



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Προσδιορισμός Βέλτιστης Θέσης Αναμεταδοτών Σε Συστήματα LTE Με Χρήση Του Λογισμικού WINNER

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Τζίφα Μ. Σωτηρία- Ελένη

Επιβλέπων : Χρήστος Καψάλης

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Δεκέμβριος 2013



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Προσδιορισμός Βέλτιστης Θέσης Αναμεταδοτών Σε Συστήματα LTE Με Χρήση Του Λογισμικού WINNER

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Τζίφα Μ. Σωτηρία- Ελένη

Επιβλέπων : Χρήστος Καψάλης

Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Χρήστος Καψάλης

.....
Παναγιώτης Κωπτής

.....
Αθανάσιος Παναγόπουλος

Αθήνα, Δεκέμβριος 2013

.....
ΤΖΙΦΑ Μ. ΣΩΤΗΡΙΑ – ΕΛΕΝΗ

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π

Copyright © ΤΖΙΦΑ Μ. ΣΩΤΗΡΙΑ – ΕΛΕΝΗ, 2013

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος, All right 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 το 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.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική ασχολείται με τον καθορισμό της βέλτιστης θέσης αναμεταδοτών σε ασύρματο τηλεπικοινωνιακό περιβάλλον με τη χρήση της τεχνολογίας των LTE.

Αρχικά, παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των ασύρματων κυψελωτών δικτύων ως προς τη δομή, τη λειτουργία και τον τρόπο οργάνωσης και η εξέλιξή τους μέχρι σήμερα. Στη συνέχεια, αναλύεται ο τρόπος διάδοσης των σημάτων, οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τη διαμόρφωσή τους και τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια της διάδοσης και επηρεάζουν το τελικό σήμα, εξασθενώντας το μέσω των απωλειών. Έπειτα, παρουσιάζεται η τεχνολογία των LTE, με την περιγραφή των τεχνικών στοιχείων που τα καθιστούν μια από τις κυρίαρχες τεχνολογίες για τα συστήματα τέταρτης γενιάς. Τέλος, στη μελέτη υπεισέρχεται η χρήση αναμεταδοτών με επαυξημένες λειτουργίες, η χρήση των οποίων σε συνδυασμό με την τεχνολογία LTE θα συμβάλλει στη βελτίωση των τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών.

Η μετάδοση των σημάτων περιγράφεται από μεγέθη, τα οποία ταυτόχρονα αποτελούν κριτήριο για την αποτελεσματικότητα της χρησιμοποιούμενης τεχνολογίας. Με γνώμονα αυτό το σκεπτικό επιλέχθηκαν τα μεγέθη της απόστασης, της ισχύος του συστήματος και του ρυθμού μετάδοσης, πάνω στα οποία βασίστηκαν τα σενάρια προσομοίωσης, μέσα από τα οποία προσεγγίστηκε η τελική βέλτιστη θέση για την τοποθέτηση των LTE αναμεταδοτών, τόσο σε συστήματα μονής κεραίας (SISO), όσο και στα συστήματα πολλαπλών κεραίων MIMO. Οι προσομοιώσεις δοκιμάστηκαν σε περιβάλλον Matlab, μέσω του κώδικα της winner II. Τα αποτελέσματα αποτυπώνονται γραφικά και ακολουθούνται από τα απαραίτητα σχόλια και συμπεράσματα.

Λέξεις κλειδιά: Κυψελωτά συστήματα, LTE , Winner, προσομοίωση, LTE αναμεταδότες

ABSTRACT

The present diploma thesis deals with the determination of the optimal relays' allocation in wireless environment using LTE technology.

Initially, there are the characteristics of wireless cellular networks as to the structure, the function and the way that are organised and their evolution to date. Then, the procedure of signals' transmission has to be mentioned, in addition to their modulation's techniques and the facts that take place on propagation and affect the quality of signals, causing power losses. Then, LTE technology is presented, with a description of the technical elements and advantages, which make it one of the dominant technologies for fourth generation's systems. Finally, the study involves the use of relays with enhanced features, the use of which in combination with the LTE technology will contribute to the improvement of telecommunication services.

The transmission of signals is described by sizes, which simultaneously constitute a criterion for the effectiveness of the used technology. With this in mind, the concepts of distance, total system's power and the transmission rate underlie the scenarios that have been simulated, through which the optimal allocation of LTE relays' is about to be reached, using both SISO and MIMO antennas systems. Simulations were tested in Matlab environment, through the code of winner II. The results depict graphics and are followed by the necessary comments and conclusions.

Key words: cellular telecommunication systems, LTE, Winner II, simulation, LTE relays

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εκπονήθηκε στον τομέα Συστημάτων Μετάδοσης Πληροφορίας και Τεχνολογίας Υλικών της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών ΕΜΠ, στο εργαστήριο Ασυρμάτου και Επικοινωνίας Μεγάλων Αποστάσεων.

Σε αυτό το σημείωμα θα ήθελα να ευχαριστήσω πρωτίστως τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Χρήστο Καψάλη, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον και σύγχρονο θέμα. Η καθοδήγησή του και οι υποδείξεις του αποδείχθηκαν καίριες για την πρόοδο και την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά και τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Νικόλαο Καψάλη για τη βοήθειά του και τη συνεχή του υποστήριξη που συνέβαλε καταλυτικά στην εκπόνηση της εργασίας.

Καταλήγοντας, θα ήθελα να αφιερώσω τη διπλωματική μου εργασία στην οικογένειά μου, τους γονείς μου και τα αδέρφια μου, και στους φίλους μου που με στηρίζουν όλα αυτά τα χρόνια. Η ολοκλήρωση των σπουδών μου θα ήταν δύσκολη χωρίς την υποστήριξη και την υπομονή που επέδειξαν.

Πίνακας περιεχομένων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	5
ABSTRACT	7
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	9
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ	15
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ	17
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ	18
ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ	20
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	21
<i>1. ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΚΥΨΕΛΩΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ</i>	25
<i>1.1 ΕΞΕΛΙΞΗ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΚΥΨΕΛΩΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ</i>	25
<i>1.1.1 Αναλογικά κυψελωτά δίκτυα-1G</i>	25
<i>1.1.2 Μετάβαση στα ψηφιακά κυψελωτά δίκτυα</i>	25
<i>1.1.3 GSM</i>	26
<i>1.1.4 Μετάβαση στα τρίτης γενιάς συστήματα</i>	26
<i>1.1.5 UMTS</i>	27
<i>1.1.6 Μετάβαση στα δίκτυα 4G</i>	28
<i>1.2 ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΚΥΨΕΛΩΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ</i>	28
<i>1.3 ΤΡΟΠΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΥΨΕΛΩΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ</i>	29
<i>1.4 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΕΡΑΙΩΝ ΣΤΑ ΚΥΨΕΛΩΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ</i>	30
<i>1.5 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΥΨΕΛΩΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ</i>	31
<i>1.5.1 Cluster</i>	31
<i>1.5.2 Τύποι κυψελών</i>	32
<i>1.5.3 Reuse factor</i>	34
<i>1.5.4 Handover</i>	35
<i>2. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ</i>	39
<i>2.1 ΠΟΛΥΠΛΕΞΙΑ</i>	39
<i>2.1.1 Πολυπλεξία με διαίρεση χρόνου (TDM)</i>	39
<i>2.1.2 Πολυπλεξία με Διαίρεση Συχνότητας (FDM)</i>	39
<i>2.2 ΠΟΛΛΑΠΛΗ ΠΡΟΣΠΕΛΑΣΗ</i>	40
<i>2.2.1 Πολλαπλή προσπέλαση με διαίρεση συχνότητας (FDMA)</i>	40
<i>2.2.2 Πολλαπλή προσπέλαση διαίρεσης χρόνου (TDMA)</i>	41

2.2.3 Πολλαπλή προσπέλαση με κωδικοποίηση (CDMA)	42
2.2.4 Πολλαπλή προσπέλαση διαίρεσης χώρου (SDMA)	43
2.2.5 Σύγκριση Τεχνικών Προσπέλασης	43
3. DUPLEX SCHEMES	45
3.1 ΕΙΔΗ ΑΜΦΙΔΡΟΜΗΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ	45
3.1.1 Frequency Division Duplex (FDD)	45
3.1.2 Time Division Duplex (TDD)	46
3.1.3 Συνοπτική Σύγκριση FDD και TDD	47
3.1.4 LTE Bands για TDD και FDD	48
4. ΔΙΑΔΟΣΗ ΣΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΑΠΩΛΕΙΕΣ	51
4.1 ΔΙΑΔΟΣΗ	51
4.1.1 Μηχανισμοί διάδοσης ραδιοκυμάτων εκτός απευθείας διεύθυνσης	51
4.2 ΑΠΩΛΕΙΕΣ	52
4.2.1 Απώλειες ελευθέρου χώρου	53
4.2.2 Σκίαση	54
4.2.3 Διαλείψεις	55
4.3 PATHLOSS	58
4.3.1 Σενάρια καθορισμού περιβάλλοντος	58
5. LTE	65
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ 3GPP LTE	65
5.2 ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ LTE	67
5.2.1 OFDM	68
5.2.2 OFDMA	71
5.2.3 Συστήματα MIMO	76
5.3 LTE-ADVANCED	77
6. ΑΝΑΜΕΤΑΔΟΣΗ	79
6.1 ΤΥΠΟΙ ΑΝΑΜΕΤΑΔΟΣΗΣ	80
6.1.1 Κατανεμημένα συστήματα κεραιών (DAS)	80
6.1.2 Inband RF επαναλήπτης on-channel	80
6.1.3 Out-of-band αναμετάδοση	81
6.1.4 Inband αναμεταδότης με μετατόπιση καναλιού	82
6.2 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΑΝΑΜΕΤΑΔΟΣΗΣ	83
6.3 ΔΙΚΤΥΑ ΑΝΑΜΕΤΑΔΟΣΗΣ	83
6.3.1 Δίκτυο Ricochet	83

6.3.2 Τεχνικές αναμετάδοσης και κυψελωτά δίκτυα.....	84
6.4 ANAMENOMENA OΦEΛH AΠO TΗ XPHΣH ANAMETAΔOΤΩN.....	85
6.4.1 Τεχνικά αποτελέσματα.....	85
6.4.2 Άλλα οφέλη της αναμετάδοσης.....	86
6.5 ΣΧΗΜΑΤΑ ANAMETAΔOΣHΣ.....	86
6.6 EΠIΛOΓH ANAMETAΔOTH.....	88
6.7 ANAMETAΔOΣH ΣE 4G- LTE ADVANCED.....	89
6.7.1 Εισαγωγή στους LTE αναμεταδότες.....	90
6.7.2 Πλεονεκτήματα στη χρήση αναμετάδοσης στα LTE.....	90
6.7.3 LTE αναμετάδοση full & half duplex.....	92
6.7.4 LTE τύποι αναμεταδότη.....	93
7. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	95
7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	96
7.2 ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	96
7.2.1 Διάταξη προσομοίωσης.....	96
7.2.2 Περιβάλλον- Σενάριο προσομοίωσης.....	98
7.2.3 Κριτήρια επιλογής θέσης αναμεταδοτών.....	99
7.2.4 Μεταβολή στις θέσεις των αναμεταδοτών.....	100
7.2.5 Χωρισμός του εύρους ζώνης.....	103
7.2.6 Κινητικότητα χρηστών.....	105
7.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΙΣΧΥΩΝ.....	105
7.3.1 Επιλογή διαδρομής μετάδοσης- Γενικό μοντέλο απωλειών διάδοσης.....	106
7.3.2 Επιλογή διαδρομής μετάδοσης- Απώλειες μικρο-κυψελωτού αστικού περιβάλλοντος.....	107
7.3.3 Υπολογισμός τελικής ισχύος στο δέκτη λόγω καθυστερήσεων σε κάθε διαδρομή μετάδοσης του σήματος.....	108
7.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ.....	110
7.4.1 Προσέγγιση θέσης αναμετάδοσης σε σύστημα με έναν χρήστη με χρήση του γενικού μοντέλου απωλειών.....	110
7.4.2 Προσέγγιση θέσης αναμεταδότη με κριτήριο το ρυθμό μετάδοσης με χρήση του γενικού μοντέλου απωλειών.....	111
7.4.3 Προσομοίωση επιβεβαίωσης επέκτασης κυψέλης.....	112
7.4.4 Προσέγγιση θέσης αναμεταδότη με κριτήριο ελάχιστη κατανάλωση ισχύος με απώλειες αστικού μικρο-κυψελωτού περιβάλλοντος.....	113
7.4.5 Προσέγγιση θέσης αναμεταδότη με κριτήριο την απόσταση με απώλειες αστικού μικρο-κυψελωτού περιβάλλοντος.....	113

7.4.6 Προσέγγιση θέσης αναμεταδότη με τη χρήση του ρυθμού μετάδοσης με απώλειες αστικού μικρο-κυβελωτού περιβάλλοντος	113
8. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ.....	115
8.1 ΓΕΝΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ.....	115
8.2 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΧΡΗΣΤΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΔΟΣΗ	116
8.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΓΕΝΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΑΠΩΛΕΙΩΝ	117
8.3.1 Θέση αναμεταδότη σε σύστημα με έναν χρήστη.....	117
8.3.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης με κριτήριο το ρυθμό μετάδοσης	118
8.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΜΕ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΑΠΟ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ WINNER II	121
8.4.1 Αποτελέσματα προσομοίωσης επέκτασης και προσομοίωσης με κριτήριο την απόσταση.....	121
8.4.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης με κριτήριο την επίτευξη ελάχιστης ισχύος συστήματος	123
8.4.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης με τη χρήση του κριτηρίου του ρυθμού μετάδοσης .	127
8.5 ΧΡΗΣΗ ΚΕΡΑΙΩΝ ΜΙΜΟ ΣΤΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΜΕ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΤΗΝ ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΙΣΧΥΟΣ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΑΙ ΤΟΥ ΡΥΘΜΟΥ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ.....	129
8.5.1 Αποτελέσματα προσομοίωσης με κριτήριο την ελάχιστη ισχύ στο σύστημα με τη χρήση κεραιών ΜΙΜΟ.....	129
8.5.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης με κριτήριο το ρυθμό μετάδοσης με τη χρήση κεραιών ΜΙΜΟ	134
9. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ- ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	137
9.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΕΡΑΙΩΝ SISO.....	137
9.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΜΙΜΟ.....	139

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1. Εξέλιξη τεχνολογιών κυψελωτών δικτύων	29
Εικόνα 1.2. Κυψελωτό σύστημα.....	30
Εικόνα 1.3. Cluster επτά κυψελών.....	31
Εικόνα 1.4. Απεικόνιση pico-, micro-, macro- cell.....	33
Εικόνα 1.5. Umbrella cell.....	34
Εικόνα 1.6. Reuse Factor 1/7.....	35
Εικόνα 1.7. Απλή περίπτωση handover/handoff.....	35
Εικόνα 2.1. Πολλαπλή προσπέλαση με διαίρεση συχνότητας	41
Εικόνα 2.2. Πολλαπλή προσπέλαση με διαίρεση χρόνου	42
Εικόνα 2.3. FDMA, TDMA, CDMA	43
Εικόνα 3.1. Frequency Division Duplex (FDD)	46
Εικόνα 3.2. Time Division Duplex (TDD).....	47
Εικόνα 5.1. Τοπολογία δικτύου με χρήση του πρωτοκόλλου IP	66
Εικόνα 5.2. Διασυμβολική παρεμβολή λόγω χρονικής καθυστέρησης πολυδιαδρομικής διάδοσης.....	68
Εικόνα 5.3. Επίδραση της χρονικής διασποράς σε κανάλι επιλεκτικό ως προς τις διαλείψεις συχνότητας	68
Εικόνα 5.4. OFDM. Κάθε συχνότητα μεταφέρει μοναδική πληροφορία.....	69
Εικόνα 5.5. Αντιμετώπιση της διασυμβολικής παρεμβολής από τη χρήση OFDM	70
Εικόνα 5.6. FFT του συμβόλου OFDM εμφανίζει διακριτά υπο-φέροντα (subcarriers)	71
Εικόνα 5.7. OFDM, OFDMA.....	72
Εικόνα 5.8. Γενική δομή πλαισίου LTE	72
Εικόνα 5.9. Δομή πλαισίου LTE με τη χρήση FDD	75
Εικόνα 5.10. Δομή πλαισίου LTE με τη χρήση TDD	75
Εικόνα 5.11. Downlink Resource Grid	76
Εικόνα 5.12. Channel Bandwidth, Transmission Bandwidth Configuration, Transmission Bandwidth	77
Εικόνα 5.13. Σύστημα MIMO	78

