτό δημιουργούμε ένα project, μέσω του project manager, το οποίο θα πρέπει να διαθέτει κάποια συγκεκριμένα αρχεία. Αυτά είναι τα εξής:

- .geo, δηλαδή αρχεία DTM (Digital Terrain Model) ή DEM (Digital Elevation Model) τα οποία περιέχουν το υψόμετρο κάθε pixel (το ανάγλυφο της περιοχής)

- .img, δηλαδή αεροφωτογραφίες, τοπογραφικοί ή πολιτικοί χάρτες, δορυφορικές φωτογραφίες της περιοχής
- .pal, δηλαδή αρχεία που περιέχουν την πληροφορία για τα χρώματα που υπάρχουν στο αρχείο .img
- .sol, δηλαδή αρχεία που περιέχουν την πληροφορία για το clutter κάθε pixel (αγροτική περιοχή, κτίρια/δρόμοι, δάση, βλάστηση, χώμα κ.λπ.) και τέλος
- .blg, δηλαδή αρχεία που περιέχουν την πληροφορία για το υψόμετρο των κτιρίων.

Αυτοί είναι οι πέντε βασικοί τύποι αρχείων του ICS Telecom ώστε να μπορεί να ξεκινήσει κάποιο project. Από αυτούς, οι τρεις πρώτοι (δηλαδή τα αρχεία .geo, .img και .pal) είναι απολύτως απαραίτητοι για τη διεξαγωγή μιας απλής μελέτης ραδιοκάλυψης. Προφανώς, το είδος της μελέτης καθορίζει και τη σημασία ύπαρξης και των άλλων δύο τύπων αρχείων (δεν έχει π.χ. νόημα να γίνει μια μελέτη για μια αστική περιοχή χωρίς να διατίθενται τα αρχεία .sol και .blg). Ειδικά τα αρχείο .sol είναι πολύ σημαντικό για μια όσο το δυνατόν περισσότερο ακριβή μελέτη, διότι καθορίζει την απόσβεση καθώς και την ανάκλαση/περίθλαση/σκέδαση που θα προκληθεί λόγω της διαφορετικής φύσης του εδάφους. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, για το πρώτο σενάριο χρησιμοποιήθηκαν και οι πέντε τύποι αρχείων, ενώ για το δεύτερο και το τρίτο χρησιμοποιήθηκαν οι πρώτοι τρεις.

Βασική παράμετρος των πιο πάνω αρχείων είναι η ανάλυσή τους, δηλαδή, πόσα τετραγωνικά μέτρα στην πραγματικότητα αντιπροσωπεύει το κάθε pixel. Είναι εύκολα αντιληπτό ότι η αύξηση της ανάλυσης (δηλαδή το κάθε pixel να αντιπροσωπεύει λιγότερα τετραγωνικά μέτρα στην πραγματικότητα) οδηγεί σε ακριβέστερα αποτελέσματα με αντίτιμο την αύξηση του κόστους απόκτησης ενός τέτοιου αρχείου, καθώς και του μεγέθους του, κάτι που αυξάνει, συνεπώς και το χρόνο εκτέλεσης μιας προσομοίωσης.

Πέραν των παραπάνω πέντε τύπων αρχείων, υπάρχουν και άλλοι που είτε δημιουργούνται στη συνέχεια από το χρήστη του λογισμικού είτε όχι και δεν είναι αναγκαίοι για τη διεξαγωγή μιας προσομοίωσης. Μερικοί εξ' αυτών είναι οι εξής:

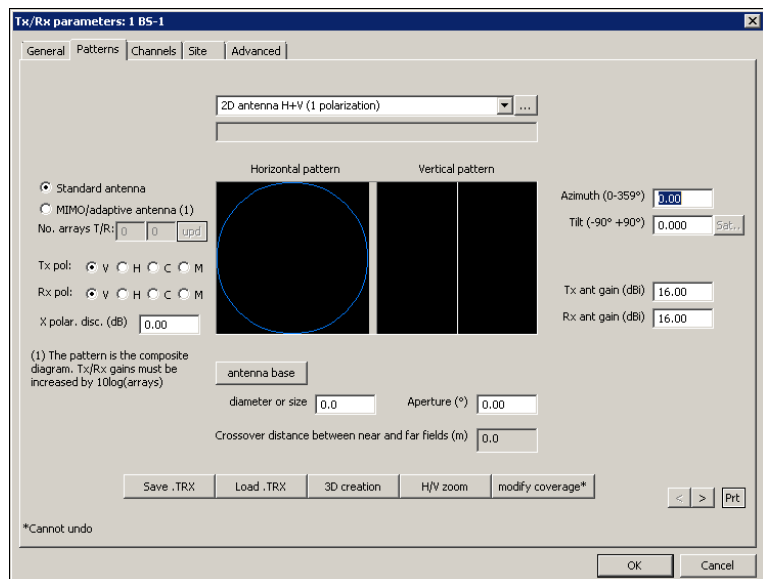
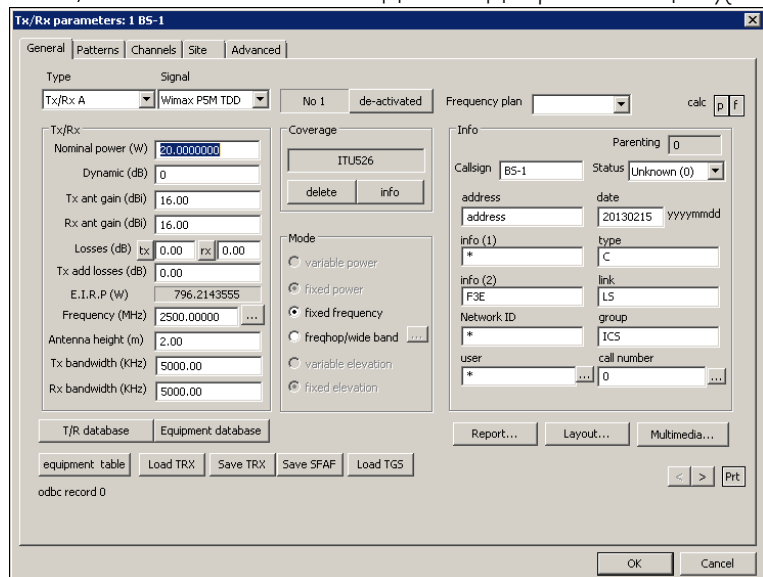
- .vec, δημιουργούνται από τη χρήστη και είναι τα αρχεία που περιέχουν τις πληροφορίες για την εισαγωγή πάνω στο χάρτη του project σημείων, κειμένου και κύκλων.
- .ewf, δημιουργούνται από το χρήστη και περιλαμβάνουν όλες τις πληροφορίες (διαγράμματα ακτινοβολίας, θέση πομποδεκτών, πυκνότητα ισχύος πεδίου, ισχύς λήψης κ.λπ.) σχετικά με τα διάφορα αντικείμενα (κεραίες πομποδεκτών, ραντάρ, κ.λπ.) ενός τηλεπικοινωνιακού δικτύου. Είναι, ίσως, το σημαντικότερο αρχείο με βάση το οποίο γίνεται κατά το μεγαλύτερο μέρος η μελέτη ραδιοκάλυψης μιας περιοχής.
- .p11, δεν είναι αναγκαία η δημιουργία/χρήση τους, περιλαμβάνουν τις επιλογές του χρήστη σχετικά με την παλέτα των χρωμάτων που περιγράφουν διάφορα φυσικά μεγέθη και αποτυπώνονται πάνω στο χάρτη (ΗΜ πεδίο, ισχύς λήψης, ποσοστό κάλυψης μιας περιοχής από κάθε pixel κ.λπ.)
- .prm, αρχεία παραμέτρων, με τα οποία ο χρήστης μπορεί να αποθηκεύσει τις επιλογές του σε ό,τι αφορά το μοντέλο διάδοσης, τα κατώφλια ισχύος κ.α.
- .msk, αρχεία που ορίζει ο χρήστης με τα οποία δημιουργείται πάνω στο χάρτη μια μάσκα (ορθογώνια ή πολυγωνική). Αυτή, στη συνέχεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διάφορες ενέργειες: μπορεί να αλλαχθεί το clutter εντός ή εκτός αυτής, μπορεί να γίνει μια μελέτη

εύρεσης της βέλτιστης θέσης ενός πομπού που θα καλύπτει την περιοχή εντός ή εκτός της μάσκας κ.α.

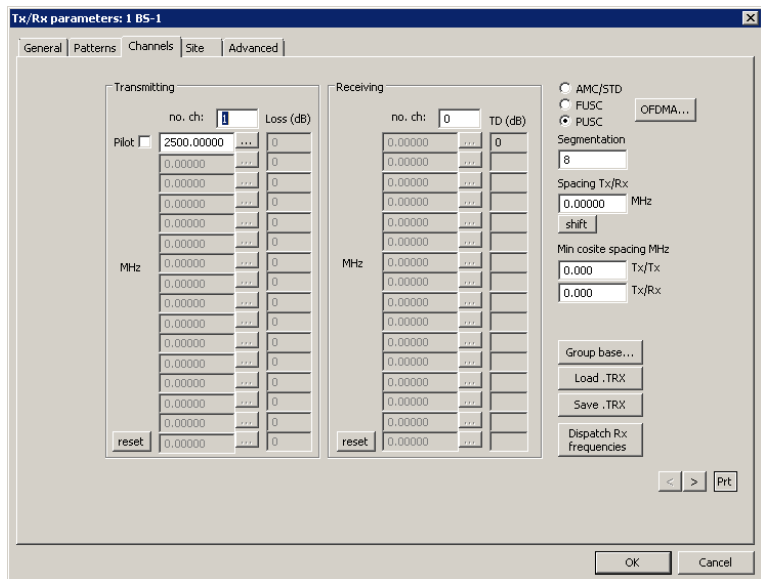
9.2.2 Τοποθέτηση σταθμών εκπομπής/λήψης

Αφού δημιουργηθεί ένα project που να περιέχει τους προηγούμενους τύπους αρχείων, μπορούμε να προχωρήσουμε στη δημιουργία του δικτύου που θέλουμε να μελετήσουμε. Στην περίπτωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, το δίκτυο κάθε σεναρίου δεν είναι προκαθορισμένο από πριν, επομένως οι τοποθεσίες των διαφόρων σταθμών εκπομπής/λήψης μπορούν να προσδιοριστούν με στόχο τη βέλτιστη δυνατή κάλυψη των περιοχών ενδιαφέροντος. Το ICS Telecom διαθέτει τη συνάρτηση **search sites**, με την οποία υπολογίζεται, για κάθε ρίxel ξεχωριστά, το ποσοστό της περιοχής που θα καλυπτόταν, εάν τοποθετούνταν σε αυτό ένας πομπός. Αυτή η λειτουργία μπορεί να χρησιμοποιηθεί, εκτός από το προφανές, δηλαδή για την εύρεση των καλύτερων σημείων τοποθέτησης των σταθμών βάσης, και αντίστροφα, για την εύρεση των σημείων τα οποία είναι τα δυσμενέστερα από άποψη κάλυψης, δηλαδή για τα σημεία στα οποία αξίζει να τοποθετηθούν οι συσκευές ασύρματων αισθητήρων (π.χ. θερμικές κάμερες) ώστε να μελετηθεί η επίδοση του κάθε συστήματος επικοινωνιών. Για τη μελέτη μεγάλων περιοχών είναι πολύ σημαντικός ο χωρισμός αυτών σε μικρότερες προκειμένου η συνάρτηση **search sites** να έχει πιο ακριβή αποτελέσματα, κάτι που γίνεται με τη βοήθεια των μάσκων που περιγράφηκαν προηγουμένως.

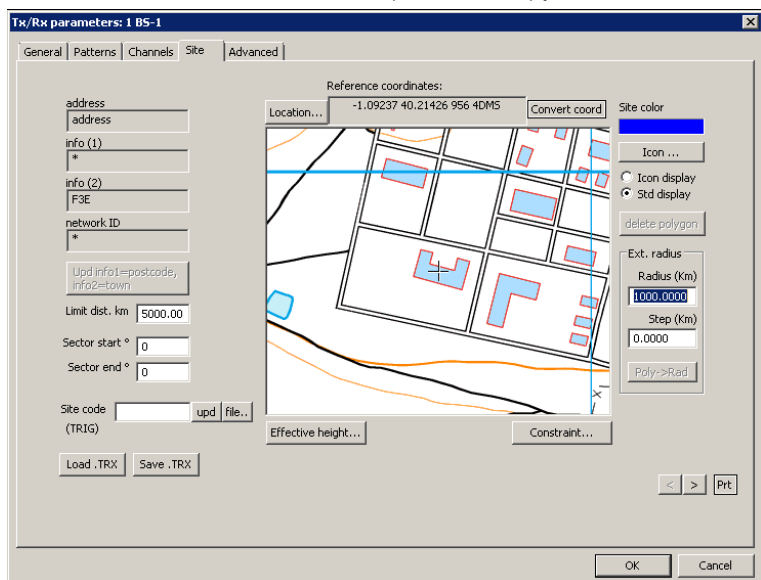
Μετά την εύρεση των κατάλληλων σημείων, σειρά έχει η τοποθέτηση των διαφόρων αντικειμένων του δικτύου. Αφού επιλεγθεί η θέση ενός αντικειμένου, θα πρέπει να προσδιοριστούν τα διάφορα τεχνικά χαρακτηριστικά του, μέσω της επιλογής Tx/Rx parameters. Στην καρτέλα General βρίσκονται οι λεπτομέρειες του αντικειμένου, που αφορούν, μεταξύ άλλων, τον τύπο (πομποδέκτης/χρήστης/συνδρομητής κ.α.), το είδος του σήματος (π.χ. WiMax), τα κέρδη των κεραιών εκπομπής και λήψης, τις πρόσθετες απώλειες, τη συχνότητα λειτουργίας, το ύψος της κεραιάς και το εύρος ζώνης εκπομπής/λήψης, καθώς και το όνομα και το προσωνύμιο αυτού.



Στην καρτέλα Patterns του μενού βρίσκονται τα διαγράμματα ακτινοβολίας για το οριζόντιο (Horizontal) και κατακόρυφο (Vertical) επίπεδο, τα οποία βεβαίως μπορούν να αλλάξουν από το χρήστη και έτσι να δημιουργηθεί επακριβώς η κεραία που αυτός επιθυμεί. Επίσης καθορίζεται το αζιμούθιο, η κλίση της κεραίας ως προς τον ορίζοντα και το επιθυμητό επίπεδο πόλωσης.

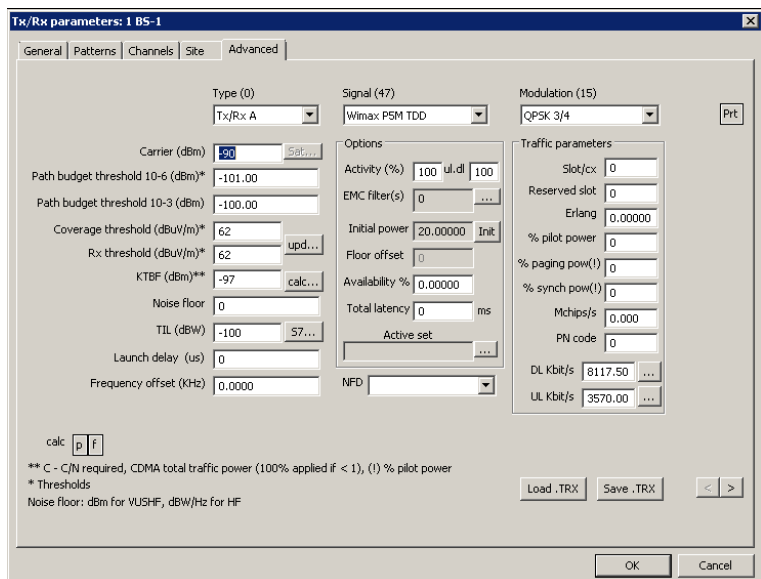


Στην καρτέλα Channels υπάρχουν οι πληροφορίες για την κατανομή συχνοτήτων ενός συστήματος επικοινωνιών (π.χ. κυβελωτή τηλεφωνία), μαζί με τις διάφορες παραμέτρους που απαιτούνται (π.χ. spacing μεταξύ των καναλιών πομπού/δέκτη κ.λπ.). Στην παρούσα εργασία δε χρησιμοποιήθηκε κάτι τέτοιο.



Στην καρτέλα Site βρίσκονται οι πληροφορίες σχετικά με τη θέση του αντικείμενου, όπως οι συντεταγμένες του, το χρώμα που θα έχει πάνω στο project κ.α.

Τέλος, στην καρτέλα Advanced βρίσκονται πιο λεπτομερείς πληροφορίες για το αντικείμενο, όπως το σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης (το οποίο έχει άμεση σχέση με τον τύπο του σήματος που έχει επιλεγεί), το κατώφλι κάλυψης, το κατώφλι λήψης του δέκτη, η διαθεσιμότητα και το ποσοστό λειτουργίας upload/download στη διάρκεια του χρόνου.



Οι διαθέσιμες επιλογές παραμετροποίησης του εκάστοτε αντικειμένου είναι πάρα πολλές, με αποτέλεσμα να μπορούν να προσομοιωθούν αρκετά πολύπλοκα τηλεπικοινωνιακά συστήματα (π.χ. διαχωρισμός σε κυψέλες και κατανομή συχνοτήτων σε αυτές για συστήματα κινητής τηλεφωνίας).

9.2.3 Μελέτη ραδιοκάλυψης

Ύστερα από την τοποθέτηση των αντικειμένων του δικτύου στο project, οι τελευταίες αναγκαίες παράμετροι που απομένουν να καθοριστούν είναι το μοντέλο διάδοσης/περίθλασης/πολυόδευσης που θα χρησιμοποιηθεί, η απόσβεση που προστίθεται από το clutter, το αν η λήψη θα γίνει πάνω από το clutter ή μέσα σε αυτό καθώς και η μέγιστη απόσταση από τους ενεργοποιημένους πομπούς για την οποία θα γίνει η προσομοίωση. Εκτός από την παρουσίαση της μεταβολής του ΗΜ πεδίου και της ισχύος λήψης, μπορούν να γίνουν διάφορες άλλες προσομοιώσεις, όπως, μελέτη παρεμβολών, εύρεση του σταθμού εκπομπής που προκαλεί μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος για κάθε ρixel, εύρεση της μεταβολής του σηματοθορυβικού λόγου C/N καθώς και του ανηγμένου σηματοθορυβικού λόγου E_b/n_0 , εμφάνιση της επικάλυψης της ραδιοκάλυψης από διαφορετικούς σταθμούς, εύρεση του περιθωρίου ισχύος, μελέτη επικινδυνότητας των πεδίων για τον άνθρωπο και πολλά άλλα.

9.2.4 Μέθοδος δημιουργίας σεναρίων προσομοίωσης και τρόπος εργασίας

Όπως φαίνεται και από τα παραπάνω, το ICS Telecom διαθέτει τεράστιο εύρος επιλογών και ρυθμίσεων, με συνέπεια να είναι εξαιρετικά κρίσιμης σημασίας η σωστή και οργανωμένη δουλειά, έτσι ώστε να μην εξαχθούν λανθασμένα αποτελέσματα, αλλά και για να γίνει με τη μεγαλύτερη δυνατή οικονομία χρόνου η ζητούμενη μελέτη. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, οι προσομοιώσεις αφορούσαν τη σύγκριση της ραδιοκάλυψης δύο, κυρίως, συστημάτων, ενός δικτύου WiMAX και ενός δικτύου LTE, ανάλογα βέβαια και με το σενάριο. Τα δύο αυτά δίκτυα θα διαθέτουν τις ίδιες θέσεις για τους πομποδέκτες και αυτό που αυτό που τα διαφοροποιεί μεταξύ τους είναι οι τεχνικές προδιαγραφές. Επομένως, κάθε δίκτυο θα προσομοιώνεται ανεξάρτητα από το άλλο και στο τέλος θα γίνεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε και προτείνεται, προέκυψε ύστερα από πολλές προσπάθειες και δοκιμές και είναι η εξής:

Ας ξεκινήσουμε από ένα δίκτυο WiMAX. Αρχικά, θα πρέπει να διαχωριστεί η μελέτη για κάθε δίκτυο σε δύο τμήματα: το downlink και το uplink. Το downlink αφορά την επικοινωνία από τον/τους σταθμό/σταθμούς βάσης προς τους αισθητήρες, ενώ το uplink το αντίστροφο.

Μιας και τα δίκτυα στην περίπτωση μας δεν είναι δεδομένα, δεν υπάρχουν δηλαδή προκαθορισμένες θέσεις για τους πομποδέκτες, θα πρέπει πριν από όλα να προσδιοριστούν αυτές. Τούτο γίνεται με τη λειτουργία search sites του ICS Telecom. Όπως εγράφη και προηγουμένως, με αυτή υπολογίζεται, για κάθε ρixel ξεχωριστά, το ποσοστό της περιοχής που θα καλυπτόταν, εάν τοποθετούνταν σε αυτό ένας πομπός. Αυτό, αφενός μεν υποδεικνύει τα σημεία στα οποία θα πρέπει να τοποθετηθούν οι σταθμοί βάσης (τα

σημεία, δηλαδή, που έχουν το μεγαλύτερο ποσοστό), αφετέρου δε υποδεικνύει και τα σημεία που είναι τα δυσμενέστερα από άποψη κάλυψης (αυτά που έχουν το μικρότερο ποσοστό), δηλαδή τα σημεία στα οποία αξίζει να τοποθετηθούν οι αισθητήρες. Με τον τρόπο αυτό γίνεται και ο διαχωρισμός της μελέτης ενός δικτύου στα τμήματα του downlink και του uplink. Για το downlink μας ενδιαφέρει να εκπέμπουν μόνο οι σταθμοί βάσης και να βρεθεί η ισχύς λήψης (ή η πυκνότητα του ΗΜ πεδίου) στη θέση κάθε αισθητήρα. Αν αυτή υπερβαίνει το κατώφλι λήψης που ορίζεται από τις προδιαγραφές του συστήματος, τότε θεωρούμε ότι το σύστημα λειτουργεί. Ομοίως, για το uplink μας ενδιαφέρει να εκπέμπουν μόνο οι αισθητήρες και να βρεθεί η ισχύς λήψης στη θέση κάθε σταθμού βάσης, ώστε να δούμε αν αυτή υπερβαίνει το κατώφλι λήψης. Ανάλογα με το σενάριο, μπορεί να χρειάζεται να λειτουργούν, ταυτόχρονα ή όχι, όλοι οι σταθμοί βάσης ή όλοι οι αισθητήρες.

Στη συνέχεια, αφού δηλαδή βρεθούν οι τοποθεσίες των διαφόρων αντικειμένων του δικτύου, σειρά έχει ο προσδιορισμός των παραμέτρων και των τεχνικών προδιαγραφών του δικτύου. Αυτό γίνεται μέσω των καρτελών General και Advanced του μενού parameters κάθε αντικειμένου. Στην παρούσα εργασία, ζητούμενο ήταν η υποστήριξη ρυθμών μετάδοσης της τάξης των 3 Mbps, τόσο στο downlink, όσο στο uplink, διότι αυτή είναι η απαιτούμενη ταχύτητα μετάδοσης για μια τυπική θερμοκάμερα FLIR που είναι το κύριο στοιχείο επιτήρησης, έτσι οι διάφορες επιλογές (σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης) έγιναν με γνώμονα την ικανοποίηση αυτού του περιορισμού. Με βάση τις τεχνικές προδιαγραφές προκύπτουν τα κατώφλια ισχύος λήψης και πυκνότητας ισχύος του ΗΜ πεδίου, τα οποία και εν τέλει θα χρησιμεύσουν για την εποπτεία των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων. Σημειώνεται ότι στο ICS Telecom μπορεί κανείς να αποθηκεύσει έτοιμα αντικείμενα (σταθμούς βάσης και αισθητήρες) και να τα αλλάζει κατά βούληση ώστε να προσομοιώνει απλούστατα και ταχύτατα διαφορετικές καταστάσεις και δίκτυα.

Κατόπιν τούτου, απαραίτητη είναι η επιλογή των μοντέλων διάδοσης, περίθλασης, πολυόδευσης, τροποσφαιρικού διασκορπισμού, ανάκλασης και κλίματος. Στην περίπτωση μας χρησιμοποιήθηκαν τα μοντέλα ITU-R 525/526, Deygout, τα οποία μελετώνται αναλυτικότερα στο τέλος του κεφαλαίου.

Ύστερα και από αυτό μπορούμε να ξεκινήσουμε την προσομοίωση που θέλουμε. Για να δούμε το πεδίο λήψης στο downlink, απομονώνουμε ένα σταθμό βάσης μέσω της επιλογής isolate αφού κάνουμε κλικ πάνω του (ή αλλιώς ενεργοποιούμε πολλούς σταθμούς βάσης με την επιλογή activate σε καθέναν ώστε να εκπέμπουν ταυτόχρονα) και επιλέγουμε Coverage→Network calculation→Tx/Rx FS coverage. Στο παράθυρο που ανοίγει μετά, προσδιορίζουμε το ύψος της κεραίας των δεκτών, την απόσταση από τον πομπό για την οποία θέλουμε να γίνει προσομοίωση και το κατώφλι ισχύος λήψης, το οποίο μπορεί να καθοριστεί είτε αυθαίρετα, είτε με βάση τις προδιαγραφές που έχουν τεθεί προηγουμένως. Αφού πατήσουμε START και περιμένουμε μέχρι να ολοκληρωθεί η προσομοίωση μπορούμε να δούμε το χάρτη με την κάλυψη της περιοχής και κάτω αριστερά το χρωματικό υπόμνημα (palette) που υποδηλώνει την αντιστοιχία χρώματος-επιπέδου πυκνότητας ισχύος και ισχύος λήψης. Η διαβάθμιση των επιπέδων και οι αντίστοιχες χρωματικές επιλογές μπορούν να αλλάξουν μέσω της επιλογής Tools→User palette και ύστερα να αποθηκευτούν ως αρχείο .P11 ώστε να φορτώνονται κάθε φορά με το άνοιγμα του project.

Στο σημείο αυτό μπορούμε να εμφανίσουμε μια πολύ μεγάλη ποικιλία αποτελεσμάτων, επιλέγοντας από το αριστερό υπομενού το Layer, δίνοντάς μας έτσι τη δυνατότητα να εξετάσουμε την κατανομή των συχνοτήτων, αν υπάρχει, τα ποσοστά κάλυψης από κάθε pixel, το βαθμό εξυπηρέτησης (Grade of Service - GoS), το επίπεδο των παρεμβολών, το λόγο σήματος-προς-παρεμβολή, το λόγο παρεμβολής-προς-θόρυβο, τον ανηγμένο σηματοθορυβικό λόγο ενέργειας κωδικοποιημένης λέξης-προς-παρεμβολή, τον ανηγμένο σηματοθορυβικό λόγο ενέργειας ψηφίου-προς-παρεμβολή, τα επίπεδα της μείωσης του κατωφλίου, το ρυθμό μετάδοσης, την τηλεπικοινωνιακή κίνηση σε Erlang/km² κ.α. Επίσης, μέσω της επιλογής Coverage→Network analysis μπορούμε να εμφανίσουμε διάφορους χάρτες ραδιοκάλυψης, όπως, του καλύτερου σταθμού βάσης με ή χωρίς κάποιο περιθώριο, το overlap (επικάλυψη) των καλύψεων όλων των σταθμών βάσης, τη διαθεσιμότητα και την αξιοπιστία των σταθμών βάσης, το χάρτη επικινδυνότητας των ακτινοβολιών για τον άνθρωπο (σύμφωνα με την οδηγία EEC-1999/519) και τους χάρτες διαφορών στο HM πεδίο μεταξύ δύο επιλεγμένων σταθμών. Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα εξονυχιστικής μελέτης παρεμβολών, με τέσσερις μάλιστα τρόπους, μέσω της επιλογής Coverage→Network interference, κάτι που χρησιμεύει σημαντικά στη μελέτη δικτύων κινητής τηλεφωνίας και όχι τόσο στο αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Με την ολοκλήρωση των επιθυμητών προσομοιώσεων και την εξαγωγή των κατάλληλων χαρτών ραδιοκάλυψης έχει ουσιαστικά ολοκληρωθεί μια βασική μελέτη σχετικά με το downlink. Για το uplink, απενεργοποιούμε όλους τους σταθμούς βάσης, ενεργοποιούμε έναν ή κάποιους αισθητήρες και ακολουθούμε την ίδια διαδικασία. Ύστερα μπορούμε να φορτώσουμε ή να δημιουργήσουμε το άλλο δίκτυο που θέλουμε να προσομοιώσουμε (δηλαδή το LTE) και επαναλαμβάνουμε τη μελέτη για το downlink και το uplink ξεχωριστά, όπως προηγουμένως. Αν προσέξουμε να πάρουμε κατάλληλα screenshots των χαρτών, μπορούμε να συγκρίνουμε πολύ εύκολα και κατατοπιστικά τα δύο δίκτυα και να σημειώσουμε τις διαφορές τους, τα πλεονεκτήματα του καθενός και τις επιπτώσεις τυχόν βελτιώσεων που θα χρειαστεί καθένα από αυτά. Είναι σαφές ότι η επιλογή ενός δικτύου προς υλοποίηση εξαρτάται τόσο από τα αποτελέσματα σχετικά με τη ραδιοκάλυψη που παρέχει, όσο και από το κόστος που συνεπάγεται η ανάπτυξή του. Συχνά αυτά τα δύο αλληλοσυνδέονται και το ζητούμενο είναι αυτό το trade-off να παρακαμφθεί, κατά το δυνατόν, με πιο σύνθετες και ευριστικές λύσεις.

9.3 Μοντέλα προσομοιώσεων

Όπως εγράφη και προηγουμένως, απαραίτητο σημείο κατά τη μελέτη της ραδιοκάλυψης οποιουδήποτε ασύρματου τηλεπικοινωνιακού συστήματος είναι η επιλογή των κατάλληλων μοντέλων διάδοσης, περίθλασης και λοιπών φαινομένων. Παρακάτω, αναλύονται λεπτομερώς τα κυριότερα εξ' αυτών, που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία.

9.3.1 Μέθοδος Deygout για την περίθλαση

Ένας από τους σημαντικότερους μηχανισμούς διάδοσης που επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη λήψη ενός εκπεμπόμενου σήματος είναι η περίθλαση. Η περίθλαση εμφανίζεται όταν κατά μήκος μιας ζεύξης βρίσκονται αδιαπέραστα εμπόδια, με αποτέλεσμα πάνω σε αυτά

να επάγονται ρεύματα υψηλής συχνότητας, τα οποία και αποτελούν πηγές δευτερογενούς πεδίου, σύμφωνα με την αρχή του Huygens. Η ένταση του πεδίου ενός περιθλώμενου κύματος στη ραδιοσκιασμένη περιοχή (όπου υπάρχουν εμπόδια) ισούται με το διανυσματικό άθροισμα των συνιστωσών του ηλεκτρικού πεδίου κάθε δευτερεύοντος κύματος στο χώρο γύρω από το εμπόδιο. Λόγω της περίθλασης είναι δυνατή η μετάδοση σημάτων γύρω από την καμπύλη επιφάνεια της γης, πέραν του ορίζοντα, καθώς επίσης και πίσω από διάφορα, φυσικά ή μη, εμπόδια, όπως βουνά, κτίρια κ.α. Σε ραδιοσυχνότητες, όπου το μήκος κύματος είναι συγκρίσιμο με τις διαστάσεις των εμποδίων, η περίθλαση προκαλεί εξασθένηση και όχι μηδενισμό στο σήμα.

Το πολύπλοκο μαθηματικό πρόβλημα της περίθλασης προσεγγίζεται μέσω των λύσεων συγγενών προβλημάτων σκέδασης (knife edge, cylinders, Deygout, κλπ). Βασική παραδοχή για τον υπολογισμό της απόσβεσης λόγω περίθλασης αποτελεί ο χαρακτηρισμός του εμποδίου ως «αιχμηρού» ή «κυλινδρικού» τύπου. Επίσης, το πραγματικό πρόβλημα περίθλασης είναι αυτό που περιλαμβάνει πολλαπλά εμπόδια. Οι περισσότερο διαδεδομένες μέθοδοι υπολογισμού σε αυτή την περίπτωση είναι οι Bullington, Epstein-Peterson και Deygout. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, για την προσομοίωση των διαφόρων σεναρίων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Deygout, η οποία και παρουσιάζεται αναλυτικότερα στη συνέχεια.

Για τη μέθοδο αυτή, καθώς και για τη μελέτη διαφόρων άλλων φαινομένων διάδοσης, είναι απαραίτητος ο υπολογισμός της λεγόμενης παραμέτρου Fresnel-Kirchhoff u , η οποία δίνεται από τη σχέση

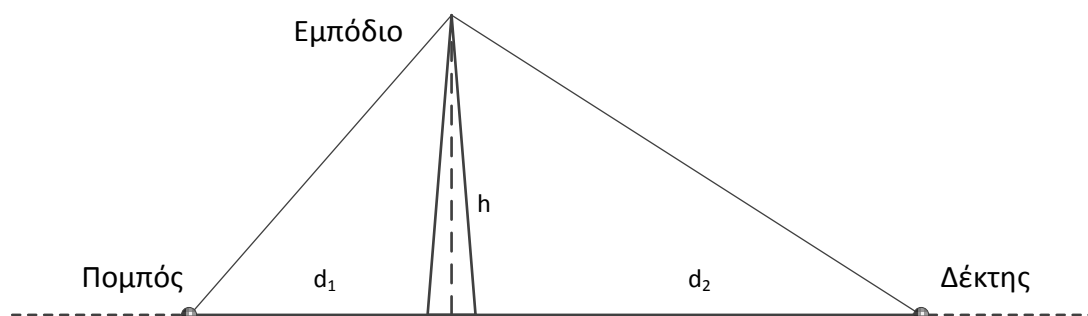
$$u = h \sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2}}$$

όπου:

h , είναι το ύψος του εμποδίου,

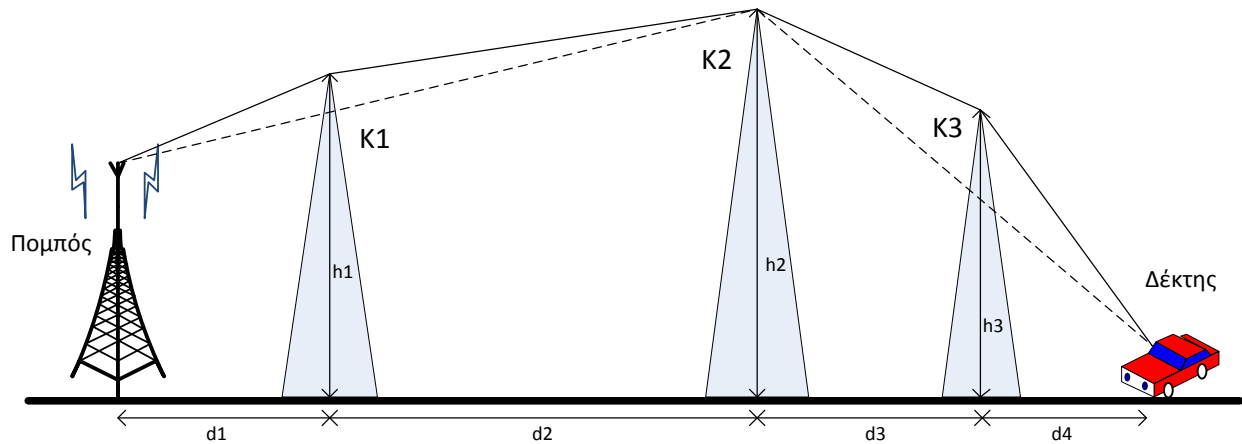
d_1 και d_2 , είναι οι αποστάσεις του εμποδίου από τον πομπό και το δέκτη και

λ , είναι το μήκος κύματος του μεταδιδόμενου σήματος



Η μέθοδος Deygout θεωρεί το κάθε εμπόδιο απομονωμένο από τα υπόλοιπα και ξεχωρίζει μια κορυφή ως κύρια, για την οποία υπολογίζεται η απώλεια που αυτή εισάγει στο σήμα λήψης. Προκειμένου να επιλεγθεί η κύρια κορυφή, υπολογίζεται για κάθε κορυφή η παράμετρος Fresnel-Kirchhoff u , θεωρώντας ότι οι υπόλοιπες κορυφές δεν υπάρχουν. Η κορυφή που μεγιστοποιεί την τιμή της παραμέτρου αυτής θεωρείται η κύρια και οι επιμέρους απώλειες λόγω των υπόλοιπων κορυφών προκύπτουν με την εκτέλεση της διαδικασίας αυτής επαναληπτικά. Για παράδειγμα, αν μεταξύ πομπού και δέκτη υπάρχουν

τρεις κορυφές, οι K1, K2 και K3, η κορυφή K3 θα είναι η κύρια (διότι η παράμετρος u παίρνει για αυτήν τη μεγαλύτερη τιμή της) και οι απώλειες περίθλασης των K1 και K2 υπολογίζονται από τις ευθείες που ενώνουν τον πομπό και το δέκτη με την κύρια κορυφή K2. Στο τέλος, όλες οι επιμέρους απώλειες αθροίζονται μαζί με την απώλεια λόγω της κύριας κορυφής και προκύπτει η συνολική απώλεια λόγω περίθλασης στην εξεταζόμενη ζεύξη.



Η μέθοδος Deygout είναι, στην πλειονότητα των περιπτώσεων, αρκετά ακριβής. Υπάρχει, όμως, πιθανότητα να προκύψουν αρκετά μεγαλύτερες απώλειες από ότι στην πραγματικότητα σε περιπτώσεις που τα πολλαπλά εμπόδια που μεσολαβούν βρίσκονται κοντά το ένα στο άλλο. Σε τέτοιες περιπτώσεις θα πρέπει να αναζητηθούν άλλες μέθοδοι που διορθώνουν τα σφάλματα αυτά.

9.3.2 ITU-R P.525-2: Υπολογισμός εξασθένησης ελεύθερου χώρου, 1994

Το μοντέλο διάδοσης ελεύθερου χώρου που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι το ITU-R P.525-2. Όπως προκύπτει και από την ονομασία του, έχει συνταχθεί από τη Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunications Union – ITU), από τον τομέα Ραδιοεπικοινωνιών (Radiocommunication) αυτής και αναφέρεται στον υπολογισμό της εξασθένησης που υφίσταται ένα σήμα που μεταδίδεται στον ελεύθερο χώρο. Δημιουργήθηκε για πρώτη φορά το 1978 και έχει αναθεωρηθεί το 1982 και το 1994.

Στο μοντέλο αυτό τονίζεται η σημασία που έχει η διάδοση ελεύθερου χώρου για τη μελέτη των τηλεπικοινωνιακών ζητημάτων, μιας και αποτελεί ένα θεμελιώδες **μοντέλο αναφοράς**, με καθολική, σχεδόν, υιοθέτηση ανά τον κόσμο. Ξεκινώντας από αυτό, διακρίνονται δύο τύποι ζεύξεων: σημείου-προς-περιοχή (point-to-area) και σημείου-προς-σημείο (point-to-point). Για μια ζεύξη σημείου-προς-περιοχή, όπου ένας πομπός επικοινωνεί με αρκετούς, τυχαία κατανομημένους δέκτες (π.χ. τηλεοπτική μετάδοση, κινητή τηλεφωνία κ.λπ.), το πεδίο που υφίσταται σε κάποια απόσταση από τον πομπό δίνεται από τη σχέση

$$e = \frac{\sqrt{30p}}{d}$$

όπου:

e , είναι η rms τιμή της έντασης του πεδίου σε V/m,

p , είναι η ισοδύναμη ιστροπικά ακτινοβολούμενη ισχύς (EIRP) του πομπού στην κατεύθυνση του εξεταζόμενου σημείου σε Watts και

d , είναι η απόσταση του εξεταζόμενου σημείου από τον πομπό

Σημειώνεται ότι εάν το διαδιδόμενο κύμα είναι ελλειπτικά και όχι γραμμικά πολωμένο και εάν οι συνιστώσες του ηλεκτρικού πεδίου σε δύο ορθογώνιους άξονες εκφράζονται ως e_x και e_y , ο όρος στο αριστερό μέρος της παραπάνω εξίσωσης θα πρέπει να αντικατασταθεί με το $\sqrt{e_x^2 + e_y^2}$. Επίσης, τα e_x και e_y μπορούν να εξαχθούν μόνο όταν είναι γνωστός ο αξονικός λόγος, ενώ το e θα πρέπει να αντικατασταθεί με το $e\sqrt{2}$ στην περίπτωση κυκλικής πόλωσης. Ακόμη, όταν οι κεραιές βρίσκονται στο επίπεδο του εδάφους και λειτουργούν σε σχετικά χαμηλές συχνότητες με κατακόρυφη πόλωση, η ακτινοβολία θεωρείται γενικά μόνο στον άνω ημι-χώρο. Αυτό πρέπει να ληφθεί υπόψη στον προσδιορισμό του EIRP (σύσταση ITU-R PN.368)

Η προηγούμενη εξίσωση συχνά αντικαθίσταται από την εξίσωση

$$e_{mV/m} = 173 \frac{\sqrt{p_{kW}}}{d_{km}}$$

η οποία χρησιμοποιεί πρακτικές μονάδες.