Εικόνα 6.1. Ασύρματο περιβάλλον επικοινωνιών	79
Εικόνα 6.2. Distributed Antenna System (DAS)	80
Εικόνα 6.3. On Channel RF επαναλήπτης	81
Εικόνα 6.4. Αναμετάδοση Out of Band	82
Εικόνα 6.5. Αναμετάδοση με μετατόπιση Καναλιού (channel shift)	82
Εικόνα 6.6. Διάταξη όπου η απευθείας διαδρομή περιέχει εμπόδιο και η αναμετάδοση γίνεται μέσω των line-of-sight διαδρομών των αναμεταδοτών	87
Εικόνα 6.7. Διάταξη στην οποία οι αναμεταδότες χρησιμοποιούνται εάν υπάρχουν λάθη αποκωδικοποίησης στην απευθείας διαδρομή	87
Εικόνα 6.8. Αναμετάδοση μέσω πολλαπλών μεταβάσεων, απουσία απευθείας σύνδεσης πομπού-δέκτη	88
Εικόνα 6.9. Συνεργασία μεταξύ πηγών και μετάδοση μηνυμάτων στον προορισμό	88
Εικόνα 6.10. Απεικόνιση διαδικασία επιλογής αναμεταδότη	89
Εικόνα 6.11. Αύξηση πυκνότητας δικτύου	91
Εικόνα 6.12. Επέκταση κάλυψης δικτύου και εξυπηρέτηση κενών κάλυψης	91
Εικόνα 6.13. Επέκταση κάλυψης	91
Εικόνα 6.14. Fast Roll-out για ανάπτυξη του δικτύου	92
Εικόνα 6.15. Λειτουργία κυψελωτού δικτύου με τους δύο τύπους αναμεταδοτών	94
Εικόνα 7.1- Downlink και Uplink συνδέσεις μεταξύ BS-RS-UE	106

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.1. Σύγκριση FDD και TDD	47
Πίνακας 3.2. LTE Bands for FDD	48
Πίνακας 3.3. LTE Bands for TDD	49
Πίνακας 4.1. Ενδεικτικές Τιμές Εκθέτη Απωλειών γ	54
Πίνακας 4.2. Παράμετροι σεναρίων	61
Πίνακας 5.1. Available Downlink Bandwidth.....	75
Πίνακας 7.1- Δεδομένα του συστήματος	98
Πίνακας 8.1- Απώλειες όπως προέκυψαν από το winner II για 200 χρήστες.....	116
Πίνακας 8.2- Ποσοστιαία επέκταση της κυψέλης σε αριθμό χρηστών.....	121

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 7.1- Χωρισμός της κυψέλης σε διακριτές περιοχές	100
Διάγραμμα 7.2-Θέση αναμεταδοτών σε απόσταση 75 m από το κέντρο	101
Διάγραμμα 7.3-Θέση αναμεταδοτών σε απόσταση 150 m από το κέντρο	101
Διάγραμμα 7.4-Θέση αναμεταδοτών σε απόσταση 250 m από το κέντρο.....	102
Διάγραμμα 7.5-Θέση αναμεταδοτών σε απόσταση 400 m από το κέντρο.....	102
Διάγραμμα 7.6- Διαμοιρασμός εύρους ζώνης B στην κυψέλη.....	103
Διάγραμμα 7.7 – Χρονική καθυστέρηση σε κάθε διαδρομή του σήματος	109
Διάγραμμα 7.8- Σχετική ισχύς σε κάθε διαδρομή του σήματος	110
Διάγραμμα 8.1- Συνδέσεις 200 χρηστών με το σταθμό βάσης	111
Διάγραμμα 8.2- Εύρεση βέλτιστης θέσης αναμεταδοτή με χρήση του γενικό μοντέλου απωλειών σε σύστημα ενός χρήστη	117
Διάγραμμα 8.3- Τηλεπικοινωνιακή κίνηση κυψέλης 200 χρηστών με χρήση του γενικού μοντέλου απωλειών με κριτήριο το ρυθμό μετάδοσης_1.....	118
Διάγραμμα 8.4- Τηλεπικοινωνιακή κίνηση κυψέλης 200 χρηστών με χρήση του γενικού μοντέλου απωλειών με κριτήριο το ρυθμό μετάδοσης_2.....	119
Διάγραμμα 8.5- Τηλεπικοινωνιακή κίνηση κυψέλης 200 χρηστών με χρήση του γενικού μοντέλου απωλειών με κριτήριο το ρυθμό μετάδοσης_3.....	120
Διάγραμμα 8.6- Αριθμός χρηστών συναρτήσει του χρόνου με τη χρήση του κριτηρίου της απόστασης	122
Διάγραμμα 8.7- Διάγραμμα αριθμού απομακρυσμένων χρηστών της κυψέλης συναρτήσει του χρόνου	122
Διάγραμμα 8.8- Τηλεπικοινωνιακή κίνηση κυψέλης 200 χρηστών με κριτήριο την ελαχιστοποίηση της ισχύος και απώλειες μέσω winner II_1.....	123
Διάγραμμα 8.9- Τηλεπικοινωνιακή κίνηση κυψέλης 200 χρηστών με κριτήριο την ελαχιστοποίηση της ισχύος και απώλειες μέσω winner II_2.....	124
Διάγραμμα 8.10- Τηλεπικοινωνιακή κίνηση κυψέλης 200 χρηστών με κριτήριο την ελαχιστοποίηση της ισχύος και απώλειες μέσω winner II_3.....	125
Διάγραμμα 8.11- Τηλεπικοινωνιακή κίνηση κυψέλης 200 χρηστών με κριτήριο την ελαχιστοποίηση της ισχύος και απώλειες μέσω winner II_4.....	126
Διάγραμμα 8.12- Αριθμός χρηστών σε συγκεκριμένες θέσεις αναμεταδοτών τη χρονική στιγμή 1 sec-Κριτήριο ρυθμού μετάδοσης και απώλειες μέσω winner II.....	127

Διάγραμμα 8.13- Αριθμός χρηστών σε συγκεκριμένες θέσεις αναμεταδοτών τη χρονική στιγμή 50 sec-Κριτήριο ρυθμού μετάδοσης και απώλειες μέσω winner II.....	128
Διάγραμμα 8.14- Αριθμός χρηστών σε συγκεκριμένες θέσεις αναμεταδοτών τη χρονική στιγμή 90 sec-Κριτήριο ρυθμού μετάδοσης και απώλειες μέσω winner II.....	128
Διάγραμμα 8.15- Τηλεπικοινωνιακή κίνηση κυψέλης 200 χρηστών με κριτήριο την ελαχιστοποίηση της ισχύος και απώλειες μέσω winner II-MIMO κεραίες_1	130
Διάγραμμα 8.16- Τηλεπικοινωνιακή κίνηση κυψέλης 200 χρηστών με κριτήριο την ελαχιστοποίηση της ισχύος και απώλειες μέσω winner II-MIMO κεραίες_2	131
Διάγραμμα 8.17- Τηλεπικοινωνιακή κίνηση κυψέλης 200 χρηστών με κριτήριο την ελαχιστοποίηση της ισχύος και απώλειες μέσω winner II-MIMO κεραίες_3	132
Διάγραμμα 8.18- Τηλεπικοινωνιακή κίνηση κυψέλης 200 χρηστών με κριτήριο την ελαχιστοποίηση της ισχύος και απώλειες μέσω winner II-MIMO κεραίες_4	133
Διάγραμμα 8.19- Αριθμός χρηστών σε συγκεκριμένες θέσεις αναμεταδοτών τη χρονική στιγμή 1 sec-Κριτήριο ρυθμού μετάδοσης και απώλειες μέσω winner II-MIMO κεραίες ...	134
Διάγραμμα 8.20- Αριθμός χρηστών σε συγκεκριμένες θέσεις αναμεταδοτών τη χρονική στιγμή 50 sec-Κριτήριο ρυθμού μετάδοσης και απώλειες μέσω winner II-MIMO κεραίες .	135
Διάγραμμα 8.21- Αριθμός χρηστών σε συγκεκριμένες θέσεις αναμεταδοτών τη χρονική στιγμή 90 sec-Κριτήριο ρυθμού μετάδοσης και απώλειες μέσω winner II-MIMO κεραίες .	135

ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ

Διάταξη 1- Κυψέλη με ένα σταθμό βάσης στο κέντρο	93
Διάταξη 2- Κυψέλη με ένα σταθμό βάσης στο κέντρο και τρεις αναμεταδότες	94

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το σημερινό ασύρματο τηλεπικοινωνιακό περιβάλλον χαρακτηρίζεται από έντονη ανομοιογένεια, καθ' ότι πολλαπλής μορφής δίκτυα έχουν διαμορφωθεί και λειτουργούν στα πλαίσια αυτού. Οι νέες απαιτήσεις για μεγαλύτερο ρυθμό μετάδοσης, βελτιωμένη φασματική απόδοση και εξασφάλιση καλύτερης ποιότητας υπηρεσιών στις τηλεπικοινωνίες δρομολόγησαν την εξέλιξη των ασύρματων δικτύων και οδήγησαν στην μετάβαση στα συστήματα τέταρτης γενιάς.

Τα δίκτυα επόμενης γενιάς ανταποκρινόμενα στις σημερινές απαιτήσεις προσφέρουν πρόσβαση σε πολλαπλές υπηρεσίες, όπως τηλεφωνικό δίκτυο και δίκτυο δεδομένων. Παρέχουν όλες τις λειτουργίες τους χρησιμοποιώντας στον πυρήνα του δικτύου το πρωτόκολλο TCP/IP, ενοποιώντας με τον τρόπο αυτό όλα τα ετερογενή δίκτυα και προσφέροντας ασφαλή και συνεχή πρόσβαση στις παραπάνω υπηρεσίες. Εκτός αυτού, διαχειρίζονται αποτελεσματικά την κινητικότητα και την αναδρομολόγηση του σήματος στους χρήστες μετατρέποντας το τηλεπικοινωνιακό κυψελωτό δίκτυο σε άλλο ένα IP δίκτυο.

Προς αυτήν την κατεύθυνση, η ανάπτυξη του πρωτοκόλλου LTE στοχεύει στην εξασφάλιση υψηλής ταχύτητας μετάδοσης δεδομένων και εφαρμογών πολυμέσων, καθώς με την εξάπλωση του διαδικτύου στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, το μεγαλύτερο μέρος της τηλεπικοινωνιακής κίνησης αφορά υπηρεσίες δεδομένων, αλλά και στην καλύτερη υποστήριξη των υπηρεσιών φωνής. Ταυτόχρονα, εισάγει στη διαμόρφωση του φυσικού του στρώματος νέες για τα κυψελωτά δίκτυα τεχνικές, που ανταποκρίνονται στην ανάγκη για μετάδοση τόσο δεδομένων πληροφορίας όσο και δεδομένων ελέγχου της ορθής μετάδοσης από το σταθμό βάσης στο τερματικό.

Τα υψηλά ποσοστά του ρυθμού δεδομένων που επιτυγχάνονται με τη χρήση της τεχνολογίας LTE, μειονεκτούν ως προς τους χρήστες που τοποθετούνται στο άκρο της κυψέλης. Οι τεχνολογίες MIMO και OFDM που συνθέτουν ένα σύστημα LTE συνεισφέρουν στην αντιμετώπιση του θέματος αλλά απαιτούνται επιπρόσθετες ενέργειες για την εξάλειψή του. Για την επίλυση του ανωτέρω προβλήματος, εισάγεται η χρήση αναμεταδοτών στο σύγχρονο ασύρματο περιβάλλον. Πρόκειται για αναμεταδότες, οι οποίοι δεν περιορίζονται στην απλή λήψη, ενίσχυση και επαναμετάδοση του σήματος προς τον τελικό χρήστη, αλλά επιφορτίζονται με πρόσθετες λειτουργίες, εφάμιλλες του κεντρικού σταθμού βάσης, συμπεριλαμβανομένου του έλεγχου λαθών κατά τη μετάδοση και τη διόρθωσή τους. Στόχος της LTE αναμετάδοσης αποτελεί η ενίσχυση της κάλυψης και της χωρητικότητας εντός της κυψέλης και συμβάλλει στην αυτόνομη και αυτόματη διαμόρφωση των ετερογενών δικτύων, οδηγώντας στην ανάπτυξη των LTE- Advanced συστημάτων.

Στα πλαίσια της διπλωματικής έγινε χρήση του προγράμματος της winner II, το οποίο προσομοιώνει ασύρματο τηλεπικοινωνιακό κανάλι, λαμβάνοντας υπόψη το περιβάλλον στο οποίο γίνεται η μελέτη. Σε αυτό περιλαμβάνονται όλες οι παράμετροι που επιδρούν στη μετάδοση του σήματος και δίνεται η δυνατότητα διαμόρφωσης κάθε επιθυμητής και δυνατής διάταξης ασύρματου περιβάλλοντος. Ο κώδικας του προγράμματος είναι σε Matlab, πρόγραμμα που δίνει τη δυνατότητα απεικόνισης και περαιτέρω επεξεργασίας των αποτελεσμάτων και δίνει το περιθώριο επέκτασης του κώδικα στα πλαίσια κάθε διαφορετικής προσομοίωσης.

Η παρούσα διπλωματική χωρίζεται σε δυο μέρη. Στο πρώτο μέρος, το οποίο αποτελεί το θεωρητικό υπόβαθρο της εργασίας και περιλαμβάνει όλες τις απαιτούμενες πληροφορίες για την κατανόηση των εννοιών που θα χρησιμοποιηθούν, και στο δεύτερο μέρος, το οποίο περιέχει την ανάλυση του ασύρματου περιβάλλοντος που προσομοιώθηκε και της διάταξης που διαμορφώθηκε, την αναφορά στα κριτήρια στα οποία στηρίχθηκαν οι προσομοιώσεις για την προσέγγιση της θέσης των αναμεταδοτών και, τέλος, παρατίθενται τα αποτελέσματα των ανωτέρω προσομοιώσεων και τα συμπεράσματα βασιζόμενα σε αυτά.

Αναλυτικότερα, στο 1^ο κεφάλαιο, γίνεται αναφορά στα χαρακτηριστικά των ασύρματων κυψελωτών συστημάτων, την εξέλιξη από τα αναλογικά δίκτυα στα δίκτυα τέταρτης γενιάς και τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε στάδιο, και στον τρόπο οργάνωσής και λειτουργίας τους. Παράλληλα, γίνεται ανάλυση των τύπων των κυψελών και βασικών εννοιών των κυψελωτών δικτύων.

Το 2^ο κεφάλαιο, αποτυπώνει τις τεχνικές μετώσεις των τηλεπικοινωνιακών σημάτων από πλευράς μέσου και από πλευράς του χρήστη. Αναλύονται, πρώτα, τα είδη πολυπλεξίας αναλογικών ή ψηφιακών σημάτων κατά τη διάδοσή τους σε κοινό κανάλι, και, έπειτα, ο τρόπος διάθεσης κάθε μέσου σε πολλούς χρήστες, συνθέτοντας την έννοια της πολλαπλής προσπέλασης, ενώ γίνεται και σύγκριση μεταξύ αυτών ενισχύοντας τα πλεονεκτήματα και αναδεικνύοντας τα μειονεκτήματά τους.