Για ζεύξεις σημείου-προς-σημείο προτιμάται ο υπολογισμός της απόσβεσης ελεύθερου χώρου μεταξύ ισοτροπικών κεραιών, που είναι επίσης γνωστή στη βιβλιογραφία ως **βασική απώλεια μετάδοσης ελεύθερου χώρου** (L_{bf} ή A_0), από τη σχέση

$$L_{bf}(dB) = 20 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)$$

όπου:

d , είναι η απόσταση σε m και

λ , είναι το μήκος κύματος σε m

Η σχέση αυτή μπορεί, για ευκολία, να γραφεί με χρήση της απόστασης σε km και της συχνότητας (σε MHz) αντί για το μήκος κύματος, παίρνοντας της μορφή

$$L_{bf}(dB) = 32.4 + 20 \log f + 20 \log d$$

Ισχύει, επίσης, η παρακάτω σχέση μεταξύ των χαρακτηριστικών ενός επίπεδου κύματος (ή ενός κύματος που μπορεί να αντιμετωπιστεί σαν τέτοιο) σε ένα σημείο:

$$s = \frac{e^2}{120\pi} = \frac{4\pi p_r}{\lambda^2}$$

όπου,

s , είναι η πυκνότητα ροής ισχύος σε W/m^2 ,

e , είναι η rms τιμή της έντασης του πεδίου σε V/m και

p_r , είναι η διαθέσιμη ισχύς σε W από μια ισοτροπική κεραιά τοποθετημένη στο σημείο αυτό

Στο μοντέλο ITU-R P.525 γίνεται ειδική αναφορά σε συστήματα radar, όπου το σήμα αποσβένεται τόσο στη διαδρομή μεταξύ πομπού-στόχου, όσο και στη διαδρομή μεταξύ

στόχου-δέκτη. Για radars που χρησιμοποιούν μια κοινή κεραία για τον πομπό και το δέκτη, η βασική απώλεια μετάδοσης ελεύθερου χώρου ενός radar (L_{br}) μπορεί να γραφεί

$$L_{br}(dB) = 103.4 + 20\log f + 40\log d - 10\log \sigma$$

όπου,

σ , είναι η ενεργός διατομή του στόχου (radar target cross-section) σε m^2 ,

d , είναι η απόσταση μεταξύ radar και στόχου σε km και

f , είναι η συχνότητα του συστήματος σε MHz

Υπενθυμίζεται ότι η ενεργός διατομή του στόχου είναι ο λόγος της συνολικής ισοδύναμης ιστροπικά σκεδαζόμενης ισχύος προς την προσπίπτουσα στο στόχο πυκνότητα ισχύος.

Τέλος, δίνονται και κάποιοι βασικοί τύποι μετατροπής διαφόρων μεγεθών, όπως:

- Η ένταση του πεδίου για ιστροπικά εκπεμπόμενη ισχύ

$$E = P_t - 20\log d + 74.8$$

- Η ιστροπικά ληφθείσα ισχύς για δεδομένη ένταση πεδίου

$$P_r = E = 20\log f - 167.2$$

- Η βασική απώλεια μετάδοσης ελεύθερου χώρου για δεδομένη ιστροπικά εκπεμπόμενη ισχύ και ένταση πεδίου

$$L_{bf} = P_t - E + 20\log f + 167.2$$

- Η πυκνότητα ροής ισχύος για δεδομένη ένταση πεδίου

$$S = E - 145.8$$

όπου,

P_t , είναι η ιστροπικά εκπεμπόμενη ισχύς σε dBW,

P_r , είναι η ιστροπικά ληφθείσα ισχύς σε dBW,

E , είναι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σε dBμV/m,

f , είναι η συχνότητα σε GHz,

d , είναι η απόσταση σε km,

L_{bf} , είναι η βασική απώλεια μετάδοσης ελεύθερου χώρου σε dB και

S , είναι η πυκνότητα ροής ισχύος σε dBW/m²

9.3.3 ITU-R P.526-12 Διάδοση με περίθλαση, 2/2012

Η σύσταση P.526-12 της ITU-R παρουσιάζει διάφορα μοντέλα για τον υπολογισμό των επιδράσεων της περίθλασης σε ένα λαμβανόμενο σήμα, για μια ποικιλία τύπων εμποδίων και τοπολογιών. Συντάχθηκε από τον τομέα Ραδιοεπικοινωνιών της ITU για πρώτη φορά το 1978 και έχει αναθεωρηθεί τα έτη 1982, 1992, 1994, 1995, 1997, 1999, 2001, 2003, 2005, 2007, 2009 και 2012. Ανήκει και αυτή στη σειρά P των συστάσεων, η οποία αναφέρεται στη διάδοση των ραδιοκυμάτων.

Στη σύσταση αυτή επισημαίνεται η σημασία της ατμοσφαιρικής περίθλασης, εκτός από την επίδραση του εδάφους και των διαφόρων εμποδίων πάνω σε αυτό, προκειμένου να αξιολογηθούν σωστά οι γεωμετρικές παράμετροι που βρίσκονται στο μονοπάτι της διάδοσης (π.χ. γωνία περίθλασης, ακτίνα καμπυλότητας, ύψος εμποδίου κ.α.). Για το σκοπό αυτό θα πρέπει να χρησιμοποιείται πάντα η κατάλληλη ισοδύναμη ακτίνα της γης (σύσταση ITU-R P.834) και σε περίπτωση απουσίας άλλων πληροφοριών θα πρέπει να υιοθετείται σαν βάση η τιμή των 8500 km.

Όπως εγράφη και προηγουμένως, στη σύσταση αυτή περιγράφονται διάφορες περιπτώσεις περίθλασης. Ξεκινώντας λοιπόν από την περίπτωση της σφαιρικής γης, για τον υπολογισμό των απωλειών περίθλασης πέρα από τον ορίζοντα (over-the-horizon), παρέχονται δυο τύποι λύσεων: μια αριθμητική και ένα νομόγραμμα. Η αριθμητική μέθοδος που χρησιμοποιείται περιλαμβάνει τον προσδιορισμό διαφόρων μεταβλητών, όπως του κανονικοποιημένου συντελεστή επιφανειακής αγωγιμότητας K , του κανονικοποιημένου μήκους της ζεύξης μεταξύ πομπού-δέκτη X , τα κανονικοποιημένα ύψη των κεραιών αυτών Y_1 και Y_2 και τέλος, ενός συντελεστή που εξαρτάται από τον τύπο του εδάφους και της πόλωσης β . Τα νομογράμματα που παρατίθεται στη σύσταση καλύπτουν αρκετές περιπτώσεις περίθλασης, όπως οριζόντια και κατακόρυφη πόλωση, ξηρά και θάλασσα. Για την περίπτωση διάδοσης για κάθε απόσταση, σε συχνότητες από 10 MHz και πάνω, γίνεται χρήση των προηγούμενων αποτελεσμάτων (πέρα από τον ορίζοντα) ή προτείνεται μια διαδικασία παρεμβολής (interpolation) που βασίζεται στην τιμή της ενεργής ακτίνας της γης.

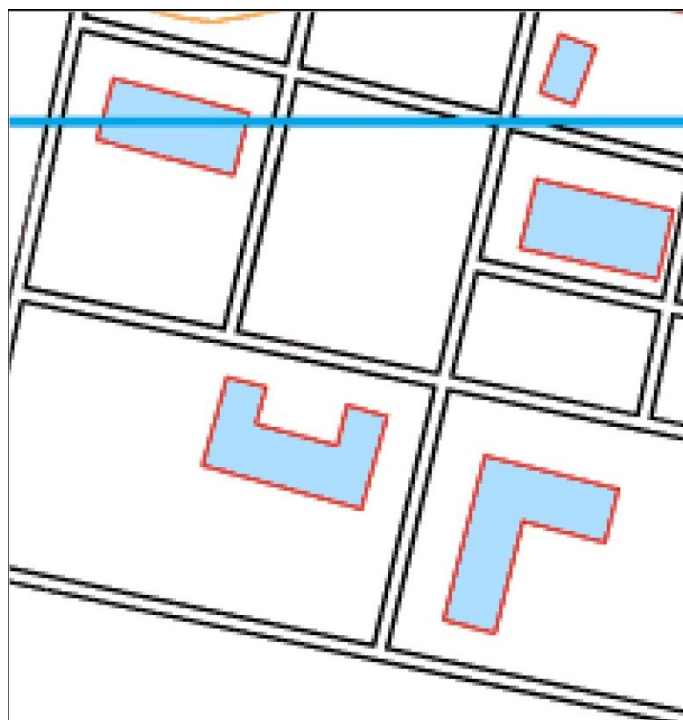
Ένα άλλο σενάριο μελέτης είναι η περίθλαση από απομονωμένα εμπόδια πάνω σε ένα γενικό επίγειο περιβάλλον. Οι υπολογισμοί εξαρτώνται από τον τύπο και τις διαστάσεις του εμποδίου και μπορεί να λαμβάνουν υπ' όψιν τόσο την απευθείας, όσο και την περιθλώμενη συνιστώσα. Έτσι, διακρίνονται οι περιπτώσεις ενός αιχμηρού εμποδίου (knife-edge), ενός στρογγυλεμένου εμποδίου, δύο απομονωμένων κορυφών, πολλαπλών απομονωμένων κυλίνδρων και του μοντέλου Bullington. Επίσης, περιγράφονται σενάρια περίθλασης από λεπτά προπετάσματα (thin screens), όπως για προπέτασμα πεπερασμένου πλάτους, ενός ορθογώνιου ανοίγματος (aperture) καθώς και σύνθετων ανοιγμάτων ή προπετασμάτων. Ακόμη, διακρίνεται η περίπτωση ακμών πεπερασμένης αγωγιμότητας, όπου χρησιμοποιείται η ενοποιημένη θεωρία περίθλασης (Unified Theory of Diffraction – UTD).

Κλείνοντας, αξίζει να σημειωθεί ότι στο τέλος της σύστασης αυτής περιλαμβάνεται και ένα μπλοκ διάγραμμα ροής που καθοδηγεί τον αναγνώστη της σύστασης αυτής στην εύρεση της κατάλληλης μεθόδου για την μελέτη του ζητούμενου φαινομένου περίθλασης.

10. Προσομοίωση σε βιομηχανική περιοχή

Το 1^ο σενάριο των προσομοιώσεων της παρούσας διπλωματικής εργασίας αναφέρεται στη σύγκριση της ραδιοκάλυψης μεταξύ δύο δικτύων WiMAX και LTE σε μια περιοχή με λίγα και μεγάλα κτίρια, δηλαδή, σε μια τυπική βιομηχανική περιοχή. Το ζητούμενο είναι να εξεταστεί η δυνατότητα επικοινωνίας ενός μοναδικού σταθμού βάσης με ένα κινούμενο όχημα (τζιπάκι) το οποίο θα περιφέρεται γύρω από τα κτίρια και θα επιτηρεί το χώρο μέσω μιας θερμικής κάμερας FLIR. Γίνεται σαφές ότι, σχετικά με το δίκτυο WiMAX, το πρότυπο που θα χρησιμοποιηθεί είναι το mobile WiMAX 802.16e στα 2.5 GHz. Επειδή ο αισθητήρας είναι κινούμενος και αυτό δε μπορεί να προσομοιωθεί επακριβώς στο ICS Telecom, αποφασίστηκε να τοποθετηθούν σε κατάλληλα σημεία της περιοχής ενδιαφέροντος αισθητήρες και να μελετηθεί καθένας από αυτούς ξεχωριστά.

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, μιλάμε για μια μικρή περιοχή, μερικών km². Για το λόγο αυτό, απαιτείται η ανάλυση των χαρτών πάνω στους οποίους θα γίνει η προσομοίωση να έχουν όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ανάλυση, δηλαδή λιγότερα τετραγωνικά μέτρα ανά pixel. Η μόνο διαθέσιμη επιλογή με αυτό το χαρακτηριστικό ήταν μια περιοχή λίγο πάνω από την πόλη Teruel, στα περίχωρα της Valencia στην Ισπανία, για την οποία η ανάλυση των χαρτών είναι 5m/pixel. Έτσι, αφού φορτώθηκαν οι χάρτες στο project, μέσω μιας ορθογωνικής μάσκας περικόπηκε ακριβώς η περιοχή που ενδιαφέρει και στην οποία θα γίνουν οι διάφορες προσομοιώσεις.



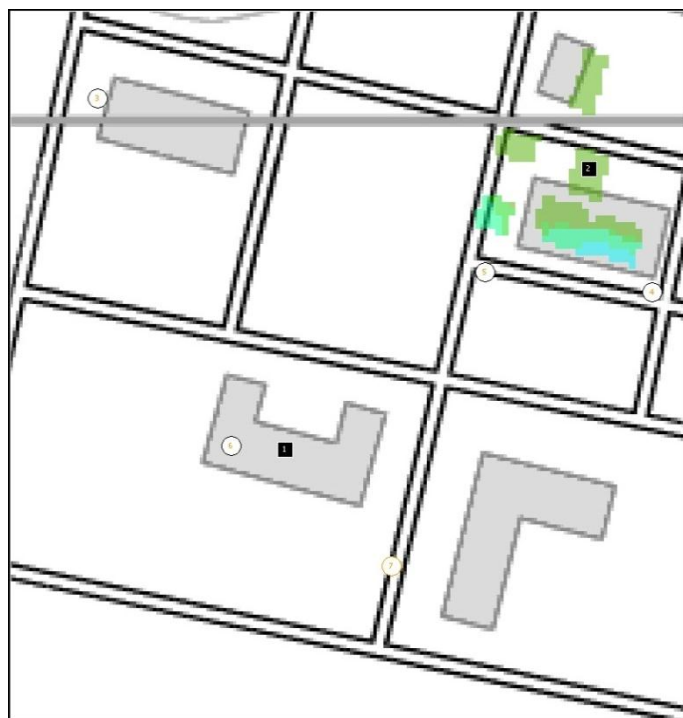
Πολιτικός χάρτης της περιοχής ενδιαφέροντος

Στη συνέχεια, με τη βοήθεια της λειτουργίας *search sites* αναζητήθηκαν τόσο τα καλύτερα δυνατά σημεία για την τοποθέτηση του σταθμού βάσης, όσο και τα δυσμενέστερα σημεία

από πλευράς κάλυψης, δηλαδή οι καταλληλότερες πιθανές θέσεις από τις οποίες περνά το κινούμενο όχημα, για την τοποθέτηση των αισθητήρων στην προσομοίωση.

Σχετικά με το σταθμό βάσης, η αρχική πρόταση ήταν η τοποθέτησή του πάνω σε κάποιο από τα κτίρια, πιθανώς στο πιο ψηλό. Με την εφαρμογή της λειτουργίας *search sites*, όμως, αποδεικνύεται, πιο κάτω, ότι, ανάλογα με την περιοχή προς μελέτη, **είναι καλύτερο ο σταθμός βάσης να τοποθετηθεί στο έδαφος**, σε συγκεκριμένο βέβαια σημείο. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ότι, λόγω σκίασης και περίθλασης, μια κεραία στην οροφή ενός κτιρίου δε θα μπορεί να επικοινωνήσει με έναν αισθητήρα που βρίσκεται κοντά ή ανάμεσα σε άλλα κτίρια. Αντίθετα, μια κεραία που βρίσκεται στο έδαφος (προφανώς η κεραία, έτσι κι αλλιώς, έχει κάποιο ιστό, στην περίπτωση μας 2m, επομένως δεν ακουμπά πάνω σε αυτό), λόγω πολυόδευσης των ΗΜ κυμάτων, μπορεί να καλύψει σημεία που με την πρώτη ματιά φαίνονται δυσπρόσιτα. Αυτό το αναπάντεχο, αρχικά, συμπέρασμα συνεπάγεται αρκετά οφέλη, όπως για παράδειγμα ευκολότερη και οικονομικότερη εγκατάσταση, συντήρηση, επισκευή και μελλοντική αναβάθμιση.

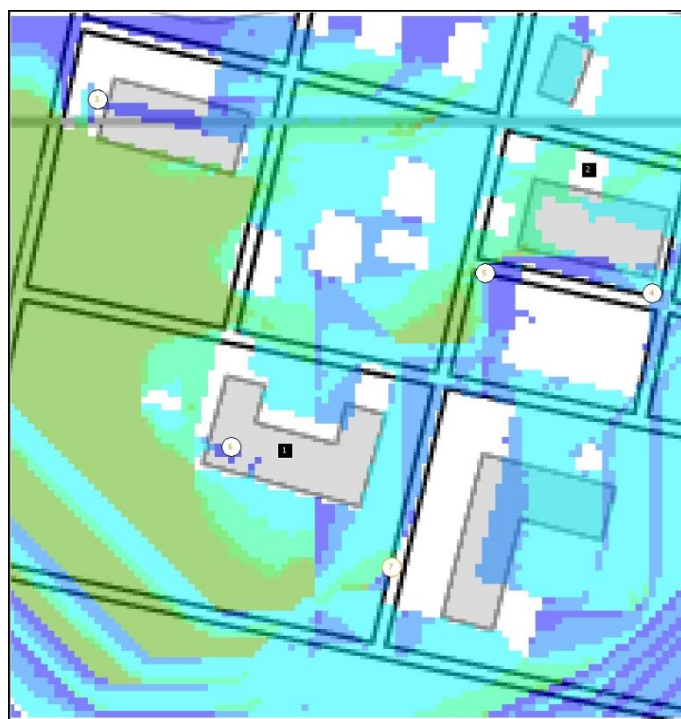
Η παρακάτω εικόνα παρουσιάζει τα αποτελέσματα της λειτουργίας *search sites* πάνω στο χάρτη της περιοχής. Ο μόνος περιορισμός που τέθηκε ήταν η κεραία να τοποθετηθεί πάνω σε τσιμέντο, με αποτέλεσμα να αποκλειστούν οι υπόλοιπες περιοχές. Όπως φαίνεται, το καταλληλότερο σημείο για το σταθμό βάσης είναι στη θέση 2 (τσιμέντο, ύψος 0m), με το ποσοστό οπτικής κάλυψης να είναι στο 26%. Είναι ενδεικτικό, το γεγονός ότι στη θέση 1 (πάνω σε ψηλό τσιμεντένιο κτίριο ύψους 8m), καθώς και σε οποιοδήποτε άλλο μέρος με υπόστρωμα τσιμέντο, το ποσοστό οπτικής κάλυψης είναι 0%.



Λειτουργία *search sites* για την εύρεση της βέλτιστης θέσης του σταθμού βάσης

Για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας, όμως, αποφασίστηκε να τοποθετηθούν σταθμοί βάσης και στα δύο σημεία (1 και 2), ώστε να συγκριθούν οι δυνατότητες κάθε επιλογής. Προφανώς, μόνο ένας σταθμός βάσης θα λειτουργεί κάθε φορά, για το λόγο αυτό διεξήχθησαν δύο διαφορετικές προσομοιώσεις, σχετικά με το downlink, μία για κάθε σταθμό βάσης.