Στο 3^ο κεφάλαιο, αναφέρεται στα είδη αμφίδρομης μετάδοσης, τα οποία και αναλύονται, γίνεται σύγκριση μεταξύ τους και για την περίπτωση των LTE παρουσιάζονται οι ζώνες συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται σε κάθε είδος αμφίδρομης μετάδοσης.

Στο 4^ο κεφάλαιο, περιγράφεται ο τρόπος διάδοσης των σημάτων και τα φαινόμενα που εμφανίζονται κατά τη πολυδιαδρομική διάδοση. Σημαντικό μέρος του κεφαλαίου είναι ο τρόπος υπολογισμού των απωλειών διάδοσης, μέσω των εξισώσεων απωλειών ελευθέρου χώρου και του γενικού μοντέλου απωλειών, και η επίδραση του φαινομένου των διαλείψεων, τα χαρακτηριστικά και οι επιπτώσεις τους στη μετάδοση των σημάτων. Οι ανωτέρω απώλειες, συνθέτουν τον όρο pathloss, ο υπολογισμός του οποίου βασίζεται σε εξισώσεις ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των σεναρίων που περιγράφουν τα διάφορα είδη ασύρματων περιβαλλόντων.

Το 5^ο κεφάλαιο αναφέρεται στην τεχνολογία LTE. Στις απαιτήσεις της σημερινής εποχής που οδήγησαν στην ανάπτυξη της, στα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει και τα χαρακτηριστικά που προσδίδει στα ασύρματα δίκτυα. Αναλύονται, στη συνέχεια, τα τεχνικά χαρακτηριστικά που χρησιμοποιούνται από τα συστήματα LTE, το είδος πολλαπλής προσπέλασης και αμφίδρομης μετάδοσης στο οποίο βασίζεται, ενώ γίνεται αναφορά και στα συστήματα MIMO. Τέλος, για την οριστική μετάβαση στα συστήματα τέταρτης γενιάς, παρατίθενται τα επιπλέον χαρακτηριστικά, που συνθέτουν τα LTE-Advanced.

Στο 6^ο κεφάλαιο, και τελευταίο του θεωρητικού μέρους, γίνεται αναφορά στη σημασία της αναμετάδοσης στα ασύρματα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα. Παρουσιάζονται οι τύποι και τα σχήματα της αναμετάδοσης, τα δίκτυα που σχηματίζουν οι αναμεταδότες, και τα αναμενόμενα οφέλη από τη χρήση τους. Τέλος, γίνεται ιδιαίτερη μνεία στους αναμεταδότες στα LTE συστήματα και τα πλεονεκτήματα που προσδίδουν σε αυτά.

Με το 7^ο κεφάλαιο, γίνεται η μετάβαση στις προσομοιώσεις. Αρχικά παρουσιάζεται η διάταξη και το περιβάλλον που εμφανίζονται στις προσομοιώσεις. Στη συνέχεια,

καθορίζονται τα μεγέθη που αποτελούν τα κριτήρια στα οποία στηρίζονται τα σενάρια των προσομοιώσεων και ο τρόπος υπολογισμού των ισχύων σε αυτά. Τέλος, γίνεται αναλυτική περιγραφή των σεναρίων που θα μελετηθούν. Σε αυτά κάποια βασίζουν τον υπολογισμό ισχύων σε θεωρητικές εξισώσεις ενώ τα υπόλοιπα σε εξισώσεις ανάλογα με το σενάριο που επιλέχθηκε και τα οποία προσεγγίζουν περισσότερο τα πραγματικά δεδομένα.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων εμφανίζονται στο 8^ο κεφάλαιο. Χωρίζεται σε δύο μέρη. Τα αποτελέσματα με το θεωρητικό υπολογισμό των ισχύων και τα αποτελέσματα με τις ακριβείς εξισώσεις των ισχύων. Παράλληλα με τη γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων γίνεται η περιγραφή τους και τα πρώτα συμπεράσματα που εξάγονται.

Στο 9^ο και τελευταίο κεφάλαιο, γίνεται αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων και των συμπερασμάτων από τις προσομοιώσεις για το σύστημα μονής κεραίας και το σύστημα πολλαπλών κεραιών.

1. ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΚΥΨΕΛΩΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Κυψελωτό δίκτυο χαρακτηρίζεται το δίκτυο, η διάταξη του οποίου αποτελείται από μια ευρύτερη περιοχή, που χωρίζεται σε μικρότερες σε σχήμα κυψέλης, κάθε μία από τις οποίες εξυπηρετείται από τουλάχιστον ένα σταθερό πομπό. Ο πομπός αναφέρεται ως σταθμός βάσης ή cell site. Στα κυψελωτά συστήματα, κάθε κυψέλη χρησιμοποιεί διαφορετικό φάσμα συχνοτήτων ώστε να αποφεύγονται παρεμβολές από γειτονικές κυψέλες και το διατιθέμενο εύρος ζώνης να προσφέρεται εντός των ορίων αυτής.

Το σύνολο των κυψελών ορίζει μια ευρύτερη περιοχή στην οποία υπάρχει πλήθος κινητών και σταθερών δεκτών, οι οποίοι επικοινωνούν τόσο με το σταθμό βάσης όσο και μεταξύ τους.

Τα κυψελωτά δίκτυα προσφέρουν μια σειρά από πλεονεκτήματα σε σχέση με τα εναλλακτικά σχήματα δικτύων:

- Ευελιξία ώστε να χρησιμοποιούνται για τις λειτουργίες όλων σχεδόν των δημόσιων και ιδιωτικών δικτύων
- Αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου
- Μειωμένη χρήση ενέργειας
- Μεγαλύτερη κάλυψη
- Μειωμένη παρεμβολή από άλλα σήματα

1.1 ΕΞΕΛΙΞΗ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΚΥΨΕΛΩΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

1.1.1 Αναλογικά κυψελωτά δίκτυα-1G

Τα δίκτυα πρώτης γενιάς (1G) ήταν αναλογικά και περιορίζονταν σε παροχή υπηρεσιών φωνής. Η αναλογική τεχνολογία ήταν κατά πολύ κατώτερη της σημερινής, καθώς ένα κανάλι υποστήριζε μόνο μία συσκευή σε μια δεδομένη στιγμή. Η σημερινή τεχνολογία επιτρέπει σε πολλαπλές συσκευές να υποστηρίζονται ταυτόχρονα από ένα μόνο κανάλι.

1.1.2 Μετάβαση στα ψηφιακά κυψελωτά δίκτυα

Η μετάβαση από τα αναλογικά στα ψηφιακά κυψελωτά συστήματα βασίζεται στα εξής πλεονεκτήματα των δεύτερων έναντι των πρώτων:

- Αυξημένη ανοσία στο θόρυβο
- Δυνατότητα επεξεργασίας του σήματος, προσφέροντας αποδοτικότερες τεχνικές μετάδοσης καλύτερη ποιότητα υπηρεσιών – κάνοντας χρήση κωδίκων διόρθωσης

σφαλμάτων και φασματικά αποδοτικών τεχνικών διαμόρφωσης – και αποδοτική κωδικοποίηση πληροφορίας και διαύλου

- Δυνατότητα εφαρμογής τεχνικών κρυπτογράφησης για την ασφάλεια μετάδοσης
- Υποστήριξη περισσότερων τεχνικών πολλαπλής πρόσβασης (TDMA/CDMA/SDMA) και duplexing (FDD, TDD)
- Μεγαλύτερη κάλυψη
- Κατανάλωση λιγότερης ενέργειας και, τέλος,
- Επιτρέπουν την υλοποίηση επαναπροσδιοριζόμενων δεκτών λογισμικού (SDR) και των λεγόμενων cognitive radios.

Οι ανάγκες που οδήγησαν στην απομόνωση και, εν τέλει, στην εξαφάνιση του αναλογικού συστήματος αφορούν στο περιορισμένο φάσμα και συνεπώς, στη χαμηλή χωρητικότητα των συστημάτων, στην απουσία ασφάλειας επικοινωνιών, στην αδυναμία μείωσης του κόστους των τερματικών και της απαραίτητης υποδομής, στην ασυμβατότητα μεταξύ των διαφόρων αναλογικών συστημάτων και στη χαμηλή ποιότητα των υπηρεσιών.

1.1.3 GSM

Συγκαταλέγεται στα δίκτυα δεύτερης γενιάς, στα οποία εντάσσονται όλα τα υπάρχοντα λειτουργικά συστήματα. Στηρίζονται στις τεχνικές TDMA ή DS-CDMA. Για τις ΗΠΑ είναι τα IS-54, IS-136 και IS-95, για την Ευρώπη το GSM και για την Ιαπωνία το PDC.

Το GSM είναι 2G τεχνολογία που προσφέρει δύο δυνατότητες, φωνής και δεδομένων. Διαφέρει από τα δίκτυα πρώτης γενιάς, καθώς χρησιμοποιεί ψηφιακή τεχνολογία σε κυψελωτό δίκτυο και πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης χρόνου (TDMA), αντί της CDMA. Προσφέρει ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων έως και 9,6 Kbps, ενώ, ταυτόχρονα, εισήγαγε υπηρεσίες όπως η αποστολή σύντομων γραπτών μηνυμάτων (sms) ή μηνύματα κειμένου, καθώς και το roaming.

1.1.4 Μετάβαση στα τρίτης γενιάς συστήματα

Το βασικό χαρακτηριστικό των συστημάτων τρίτης γενιάς είναι η υποστήριξη εφαρμογών πολυμέσων και η δυνατότητα πρόσβασης σε πληροφορίες και υπηρεσίες από δημόσια ή ιδιωτικά δίκτυα, με υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης. Οι βασικές απαιτήσεις που τίθενται είναι:

- Ρυθμοί μετάδοσης μέχρι 2 MBps
- Μεγάλη φασματική απόδοση
- Μεταβαλλόμενος ρυθμός μετάδοσης για δυνατότητα προσφοράς εύρους ζώνης κατ' απαίτηση
- Πολυπλεξία υπηρεσιών με διαφορετικές απαιτήσεις ως προς την ποιότητα στην ίδια σύνδεση
- Μεταβαλλόμενες απαιτήσεις ως προς την καθυστέρηση, ανάλογα με την ευαισθησία ως προς την καθυστέρηση της κάθε υπηρεσίας

- Συνύπαρξη συστημάτων 2^{ης} και 3^{ης} γενιάς καθώς και FDD και TDD συστημάτων αλλά και δυνατότητα υποστήριξης μεταπομπής
- Υποστήριξη ασύμμετρης τηλεπικοινωνιακής κίνησης στην άνω και κάτω ζεύξη.

1.1.5 UMTS

Η τεχνολογία UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) αποτελεί ένα γενικό όρο για τις τεχνολογίες τρίτης γενιάς και έχει αναπτυχθεί από την 3GPP. Οι προδιαγραφές ασύρματης πρόσβασης προβλέπουν τη χρήση των τεχνικών πρόσβασης Frequency Division Duplex (FDD) και Time Division Duplex (TDD), επιτρέποντας στην UTRA (Universal Terrestrial Radio Access) τεχνολογία να λειτουργήσει σε ένα ευρύ φάσμα ζωνών συχνοτήτων και να συνυπάρχει με άλλες τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης.

Τα UMTS συστήματα δεν αφορούν μόνο τις ασύρματες ζεύξεις: το δίκτυο ασύρματης πρόσβασης συνδέεται με το κεντρικό δίκτυο (δίκτυο πυρήνας – core network), που είναι εξέλιξη του δικτύου πυρήνα της τεχνολογίας GSM. Η 3GPP έχει επεκτείνει τις δυνατότητές της επιτρέποντας στις περισσότερες υπηρεσίες να υλοποιούνται είτε μέσω GERAN 2G (GSM / EDGE), δηλαδή με τη χρήση τεχνολογίας δεύτερης γενιάς είτε μέσω 3G UTRAN, χρησιμοποιώντας τεχνολογία τρίτης γενιάς.

Ακριβώς όπως το GSM έχει γίνει συνώνυμο με την τεχνολογία δεύτερης γενιάς (2G) στα ασύρματα συστήματα, η τεχνολογία UMTS συνδέεται με την τεχνολογία τρίτης γενιάς (3G), η οποία περιλαμβάνει τα πρωτόκολλα W-CDMA και HSPA.

1.1.5.1 W-CDMA

Το πρωτόκολλο Wideband Code Division Multiple Access (W-CDMA) αποτέλεσε τη μετάβαση από το GSM στα συστήματα 3G. Είναι ένα είδος πρωτοκόλλου για δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 3G και ένα υψηλής ταχύτητας πρωτόκολλο μετάδοσης που χρησιμοποιείται στο Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Τηλεπικοινωνιών (UMTS). Το UMTS προσφέρει μετάδοση δεδομένων που βασίζεται σε αποστολή και λήψη πακέτων όσον αφορά στη μετάδοση κειμένου, στην ψηφιοποιημένη φωνή, στο βίντεο αλλά και σε περιεχόμενο πολυμέσων (multimedia).

1.1.5.2 HSPA

Είναι ένα πρωτόκολλο κινητής τηλεφωνίας που βοηθά στη βελτίωση της απόδοσης του UMTS. Χρησιμοποιεί βελτιωμένα συστήματα διαμόρφωσης, ενώ βελτιώνει και τα πρωτόκολλα, τα οποία κινητές συσκευές και σταθμοί βάσης χρησιμοποιούν για να επικοινωνούν. Αυτές οι διαδικασίες επαυξάνουν την αξιοποίηση του εύρους ζώνης που παρέχεται από τα συστήματα UMTS. Οι πάροχοι του δικτύου είναι σε θέση να παρέχουν εμπορικές υπηρεσίες μεταγωγής πακέτων πολύ υψηλής ταχύτητας, όπως πρόσβαση στο

διαδίκτυο και πρόσβαση σε ασύρματες υπηρεσίες ήχου και video. Περιλαμβάνει δύο τεχνολογίες, τις HSDPA και HSUPA.

- Το High-Speed Downlink Packet Access (HSDPA) είναι ένα 3G πρωτόκολλο, που επιτρέπει υψηλότερες ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων και μεγαλύτερη χωρητικότητα σε UMTS δίκτυα. Το πρότυπο υποστηρίζει ταχύτητες downlink έως 14,4 Mbps σε 5 MHz εύρος ζώνης.
- Το High-Speed Uplink Packet Access (HSUPA), είναι επίσης ένα 3G πρωτόκολλο κινητής τηλεπικοινωνίας, το οποίο επιτρέπει μέγιστες ταχύτητες uplink έως 5,76 Mbps.

1.1.5.3 HSPA+

Αποτελεί ένα πρότυπο ασύρματης ευρυζωνικής τεχνολογίας που παρέχει μέγιστες ταχύτητες έως 42 Mbps στην κάτω ζεύξη και 22 Mbps στην άνω ζεύξη (uplink), με τη χρήση κεραιών πολλαπλών εισόδων και πολλαπλών εξόδων (MIMO) και υψηλότερης τάξης διαμόρφωση.

1.1.6 Μετάβαση στα δίκτυα 4G

Οι 4G τεχνολογίες κινητών ευρυζωνικών συνδέσεων επιτρέπουν στα ασύρματα φέροντα να επωφεληθούν μεγαλύτερες ταχύτητες λήψης και αποστολής για να αυξηθεί η ποσότητα και το είδος του περιεχομένου που διατίθεται μέσω κινητών συσκευών.

Τα 4G δίκτυα βασίζονται στην IP τεχνολογία και προσφέρουν υπηρεσίες φωνής, δεδομένων και πολυμέσων σε χρήστες κινητών τερματικών οποτεδήποτε και σχεδόν οπουδήποτε. Τα πρότυπα της τεχνολογίας αυτής, όπως το LTE, προσφέρουν βελτιωμένους ρυθμούς δεδομένων σε σχέση με τις προηγούμενες γενιές της ασύρματης τεχνολογίας. Οι ταχύτερες ασύρματες ευρυζωνικές συνδέσεις επιτρέπουν την υποστήριξη υψηλού επιπέδου υπηρεσιών δεδομένων, συμπεριλαμβανομένων των επιχειρηματικών εφαρμογών (business applications), της συνεχούς ροής ήχου και βίντεο, αποστολή video μηνυμάτων, video κλήσης και τηλεόρασης μέσω κινητής συσκευής (mobile TV).