Όσον αφορά το uplink, όπως έχει γραφεί και προηγουμένως, οι θέσεις στις οποίες θα τοποθετηθούν οι αισθητήρες για τις ανάγκες των προσομοιώσεων είναι αυτές στις οποίες η λειτουργία search sites παρουσιάζει το χαμηλότερο ποσοστό. Η μόνη διαφορά με την προηγούμενη εικόνα είναι ότι, πλέον, θα αποκλείσουμε όσα σημεία έχουν τσιμέντο για υπόστρωμα. Έτσι, τα πιθανά σημεία τοποθέτησης των αισθητήρων είναι εκείνα που έχουν σκούρο μπλε χρώμα στην παρακάτω εικόνα:



Λειτουργία search sites για την εύρεση των χειρότερων δυνατών θέσεων των αισθητήρων

Όπως φαίνεται, τα επιλεγμένα σημεία είναι πέντε: τα σημεία 3,4 βρίσκονται ανάμεσα σε δύο διπλανά κτίρια, το σημείο 5 περιτριγυρίζεται από πολλά μικρά και μεγαλύτερα κτίρια, το σημείο 6 βρίσκεται σε μια εσοχή ενός μεγάλου κτιρίου και το σημείο 7 βρίσκεται στην άκρη ενός δρόμου, δίπλα σε ένα μεγάλο κτίριο. Όλες οι θέσεις αυτές δείχνουν ιδανικές για μελέτη, καθώς τα φαινόμενα σκίασης, ανάκλασης, περίθλασης και πολυόδευσης δυσχεραίνουν την ομαλή διάδοση των ΗΜ κυμάτων, καθιστώντας την επικοινωνία από και προς τους αισθητήρες αβέβαιη. Τέλος, σημειώνεται ότι επιλέχθηκαν μόνο οι θέσεις αυτές και όχι κάποιες άλλες, πιο ευνοϊκές, διότι σκοπός ήταν να δοκιμαστεί κάθε σύστημα υπό τις χειρότερες δυνατές συνθήκες, να γίνει δηλαδή μια **worst case analysis**, ώστε να φανούν πιο έντονα οι διαφορές και τα πλεονεκτήματα καθενός.

Αφού ξεκαθαρίστηκε και αυτό, είμαστε, πλέον, έτοιμοι να προχωρήσουμε στις προσομοιώσεις καθαυτές, ξεκινώντας πρώτα από την κάτω ζεύξη (downlink), δηλαδή την επικοινωνία από το σταθμό βάσης προς τους αισθητήρες.

10.1 Downlink

10.1.1 WiMAX

Αφού τοποθετήσουμε τους δύο σταθμούς βάσης στις θέσεις τους και φορτώσουμε τις τεχνικές προδιαγραφές τους, ενεργοποιούμε κάθε έναν μόνο του και εμφανίζουμε το χάρτη ραδιοκάλυψης του καθενός. Τα παρακάτω αποτελέσματα είναι πλέον αναμενόμενα.



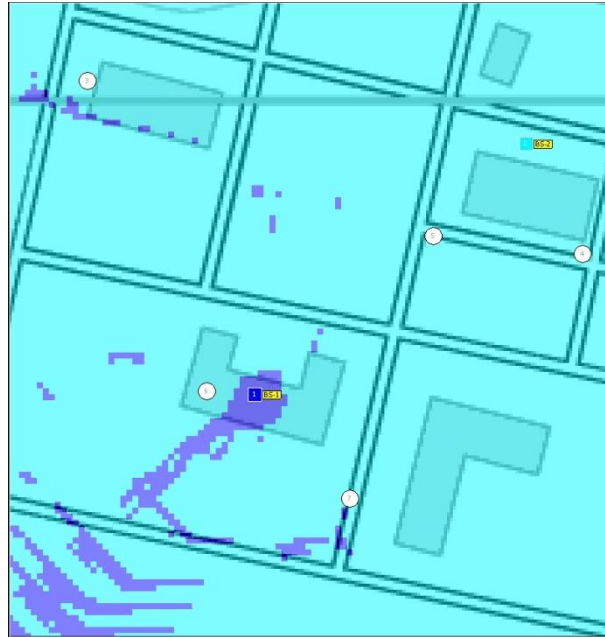
Ραδιοκάλυψη σταθμού βάσης 1 WiMAX



Ραδιοκάλυψη σταθμού βάσης 2 WiMAX



Η θέση 2 υπερέρχει κατά πολύ σε σχέση με τη θέση 1 και οι μόνες περιοχές που συμβαίνει το αντίθετο είναι κυρίως κάτω αριστερά (εκτός δηλαδή της κύριας περιοχής που πρέπει να επιτηρηθεί) και σε κάποια μικρά διασκορπισμένα σημεία. Αυτό φαίνεται καλύτερα μέσα από την παρακάτω εικόνα, που δημιουργήθηκε με την επιλογή Coverage→Network analysis→Best server display και ανάλογα με το χρώμα κάθε pixel, μας πληροφορεί για το ποιος σταθμός βάσης εμφανίζει υψηλότερη πυκνότητα ισχύος σε αυτό. Στην περίπτωση μας τα σημεία με το σκούρο μπλε υποστηρίζονται καλύτερα από το σταθμό βάσης 1, ενώ τα σημεία με το γαλάζιο υποστηρίζονται καλύτερα από το σταθμό βάσης 2. Η διαφορά δείχνει χαώδης.

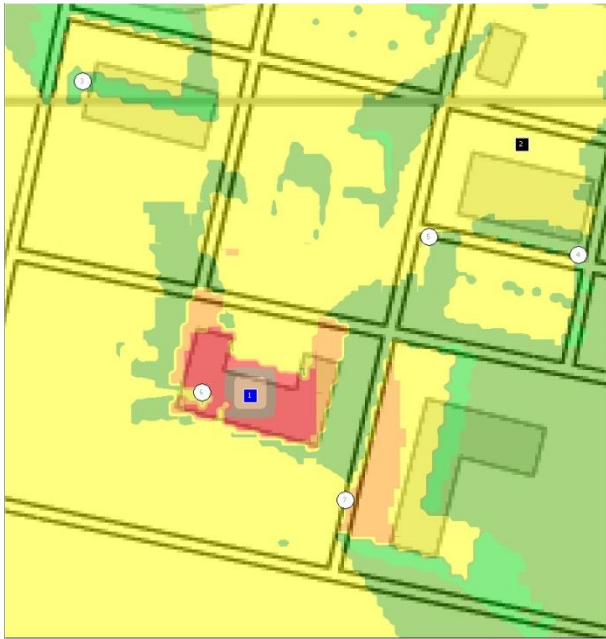


Χάρτης καλύτερου σταθμού βάσης

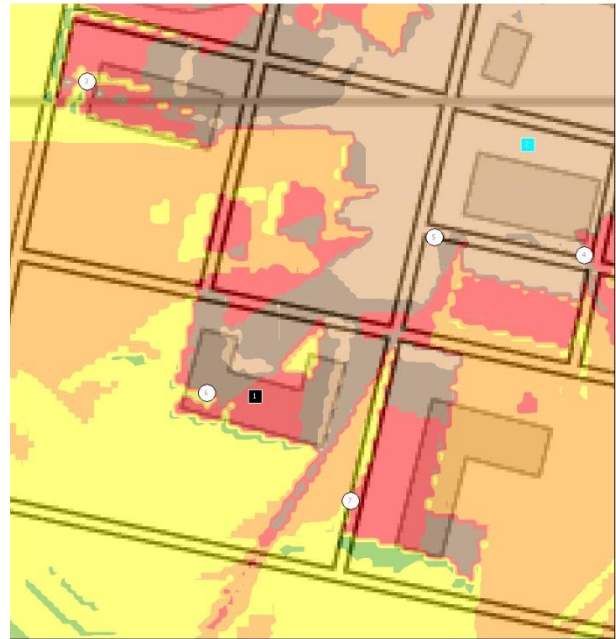
Από τις προδιαγραφές του συστήματος mobile WiMAX προκύπτει ότι οι αισθητήρες έχουν ευαισθησία -95 dBm, επομένως για να έχουμε κάλυψη θα πρέπει στη θέση κάθε αισθητήρα να υπάρχει χρώμα τουλάχιστον θαλασσί (αφορά τις προηγούμενες εικόνες). Παρατηρούμε επομένως ότι οι αισθητήρες 3 και οριακά ο 4 δε λαμβάνουν το ελάχιστο σήμα που απαιτείται ώστε να υπάρχει ορθή επικοινωνία από το σταθμό βάσης 1. Αντίθετα, ο σταθμός βάσης 2 επικοινωνεί άνετα με όλους τους αισθητήρες και έτσι, μπορούμε να τον λειτουργούμε με χαμηλότερη ισχύ εκπομπής εξοικονομώντας ενέργεια. Αποτελεί, δηλαδή, εκτός από πιο αξιόπιστη και πιο οικονομική λύση για την κάλυψη ολόκληρης της περιοχής ενδιαφέροντος.

10.1.2 LTE

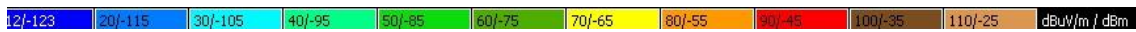
Για να μελετήσουμε το δίκτυο σταθμών βάσης-αισθητήρων στην περίπτωση χρήσης του προτύπου LTE θα τροποποιήσουμε κάθε αντικείμενο του δικτύου, ώστε να διαθέτει τις κατάλληλες τεχνικές προδιαγραφές. Έπειτα, ακολουθώντας την ίδια διαδικασία με προηγούμενως, μπορούμε να εμφανίσουμε τους χάρτες ραδιοκάλυψης της περιοχής ενδιαφέροντος, σχετικά με την κάτω ζεύξη.



Ραδιοκάλυψη σταθμού βάσης 1 LTE



Ραδιοκάλυψη σταθμού βάσης 2 LTE

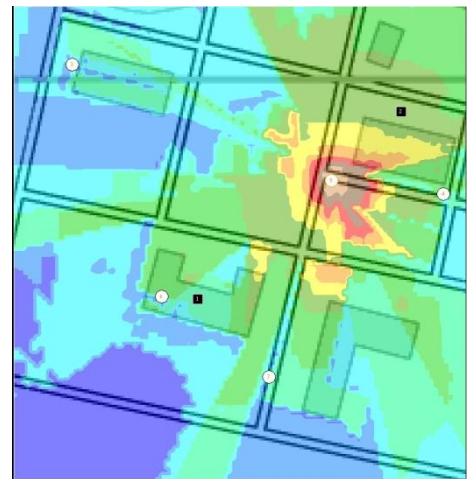
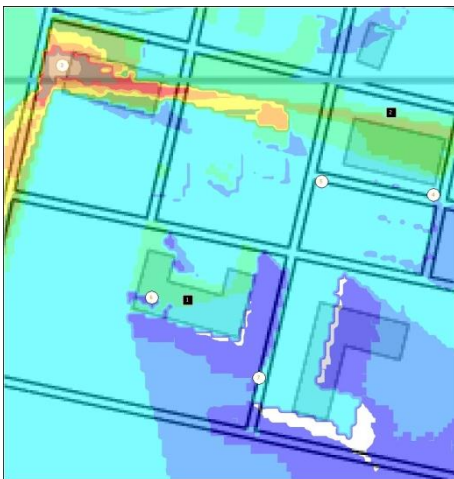


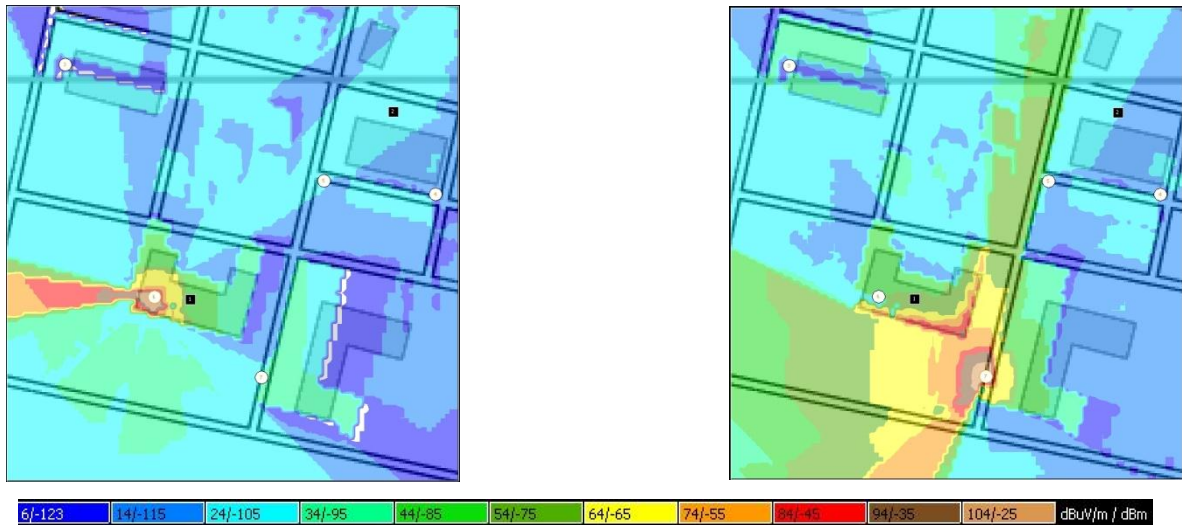
Εδώ, η ευαισθησία των αισθητήρων είναι -105 dBm, επομένως απαιτείται στις θέσεις των αισθητήρων το χρώμα να είναι τουλάχιστον γαλάζιο. Όπως είναι φανερό, και στις δύο περιπτώσεις η περιοχή καλύπτεται πλήρως, μιας και η ισχύς λήψης δεν πέφτει πουθενά κάτω από τα -85 dBm. Είναι, όμως, σαφές, ότι η θέση 2 υπερτερεί πάρα πολύ σε σχέση με τη θέση 1, σε ό,τι αφορά το downlink, με συνέπεια να είναι δυνατή η λειτουργία του συστήματος με χαμηλότερη ενέργεια, ώστε να μειωθεί το κόστος λειτουργίας αυτού.

10.2 Uplink

10.2.1 WiMAX

Σχετικά με το uplink, αφού τοποθετήσουμε τους αισθητήρες στις θέσεις τους και φορτώσουμε τις τεχνικές προδιαγραφές, μπορούμε να εμφανίσουμε τους χάρτες με την κάλυψη καθενός.





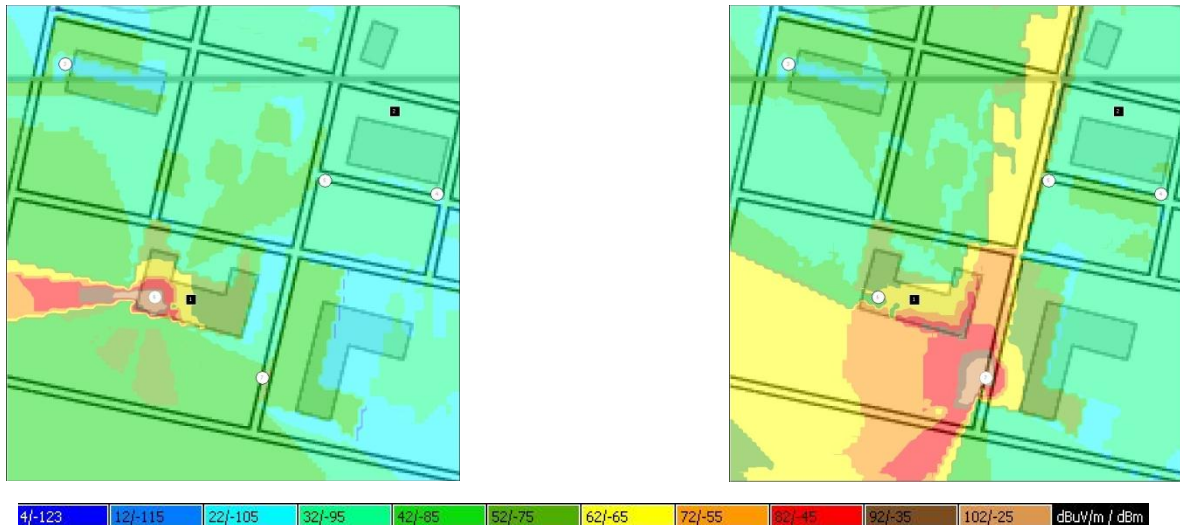
Χάρτες ραδιοκάλυψης αισθητήρα WiMAX

Σύμφωνα με τις προδιαγραφές του mobile WiMAX, η ευαισθησία των σταθμών βάσης είναι περίπου -105 dBm, επομένως, για να υπάρξει ορθή επικοινωνία από τους αισθητήρες προς τον εκάστοτε σταθμό βάσης, θα πρέπει η θέση του τελευταίου να έχει χρώμα τουλάχιστον γαλάζιο. Βλέπουμε, λοιπόν, ότι οι αισθητήρες 3,4 και 5 επικοινωνούν και με τους δύο σταθμούς βάσης (αρκετά καλύτερα όμως με το BS 2), ενώ οι αισθητήρες 6 και 7 επικοινωνούν καλύτερα με το BS 1. Όμως, αν παρατηρήσουμε πιο ενδελεχώς, προκύπτει ότι ο σταθμός βάσης 1 διατηρεί ένα αρκετά καλό επίπεδο σήματος λήψης σε όλες τις θέσεις των αισθητήρων, ενώ ο σταθμός βάσης 2, στις χαμηλότερες περιοχές του χάρτη, μόλις που μπορεί να αποκωδικοποιήσει σωστά τα σήματα που λαμβάνει. Φαίνεται, επομένως, ότι η θέση 1 είναι καλύτερη συγκριτικά με τη θέση 2, σχετικά με το uplink, δηλαδή, κατά την άνω ζεύξη, διευκολύνεται η επικοινωνία με κάποιο σημείο στην κορυφή ενός κτιρίου, παρά με κάποιο σημείο στο έδαφος. Σε αυτό συμβάλει η χαμηλότερη ισχύς εκπομπής των αισθητήρων, ακόμα και αν η ευαισθησία του σταθμού βάσης mobile WiMAX είναι κατά 10 dBm χαμηλότερη.

10.2.2 LTE

Στην περίπτωση του LTE, οι χάρτες ραδιοκάλυψης για το uplink είναι οι εξής:





Χάρτες ραδιοκάλυψης αισθητήρα LTE

Εδώ, η ευαισθησία των σταθμών βάσης LTE είναι -123 dBm, επομένως απαιτείται το χρώμα στις θέσεις τους να είναι τουλάχιστον σκούρο μπλε (δηλαδή, οποιοδήποτε χρώμα). Προκύπτει, έτσι, ότι και οι δύο θέσεις των σταθμών βάσης καλύπτονται από κάθε αισθητήρα και μάλιστα με την ισχύ λήψης να μην πέφτει κάτω από τα -95 dBm, με αποτέλεσμα να υπάρχει ένα περιθώριο περίπου 18 dBm, κάτι που καθιστά το σύστημα πολύ ανθεκτικό σε δύσκολες συνθήκες λειτουργίας. Βεβαίως και εδώ είναι δυνατή η μείωση της ισχύος εκπομπής των αισθητήρων για τη μείωση του λειτουργικού κόστους και παράλληλα της αύξηση της αυτονομίας τους, στοιχείο πολύ σημαντικό όταν μιλάμε για WSNs.