1.2 ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΚΥΨΕΛΩΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

Το πιο κοινό παράδειγμα κυψελωτού δικτύου είναι το τηλεφωνικό κυψελωτό δίκτυο. Τα κινητά τηλέφωνα λαμβάνουν από το σταθμό βάσης και αποστέλλουν το σήμα σε αυτόν μέσω ραδιοκυμάτων, οι ιδιότητες των οποίων υπεισέρχονται στη μελέτη των εξισώσεων Maxwell για τη μετάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

Η οργάνωση του δικτύου σε κυψέλες επιβάλλεται από το περιορισμένο εύρος συχνοτήτων που διατίθεται για το σκοπό αυτό, εύρος το οποίο θα πρέπει να διαμοιραστεί. Οι πομποί αλλάζουν συχνότητα λειτουργίας μέσω υπολογιστή και χρησιμοποιούνται σταθμοί βάσης

μικρής κατανάλωσης ισχύος, έτσι ώστε ένας περιορισμένος αριθμός ραδιοσυχνοτήτων να χρησιμοποιείται άμεσα από τους χρήστες με την ελάχιστη δυνατή παρεμβολή.

Οι μεγάλες γεωγραφικές περιοχές χωρίζονται σε μικρότερες κυψέλες ώστε να μειώνεται η επίδραση των Line-of-sight (LOS) απωλειών και να εξυπηρετούνται ταυτόχρονα περισσότεροι χρήστες. Όλοι οι σταθμοί βάσης συνδέονται σε μεταγωγείς (switches), οι οποίοι με τη σειρά τους συνδέονται στο δημόσιο τηλεφωνικό δίκτυο. Στις πόλεις, η ακτίνα κάθε κυψέλης είναι μικρότερη συγκριτικά με τις περιφερειακές περιοχές λόγω ισχυρών απωλειών και παρεμβολών.

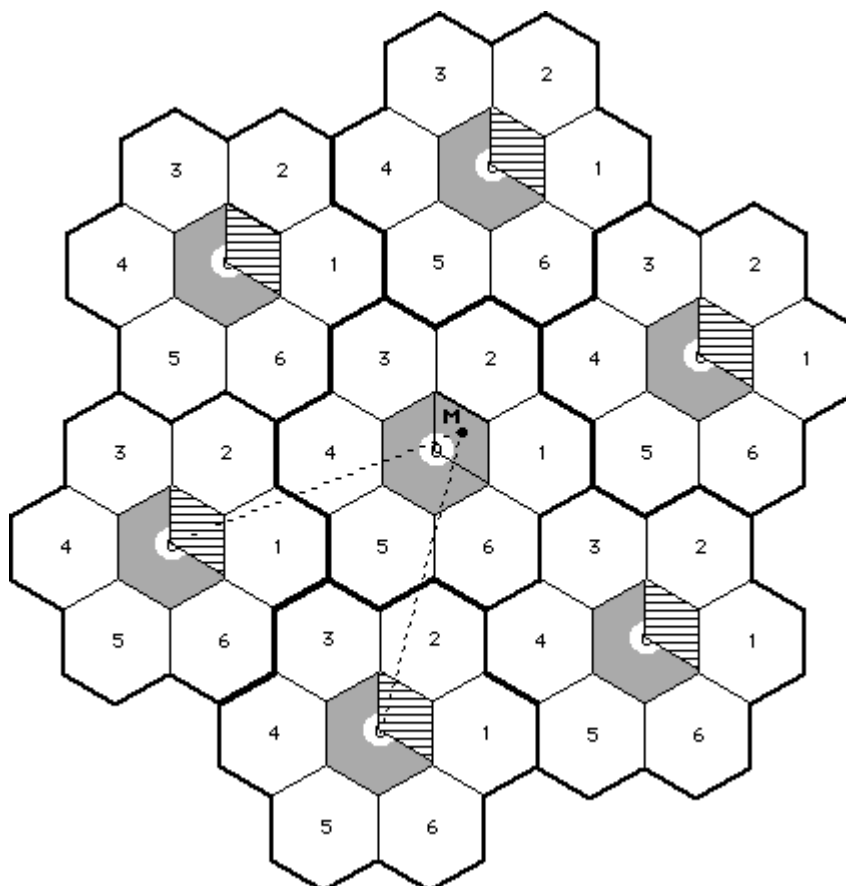
Στον ακόλουθο πίνακα φαίνονται οι διαφορές στα πρωτόκολλα των κυψελωτών δικτύων συγκριτικά με δύο σημαντικά χαρακτηριστικά αυτών, το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης που θεωρητικά υποστηρίζουν και τον μέσο ρυθμό μετάδοσης που επιτυγχάνουν οι χρήστες, τόσο στην άνω όσο και την κάτω ζεύξη.

	W-CDMA	HSPA	HSPA +	3GPP LTE
Peak speeds	2 Mbps (downlink)*	1.8 Mbps–14.4 Mbps (downlink) 384 Kbps–2 Mbps (uplink)	42 Mbps (downlink) 22 Mbps (uplink)	100 Mbps (downlink) 50 Mbps (uplink)
Average user throughput	100 Kbps–320 Kbps (downlink)* Less than 100 Kbps (uplink)*	Up to 2 Mbps (downlink only)* Uplink speeds vary by device	5 Mbps (downlink)* 3 Mbps (uplink)*	5–12 Mbps (downlink)** 2–5 Mbps (uplink)**

Εικόνα 1.1. Εξέλιξη τεχνολογιών κυψελωτών δικτύων

1.3 ΤΡΟΠΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΥΨΕΛΩΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Σε ένα κυψελοειδές ραδιοσύστημα, κάθε περιοχή διαιρείται σε μικρότερες κυψέλες, οι οποίες μπορεί να έχουν σχήμα εξαγωνικό, τετράγωνο, κυκλικό, με το εξαγωνικό να είναι το πιο διαδεδομένο. Σε κάθε μια από αυτές τις κυψέλες έχει εκχωρηθεί μια από τις πολλαπλές συχνότητες (F1 - F6). Η ομάδα των συχνοτήτων μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί σε άλλες κυψέλες, με την προϋπόθεση ότι οι ίδιες συχνότητες δε χρησιμοποιούνται σε γειτονικές κυψέλες, καθώς θα προκαλούνταν ομοδιαυλικές παρεμβολές.



Εικόνα 1.2. Κυψελωτό σύστημα

Η αυξημένη χωρητικότητα σε ένα κυψελωτό δίκτυο, σε σύγκριση με ένα δίκτυο με ένα μόνο πομπό, προέρχεται από το γεγονός ότι η ίδια ραδιοσυχνότητα μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί σε μια διαφορετική περιοχή για μια εντελώς διαφορετική μετάδοση. Εάν υπάρχει ένα μόνο απλός πομπός, μόνο μία μετάδοση μπορεί να λάβει χώρα σε οποιαδήποτε δεδομένη συχνότητα. Ωστόσο, υπάρχει αναπόφευκτα κάποιο επίπεδο παρεμβολής από το σήμα από άλλες κυψέλες, οι οποίες χρησιμοποιούν την ίδια συχνότητα. Αυτό σημαίνει ότι, σε ένα πρότυπο σύστημα FDMA, πρέπει να υπάρχει μια απόσταση τουλάχιστον μιας κυψέλης μεταξύ κυψελών που επαναχρησιμοποιούν την ίδια συχνότητα.

1.4 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΕΡΑΙΩΝ ΣΤΑ ΚΥΨΕΛΩΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Οι κεραιές αποτελούν βασική τεχνολογία σε ένα κυψελωτό τηλεφωνικό σύστημα ή οποιοδήποτε άλλο σύστημα ασύρματης επικοινωνίας. Σε ένα ασύρματο σύστημα, μια κεραία μετατρέπει την καθοδηγούμενη ενέργεια ραδιοκυμάτων σε ενέργεια που εκπέμπεται ή ακτινοβολείται σε ελεύθερο χώρο. Μια κεραία κάνει επίσης το αντίστροφο, λαμβάνει ραδιοκύματα και τα προωθεί στις συσκευές που τα ανιχνεύουν, αποκωδικοποιούν και ενισχύουν είτε για να τα μεταδώσουν περαιτέρω είτε για να τα επεξεργαστούν.

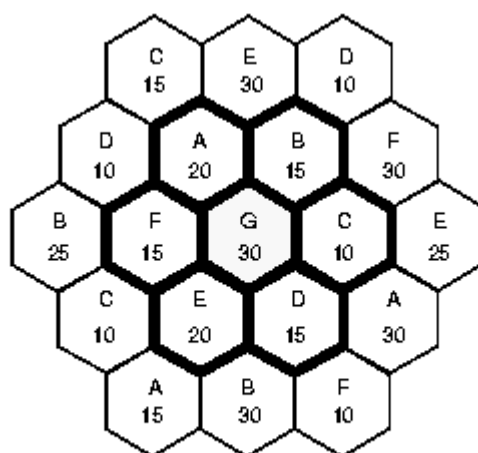
Οι κεραιές σταθμού βάσης είναι μακρόστενες ορθογώνιες συσκευές, συνήθως οργανωμένες σε ομάδες των τριών, ψηλά τοποθετημένες σε ένα πύργο σταθμού βάσης. Ο σταθμός βάσης μπορεί να θεωρηθεί ως "κέντρο διοίκησης", ο οποίος στέλνει και λαμβάνει σήματα. Ο σταθμός βάσης αφενός κατευθύνει σωστά τις εισερχόμενες και τις εξερχόμενες κλήσεις και αφετέρου υλοποιεί και λειτουργία επαναλήπτη, για να μπορεί ο κάθε χρήστης να επικοινωνεί καθώς κινείται από τα όρια της μίας κυψέλης στην επόμενη.

Κατά το σχεδιασμό των κεραιών κινητής τηλεφωνίας, ειδικά αυτές για τους σταθμούς βάσης, πρέπει να εξισορροπηθούν πολλές διαφορετικές ανάγκες. Το πρώτο είναι η εξασφάλιση κατευθυντικότητας (directionality). Όλες οι κεραιές-πομποί ακτινοβολούν ενέργεια με βάση ένα συγκεκριμένο διάγραμμα ακτινοβολίας, που εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως το σχήμα της κεραιάς. Είναι προτιμότερο για ένα κυψελωτό σύστημα, το διάγραμμα ακτινοβολίας να είναι σχεδόν παράλληλο με το έδαφος, όπου βρίσκονται οι περισσότεροι χρήστες κινητών τηλεφώνων. Επίσης, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη το κέρδος της κεραιάς, το οποίο αναφέρεται στο γεγονός ότι η κεραιά δεν μεταδίδει ή λαμβάνει κύματα από ή προς κάθε κατεύθυνση με την ίδια ευαισθησία. Ένας τρίτος παράγοντας είναι το φυσικό μέγεθος. Επειδή οι κεραιές πρέπει να τοποθετούνται κατά μήκος των δρόμων και σε άλλους δημόσιους χώρους, δεν μπορούν να έχουν μεγάλο ύψος.

1.5 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΥΨΕΛΩΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

1.5.1 Cluster

Σε ένα κυψελωτό σύστημα, η παρεμβολή μεταξύ των παρακείμενων καναλιών μειώνεται με την κατανομή διαφορετικών ζωνών συχνοτήτων ή καναλιών σε παρακείμενες κυψέλες, έτσι ώστε οι καλύψεις τους να επικαλύπτονται ελαφρώς, χωρίς ωστόσο να προκαλούνται παρεμβολές. Με τον τρόπο αυτό οι κυψέλες ομαδοποιούνται σε ομάδες, που ονομάζονται clusters.



Εικόνα 1.3. Cluster επτά κυψελών

Συνήθως τα clusters περιλαμβάνουν επτά κυψέλες, αλλά ενδέχεται να αποτελούνται και από 7, 12 ή 21 κυψέλες. Οι επτά είναι ένας ικανοποιητικός αριθμός, αλλά υπάρχουν μια σειρά από αντικρουόμενες απαιτήσεις που πρέπει να εξισορροπούνται κατά την επιλογή του αριθμού των κυψελών σε ένα cluster για ένα κυψελωτό σύστημα, όπως:

- Περιορισμός των επιπέδων παρεμβολής
- Αριθμός καναλιών που μπορούν να διατεθούν σε κάθε κυψέλη

Είναι απαραίτητο να περιοριστεί η παρεμβολή μεταξύ των κυψελών που έχουν την ίδια συχνότητα. Η τοπολογία της διάταξης των κυψελών έχει μεγάλη επίδραση σε αυτό. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός τους στο cluster, τόσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση μεταξύ κυψελών που μοιράζονται τις ίδιες συχνότητες.

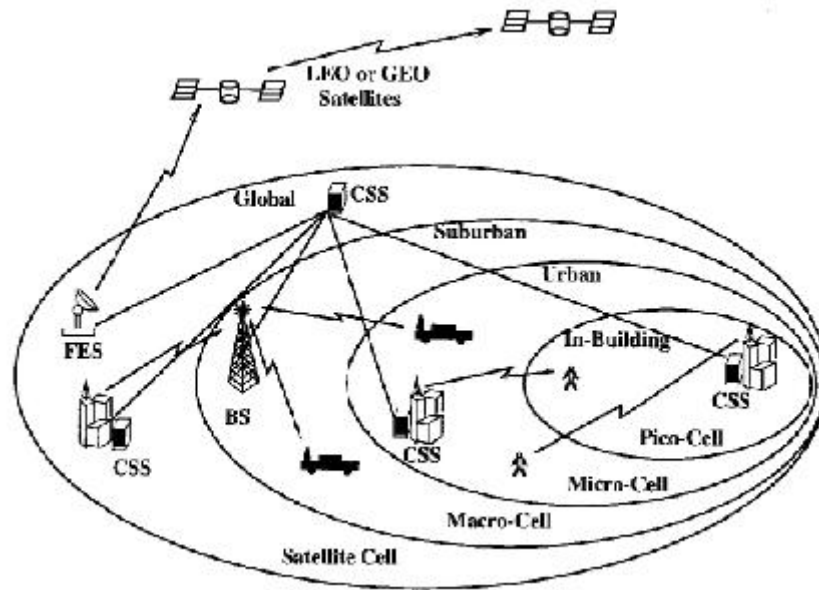
Ιδανικά, κάθε cluster θα έπρεπε να περιλαμβάνει μεγάλο αριθμό κυψελών. Ωστόσο, υπάρχει περιορισμένος αριθμός των διαθέσιμων καναλιών. Αυτό σημαίνει ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των κυψελών σε ένα cluster, τόσο μικρότερος αριθμός καναλιών ανατίθεται στην κυψέλη, και αυτό μειώνει τη χωρητικότητα.

1.5.2 Τύποι κυψελών

Ακόμη και αν ο αριθμός των κυψελών σε ένα cluster σε ένα κυψελωτό σύστημα μπορεί να συμβάλει στη ρύθμιση του αριθμού των χρηστών που μπορούν να φιλοξενηθούν, η μείωση της έκτασης των κυψελών είναι δυνατόν να αυξήσει τη συνολική χωρητικότητα του κυψελωτού συστήματος. Ωστόσο, μεγαλύτερος αριθμός τερματικών ή σταθμών βάσης απαιτούνται στην περίπτωση που οι κυψέλες γίνονται μικρότερες και αυτό αυξάνει το κόστος για το χειριστή. Κατά συνέπεια, σε περιοχές όπου υπάρχουν περισσότεροι χρήστες, είναι εγκατεστημένοι μικροί σταθμοί βάσης με μικρή κατανάλωση ισχύος.