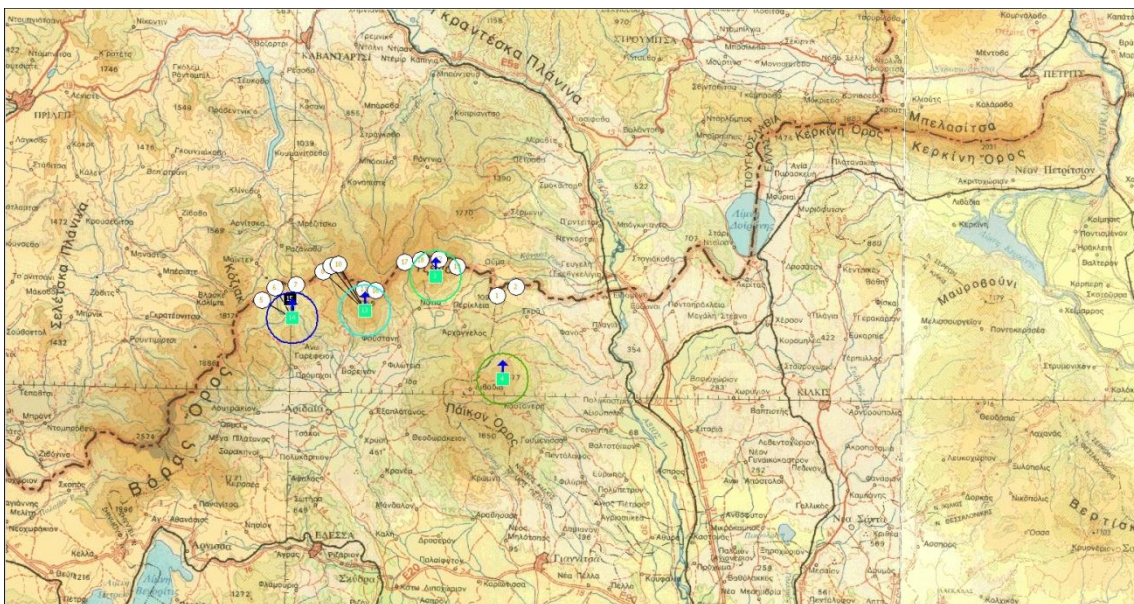
10.3 Σύγκριση mobile WiMAX-LTE

Συγκρίνοντας τις επιδόσεις των δύο προτύπων, mobile WiMAX και LTE, στο ανωτέρω σενάριο, προκύπτει ότι το LTE υπερέχει σαφώς στους περισσότερους τομείς. Η ραδιοκάλυψη, τόσο στο downlink, όσο και στο uplink, παρουσιάζει εξαιρετικά μεγάλη βελτίωση σε σχέση με το mobile WiMAX, αποτέλεσμα που δικαιολογείται από τη χαμηλότερη συχνότητα λειτουργίας, τη χαμηλότερη ευαισθησία σταθμών βάσης και αισθητήρων και εν μέρει από τη μεγαλύτερη ισχύ εκπομπής των σταθμών βάσης LTE. Όπως, όμως, εγράφη και προηγουμένως, αυτή η παράμετρος, επειδή μπορεί να μεταβληθεί, ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας, δίνει τη δυνατότητα ευελιξίας στην υλοποίηση ενός WSN για την επιτήρηση της περιοχής ενδιαφέροντος και μπορεί να συνεπάγεται τόσο θετικές, όσο και αρνητικές επιπτώσεις. Βέβαια, είναι φανερό ότι και το mobile WiMAX μπορεί να λειτουργήσει αφού καλύπτονται οι απαιτήσεις για τα κατώφλια ισχύος των σταθμών βάσης και των αισθητήρων. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι στο LTE, ο σταθμός βάσης 2 λειτουργεί αρκετά ικανοποιητικά τόσο στην άνω, όσο και στην κάτω ζεύξη, με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η ύπαρξη μόνο αυτού για τη λειτουργία του συστήματος, σε αντίθεση με το WiMAX, όπου οι δύο σταθμοί βάσης λειτουργούν μάλλον συμπληρωματικά ο ένας με τον άλλο και έτσι είναι πιθανή η απαραίτητη συνύπαρξη και των δύο, αυξάνοντας το κόστος και την πολυπλοκότητα του συστήματος.

11. Προσομοίωση σε περιοχή συνόρων

Το 2^ο σενάριο προσομοίωσης αφορά την εγκατάσταση και μελέτη ενός δικτύου αισθητήρων επιτήρησης σε μια περιοχή συνόρων. Και εδώ, σκοπός είναι η σύγκριση των υλοποιήσεων του δικτύου αυτού με WiMAX και LTE. Στην περίπτωση αυτή, όμως, οι αισθητήρες που θα τοποθετηθούν (είναι και πάλι θερμικές κάμερες FLIR με απαιτούμενο μέγιστο ρυθμό μετάδοσης 3 Mbps) είναι στατικοί και επομένως το δίκτυο WiMAX που θα χρησιμοποιηθεί είναι το fixed WiMAX 802.16d στα 3.5 GHz.

Στο σενάριο αυτό ενδιαφέρει η επίδοση των δύο αυτών συστημάτων σε ένα ποικίλο, από πλευράς υψομέτρου και εκτεταμένο, από πλευράς αποστάσεων ανάγλυφο. Για το σκοπό αυτό, επιλέχθηκε μια περιοχή στην Κεντρική Μακεδονία, στα σύνορα με τα Σκόπια (FYROM), η οποία διαθέτει τόσο πεδινό, όσο και ορεινό ανάγλυφο και μάλιστα με υψόμετρο που αλλάζει ταχύτατα, ακόμα και σε πολύ κοντινές μεταξύ τους περιοχές.



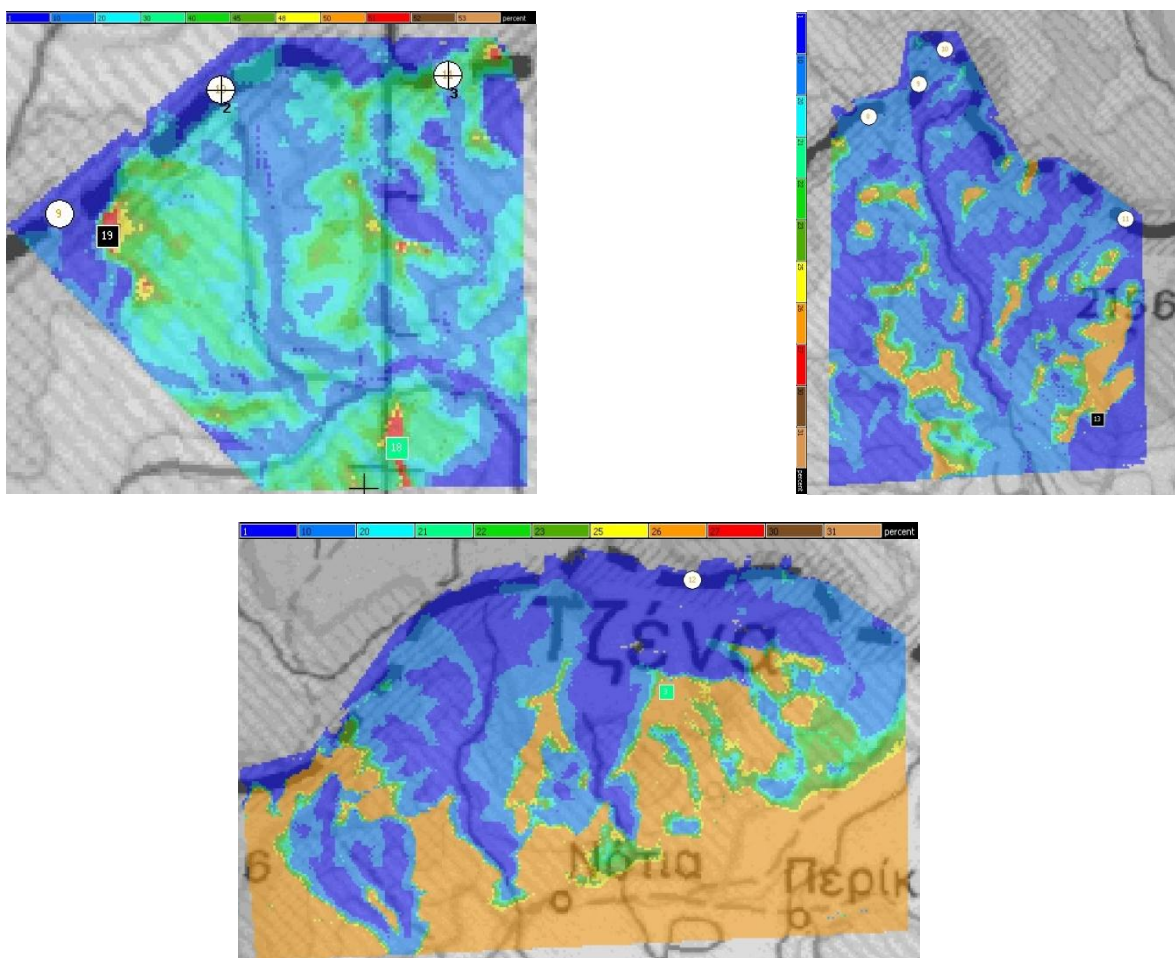
Πολιτικός χάρτης της περιοχής

Όπως και στις προηγούμενες προσομοιώσεις, θα εξεταστεί κάθε δίκτυο χωριστά και επίσης χωριστά θα γίνει και η μελέτη της κάτω και της άνω ζεύξης (downlink και uplink). Υπάρχουν, όμως, δύο σαφείς διαφορές σε σχέση με το σενάριο 1. Κατά πρώτον, σημειώνεται ότι θα λειτουργούν ταυτόχρονα όλοι οι σταθμοί βάσης και ο λόγος για αυτό είναι ότι το σύστημα είναι fixed και κάθε σταθμός καλύπτει καλύτερα διαφορετική περιοχή, ειδικά αν αναλογιστούμε το «δύσκολο» από πλευράς επικοινωνιών, ανάγλυφο.

Κατά δεύτερον, ακριβώς επειδή είναι τέτοια η φύση τόσο του εδάφους, όσο και του τρόπου επιτήρησης (κάμερες FLIR), είναι λογικό ότι, ο περιοριστικός παράγοντας, σε ό,τι αφορά τη θέση των αισθητήρων, δεν είναι τόσο το αν κάποιος εξ' αυτών μπορεί να επικοινωνήσει απ' ευθείας με τον κατάλληλο σταθμό βάσης, αλλά το αν οι αισθητήρες παρακολουθούν ολόκληρη την περιοχή που τους αναλογεί. Με άλλα λόγια, για να επιτηρηθεί σωστά μια περιοχή, θα πρέπει οι αισθητήρες να βρίσκονται σε πάρα πολύ κοντινές θέσεις ώστε το οπτικό πεδίο καθενός να σταματά ακριβώς εκεί που αρχίζει το

οπτικό πεδίο του επόμενου. Αυτό συνεπάγεται ότι κάθε αισθητήρας μπορεί να επικοινωνήσει έμμεσα με το σταθμό βάσης, αρκεί να μπορεί να επικοινωνήσει με κάποιον άλλο αισθητήρα ο οποίος έχει τη δυνατότητα της απευθείας επικοινωνίας με κάποιο BS. Όπως έχει αναφερθεί και στο θεωρητικό σκέλος της εργασίας, μέσω της μεθόδου της «πλημμύρας» είναι δυνατόν ένα σήμα να μεταδοθεί από το σημείο που δημιουργείται μέχρι το σταθμό βάσης και αντίστροφα, αρκεί να υπάρχει επικοινωνία μεταξύ των κόμβων του WSN. Επομένως, στις προσομοιώσεις που ακολουθούν, όταν κάποιος αισθητήρας δεν μπορεί να επικοινωνήσει με κάποιο σταθμό βάσης και το αντίστροφο, δε σημαίνει ότι το σύστημα δεν μπορεί να λειτουργήσει κανονικά. Εξ' άλλου, ούτε είναι σκοπός της εργασίας, ούτε υπάρχουν οι απαραίτητοι πόροι, ώστε να αποδειχθεί αν κάποιο σύστημα λειτουργεί επακριβώς ή όχι, αλλά να γίνει μια αρχική σύγκριση των δυνατοτήτων ενός συστήματος WiMAX και ενός συστήματος LTE, ως έναυσμα για περαιτέρω μελέτη και έρευνα.

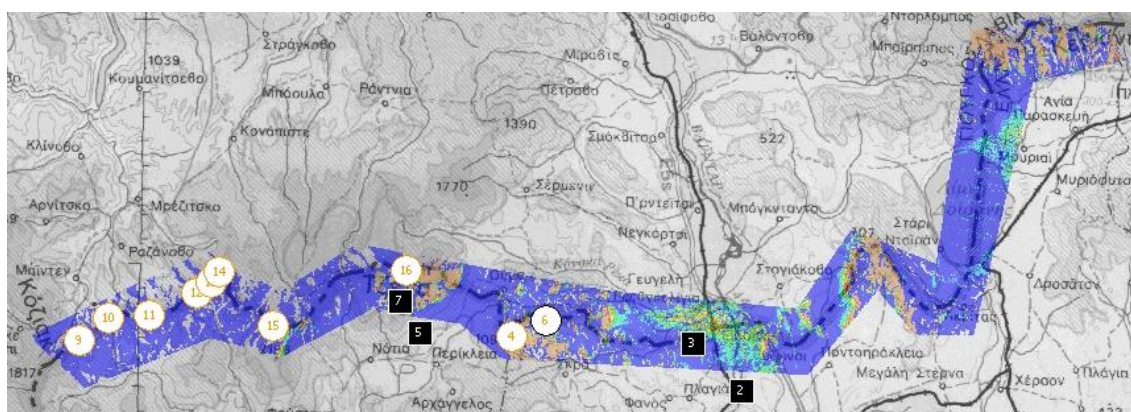
Με αυτά κατά νου, μπορούμε να προχωρήσουμε στη δημιουργία του σεναρίου προσομοίωσης στο ICS Telecom. Αφού φορτωθούν τα απαραίτητα αρχεία (η ανάλυση των χαρτών εδώ είναι 50 m/pixel) και δημιουργηθεί το project, η πρώτη μας δουλειά είναι να προσδιορίσουμε τις θέσεις των σταθμών βάσης και των αισθητήρων με τη λειτουργία search sites. Λόγω του ότι η περιοχή ενδιαφέροντος είναι αρκετά μεγάλη σε έκταση, έπειτα από αρκετές δοκιμές προτιμήθηκε ο διαχωρισμός της σε τέσσερις υπο-περιοχές για την εύρεση της θέσης των σταθμών βάσης.



Εύρεση βέλτιστων σημείων τοποθέτησης των σταθμών βάσης

Η τέταρτη υπο-περιοχή είναι η πεδιάδα στα ανατολικά. Για αυτήν, η θέση του σταθμού βάσης 4 βρέθηκε ότι την καλύπτει κατά τον καλύτερο δυνατό τρόπο, ενώ παράλληλα μπορεί να εξυπηρετήσει και ορεινές περιοχές στα δυτικότερα, όπως θα φανεί από τις προσομοιώσεις. Αν δούμε τις επιλεχθείσες θέσεις μακροσκοπικά, διακρίνουμε ότι για τις περιοχές με ορεινό ανάγλυφο είναι απαραίτητη η παρουσία ενός σταθμού βάσης όσο το δυνατόν πιο κοντά στους αισθητήρες, ενώ για τις πιο ομαλές και πεδινές περιοχές μπορεί ο σταθμός βάσης να βρίσκεται αρκετά μακριά από αυτούς καλύπτοντας πολύ μεγάλες εκτάσεις και σημεία αρκετά μακριά από αυτόν.

Σχετικά με τις θέσεις των αισθητήρων, η λειτουργία search sites μπορεί να εφαρμοστεί σε ολόκληρη την περιοχή ενδιαφέροντος, χωρίς την απαίτηση διαχωρισμού της, μιας και οι αισθητήρες εκ προοιμίου θα βρίσκονται πάνω στα σύνορα. Έτσι προκύπτει η παρακάτω εικόνα, όπου ιδανικές θέσεις είναι εκείνες στις οποίες δεν υπάρχει καθόλου χρώμα πάνω στο χάρτη (όπως και στο σενάριο 1, ακολουθείται και εδώ μια worst case analysis).



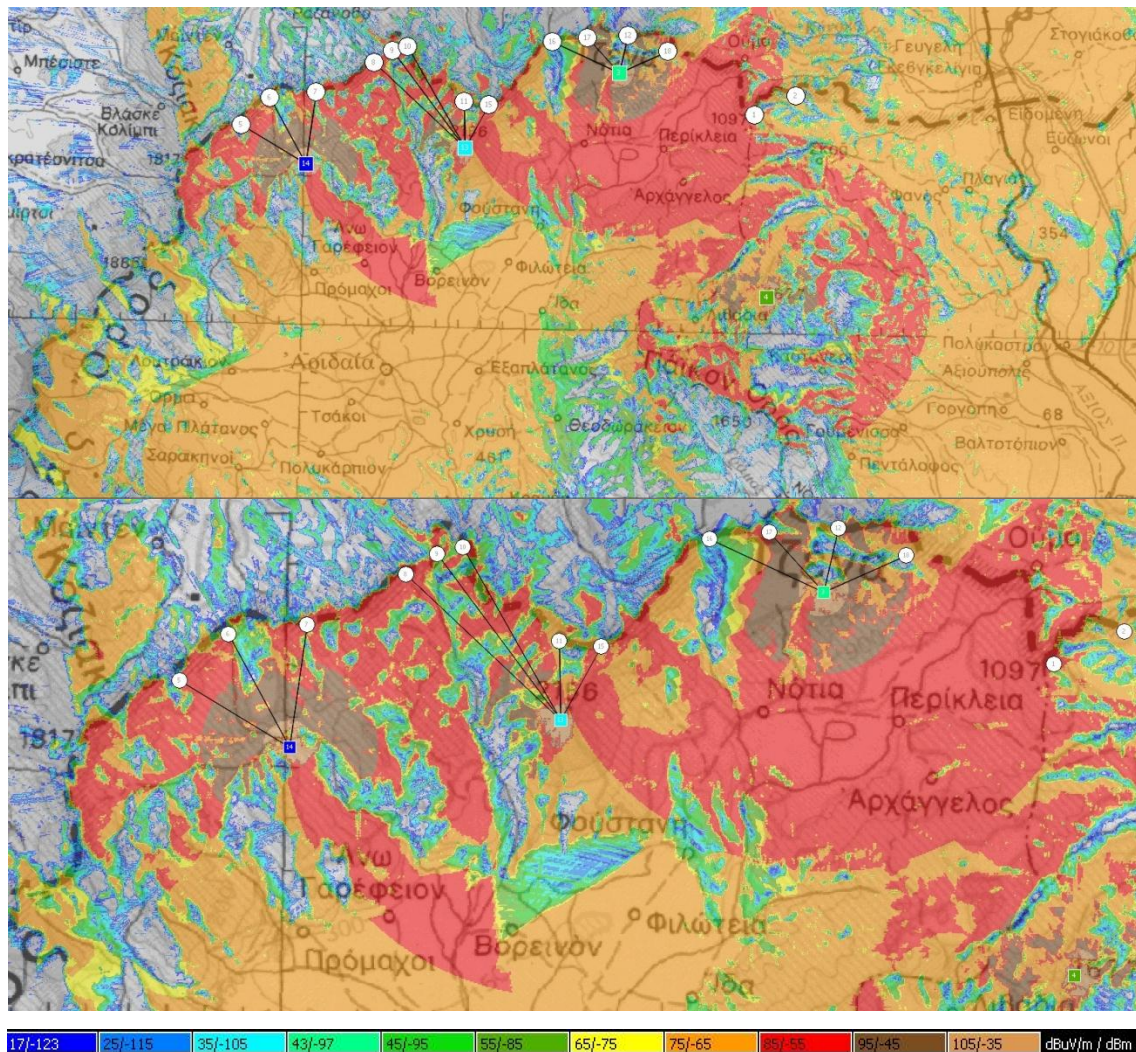
Κατάλληλες θέσεις για τους αισθητήρες

Έχοντας τοποθετήσει όλα τα αντικείμενα στο project, είμαστε πλέον έτοιμοι να ξεκινήσουμε τις προσομοιώσεις, αρχικά για την προς τα κάτω ζεύξη.

11.1 Downlink

11.1.1 WiMAX

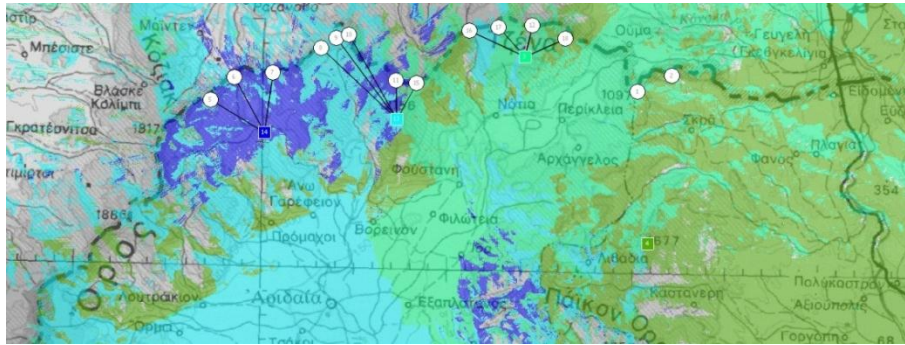
Όπως εγράφη και προηγουμένως, στο σενάριο αυτό θα λειτουργούν ταυτόχρονα όλοι οι σταθμοί βάσης. Έτσι, αφού τους ενεργοποιήσουμε όλους, μπορούμε να δούμε την κάλυψη της περιοχής ενδιαφέροντος. Οι αισθητήρες, για την περίπτωση του fixed WiMAX έχουν κατώφλι ισχύος λήψης τα -95 dBm, επομένως απαιτείται το χρώμα στη θέση κάθε αισθητήρα να είναι τουλάχιστον ανοιχτό πράσινο.



Ραδιοκάλυψη σταθμών βάσης (αρχική και εστιασμένη προβολή)

Όπως φαίνεται από τις δύο εικόνες, όλοι οι αισθητήρες, πλην του 16 οριακά, λαμβάνουν αρκετά ισχυρότερο σήμα από το ελάχιστο αναγκαίο, επομένως κατά το downlink δε θα υπάρξει πρόβλημα επικοινωνίας. Επίσης, παρατηρούμε ότι γενικότερα πάνω στη γραμμή των συνόρων, η κάλυψη είναι αρκετά καλή, και μάλιστα βλέπουμε ότι στα περισσότερα σημεία επιτυγχάνεται πυκνότητα ισχύος περίπου 85 dBmV/m και ισχύς λήψης -55 dBm (κόκκινο χρώμα στο χάρτη). Επομένως, κατά την κάτω ζεύξη, το πρότυπο 802.11d (fixed WiMAX) τα πηγαίνει αρκετά καλά, παρά το ανομοιόμορφο υψόμετρο και τις μεγάλες αποστάσεις.

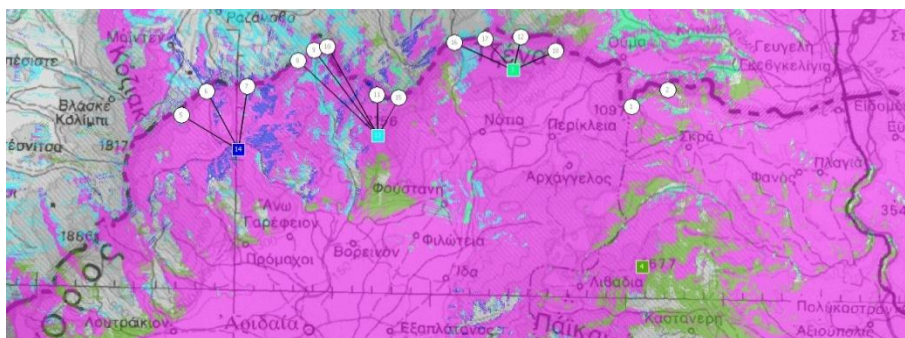
Σχετικά με τη θέση των σταθμών βάσης, έχουμε πλέον τη δυνατότητα να αιτιολογήσουμε την επιλογή τους, μέσω της λειτουργίας Best server display, με την οποία, κάθε ρixel του χάρτη χρωματίζεται ανάλογα με τον σταθμό βάσης από τον οποίο λαμβάνει το μεγαλύτερο σήμα.



Χάρτης καλύτερων σταθμών βάσης

Όπως γίνεται αντιληπτό, οι σταθμοί βάσης 3, 13 και 14 βρίσκονται κοντά στους αισθητήρες των πιο ανώμαλων εδαφών, ενώ ο σταθμός βάσης 4 καλύπτει τις πεδινές περιοχές στα δεξιά, όντας πιο μακριά από αυτές. Παρ' όλα αυτά, οι σταθμοί 3, 4 και 13 μπορούν να καλύψουν και σημεία τα οποία δεν αποτελούν άμεση προτεραιότητά τους, με συνέπεια την εξοικονόμηση πόρων και τη μείωση της πολυπλοκότητας του δικτύου.

Επιπροσθέτως, μπορούμε να δούμε την επικάλυψη των καλύψεων, μέσω της λειτουργίας Coverage overlapping.

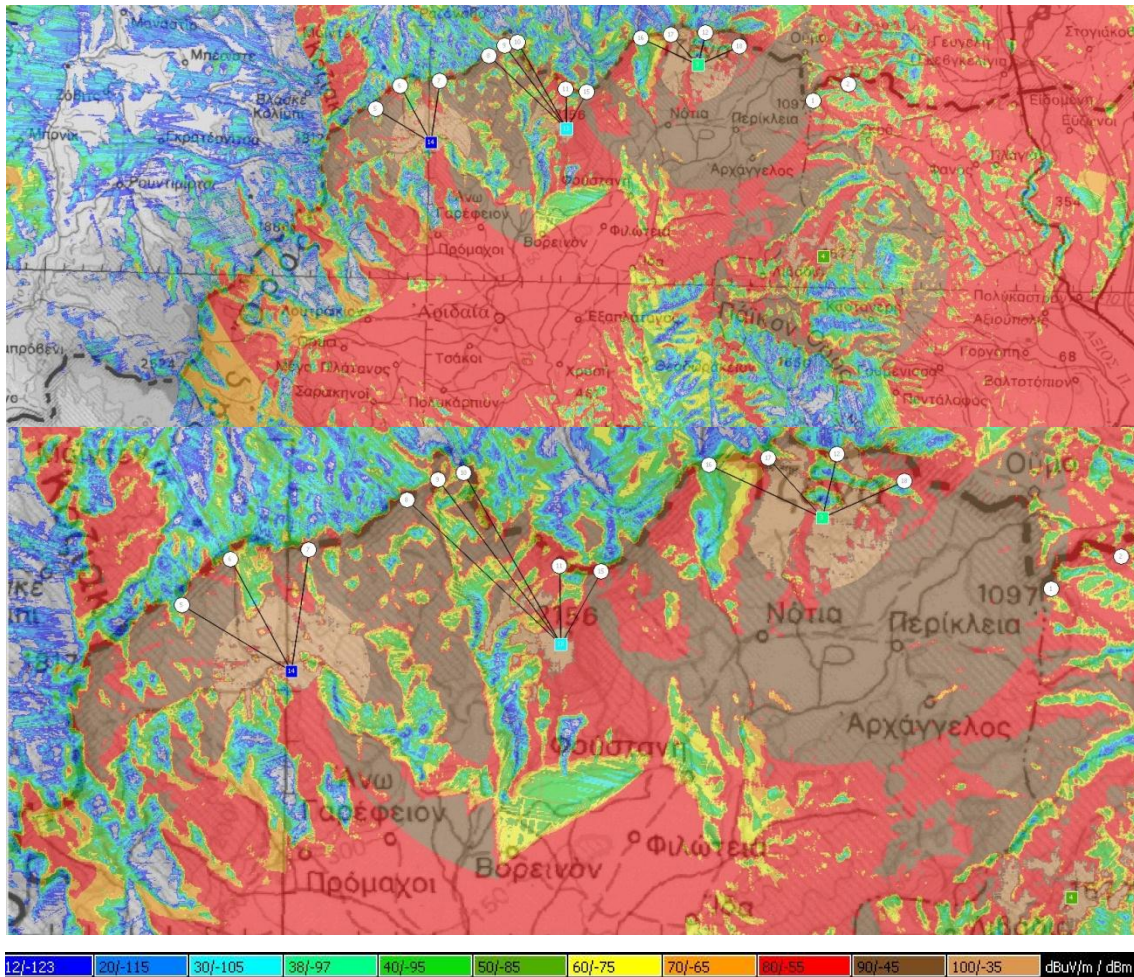


Χάρτης επικάλυψης ραδιοκαλύψεων σταθμών βάσης

Από την εικόνα αυτή προκύπτει ότι σχεδόν όλα τα σημεία της περιοχής λαμβάνουν σήμα και από τους τέσσερις σταθμούς βάσης, πράγμα που είναι καλό ώστε να μην υπάρχει πρόβλημα σε περίπτωση βλάβης ή αποτυχίας επικοινωνίας κάποιου εξ' αυτών, καθιστώντας, έτσι, το σύστημα πιο αξιόπιστο.

11.1.2 LTE

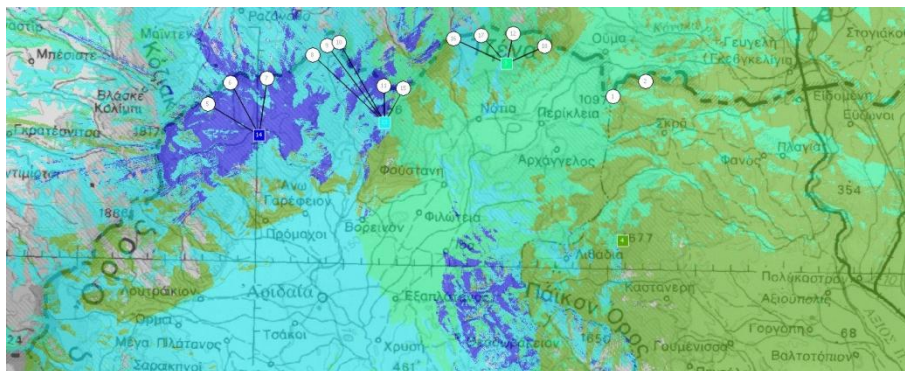
Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία με προηγουμένως, είναι δυνατή η δημιουργία των παρακάτω χαρτών ραδιοκάλυψης της περιοχής, για σύστημα LTE.



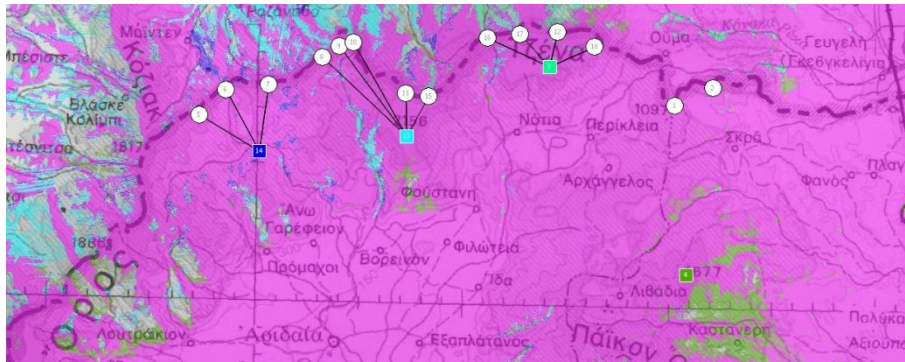
Χάρτες ραδιοκάλυψης σταθμών βάσης (αρχική και εστιασμένη προβολή)

Παρατηρώντας τους χάρτες αυτούς, διαπιστώνουμε και εδώ, ότι δεν υπάρχει κάποιο σημαντικό πρόβλημα επικοινωνίας κατά την κάτω ζεύξη, μιας και η ευαισθησία των αισθητήρων LTE είναι -105 dBm, δηλαδή απαιτείται το χρώμα της θέσης καθενός να είναι τουλάχιστον γαλάζιο. Μάλιστα, είναι φανερό ότι, στις περισσότερες περιοχές, η ισχύς λήψης είναι αρκετά μεγαλύτερη από το ανωτέρω κατώφλι (κάνοντας το σύστημα ανθεκτικότερο σε προβλήματα διαλείψεων και εξασθένησης των σημάτων), με αποτέλεσμα να είναι εφικτή η μείωση της ισχύος εκπομπής των σταθμών βάσης, για τη μείωση του λειτουργικού κόστους του συστήματος.

Στην περίπτωση του LTE, οι χάρτες καλύτερης κάλυψης και επικάλυψης των ραδιοκαλύψεων είναι οι εξής:



Χάρτης καλύτερων σταθμών βάσης



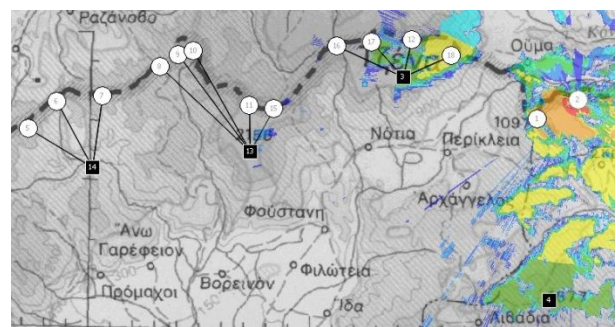
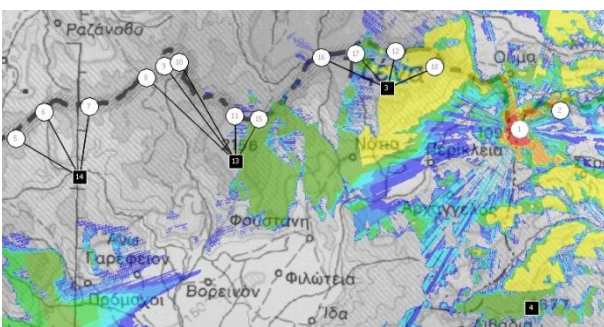
Χάρτης επικάλυψης ραδιοκαλύψεων σταθμών βάσης

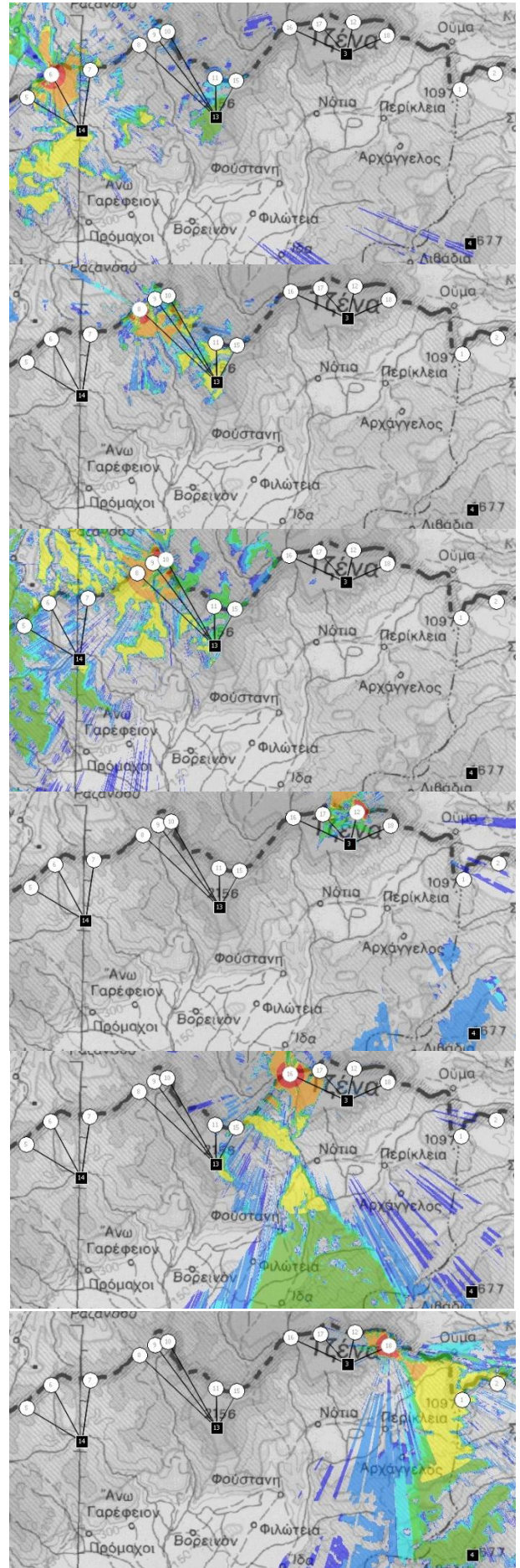
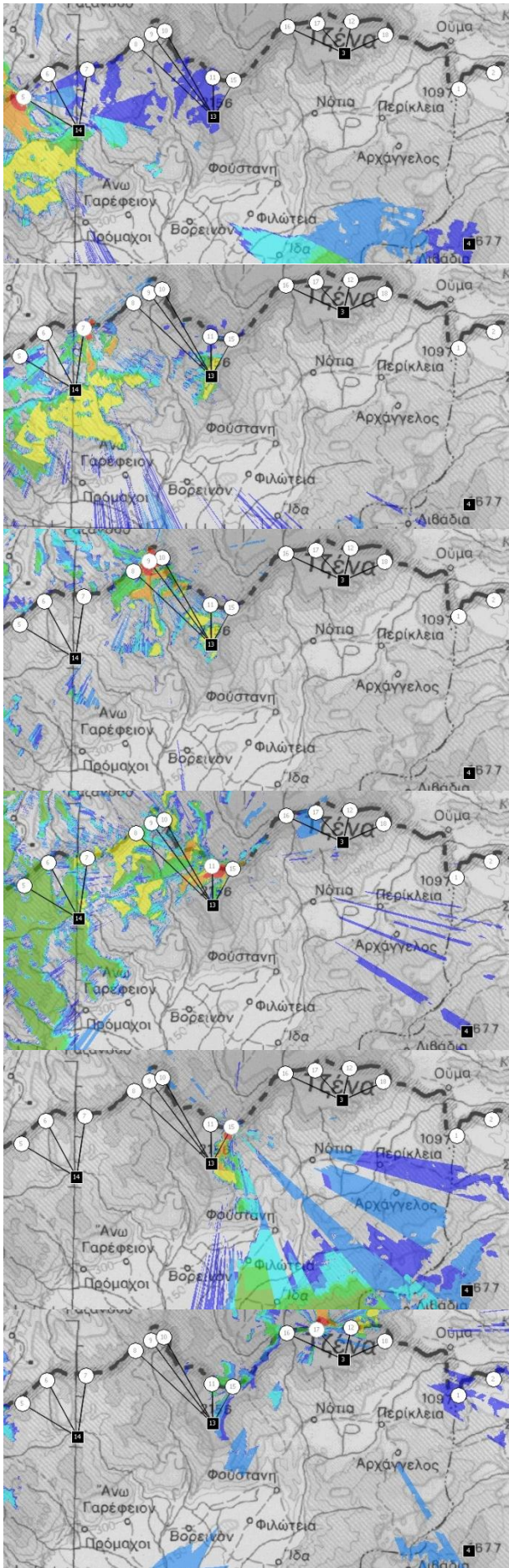
Και εδώ διαπιστώνουμε ότι σχεδόν όλες οι περιοχές καλύπτονται από περισσότερους του ενός σταθμούς βάσης, με συνέπεια το σύστημα να είναι αρκετά αξιόπιστο σε περίπτωση βλάβης κάποιου εξ' αυτών.

11.2 Uplink

11.2.1 WiMAX

Για τη μελέτη της άνω ζεύξης, αφού έχουμε τοποθετήσει τους αισθητήρες στο χάρτη, μπορούμε να δούμε την πυκνότητα ισχύος και την ισχύ που θα λαμβάνει κάποιος σταθμός βάσης. Προφανώς, σε αυτό το στάδιο της μελέτης, θα ενεργοποιούμε έναν αισθητήρα κάθε φορά και όχι όλους μαζί ταυτοχρόνως, διότι θέλουμε να δούμε το κατά πόσο μπορεί ο καθένας τους να επικοινωνήσει με κάποιο σταθμό βάσης. Όπως έχει γραφεί και προηγουμένως, σε περίπτωση που κάποιος αισθητήρας δε μπορεί να το κάνει αυτό, αρκεί να υπάρχει η δυνατότητα επικοινωνίας με κάποιον άλλον αισθητήρα, ώστε το σύστημα να λειτουργεί ορθά. Έτσι, έχουμε τις παρακάτω εικόνες, στις οποίες απαιτείται το χρώμα στη θέση των σταθμών βάσης να είναι τουλάχιστον θαλασσί (δηλαδή, η ισχύς λήψης των BSs να είναι τουλάχιστον -97 dBm), ενώ όταν αυτό δεν ικανοποιείται, η απαίτηση είναι στη θέση κάποιου άλλου αισθητήρα το χρώμα να είναι τουλάχιστον ανοιχτό πράσινο (δηλαδή η ισχύς λήψης των αισθητήρων να είναι τουλάχιστον -95 dBm).