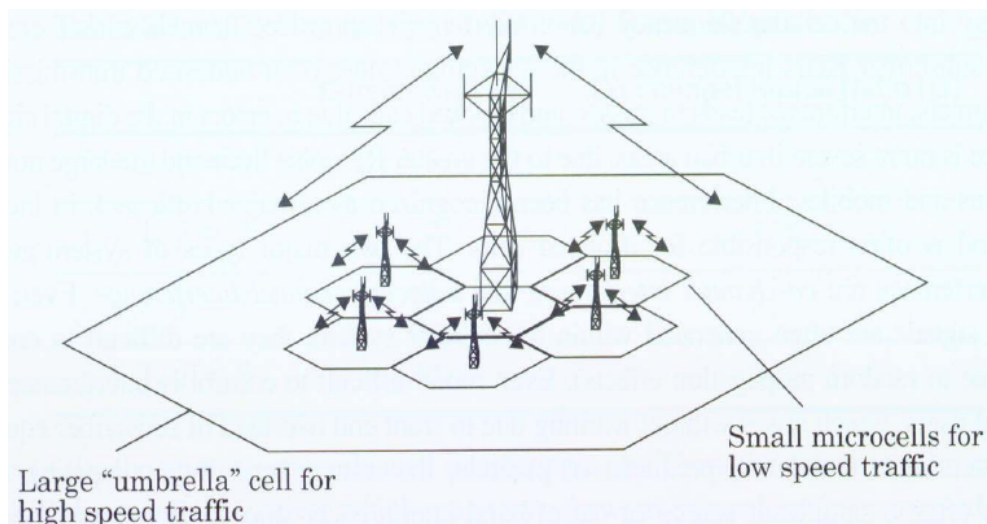
Υπάρχουν διαφορετικά είδη κυψελών ανάλογα με το μέγεθος και τη λειτουργία τους:

- I. Μακροκυψέλες (Macro-cell): Κυψέλες με μεγάλη ακτίνα που χρησιμοποιούνται συνήθως για απομακρυσμένες ή αραιοκατοικημένες περιοχές. Η διάμετρός τους μπορεί να είναι 10 km ή ενδεχομένως και μεγαλύτερη.
- II. Micro κυψέλες (Micro-cell): Αυτές χρησιμοποιούνται συνήθως σε πυκνοκατοικημένες περιοχές, και μπορεί να έχουν διάμετρο περίπου 1 χιλιόμετρο.
- III. Pico κυψέλες: χρησιμοποιούνται γενικά για την κάλυψη πολύ μικρών περιοχών, όπως συγκεκριμένες περιοχές με κτίρια, ή, ενδεχομένως, σήραγγες, όπου η κάλυψη από μια μεγαλύτερη κυψέλη δεν είναι δυνατή. Προφανώς, τα επίπεδα ισχύος που χρησιμοποιούνται από τους σταθμούς βάσης είναι πολύ χαμηλότερα και οι κεραιές δεν είναι σε θέση να καλύψουν ευρείες περιοχές. Με αυτόν τον τρόπο η κάλυψη ελαχιστοποιείται και η παρεμβολή σε γειτονικές κυψέλες είναι μειωμένη.



Εικόνα 1.4. Απεικόνιση pico-, micro-, macro- cell

- IV. Selective cells: Αποτελούν κυψέλες σε περιοχές όπου δεν απαιτείται πλήρη κάλυψη 360° γύρω από τον πομπό. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να πληρώσουν μια τρύπα στην κάλυψη στο κυψελωτό σύστημα, ή για να αντιμετωπίσουν ένα πρόβλημα κατά την κίνηση των τερματικών, όπως κατά την είσοδο σε σήραγγα, κλπ.
- V. Umbrella cell: Χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις κατά τις οποίες κάποιος δρόμος μεγάλης κυκλοφορίας διασχίζει μια περιοχή όπου υπάρχουν μικροκυψέλες. Υπό κανονικές συνθήκες, αυτό θα οδηγήσει σε ένα μεγάλο αριθμό handover, καθώς οι άνθρωποι διέρχονται γρήγορα από τα όρια της μιας μικροκυψέλης στην επόμενη. Μια umbrella κυψέλη θα αναλάβει μέρος της τηλεπικοινωνιακής κίνησης των μικροκυψελών, χρησιμοποιώντας, όμως, διαφορετικά κανάλια από εκείνα που διατίθενται για τις μικροκυψέλες. Με τον τρόπο αυτό, θα επιτρέψει στα άτομα που μετακινούνται κατά μήκος του δρόμου χρησιμοποιώντας την umbrella κυψέλη να περάσουν από τη μια microcell στην επόμενη χωρίς πολλές μεταπομπές (handovers).



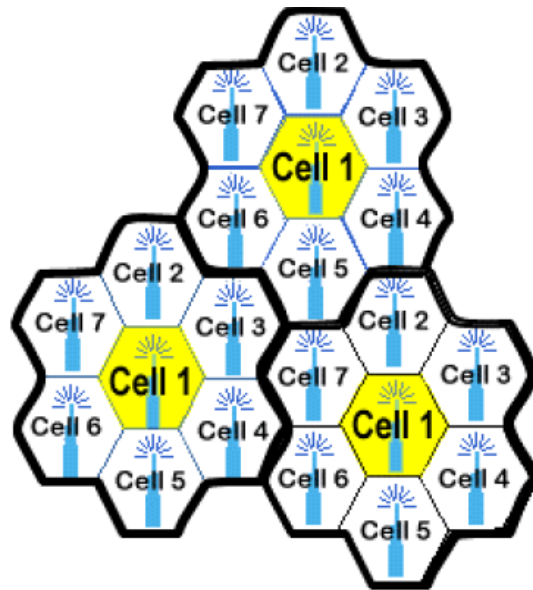
Εικόνα 1.5. Umbrella cell

1.5.3 Reuse factor

Ο περιορισμένος αριθμός συχνοτήτων των καναλιών οδηγεί στην προσπάθεια εξεύρεσης λύσεων, ώστε το κάθε κανάλι να υποστηρίζει περισσότερες από μια συνδιαλέξεις κάθε φορά. Ο παράγοντας της επαναχρησιμοποίησης έχει εισαχθεί για το πρόβλημα αυτό. Η χρήση του ενισχύεται από το κυψελωτό σχήμα των κελιών του δικτύου.

Σε κάθε κυψέλη ανατίθεται ένας αριθμός καναλιών, δηλαδή συχνοτήτων που να μη συμπίπτουν με τις συχνότητες των αντίστοιχων καναλιών γειτονικής κυψέλης. Η ίδια ομάδα συχνοτήτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί από άλλη κυψέλη, η οποία, όμως, θα πρέπει να βρίσκεται σε μια απόσταση από την πρώτη, για την αποφυγή παρεμβολών. Η εμβέλεια της κάλυψης κάθε κυψέλης περιορίζεται έτσι ώστε η επαναχρησιμοποίηση να γίνεται σε μικρή απόσταση αλλά να μην παρεμβάλλεται η μία κυψέλη στη λειτουργία της άλλης.

Όπως φαίνεται στην εικόνα, κυψέλες με τον ίδιο αριθμό έχουν ίδια ομάδα συχνοτήτων στη διάθεσή τους. Εδώ, οι διαθέσιμες συχνότητες είναι 7, επομένως ο παράγοντας επαναχρησιμοποίησης είναι $1/7$, επειδή κάθε κυψέλη διαθέτει το $1/7$ των διαθέσιμων καναλιών του δικτύου.

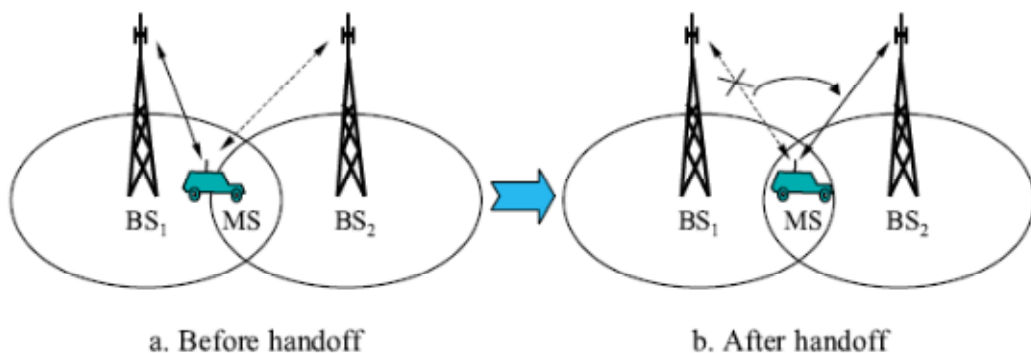


Εικόνα 1.6. Reuse Factor 1/7

1.5.4 Handover

Το κυψελωτό δίκτυο επικοινωνιών περιλαμβάνει μεγάλο αριθμό σταθμών βάσης που καλύπτουν μια συγκεκριμένη περιοχή και διαχειρίζονται τις ανάγκες των κινητών τερματικών. Μια βασική απαίτηση από το σύστημα είναι η ομαλή μετάβαση κάθε κινητού χρήστη από τη μία κυψέλη στην επόμενη χωρίς διακοπή της κλήσης.

Αν και η έννοια του handover φαίνεται απλή, στην εφαρμογή της δεν είναι μια εύκολη διαδικασία. Το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας θα πρέπει να αποφασίσει εάν η μετάβαση είναι απαραίτητη και προς ποια κυψέλη. Εάν η μεταπομπή κριθεί απαραίτητη, οφείλει να αναδρομολογήσει την κλήση στο σχετικό σταθμό βάσης και να τοποθετήσει το τερματικό σε νέο κανάλι, χωρίς διακοπή της παροχής υπηρεσιών.



Εικόνα 1.7. Απλή περίπτωση handover/handoff

Υπάρχουν ποικίλα πρότυπα για τον τρόπο διαχειρισμού των μεταπομπών. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο τρόπος χειρισμού τους από το δίκτυο GSM.

Κατά τη μεταπομπή πολλές παράμετροι θα πρέπει να αποσαφηνιστούν και να προσδιοριστούν. Αρχικά θα πρέπει να καθοριστεί η ισχύς του σήματος του σταθμού βάσης που εξυπηρετεί το χρήστη, καθώς και οι ισχύεις του σήματος των γύρω σταθμών. Επιπλέον, πρέπει να είναι γνωστή η διαθεσιμότητα των καναλιών. Το κινητό είναι προφανώς καταλληλότερο να παρακολουθεί τη δύναμη των σταθμών βάσης, αλλά μόνο το κυψελωτό δίκτυο γνωρίζει την κατάσταση της διαθεσιμότητας των καναλιών και, επομένως, το δίκτυο λαμβάνει την απόφαση σχετικά με το πότε η μεταπομπή πρόκειται να λάβει χώρα και σε ποιο κανάλι.

Κατά συνέπεια, το κινητό παρακολουθεί συνεχώς το επίπεδο του σήματος των σταθμών βάσης που μπορεί να αντιληφθεί, συμπεριλαμβανομένου και του σταθμού βάσης που τον εξυπηρετεί τη δεδομένη στιγμή. Όταν η ισχύς του σήματος από τον αρχικό σταθμό βάσης ελαττώνεται, το δίκτυο κάνει αποτίμηση των ισχύων που δέχεται ο χρήστης και από τους υπόλοιπους σταθμούς βάσης. Στη συνέχεια, ελέγχει για τη διαθεσιμότητα των καναλιών, και αν κάποιο είναι διαθέσιμο ενημερώνει την επιλεγμένη κυψέλη να διατηρήσει το συγκεκριμένο κανάλι για τον νέο χρήστη, προερχόμενο από handover. Όταν το κινητό τερματικό εισέρχεται στο νέο κανάλι, το τελευταίο στέλνει μήνυμα ενημέρωσης στο σταθμό βάσης, ο οποίος και διακόπτει την επικοινωνία του χρήστη με το παλιό κανάλι, ελευθερώνοντάς το για άλλον χρήστη.

Στην περίπτωση που ένας σταθμός βάσης πλησιάζει στο όριο της χωρητικότητάς του, μπορεί να μεταθέσει την εξυπηρέτηση των τελικών χρηστών σε άλλους σταθμούς βάσης μειώνοντας τον τηλεπικοινωνιακό του φόρτο και επιτυγχάνοντας καλύτερο καταμερισμό των πόρων. Με αυτόν τον τρόπο, κάθε σταθμός βάσης μπορεί να προσφέρει πρόσβαση στο μέγιστο αριθμό ενεργών χρηστών που μπορεί να υποστηρίξει. Η χρήση των καναλιών και η χωρητικότητα είναι πολύ σημαντικοί παράγοντες κατά το σχεδιασμό ενός κυψελωτού δικτύου.

1.5.4.1 Είδη μεταπομπών

II. Intracell-IntraBSC

Η μεταπομπή γίνεται εντός της ίδιας κυψέλης στην περίπτωση κατά την οποία το σύστημα θέλει να αναδιατάξει τους διαύλους εντός της κυψέλης. Τον έλεγχο της μεταπομπής αναλαμβάνει μια ξεχωριστή συσκευή, BSC, και όχι ο σταθμός βάσης. Η μεταπομπή μπορεί να αφορά και στην αλλαγή σταθμού βάσης εντός της κυψέλης, ο οποίος μπορεί να είναι και ένας αναμεταδότης.

III. Intecell-IntraBSC

Ο χρήστης μετακινείται από μια κυψέλη σε μία άλλη και ο έλεγχος μεταπομπής γίνεται από τον ίδιο BSC, ο οποίος είναι υπεύθυνος για τη σύνδεση του τερματικού στο νέο κανάλι, άρα και για την αλλαγή της συχνότητάς του, αλλά και για την ενημέρωση του παλιού σταθμού βάσης για την ολοκλήρωση της διαδικασίας, ώστε να απελευθερώσει το αρχικό κανάλι.

IV. Intecell-InteBSC

Ο χρήστης μετακινείται από μία κυψέλη σε μία δεύτερη αλλά στη διαδικασία μεταπομπής λαμβάνουν μέρος δύο BSC, καθένας εξυπηρετώντας τη μία από τις δύο κυψέλες. Τα BSC συνδέονται με ένα μεταγωγέα. Η απόφαση αλλαγής κυψέλης λαμβάνεται από το BSC της αρχικής κυψέλης, κατόπιν ενημερώνεται ο μεταγωγέας και ανατίθεται η σύνδεση του κινητού τερματικού στον νέο BSC.

V. INterMSC

Ο χρήστης μετακινείται από τη μια κυψέλη σε δεύτερη αλλά η μεταπομπή γίνεται μέσω MSC με πιο πολύπλοκη διαδικασία από την προηγούμενη. Την απόφαση, ωστόσο, λαμβάνει ξανά ο αρχικός BSC. Η επικοινωνία μεταξύ των MSC απαιτεί την ύπαρξη ενός αριθμού μεταπομπής (handover number, hon) για την ταυτοποίηση του MSC μεταγωγής, καθώς και την αίτηση μεταπομπής του αποστολέα-MSC προς τον παραλήπτη-MSC.

2. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ

2.1 ΠΟΛΥΠΛΕΞΙΑ

Στις μεταδόσεις δεδομένων υπάρχει η απαίτηση περισσότεροι του ενός χρήστες να διαμοιράζονται ένα κοινό μέσο επικοινωνίας.

Κάθε μέσο αποτελεί έναν πόρο ενός συστήματος, το οποίο για να κατανέμεται αποδοτικά και με καθορισμένο τρόπο σε πολλαπλούς χρήστες απαιτείται η ύπαρξη πρωτοκόλλου πρόσβασης, το οποίο καθορίζει τον τρόπο κοινής χρήσης του καναλιού και τον τρόπο διαχείρισης των διαφορετικών μηνυμάτων των χρηστών. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται πολυπλεξία στην ενσύρματη μετάδοση και πολλαπλή προσπέλαση στις ασύρματες επικοινωνίες, αντίστοιχα. Η πολυπλεξία αποτελεί συνδυασμό δύο ή περισσότερων σημάτων, αναλογικών ή ψηφιακών, σε ένα μεγαλύτερο σήμα με μεγαλύτερο εύρος ζώνης, με σκοπό να διέλθουν μέσα από το ίδιο κανάλι ταυτόχρονα. Με αυτόν τον τρόπο, κάποιος πόρος, ειδικά εάν είναι σπάνιος, διαμοιράζεται σε πολλαπλούς χρήστες. Μέσω της πολυπλεξίας, η χωρητικότητα κάθε μέσου διαιρείται σε μικρότερα κανάλια, ένα για κάθε προς μετάδοση πακέτο, τα οποία διέρχονται συνδυασμένα από το κανάλι.