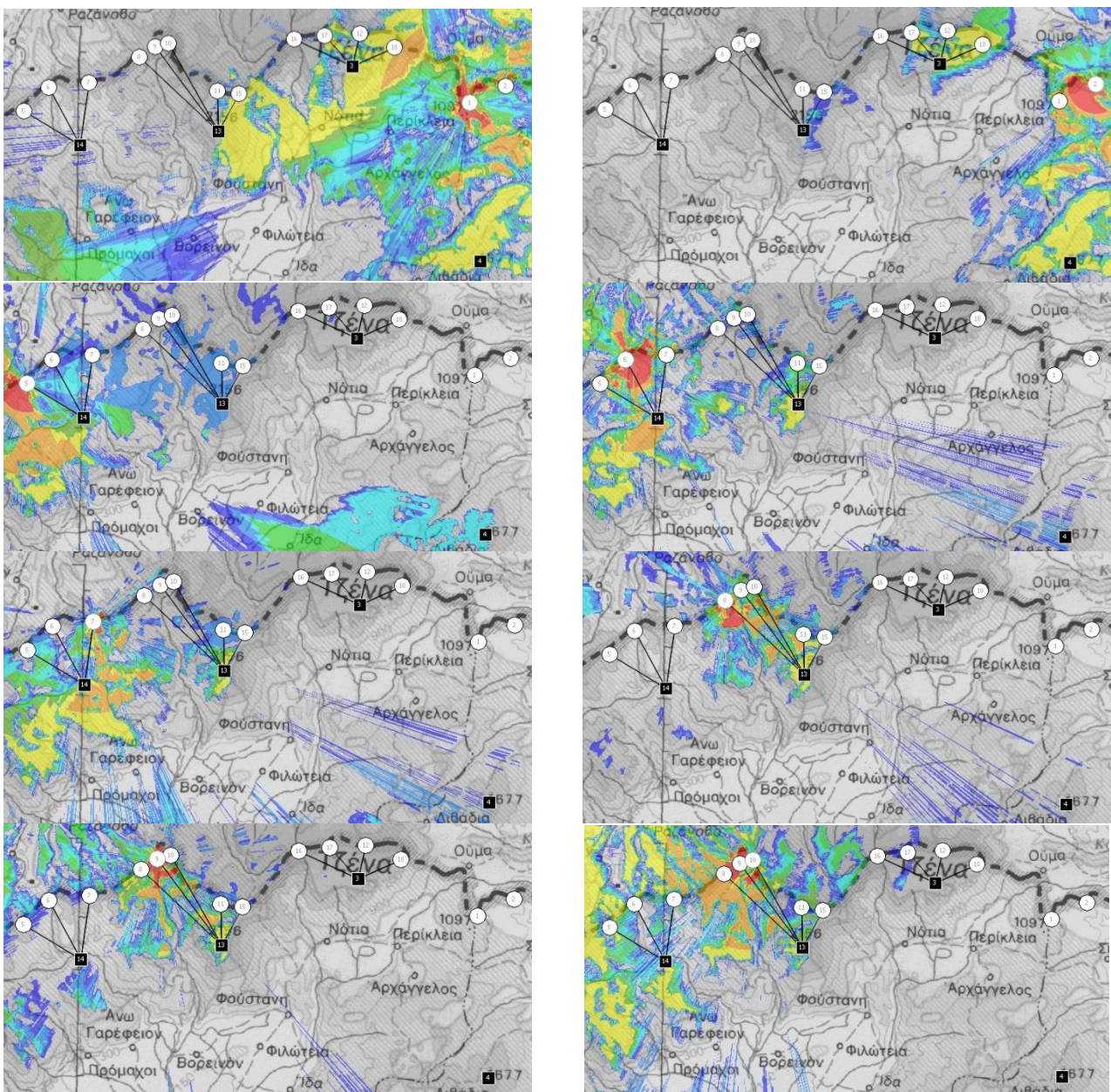
0/-123 16/-115 26/-105 34/-97 36/-95 46/-85 56/-75 66/-65 76/-55 86/-45 96/-35 dBW/m / dBm

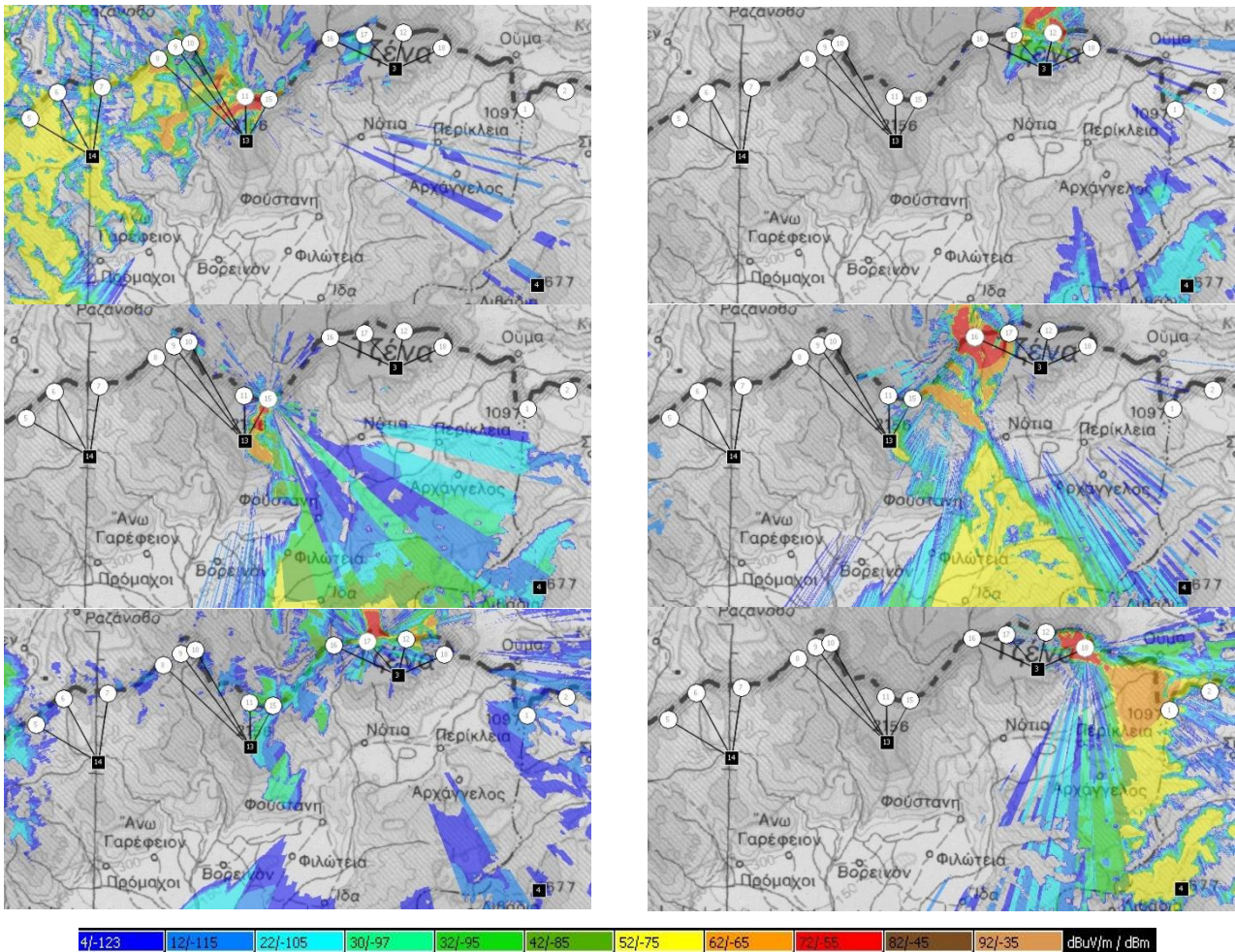
Χάρτες ραδιοκάλυψης αισθητήρων Fixed WiMAX

Όπως φαίνεται στις παραπάνω εικόνες, οι αισθητήρες 1, 2, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 15, 16 και 18 μπορούν να επικοινωνήσουν απ' ευθείας με κάποιο σταθμό βάσης. Αρκετοί, μάλιστα, εξ' αυτών δύνανται να επικοινωνήσουν με περισσότερους του ενός σταθμούς. Στον αντίποδα, ο αισθητήρας 12 δε μπορεί να επικοινωνήσει με κάποιο σταθμό βάσης, όμως οριακά υπάρχει δυνατότητα επικοινωνίας με τον αισθητήρα 17, ενώ και ο αισθητήρας 17 δε μπορεί να επικοινωνήσει απευθείας με κάποιο σταθμό βάσης, αλλά υπάρχει η δυνατότητα επικοινωνίας με τους αισθητήρες 11, 15 και 16. Επομένως, παρατηρούμε ότι γενικά δεν υπάρχει κάποιος αισθητήρας που να μη μπορεί καθόλου να επικοινωνήσει με κάποιο σταθμό βάσης, με συνέπεια το σύστημα fixed WiMAX να λειτουργεί ικανοποιητικά και στο uplink.

11.2.1 LTE

Στην περίπτωση του LTE, οι χάρτες ραδιοκάλυψης για την άνω ζεύξη είναι οι εξής:





Χάρτες ραδιοκάλυψης αισθητήρων LTE

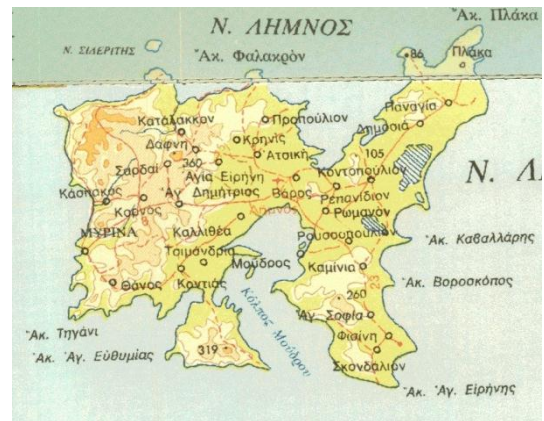
Παρατηρώντας τις παραπάνω εικόνες, διακρίνουμε ότι όλοι οι αισθητήρες μπορούν να επικοινωνήσουν απ' ευθείας με κάποιο σταθμό βάσης, μιας και η ευαισθησία των τελευταίων είναι -123 dBm και ως εκ τούτου, απαιτείται η θέση αυτών να είναι χρωματισμένη τουλάχιστον με σκούρο μπλε. Μάλιστα, σχεδόν όλοι οι αισθητήρες μπορούν να επικοινωνήσουν με περισσότερους του ενός σταθμούς βάσης, αυξάνοντας, έτσι, την αξιοπιστία, την ανθεκτικότητα και την ευελιξία του συστήματος.

11.3 Σύγκριση fixed WiMAX-LTE

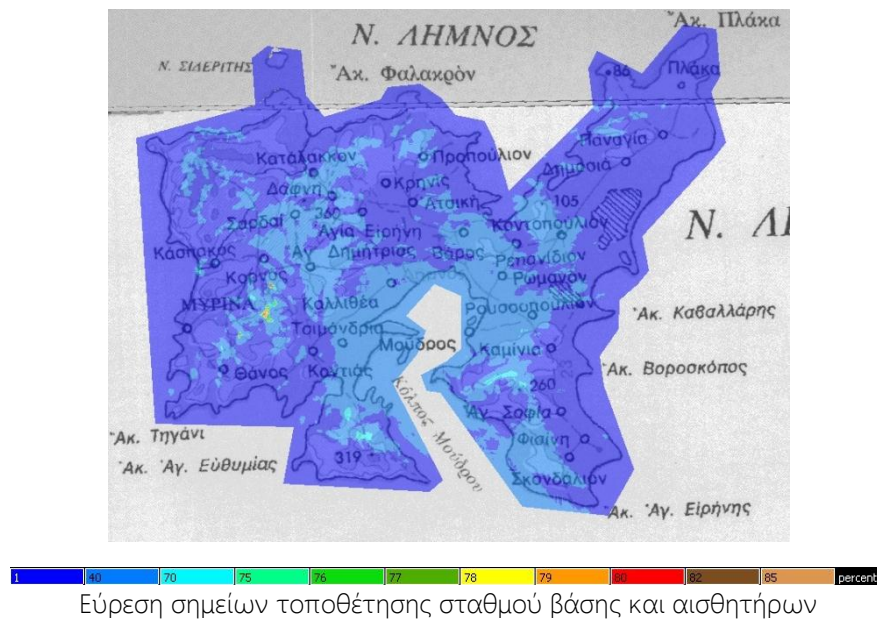
Από τις παραπάνω εικόνες, είναι φανερό ότι το πρότυπο LTE λειτουργεί και στο σενάριο αυτό αρκετά καλύτερα από ότι το WiMAX. Μπορεί πάλι και στις δύο υλοποιήσεις να καλύπτονται τα κατώφλια ισχύος των σταθμών βάσης και των αισθητήρων, όμως είναι πασιφανές ότι το LTE, για τους λόγους που παρατέθηκαν και στο προηγούμενο σενάριο, καταφέρνει να καλύψει την περιοχή ενδιαφέροντος με ένα αρκετά μεγαλύτερο περιθώριο ισχύος. Μάλιστα, στην περίπτωση του uplink, οι αισθητήρες επικοινωνούν όλοι απ' ευθείας με τους σταθμούς βάσης, δημιουργώντας την προσδοκία ότι το ίδιο θα συμβεί και για άλλους αισθητήρες (κάμερες) που μπορεί να τοποθετηθούν στην περιοχή για την επιτήρησή της.

12. Προσομοίωση σε νησί

Το τρίτο σενάριο προσομοίωσης της εργασίας αφορά στην επιτήρηση της περιμέτρου ενός νησιού. Το σύστημα που θα αναπτυχθεί θα αποτελείται από ένα σταθμό βάσης πάνω στο νησί και από ένα κινητό αισθητήρα (κάμερα FLIR), τοποθετημένο πάνω σε ένα ταχύπλοο σκάφος. Ζητούμενο είναι να διερευνηθεί η δυνατότητα επικοινωνίας μεταξύ των δύο αυτών αντικειμένων του δικτύου, χρησιμοποιώντας είτε το πρότυπο mobile WiMAX, είτε το πρότυπο LTE. Είναι σαφές, ότι το σενάριο αυτό μοιάζει αρκετά με το πρώτο, επομένως θα χρησιμοποιηθεί η ίδια μεθοδολογία με εκείνο. Η σημαντική διαφορά μεταξύ τους είναι το ανάγλυφο της περιοχής, μιας και εδώ, μιλάμε για ένα νησί, το οποίο βρέχεται από θάλασσα και του οποίου το έδαφος είναι ανώμαλο, βραχώδες, με κόλπους και όρμους που δυσχεραίνουν την επικοινωνία. Το νησί που επιλέχθηκε είναι η Λήμνος, τόσο για τη στρατηγική της σημασία, όσο και για το ανάγλυφό της: διαθέτει μια σχετικά μεγάλη έκταση, απότομες υψομετρικές διαφορές μεταξύ γειτονικών περιοχών, ενώ η ακτογραμμή της είναι εξαιρετικά ανομοιόμορφη, δίνοντάς μας τη δυνατότητα να δοκιμάσουμε τα δύο πρότυπα σε συνθήκες αρκετά δύσκολες.



Για την εύρεση των θέσεων του σταθμού βάσης και των αισθητήρων χρησιμοποιείται η λειτουργία search sites, η οποία δίνει την παρακάτω εικόνα:

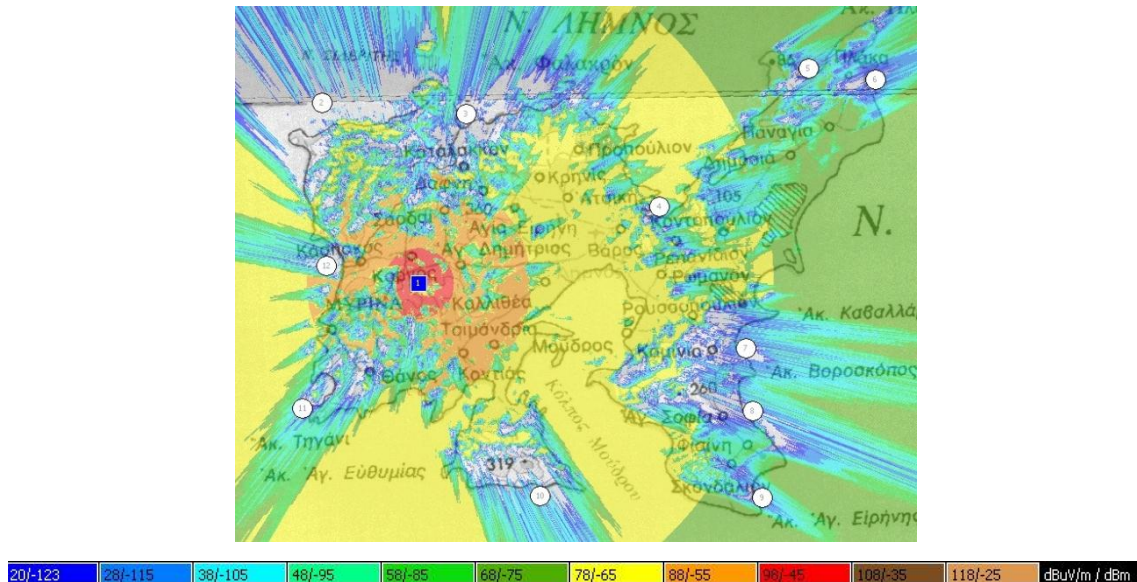


Από αυτή προκύπτει η θέση του σταθμού βάσης δεξιά από τη Μύρινα, ενώ οι αισθητήρες επιλέχθηκαν να τοποθετηθούν σε κατάλληλα σημεία περιμετρικά του νησιού. Πλέον, μπορούμε να προχωρήσουμε στη μελέτη των προτύπων mobile WiMAX και LTE, ξεχωριστά για την κάτω και άνω ζεύξη, ως συνήθως.

12.1 Downlink

12.1.1 WiMAX

Ενεργοποιώντας το σταθμό βάσης, δημιουργούμε το χάρτη ραδιοκάλυψης της περιοχής, ο οποίος είναι ο εξής:

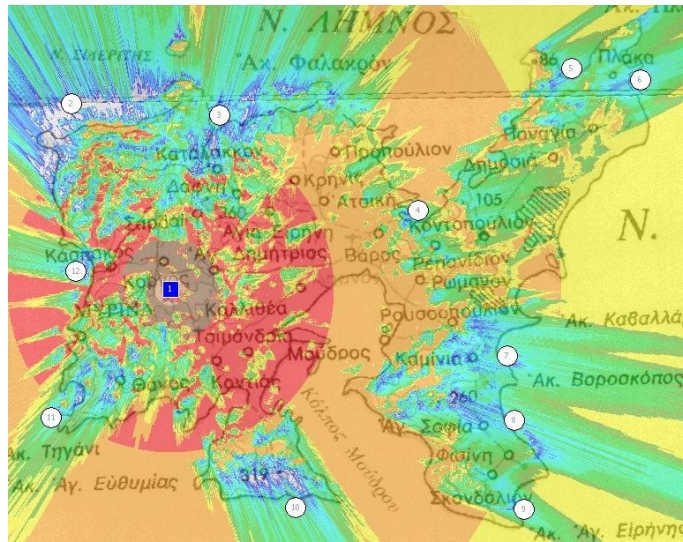


Χάρτης ραδιοκάλυψης σταθμού βάσης mobile WiMAX

Η ευαισθησία των αισθητήρων στο πρότυπο mobile WiMAX είναι -95 dBm, επομένως απαιτείται η θέση κάθε αισθητήρα να έχει χρώμα τουλάχιστον θαλασσί. Μόνο η θέση 4 καταφέρνει να ικανοποιήσει την απαίτηση αυτή, επομένως, η απευθείας επικοινωνία με τις υπόλοιπες δεν είναι εφικτή. Επίσης, βλέπουμε ότι οι περιοχές που δεν καλύπτονται εκτείνονται σε αρκετά μεγάλες αποστάσεις από τις ακτές, επομένως είναι βέβαιο ότι το πρότυπο WiMAX δεν καταφέρνει να εξασφαλίσει την επιτήρηση της περιοχής μόνο με ένα σταθμό βάσης, επομένως θα χρειαστούν πιο σύνθετες λύσεις για το σκοπό αυτό.