2.1.1 Πολυπλεξία με διαίρεση χρόνου (TDM)

Η TDM είναι είδος ψηφιακής ή και αναλογικής πολυπλεξίας στην οποία δύο ή περισσότερα ψηφία ή σήματα, αντίστοιχα, μεταδίδονται ταυτόχρονα σε χρονοσχιστές σε ένα κανάλι επικοινωνίας. Οι χρονοσχιστές (timeslots) είναι σταθερού μήκους και διάρκειας τ , έτσι, κάθε σήμα καταλαμβάνει το διάυλο για κλάσμα τ/T του συνολικού χρόνου. Δείγματα διάρκειας τ μεταδίδονται ανά χρονικά διαστήματα T με καθορισμένη χρονική αλληλουχία και τα σήματα καταλαμβάνουν μη επικαλυπτόμενες χρονικές θυρίδες. Ο διάυλος, ωστόσο, ενδέχεται να παραμένει αδρανής για κάποιο χρονικό διάστημα. Εάν τα σήματα είναι ψηφιακά, η πολυπλεξία των ψηφίων γίνεται με κατάλληλο τρόπο ώστε να λαμβάνει υπόψη τις διαφορές στο ρυθμό μετάδοσης των διαφορετικών πηγών πληροφορίας. Ως μειονέκτημα της τεχνικής σημειώνεται η ανάγκη συγχρονισμού μεταξύ πομπού και δέκτη, ο οποίος επιτυγχάνεται με χρήση ψηφιακών κυκλωμάτων. Επίσης, σε περίπτωση χρονικής επικάλυψης των δειγμάτων ενδέχεται να δημιουργηθεί διασυμβολική παρεμβολή.

2.1.2 Πολυπλεξία με Διαίρεση Συχνότητας (FDM)

Στην περίπτωση πολυπλεξίας με διαίρεση συχνότητας, η φέρουσα συχνότητα κάθε σήματος μετατοπίζεται φασματικά ώστε να καταλάβει μια ζώνη συχνοτήτων μεταξύ διαδοχικών, μη επικαλυπτόμενων ζωνών του διατιθέμενου φάσματος. Η υπέρθεση των επιμέρους σημάτων

συνθέτει ένα μεγαλύτερο σε εύρος ζώνης σήμα, το οποίο διαμορφώνεται ώστε να καταστεί κατάλληλο προς μετάδοση. Κάποιες από τις διαθέσιμες ζώνες παραμένουν αχρησιμοποίητες για ασφάλεια.

Παράδειγμα μετάδοσης πολυπλεγμένου σήματος FDM είναι η μετάδοση τηλεφωνικών σημάτων μέσω ομοαξονικού καλωδίου ή ασύρματης μικροκυματικής ζεύξης αλλά και οι περιπτώσεις δορυφορικών ζεύξεων σημάτων μεγάλου όγκου δεδομένων.

Η τεχνική αντιμετωπίζει δυσκολίες στην εφαρμογή της σε διαύλους που ενδέχεται να υφίστανται ισχυρές διαλείψεις ως προς τη συχνότητα, γεγονός που απαιτεί τη χρήση ενισχυτών μεγάλου εύρους ζώνης στα κυκλώματα λειτουργίας λόγω ενδεχόμενης μεγάλης φασματικής διεύρυνσης.

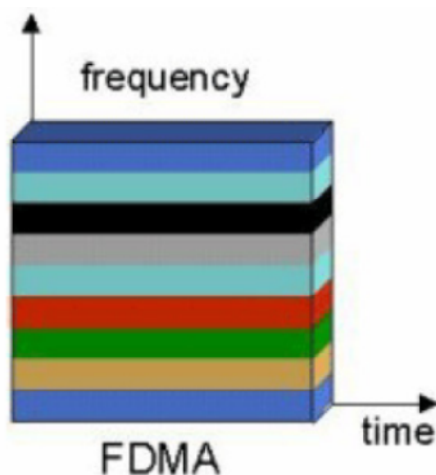
2.2 ΠΟΛΛΑΠΛΗ ΠΡΟΣΠΕΛΑΣΗ

Η τεχνική δίνει τη δυνατότητα κατανομής ενός τηλεπικοινωνιακού ή δικτύου υπολογιστών με συστηματικό και αποτελεσματικό τρόπο σε πολλούς χρήστες. Η πολλαπλή προσπέλαση επιτρέπει σε πολλούς τερματικούς σταθμούς να συνδέονται με το ίδιο μέσο μεταφοράς πολλαπλών σημείων πρόσβασης, ώστε να μεταδώσουν σε αυτό τα σήματά τους και να μοιραστούν τη χωρητικότητά του. Ιδιαίτερα στις τηλεπικοινωνίες, η χρήση της συμβάλλει στην αποφυγή του φαινομένου των διαλείψεων λόγω πολύοδης διαδρομής των σημάτων. Ο διαμοιρασμός του εύρους ζώνης του καναλιού για την κατανομή του στους χρήστες γίνεται με τους ακόλουθους τρόπους :

- Πολλαπλή προσπέλαση με διαίρεση συχνότητας
- Πολλαπλή προσπέλαση με διαίρεση χρόνου
- Πολλαπλή προσπέλαση με κωδικοποίηση
- Πολλαπλή προσπέλαση με διαίρεση χώρου

2.2.1 Πολλαπλή προσπέλαση με διαίρεση συχνότητας (FDMA)

Στην FDMA κάθε σήμα εκπέμπεται σε διαφορετική συχνότητα, με ένα διάστημα αχρησιμοποίητων συχνοτήτων να το διαχωρίζει από το επόμενο, ώστε να αποφεύγονται οι παρεμβολές. Ο χρήστης λαμβάνει τα σήματα και αφού τα επεξεργάζεται επιλέγει το προοριζόμενο προς αυτόν. Κάθε σήμα καταλαμβάνει μια ζώνη συχνοτήτων περί τη φέρουσα συχνότητά του, διαχωριζόμενο από τα γειτονικά του σήματα από μια στενή ζώνη συχνοτήτων προς αποφυγή παρεμβολών. Κατά τον τρόπο αυτό το συνολικό εύρος που διαθέτει το τηλεπικοινωνιακό σύστημα μοιράζεται στους διάφορους χρήστες που εξυπηρετεί, διαμοιρασμός που εξαρτάται από παράγοντες όπως ο τηλεπικοινωνιακός φόρτος. Τα είδη της διαμόρφωσης που χρησιμοποιούνται είναι PSK, QPSK. Χρησιμοποιείται ένας ενισχυτής ισχύος για το συνολικό σήμα με αποτέλεσμα τη δημιουργία παρεμβολών λόγω φαινομένων ενδοδιαμόρφωσης, εφόσον ο ενισχυτής λειτουργεί σε μη γραμμική περιοχή.

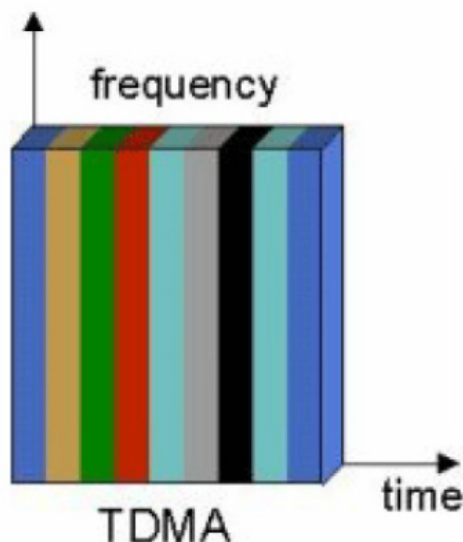


Εικόνα 2.1. Πολλαπλή προσπέλαση με διαίρεση συχνότητας

Η μέθοδος FDMA χρησιμοποιείται ευρέως στις ασύρματες επικοινωνίες, όπου το περιβάλλον του ελεύθερου χώρου δημιουργεί δύσκολες συνθήκες για κάθε μέθοδο πολλαπλής προσπέλασης εξαιτίας της χρονικά μεταβαλλόμενης φύσης του καναλιού επικοινωνίας. Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που εμφανίζονται είναι το φαινόμενο near-far effect, κατά το οποίο ο χρήστης λαμβάνει μεγάλες διακυμάνσεις της ισχύος του σήματος σε διαφορετικά κανάλια συχνότητας. Εάν ένας χρήστης βρίσκεται κοντά στο σταθμό βάσης του συστήματος, το σήμα είναι πιο έντονο συγκριτικά με έναν χρήστη στα όρια του σταθμού βάσης. Οι διακυμάνσεις μπορεί να είναι της τάξεως των 100 db. Εάν το ισχυρό σήμα παράγει έστω και λίγη ακτινοβολία εκτός ζώνης ενδέχεται να υπερκαλύψει ένα γειτονικό κανάλι ασθενούς σήματος, αλλοιώνοντας την τηλεπικοινωνιακή ζεύξη. Για την αντιμετώπιση του παραπάνω προβλήματος, έχουν αναπτυχθεί νέες ψηφιακές μέθοδοι διαμόρφωσης, όπως η CPFSK αλλά και νέων τεχνικών διαμόρφωσης που να μην επηρεάζονται από τις επιπτώσεις των ενισχυτών, όπως η διαμόρφωση $\pi/4$ QPSK. Η τεχνική αυτή αντιμετωπίζει επίσης προβλήματα από φαινόμενα όπως η μετατόπιση Doppler και τα σφάλματα τοπικού ταλαντωτή.

2.2.2 Πολλαπλή προσπέλαση διαίρεσης χρόνου (TDMA)

Στην τεχνική TDMA κάθε χρήστης έχει στη διάθεσή του όλο το εύρος ζώνης για μια χρονική θυρίδα (time slot) κατά το οποίο στέλνει το σήμα. Ιδιαίτερη σημασία έχει ο συγχρονισμός ώστε να αποφεύγεται η χρονική επικάλυψη των σημάτων. Ο δέκτης μέσω κατάλληλων διατάξεων απομονώνει το σήμα που προορίζεται για τον ίδιο. Στην TDMA χρησιμοποιείται κυρίως διαμόρφωση PSK ή QPSK.

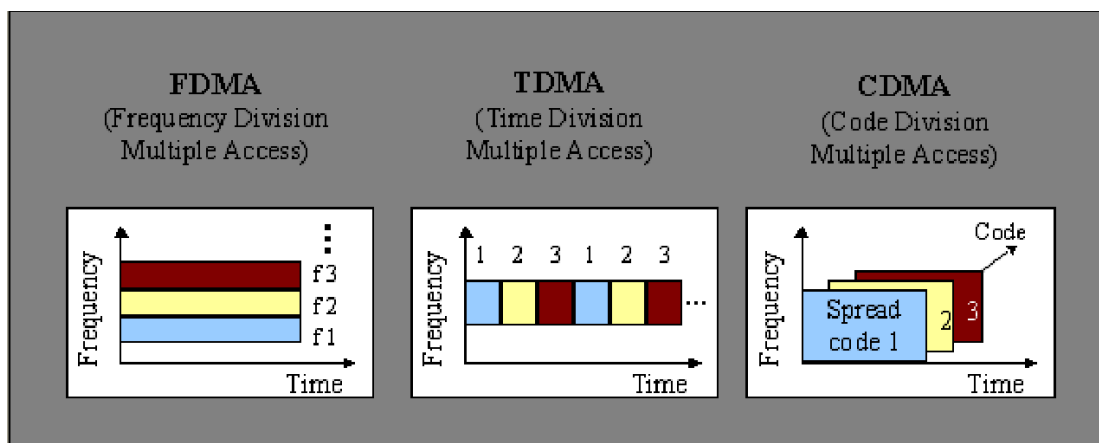


Εικόνα 2.2. Πολλαπλή προσπέλαση με διαίρεση χρόνου

Το ασύρματο περιβάλλον δημιουργεί προβλήματα στη σωστή εφαρμογή της τεχνικής, όπως είναι τα φαινόμενα near-far effect και καθυστέρησης, κατά την οποία το σήμα από μακρινό χρήστη καθυστερεί να φτάσει στο σταθμό βάσης, συγκριτικά με έναν κοντινό χρήστη. Η αντιμετώπιση των καθυστερήσεων γίνεται με τοποθέτηση χρονικών ζωνών προστασίας (guard times) μεταξύ των χρονοθυρίδων, ώστε από τη μία να λαμβάνονται υπόψιν οι μεταβλητές χρονικές καθυστερήσεις των χρηστών και, αφετέρου να εξομαλυνθούν τα σφάλματα συγχρονισμού κατά την έναρξη της χρονοθυρίδας. Το near-far effect δημιουργεί διακυμάνσεις της τιμής του σήματος αλλά δεν υφίσταται το πρόβλημα παρεμβολής μεταξύ γειτονικών καναλιών.

2.2.3 Πολλαπλή προσπέλαση με κωδικοποίηση (CDMA)

Αντίθετα από τις προηγούμενες τεχνικές, στην CDMA ο χρήστης έχει διαθέσιμο όλο το εύρος συχνοτήτων και χρόνου. Του προσδίδεται κωδικός μέσω του οποίου διαπλάτνει το φάσμα του σήματος σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Με τη βοήθεια αυτού του κωδικού γίνεται η αποκωδικοποίηση στο δέκτη στο πραγματικό φάσμα συχνοτήτων. Πριν κάποια χρόνια είχε χρησιμοποιηθεί μόνο σε στρατιωτικές εφαρμογές, αλλά έχει αρχίσει η εφαρμογή της και στις δορυφορικές και κινητές επικοινωνίες.



Εικόνα 2.3. FDMA, TDMA, CDMA

2.2.4 Πολλαπλή προσπέλαση διαίρεσης χώρου (SDMA)

Στην τεχνική αυτή χρησιμοποιούνται έξυπνες κεραιές που διαχωρίζουν χωρικά τους χρήστες ελέγχοντας την ακτινοβολούμενη ενέργεια κάθε χρήστη στην περιοχή κάλυψης.

2.2.5 Σύγκριση Τεχνικών Προσπέλασης

Η τεχνική FDMA έχει επικρατήσει τα τελευταία χρόνια, ωστόσο η TDMA κερδίζει έδαφος αντικαθιστώντας την πρώτη λόγω των πλεονεκτημάτων που προσφέρει. Το βασικό πλεονέκτημα είναι η ύπαρξη ενός μόνο φέροντος, γεγονός που αποτρέπει τις παρεμβολές λόγω ενδοδιαμόρφωσης στους ενισχυτές κατά τη λειτουργία στη γραμμική περιοχή. Επιπλέον, η εφαρμογή της επιτυγχάνεται με φθηνότερο αλλά αξιόπιστο, στο επίπεδο του χρόνου, τηλεπικοινωνιακό σύστημα, αντίθετα με τη δύσκολη επίτευξη της κατανομής της τηλεπικοινωνιακής κίνησης στο πεδίο της συχνότητας που απαιτεί πολυπλοκότερες συνδέσεις. Η τεχνική TDMA επιτρέπει την αποθήκευση, τη μετατροπή του ρυθμού μετάδοσης και την ψηφιακή επεξεργασία των ψηφιακών σημάτων, εξυπηρετώντας συστήματα με μεγάλη τηλεπικοινωνιακή σύνδεση. Ωστόσο, η τεχνική FDMA προτιμάται για συστήματα με μικρή τηλεπικοινωνιακή κίνηση.

Σε ορισμένες περιπτώσεις συστημάτων υπάρχουν ομάδες χρηστών που επιθυμούν πρόσβαση σε συστήματα πολλαπλής πρόσβασης αλλά όχι εντατικά. Στους παραπάνω χρήστες εξασφαλίζεται η πρόσβαση και καθένας εκπέμπει όποτε επιθυμεί. Σε περίπτωση ταυτόχρονης εκπομπής, υπάρχει σοβαρή παρεμβολή και τα μηνύματα επανεκπέμπονται μετά από κάποιο χρονικό διάστημα.

3. DUPLEX SCHEMES

Για τα κυψελωτά συστήματα, είναι αναγκαία η ύπαρξη δυνατότητας ταυτόχρονης ομιλίας και αποστολής δεδομένων και στις δύο κατευθύνσεις. Αυτό δημιουργεί έναν αριθμό περιορισμών σχετικά με τα συστήματα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο της ροής μετάδοσης. Δεδομένου ότι αυτό είναι ένα βασικό στοιχείο του συστήματος, είναι απαραίτητο εξ αρχής να είναι γνωστό το σύστημα που θα χρησιμοποιηθεί. Επομένως, το είδος της αμφίδρομης μετάδοσης που θα χρησιμοποιηθεί αποτελεί κομβικό σημείο της ανάλυσης του συστήματος.

3.1 ΕΙΔΗ ΑΜΦΙΔΡΟΜΗΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ

Υπάρχει μια ποικιλία διαφορετικών τρόπων ελέγχου των πληροφοριών και προς τις δύο κατευθύνσεις. Ωστόσο, κάθε σύστημα έχει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

Η διπλεξία είναι η διαδικασία για την επίτευξη αμφίδρομης επικοινωνίας πάνω από ένα κανάλι επικοινωνίας. Χωρίζεται σε δύο μορφές: half duplex και full duplex.

Half duplex: Σε ημιαμφίδρομη διπλεξία, τα δύο επικοινωνούντα μέρη αναλαμβάνουν εκ περιτροπής τη μετάδοση πάνω από ένα κοινό κανάλι. Ο ένας εκπέμπει και ο άλλος λαμβάνει, περιμένοντας τη δική του σειρά για να μεταδώσει.

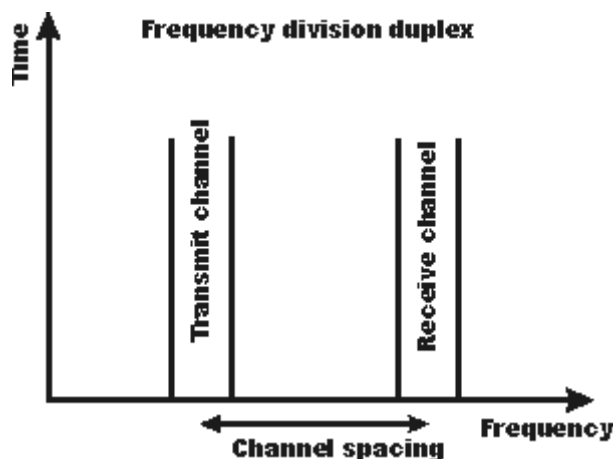
Full duplex: Αναφέρεται σε ταυτόχρονη αμφίδρομη επικοινωνία. Οι δύο σταθμοί που επικοινωνούν μπορούν να στέλνουν και να λαμβάνουν την ίδια στιγμή. Τα σταθερά και κινητά τηλέφωνα λειτουργούν με αυτόν τον τρόπο. Ωστόσο, οι μεταδόσεις πρέπει να διαχωρίζονται με κάποιο τρόπο ώστε ο δέκτης και να λαμβάνει το σήμα αλλά και να μεταφέρει τα δικά του δεδομένα την ίδια στιγμή. Αυτή είναι η πιο επιθυμητή μορφή της full duplex, αλλά είναι πιο περίπλοκη και δαπανηρή. Υπάρχουν δύο βασικές μορφές της: διπλεξία διαίρεσης συχνότητας (FDD) και διπλεξία διαίρεσης χρόνου (TDD).

Τα LTE έχουν οριστεί να λειτουργούν και σε συζευγμένο φάσμα για την τεχνολογία FDD και σε μη συνδυασμένο φάσμα για TDD. Κάθε πρότυπο έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά του.

3.1.1 Frequency Division Duplex (FDD)

Βασίζεται στην ιδέα ότι η μετάδοση και λήψη σημάτων επιτυγχάνεται ταυτόχρονα χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικές συχνότητες. Καθίσταται έτσι δυνατή η ταυτόχρονη λήψη και μετάδοση, καθώς πομπός και δέκτης δεν χρησιμοποιούν την ίδια συχνότητα. Ο διαχωρισμός των δύο καναλιών γίνεται με την μεσολάβηση της κατάλληλης ζώνης συχνοτήτων (guard band) ώστε τα δύο σήματα να μην παρεμβάλλουν μεταξύ τους. Η εξασφάλιση της ανεξάρτητης λειτουργίας των δύο κατευθύνσεων επιτυγχάνεται με τη χρήση κατάλληλου φίλτρου, το οποίο είναι συνήθως εγκατεστημένο στο σταθμό βάσης.

Η χρήση ενός συστήματος FDD επιτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση και λήψη των σημάτων. Ωστόσο, δύο κανάλια απαιτούνται και αυτό δεν οδηγεί σε αποτελεσματική εκμετάλλευση του διαθέσιμου φάσματος. Ακόμη, δεδομένου ότι υπάρχει ένας διαχωρισμός συχνοτήτων μεταξύ των κατευθύνσεων ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης, δεν είναι συνήθως δυνατή η ανακατανομή του φάσματος μεταβάλλοντας την ισορροπία uplink και downlink, εάν υπάρχουν μεταβαλλόμενες απαιτήσεις χωρητικότητας για κάθε κατεύθυνση.

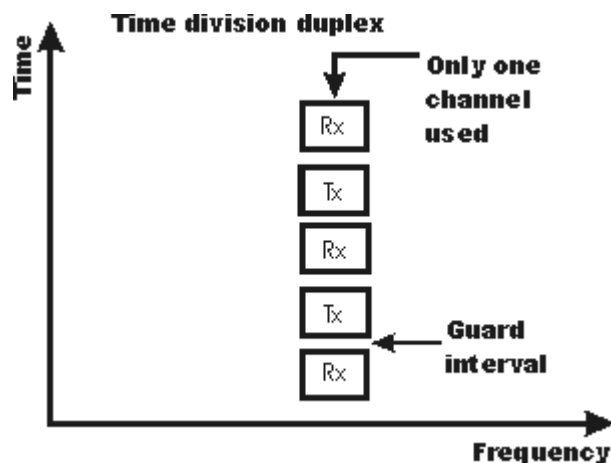


Εικόνα 3.1. Frequency Division Duplex (FDD)

3.1.2 Time Division Duplex (TDD)

Η τεχνολογία LTE TDD έχει αναπτυχθεί, κυρίως, λόγω της χρήσης του σχήματος TD-SCDMA. Το TDD χρησιμοποιεί μια μονή ζώνη συχνοτήτων, τόσο για μετάδοση όσο και για λήψη. Στη συνέχεια, μοιράζονται πομπός και δέκτης το κανάλι, με την εναλλασσόμενη ανάθεση χρονοθυρίδας για τη μετάδοση και λήψη.

Σε ορισμένα συστήματα TDD, οι εναλλασσόμενες σχισμές χρόνου είναι της ίδιας διάρκειας ή έχουν ίσους DL και UL χρόνους. Ωστόσο, το σύστημα δεν χρειάζεται να είναι συμμετρικό. Το σύστημα μπορεί να είναι ασύμμετρο, όπως απαιτείται από την εκάστοτε εφαρμογή. Για παράδειγμα, στην πρόσβαση στο Διαδίκτυο, ο χρόνος λήψης είναι συνήθως μεγαλύτερος από τον χρόνο εκπομπής, οπότε είναι απαραίτητο να εκχωρούνται περισσότερες χρονοθυρίδες σε αυτήν την κατεύθυνση. Ορισμένες μορφές TDD προσφέρουν δυναμική κατανομή εύρους ζώνης. Το πραγματικό πλεονέκτημα της TDD είναι ότι χρειάζεται μόνο ένα κανάλι. Επιπλέον, δεν χρειάζονται ζώνες ασφαλείας (guard bands) και δεν υπάρχει σπατάλη φάσματος. Το μειονέκτημα είναι ότι η επιτυχής εφαρμογή του TDD χρειάζεται πολύ ακριβή χρονισμό και σύστημα συγχρονισμού τόσο σε πομπό και δέκτη, ώστε να είναι βέβαιο ότι οι χρονοθυρίδες δεν επικαλύπτονται ή δεν παρεμβαίνουν μεταξύ τους.



Εικόνα 3.2. Time Division Duplex (TDD)

3.1.3 Συνοπτική Σύγκριση FDD και TDD

ΜΕΘΟΔΟΙ ΤΑΥΤΟΧΡΟΝΗΣ ΑΜΦΙΔΡΟΜΗΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ		
Χαρακτηριστικά	FDD	TDD
Χρήση Φάσματος	Απαιτεί διαφορετικό κανάλι uplink και downlink, και ανάμεσά τους υπάρχει ζώνη συχνοτήτων (guard band). Χαμηλή φασματική απόδοση.	Χρησιμοποιεί μια συχνότητα για μεταφορά και λήψη.
Πολυπλοκότητα	Αυξημένη	Χαμηλή, αλλά απαιτεί χρονικό συγχρονισμό
Κόστος	Υψηλότερο, λόγω απαίτησης για φίλτρα για την αποφυγή μπλοκαρίσματος του πομπού ή μείωσης της ευαισθησίας του δέκτη.	Χαμηλότερο, καθώς οι διακόπτες που απαιτούνται για την αλλαγή των time slots είναι φτηνοί.
Καθυστερήση (latency)	Χαμηλή ή μηδενική	Εξαρτάται από το εύρος και τους χρόνους αλλαγής από μεταφορά σε λήψη
Απόσταση	Μεγάλες και μικρές αποστάσεις	Μικρές αποστάσεις γιατί αύξηση της απόστασης αυξάνει το χρόνο ασφάλειας (guard time), καθώς αυξάνεται και ο χρόνος μετάδοσης του σήματος.
Συμμετρία Uplink/Downlink	Συνήθως 50/50. Διαθέτουν ίδια χωρητικότητα για uplink και downlink.	Δυνατότητα ασυμμετρίας ανάλογα με τις απαιτήσεις. Επιτυγχάνεται με αλλαγή του αριθμού των slots που δίνονται σε κάθε κατεύθυνση.
Δυναμική Κατανομή Εύρους Ζώνης	Δεν δίνεται η δυνατότητα	Επιδέχεται βελτίωση
MIMO και Beamforming	Δυσκολία επίτευξης	Πιο εύκολη επίτευξη

Πίνακας 3.1. Σύγκριση FDD και TDD

3.1.4 LTE Bands για TDD και FDD

Το FDD απαιτεί ζεύγος καναλιού, ένα της ανοδικής ζεύξης και ένα της καθοδικής ζεύξης, ενώ το TDD απαιτεί μια μονή ζώνη ως ανερχόμενη και κατερχόμενη ζεύξης ίδιας συχνότητας αλλά χρονικά διαχωρισμένο. Ως εκ τούτου, υπάρχουν διαφορετικές κατανομές LTE band για TDD και FDD. Σε ορισμένες περιπτώσεις, ενδέχεται οι ζώνες αυτές να επικαλύπτονται. Έτσι, ένα τερματικό UE ή το κινητό θα πρέπει να ανιχνεύσει το είδος της μετάδοσης γίνεται στη συγκεκριμένη μπάντα LTE στην τρέχουσα θέση του.

LTE BAND NUMBER	UPLINK (MHz)	DOWNLINK (MHz)	WIDTH OF BAND (MHz)	DUPLEX SPACING (MHz)	BAND GAP (MHz)
1	1920 - 1980	2110 – 2170	60	190	130
2	1850 - 1910	1930 – 1990	60	80	20
3	1710 - 1785	1805 -1880	75	95	20
4	1710 - 1755	2110 – 2155	45	400	355
5	824 - 849	869 – 894	25	45	20
6	830 - 840	875 – 885	10	35	25
7	2500 - 2570	2620 – 2690	70	120	50
8	880 - 915	925 – 960	35	45	10
9	1749.9 - 1784.9	1844.9 - 1879.9	35	95	60
10	1710 - 1770	2110 – 2170	60	400	340
11	1427.9 - 1452.9	1475.9 - 1500.9	20	48	28
12	698 - 716	728 – 746	18	30	12
13	777 - 787	746 – 756	10	-31	41
14	788 - 798	758 – 768	10	-30	40
15	1900 - 1920	2600 – 2620	20	700	680
16	2010 - 2025	2585 – 2600	15	575	560
17	704 - 716	734 – 746	12	30	18
18	815 - 830	860 – 875	15	45	30
19	830 - 845	875 – 890	15	45	30
20	832 - 862	791 – 821	30	-41	71
21	1447.9 - 1462.9	1495.5 - 1510.9	15	48	33
22	3410 - 3500	3510 – 3600	90	100	10
23	2000 - 2020	2180 – 2200	20	180	160
24	1625.5 - 1660.5	1525 – 1559	34	-101.5	135.5
25	1850 - 1915	1930 – 1995	65	80	15

Πίνακας 3.2. LTE Bands for FDD

LTE BAND NUMBER	ALLOCATION (MHZ)	WIDTH OF BAND (MHZ)
33	1900 – 1920	20
34	2010 – 2025	15
35	1850 – 1910	60
36	1930 – 1990	60
37	1910 – 1930	20
38	2570 – 2620	50
39	1880 – 1920	40
40	2300 – 2400	100
41	2496 – 2690	194
42	3400 – 3600	200
43	3600 – 3800	200

Πίνακας 3.3. LTE Bands for TDD

4. ΔΙΑΔΟΣΗ ΣΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΑΠΩΛΕΙΕΣ

Ο ραδιοδιάυλος αποτελεί μία σημαντική παράμετρο για επιτυχή και αξιόπιστη επικοινωνία υψηλού ρυθμού μετάδοσης. Τα σημαντικότερα προβλήματα στην ασύρματη διάδοση είναι ο θόρυβος, οι παρεμβολές, η παρεμπόδιση από ανθρώπινες και φυσικές κατασκευές και η πολυδιαδρομική διάδοση. Η κατάσταση επιδεινώνεται καθώς τα παραπάνω φαινόμενα μεταβάλλονται χρονικά, κυρίως με την κίνηση των τερματικών. Τα χαρακτηριστικά αυτά θέτουν τα βασικά όρια στην έκταση της κάλυψης, στο ρυθμό μετάδοσης και στην αξιοπιστία της επικοινωνίας του διαύλου. Τα όρια καθορίζονται από πολλούς παράγοντες με κυριότερους το περιβάλλον διάδοσης και την κινητικότητα των χρηστών. Για παράδειγμα, ο ραδιοδιάυλος μπορεί να υποστηρίξει υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης με μεγαλύτερη αξιοπιστία για έναν χρήστη που κινείται σε εσωτερικούς χώρους παρά για έναν χρήστη που βρίσκεται στο εξωτερικό περιβάλλον, περιτριγυρισμένος από ψηλά κτίρια και κινούμενος με μεγάλη ταχύτητα.

4.1 ΔΙΑΔΟΣΗ

Η διάδοση στα συστήματα κινητών επικοινωνιών εξαρτάται κυρίως από τη χρησιμοποιούμενη συχνότητα, τα διαγράμματα ακτινοβολίας και τα κέρδη των κεραιών, τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του εδάφους και των διαφόρων σκεδαστών της ενέργειας των Η/Μ κυμάτων, καθώς και από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τη σχετική θέση κεραιών και σκεδαστών στο χώρο. Η επίδραση όλων αυτών των παραγόντων στο εκπεμπόμενο σήμα γίνεται αντιληπτή ως μεταβολή και πιθανώς παραμόρφωση του λαμβανόμενου σήματος στο δέκτη.