12.1.2 LTE

Για την περίπτωση του LTE, ο χάρτης ραδιοκάλυψης του σταθμού βάσης είναι ο εξής:



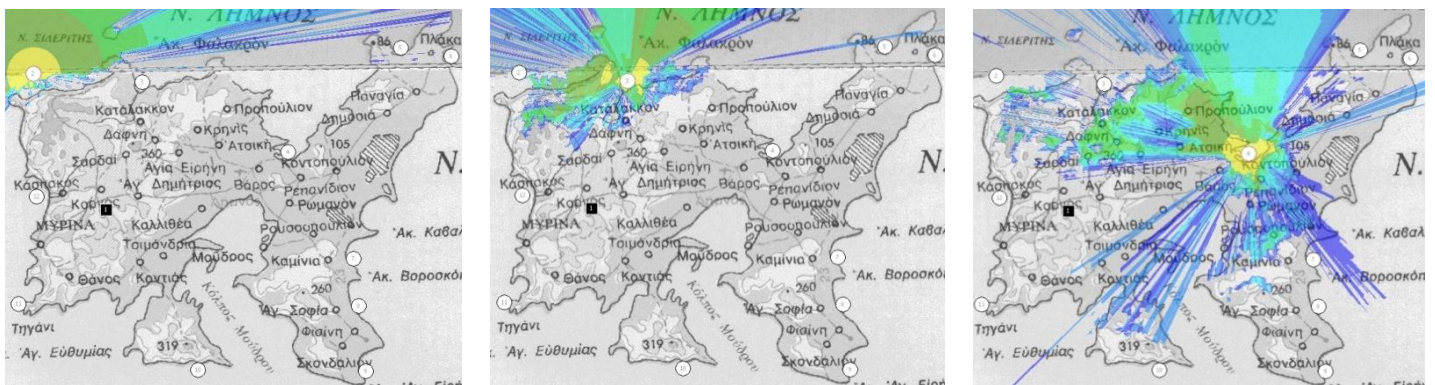
Χάρτης ραδιοκάλυψης σταθμού βάσης LTE

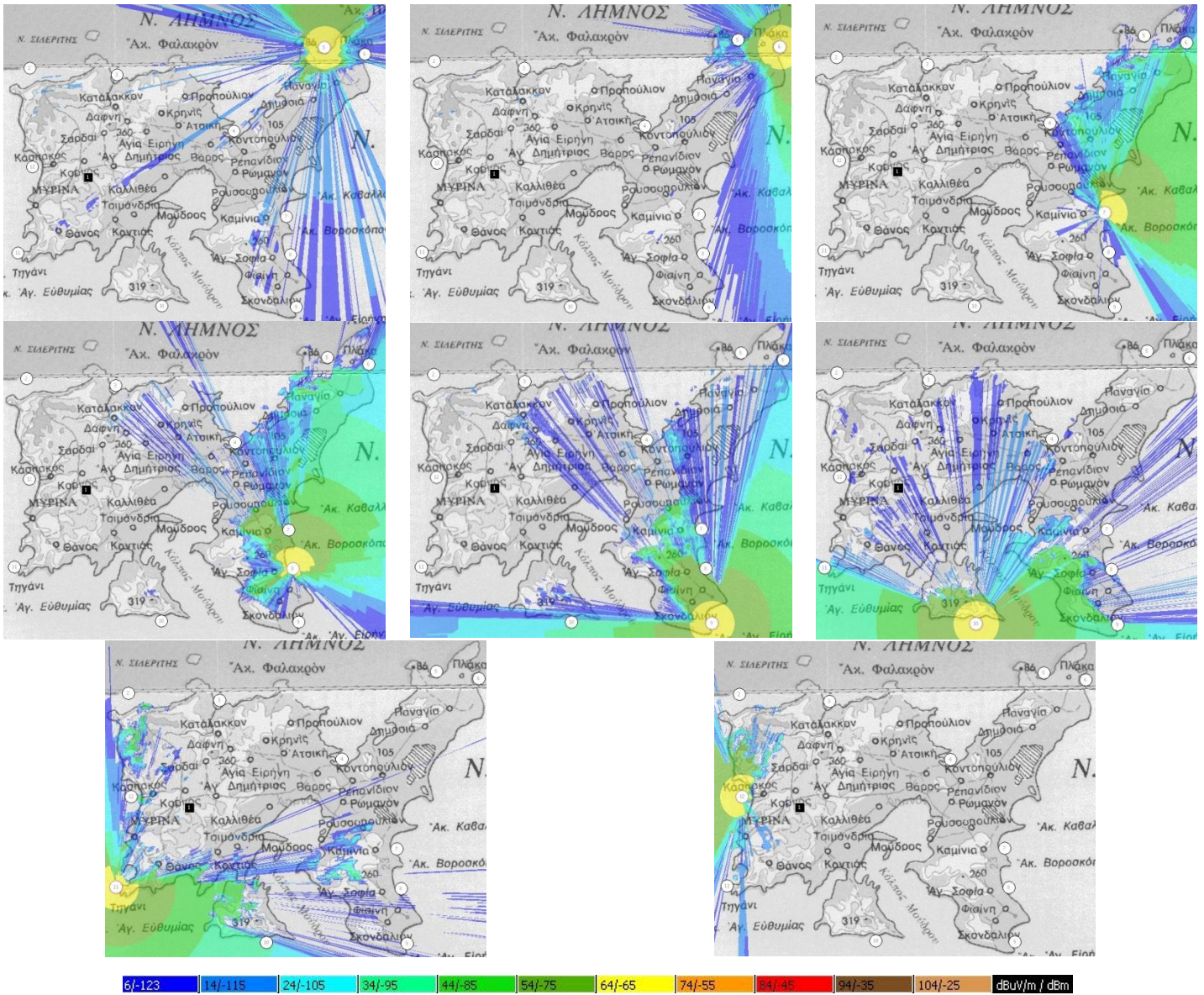
Η ευαισθησία των αισθητήρων στο LTE είναι -105 dBm, επομένως, το χρώμα που απαιτείται να έχουν οι θέσεις των αισθητήρων πρέπει να είναι τουλάχιστον γαλάζιο. Όπως φαίνεται, μόνο η θέση 2 δεν καλύπτεται (οριακά) από το σταθμό βάσης. Βέβαια, βλέπουμε ότι η γύρω, από αυτή τη θέση, περιοχή παρουσιάζει πυκνότητα ισχύος λήψης πάνω από το κατώφλι (30 dBmV/m), επομένως μπορούμε να θεωρήσουμε ότι και η θέση 2 επικοινωνεί με το σταθμό βάσης, με την υποσημείωση ότι κοντά στην ακτή στο σημείο εκείνο η ισχύς λήψης πέφτει κάτω από το κατώφλι, με ό,τι συνέπειες μπορεί να υπάρξουν.

12.2 Uplink

12.2.1 WiMAX

Για την περίπτωση της άνω ζεύξης, όπως και στο πρώτο σενάριο, θα ενεργοποιούμε έναν αισθητήρα (πιο σωστά, μια πιθανή θέση) κάθε φορά και θα μελετάμε αν μπορεί να επικοινωνήσει με το σταθμό βάσης. Εδώ, δεν εφαρμόζεται, προφανώς, η τεχνική της «πλημμύρας», αφού, όπως έχει ήδη αναφερθεί, μιλάμε για έναν κινητό αισθητήρα και όχι για πολλούς στατικούς. Οι διάφοροι αισθητήρες που εισάγουμε στο ICS Telecom χρησιμοποιούνται μόνο για να μοντελοποιηθεί το δίκτυο αυτό και δεν αναπαριστούν ξεχωριστούς αισθητήρες. Έτσι, έχουμε τους παρακάτω χάρτες:



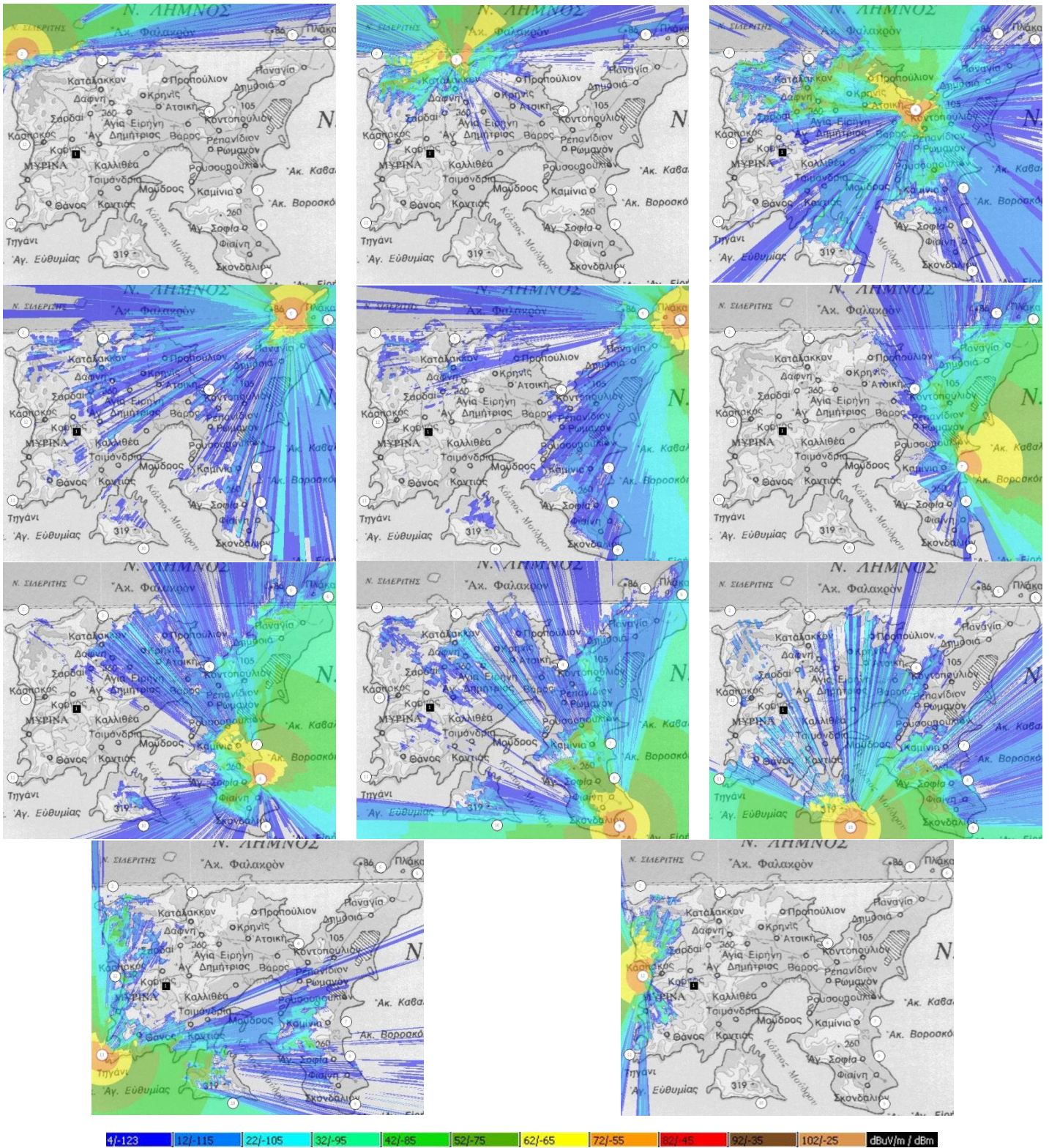


Χάρτες ραδιοκαλύψεων αισθητήρα WiMAX

Η απαίτηση εδώ, ώστε να υπάρχει επικοινωνία με το σταθμό βάσης, είναι η ισχύς λήψης αυτού να ξεπερνά τα -105 dBm, δηλαδή η θέση του BS να έχει χρώμα τουλάχιστον γαλάζιο. Όπως προκύπτει από τις παραπάνω εικόνες, σε καμία θέση των αισθητήρων δεν υπάρχει επικοινωνία με το σταθμό βάσης, επομένως, το πρότυπο mobile WiMAX αποτυγχάνει εντελώς στην άνω ζεύξη. Η προφανής λύση είναι η τοποθέτηση relays ή repeaters σε κατάλληλα σημεία στο νησί, ώστε να είναι δυνατή η λήψη του εκπεμπόμενου από τον αισθητήρα σήματος και εν συνεχεία, η μεταφορά του στο σταθμό βάσης. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή και η βελτίωση της επικοινωνίας στην κάτω ζεύξη, που, όπως είδαμε προηγουμένως, δεν είναι εφικτή παντού.

12.2.2 LTE

Για την περίπτωση LTE, οι χάρτες ραδιοκαλύψεως της άνω ζεύξης είναι οι εξής:



Χάρτες ραδιοκάλυψης αισθητήρα LTE

Η ευαισθησία του σταθμού βάσης LTE είναι -123 dBm, επομένως, στη θέση αυτού πρέπει το χρώμα να είναι τουλάχιστον σκούρο μπλε. Το συμπέρασμα που προκύπτει παρατηρώντας τις ανωτέρω εικόνες είναι ότι ούτε εδώ έχουμε επικοινωνία κατά την άνω ζεύξη. Η κατάσταση είναι σαφέστατα βελτιωμένη, σε σχέση με το mobile WiMAX, όμως είναι και στο LTE απαραίτητη η τοποθέτηση κάποιων relays ή repeaters σε κατάλληλα σημεία, ώστε να βελτιωθεί η λήψη του σήματος από το σταθμό βάσης.

12.3 Σύγκριση mobile WiMAX – LTE

Όπως είναι φανερό από τις προηγούμενες προσομοιώσεις, γενικά το πρότυπο LTE είναι καλύτερο από το mobile WiMAX και στην περίπτωση της επιτήρησης ενός νησιού όπως η Λήμνος. Στο downlink, με το LTE επιτυγχάνεται η επικοινωνία με τον αισθητήρα σχεδόν σε κάθε θέση που μπορεί να βρεθεί αυτός, ενώ στο uplink η κατάσταση βελτιώνεται σαφώς, χωρίς, όμως, να μπορεί να επικοινωνήσει ο αισθητήρας με το σταθμό βάσης. Είναι προφανές ότι στην άνω ζεύξη, οποιοδήποτε πρότυπο και αν υιοθετηθεί δε μπορεί να εξασφαλίσει την επικοινωνία με το BS, επομένως θα πρέπει να αναζητηθούν λύσεις που να συμφέρουν τόσο από άποψη κόστους όσο και από άποψη απλότητας υλοποίησης. Σε κάθε περίπτωση, απαιτείται μια πιο ενδελεχής και επί σκοπού μελέτη για την εύρεση του κατάλληλου συστήματος ασύρματων αισθητήρων, το οποίο θα μπορεί να επιτηρήσει την περίμετρο ενός νησιού, ικανοποιώντας συγκεκριμένες προδιαγραφές και περιορισμούς, τεχνικούς ή μη.

επίλογος – μελλοντικές επεκτάσεις

Στις προηγούμενες σελίδες, αξιολογήθηκε η επίδοση των προτύπων ασύρματων επικοινωνιών WiMAX (mobile και fixed) και LTE, σε ό,τι αφορά τη ραδιοκάλυψη τριών περιοχών ενδιαφέροντος, με αφορμή τη λειτουργία ενός δικτύου ασύρματων αισθητήρων για επιτήρηση. Αρχικά, παρουσιάστηκαν όλα τα θέματα που αφορούν ένα τέτοιο σύστημα, όπως, τα **white spaces**, που παρουσιάζουν ευκαιρίες εκμετάλλευσης αλλά και πιθανά προβλήματα παρεμβολών σε άλλες υπηρεσίες, οι λεπτομέρειες των προτύπων **WiMAX** και **LTE**, προκειμένου να γίνει μια αντιπαραβολή των χαρακτηριστικών και των ιδιοτήτων καθενός και επίσης η τεχνολογία **MIMO**, που αναπτύσσεται ραγδαία τα τελευταία χρόνια και προσφέρει λύσεις σε προβλήματα επικοινωνιών και κατακόρυφη αύξηση των επιδόσεων. Στη συνέχεια, παρουσιάστηκε ένα τυπικό σύστημα επιτήρησης που αποτελείται από ένα δίκτυο ασύρματων αισθητήρων και προτάθηκαν συγκεκριμένες βελτιώσεις προς αυτό, πάνω σε πιθανές αδυναμίες που εμφανίζει. Τέλος, αφού αναλύθηκε λεπτομερώς το λογισμικό **ICS Telecom**, παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα των **προσομοιώσεων** που διεξήχθησαν με αυτό και έγινε η σύγκριση των ραδιοκαλύψεων ενός δικτύου WiMAX και ενός δικτύου LTE. Τονίζεται δε, ότι τα συμπεράσματα αυτά αποτελούν μια πρώτη γεύση σχετικά με τις επιδόσεις των δύο αυτών προτύπων και η επιλογή κάποιου εξ' αυτών απαιτεί μια πιο ενδελεχή, πιο ακριβή και πιο «επί σκοπού» μελέτη.

Κλείνοντας, κάποια θέματα που μπορούν να μελετηθούν στο μέλλον πάνω στο αντικείμενο της εργασίας είναι, η περαιτέρω εξέταση της δυνατότητας χρήσης των **white spaces**, έχοντας πάντα κατά νου την αποφυγή των παρεμβολών, η αναβάθμιση των WiMAX και LTE με τις εξελίξεις τους, το WiMAX 2 και το LTE-Advanced και ακολούθως η αξιολόγηση των προτύπων αυτών ή και άλλων που μπορούν να υποστηρίξουν τη λειτουργία ενός δικτύου ασύρματων αισθητήρων.

Βιβλιογραφία

- Μελέτη Συνύπαρξης Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων και Δικτύων Wi-Fi σε Πραγματικό Περιβάλλον, Χρηστίνα Α. Μακρή, ΕΜΠ-ΣΗΜΜΥ, 2011
- Simulation Βελτίωσης Ραδιοκάλυψης DVB-T με βοήθεια Smart Antennas, Χαράλαμπος Δ. Λαμπίρης, ΕΜΠ-ΣΗΜΜΥ, 2008
- Ψηφιακή Ανάλυση Σήματος, J. G. Proakis, D. G. Manolakis, Εκδόσεις Ίων, 2010
- Ασύρματες Επικοινωνίες, Π. Γ. Κωπτής, Π.-Δ. Μ. Αράπογλου, Εκδόσεις Τζιόλα, 2011
- CEPT Report 24
- ECC Report 159
- ITU-R Report SM.2152
- SenseLess: A Database-Driven White Spaces Network, Rohan Murty, Ranveer Chandra, Thomas Moscibroda and Paramvir (Victor) Bahl, Fellow, IEEE
- ITU-R RA. 769-2
- ITU-R P.525-2: Calculation of free-space attenuation
- ITU-R P.526-12: Propagation by diffraction
- Fundamentals of WiMAX: A Technology Primer, Telesystem Innovations Inc.
- Planning of WiMAX and LTE Networks, Mehrnoush Masihpour and Johnson I Agbinya, University of Technology, Sydney Australia
- WiMAX, HSPA+, and LTE: A Comparative Analysis, Doug Gray, WiMAX Forum, 2009
- IEEE Standard for Local and metropolitan area networks-Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems-Amendment 3: Advanced Air Interface, IEEE Computer Society and the IEEE Microwave Theory and Techniques Society, 2011
- OFDM and Its Wireless Applications: A Survey, Taewon Hwang, Chenyang Yang Senior Member IEEE, Gang Wu Member IEEE, Shaoqian Li and Geoffrey Ye Li Fellow IEEE
- The LTE Radio Interface – Key Characteristics and Performance, Anders Furuskär, Tomas Jönsson, and Magnus Lundevall, Ericsson Research, Sweden, IEEE, 2008
- <http://en.wikipedia.org>
- <http://www.atdi.com/>
- <http://next-generation-communications.tmcnet.com/topics/wireless-all-around/articles/292152-public-safety-security-4g-lte-drive-cassidialcatel-lucent.htm>
- <https://sites.google.com/site/lteencyclopedia>
- <http://resources.wimaxforum.org/>
- <http://freewimaxinfo.com/wimax-standards.html>
- <http://3gpplte-longtermevolution.blogspot.gr/>
- <http://www.zdacomm.com>
- <http://www.itu.int>