Στα συστήματα κινητών επικοινωνιών η ενέργεια καταφτάνει στο δέκτη, είτε πρόκειται για κινητό σταθμό είτε για σταθμό βάσης, ακολουθώντας διαφορετικά μονοπάτια διάδοσης, με αποτέλεσμα τα αφικνούμενα ραδιοκύματα, που το καθένα καταφτάνει από διαφορετική κατεύθυνση και με διαφορετική χρονική καθυστέρηση να αθροίζονται διανυσματικά στην κεραία του δέκτη. Το φαινόμενο αυτό της άφιξης πολλαπλών εκδόσεων του εκπεμπόμενου σήματος ονομάζεται πολυδιαδρομική διάδοση (multipath propagation) και έχει ως αποτέλεσμα την αφαιρετική ή την αθροιστική συμβολή των ραδιοκυμάτων, ανάλογα με την κατανομή των φάσεων στα επιμέρους κύματα.

4.1.1 Μηχανισμοί διάδοσης ραδιοκυμάτων εκτός απευθείας διεύθυνσης

- **ΑΝΑΚΛΑΣΗ**: εμφανίζεται όταν ένα εκπεμπόμενο ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσκρούει σε μια λεία επιφάνεια μεγάλων διαστάσεων, συγκρινόμενες με το μήκος κύματος λ του RF σήματος
- **ΠΕΡΙΘΛΑΣΗ** : συμβαίνει όταν ανάμεσα στον πομπό και το δέκτη υπάρχει φυσικό ή τεχνητό εμπόδιο με μεγάλες διαστάσεις συγκρινόμενες με το μήκος κύματος, το οποίο προκαλεί την εμφάνιση δευτερευόντων κυμάτων πίσω από το εμπόδιο

σύμφωνα με την αρχή του Huygens. Αποτελεί φαινόμενο που ερμηνεύει τη μεταφορά Η/Μ ενέργειας από τον πομπό στο δέκτη χωρίς την απαραίτητη ύπαρξη απευθείας μονοπατιού μεταξύ τους.

- ΣΚΕΔΑΣΗ : εμφανίζεται όταν ένα σήμα προσκρούει σε μια μεγάλη τραχιά επιφάνεια ή σε επιφάνεια της οποίας οι διαστάσεις είναι της τάξης του μήκους κύματος λ ή μικρότερες, με αποτέλεσμα η ανακλώμενη ενέργεια να διασκορπίζεται σε όλες τις κατευθύνσεις.

Οι τρεις αυτοί μηχανισμοί είναι υπεύθυνοι για την ύπαρξη των πολλαπλών αντιγράφων του εκπεμπόμενου σήματος στην κεραία του δέκτη. Οι πολυδιαδρομικές συνιστώσες καταφτάνουν στο δέκτη με τα χαρακτηριστικά τους (πλάτος, φάση και χρόνο άφιξης) ολισθημένα ως προς τα χαρακτηριστικά του σήματος της απευθείας συνιστώσας.

4.2 ΑΠΩΛΕΙΕΣ

Η επίδραση του ραδιοδιαύλου στο εκπεμπόμενο σήμα είναι πολλαπλή και γίνεται αισθητή κυρίως με τις απώλειες διάδοσης (path loss) και το φαινόμενο των διαλείψεων μικρής κλίμακας (small scale fading) και μεγάλης κλίμακας (large scale fading). Κάθε ένα από αυτά τα φαινόμενα έχει διαφορετική φυσική προέλευση και πρέπει να μελετώνται όλα κατά τη σχεδίαση αλλά και την αξιολόγηση της επίδοσης των κυψελωτών συστημάτων.

Οι απώλειες διάδοσης στις οποίες έχει αποδοθεί ο όρος εξασθένηση, καθορίζουν την εξάρτηση της μείωσης της μέσης ισχύος του λαμβανόμενου σήματος από την απόσταση πομπού-δέκτη. Συνήθως, με δεδομένη την απόσταση πομπού-δέκτη, η απόσβεση θεωρείται σταθερή και αντιστοιχεί στη μέση απώλεια διάδοσης. Το λαμβανόμενο, όμως, σήμα δεν μπορεί να περιγραφεί αποκλειστικά και ντετερμινιστικά μόνο από αυτήν την απόσταση. Οι απώλειες διάδοσης προκαλούν μεταβολές της ισχύος και αφορούν μεγάλες αποστάσεις, άνω των 100 m και μέχρι μερικές χιλιάδες km.

Το φαινόμενο της σκίασης προκαλείται από την ύπαρξη σκεδαστών που προκαλούν φαινόμενα, όπως απορρόφηση, ανάκλαση, περίθλαση και σκέδαση των ραδιοκυμάτων, στην ευθεία που συνδέει τον πομπό με το δέκτη. Μαζί με τη χωρικά μεταβαλλόμενη πολυδιαδρομική διάδοση, είναι οι κύριες αιτίες για την εμφάνιση του φαινομένου των διαλείψεων μικρής και μεγάλης κλίμακας, δηλαδή της μεταβολής του πλάτους ή της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος σε σχέση με τη μικρή ή τη μεγάλη μετατόπιση του δέκτη. Ανάλογα με την ένταση των φαινομένων, παρατηρούνται απλά τυχαίες μεταβολές στο πλάτος, δηλαδή επίπεδες διαλείψεις και διασυμβολική παρεμβολή ή διαλείψεις επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα. Οι μεταβολές λόγω σκίασης αφορούν αποστάσεις της τάξεως των διαστάσεων των σκεδαστών που συναντώνται κατά τη διάδοση ραδιοκυμάτων (10-100 m).

Οι ανωτέρω παράγοντες μεταβάλλουν την ισχύ λήψης κατά μήκος μεγάλων αποστάσεων και για το λόγο αυτό ονομάζονται απώλειες διάδοσης μεγάλης κλίμακας, σε αντιδιαστολή με τις διαλείψεις, δηλαδή τις ταχείες μεταβολές της ισχύος λήψης κατά μήκος των μικρών αποστάσεων ή κατά τη διάρκεια σύντομων χρονικών περιόδων, που ονομάζονται απώλειες διάδοσης μικρής κλίμακας.

4.2.1 Απώλειες ελευθέρου χώρου

Οι τιμές των απωλειών διάδοσης, δηλαδή του λόγου ισχύος λήψης προς ισχύ εκπομπής, εκφράζονται σε dB με στόχο να συμπιεσθεί το μεγάλο εύρος του διαστήματος εντός του οποίου κυμαίνονται οι απώλειες διάδοσης στις οποίες υπόκεινται οι διάφορες κατηγορίες των διαύλων. Όταν γίνεται αναφορά σε απώλειες διάδοσης υπονοείται αρνητικό πρόσημο ενώ η αναφορά σε απόσβεση υπονοεί θετικό πρόσημο στην κλίμακα dB. Στην περίπτωση αυτή, οι απώλειες διάδοσης προστίθενται στο κέρδος του συστήματος, ενώ στη δεύτερη αφαιρούνται από αυτό. Η κλίμακα dB βρίσκει εφαρμογή και στα απόλυτα μεγέθη ισχύος, όπως το μέγεθος $EIRP=P*G$, το γινόμενο ισχύος επί το κέρδος της κεραίας, που μετράται σε dBW, έχοντας ως μέγεθος αναφοράς ισχύος το 1 W. Όταν ισχύς αναφοράς είναι το 1 mW, οι ισχύεις εκφράζονται σε dBm, οπότε $x \text{ dBW}=(x+30) \text{ dBm}$.

Για τις ασύρματες ζεύξεις οπτικής επαφής LOS, η σχέση που συνδέει ισχύ εκπομπής και λήψης περιγράφεται από την εξίσωση του Friis

$$L_{fs}=\frac{P_R}{P_T}=G_T G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 \quad (1)$$

σε dB γράφεται υπό τη μορφή

$$L_{fs}=-32.44+10\log G_T+10\log G_R-20\log f-20\log d \quad (2)$$

όπου f η συχνότητα σε MHz και d η απόσταση πομπού-δέκτη. Οι απώλειες ελευθέρου χώρου αυξάνουν ανάλογα με το τετράγωνο της απόστασης που διανύει το ραδιοκύμα. Ωστόσο, η πλειοψηφία των ασύρματων συστημάτων δεν ικανοποιεί το κριτήριο της καθαρότητας του 60% της ζώνης Fresnel, με αποτέλεσμα η απόσβεση να αποτελεί εκθετική συνάρτηση της απόστασης με εκθέτη απωλειών που υπερβαίνει την τιμή 2.

4.2.1.1 Γενικό μοντέλο απωλειών διάδοσης

Η γενική εξίσωση που χρησιμοποιείται είναι :

$$P_R = P_T K \left(\frac{d_o}{d}\right)^\gamma \quad (3)$$

Σε dB η απώλεια διάδοσης γράφεται

$$L(\text{dB})=10\log(P_R/P_T)=K(\text{dB})-10\gamma\log\left(\frac{d_o}{d}\right) \quad (4)$$

όπου K σταθερά που εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της κεραίας, d_o η απόσταση από την οποία αρχίζει η μακρινή περιοχή της κεραίας και γ ο εκθέτης απωλειών. Οι τιμές των παραμέτρων αυτών υπολογίζονται χρησιμοποιώντας κατάλληλο εμπειρικό ή αναλυτικό μοντέλο. Λόγω των διαφορετικών συνθηκών διάδοσης στην κοντινή περιοχή μιας κεραίας, η δεύτερη σχέση ισχύει μόνο για αποστάσεις $d > d_o$, όπου το d_o λαμβάνεται ίσο με 1-10 m προκειμένου περί διάδοσης σε εσωτερικούς χώρους και 10-100 m σε εξωτερικούς χώρους. Όσον αφορά την παράμετρο K , τίθεται ίση με την απόσβεση ελευθέρου χώρου σε απόσταση d_o

$$K(\text{dB})=20\log\left(\frac{\lambda}{4\pi d_0}\right) \quad (5)$$

Ο εκθέτης απωλειών γ προσδιορίζει τη σχέση μεταξύ της μέσης λαμβανόμενης ισχύος και της απόστασης. Η τιμή του γ εξαρτάται από το περιβάλλον διάδοσης. Οι τυπικές τιμές του, είναι :

Περιβάλλον διάδοσης	Εκθέτης απωλειών, γ
Ελεύθερος Χώρος	2
Αστικό Περιβάλλον	2.7-3.5
Suburban Περιβάλλον	3-5
Εσωτερικοί Χώροι (line of sight)	1.6-1.8
Shadowed Urban	4-6

Πίνακας 4.1. Ενδεικτικές Τιμές Εκθέτη Απωλειών γ

Παρατηρείται ότι, υπό ευνοϊκές συνθήκες διάδοσης σε εσωτερικούς χώρους, η τιμή του γ μπορεί να είναι χαμηλότερη από αυτή στον ελεύθερο χώρο, φαινόμενο που δεν εμφανίζεται σε εξωτερικούς χώρους. Ο εκθέτης απωλειών αυξάνεται με την αύξηση της συχνότητας λειτουργίας ενώ μειώνεται με την αύξηση του ύψους των εγκαταστάσεων.

Στο πείραμα λαμβάνεται υπόψη μόνο η προώθηση των δεδομένων στην κάτω ζεύξη, διαδικασία που δεν επηρεάζεται από τυχόν κίνηση στην άνω ζεύξη. Ο αναμεταδότης θεωρείται, στην προκειμένη περίπτωση, ότι απαιτεί να λάβει σήμα σε ισχύ 23 dBm και την ίδια τιμή απαιτεί και ο χρήστης στην άκρη της κυψέλης.

Κάθε σύνδεση χαρακτηρίζεται από το κέρδος σύνδεσης (link gain). Στην πραγματικότητα, η ισχύς δεν ενισχύεται κατά τη διαδρομή πομπού δέκτη. Αντίθετα, λόγω απωλειών διάδοσης και θορύβου το σήμα φτάνει εξασθενημένο στο δέκτη. Το κέρδος σύνδεσης δίνεται από τον τύπο

$$\rho_{ij}=k d_{ij}^{-\gamma} \quad (6)$$

Η σταθερά k εμπεριέχει τον υπολογισμό της φασματικής πυκνότητας ισχύος θορύβου.

4.2.2 Σκίαση

Οι διάφορες απώλειες διάδοσης υπόκεινται σε τυχαία μεταβολή λόγω της παρεμπόδισής τους από τα εμπόδια κατά μήκος της διαδρομής μετάδοσης, αυξομειώσεις οι οποίες, ενδεχομένως, προκαλούνται από μεταβολές που οφείλονται στο περιβάλλον διάδοσης και στους σκεδαστές που παρεμβάλλονται. Επειδή η θέση, το μέγεθος και οι διηλεκτρικές ιδιότητες των εμποδίων καθώς και οι μεταβολές των επιφανειών ανάκλασης και της θέσης των σκεδαστών είναι γενικά άγνωστες, η συνολική απώλεια διάδοσης αποτελεί τυχαία μεταβλητή. Για τη στατιστική περιγραφή του μηχανισμού αυτού απωλειών, γνωστού υπό τον όρο σκίαση, έχει επιβεβαιωθεί πειραματικά σε ασύρματα δίκτυα εσωτερικού και εξωτερικού χώρου ότι ισχύει η λογαριθμοκανονική κατανομή.

Σύμφωνα με το λογαριθμοκανονικό μοντέλο, ο λόγος ισχύος εκπομπής προς ισχύ λήψης είναι τυχαία μεταβλητή και περιγράφεται με συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας.

Η μέση τιμή υπολογίζεται είτε από μετρήσεις είτε από εφαρμογή κατάλληλου εμπειρικού μοντέλου και ισούται με την απώλεια ζεύξης, δεδομένου ότι η απόσβεση λόγω σκίασης ενσωματώνεται στις μετρήσεις.

Συνήθεις τιμές της τυπικής απόκλισης σε ασύρματα συστήματα εξωτερικού χώρου κυμαίνονται από 4 έως 13 dB, ενώ η αντίστοιχη μέση απόσβεση εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος διάδοσης και μεταβάλλεται με την απόσταση.

4.2.3 Διαλείψεις

Οι διαλείψεις αποτελούν τις τυχαίες μεταβολές που παρατηρούνται στο πλάτος, τη φάση και τη συχνότητα του σήματος σε μικρές αποστάσεις ή σε μικρά χρονικά διαστήματα, γι' αυτό και χαρακτηρίζονται ως απώλειες διάδοσης μικρής κλίμακας.

Τα αίτια που προκαλούν τις διαλείψεις εξαρτώνται από τη συχνότητα λειτουργίας, το περιβάλλον διάδοσης των Η/Μ κυμάτων και τα χαρακτηριστικά των σημάτων. Οι κυριότεροι φυσικοί μηχανισμοί που συνδέονται με το φαινόμενο των διαλείψεων σε ασύρματους διαύλους είναι οι ακόλουθοι:

- Πολυδιαδρομική Διάδοση: Η παρουσία σκεδαστών στο περιβάλλον διάδοσης δημιουργεί πολλαπλούς διαύλους μετάδοσης του σήματος προς το δέκτη. Στο τελικό σημείο λήψης το αρχικό σήμα ανασυντίθεται από τις πολυδιαδρομικές συνιστώσες που φτάνουν σε διαφορετικό χρόνο με διαφορές σε πλάτος και φάση, προκαλώντας διαλείψεις.
- Κινητικότητα Τερματικών και Σκεδαστών: Η σχετική θέση σταθμού βάσης και δέκτη προκαλεί χρονική μεταβολή της φέρουσας συχνότητας λόγω φαινομένου Doppler. Οι διάφορες πολυδιαδρομικές συνιστώσες εμφανίζουν θετική ή αρνητική μετατόπιση συχνότητας Doppler, εάν πλησιάζει ή απομακρύνεται ο δέκτης, αντίστοιχα. Ωστόσο, διαλείψεις προκαλούνται και από τη σχετική κίνηση των σκεδαστών, όπως ανθρώπινη κίνηση στο εσωτερικό κτιρίων ή κίνησης οχημάτων σε δίκτυα εξωτερικού χώρου. Λόγω των κινούμενων οντοτήτων, οι πολυδιαδρομικές συνιστώσες υφίστανται μετατοπίσεις Doppler που μεταβάλλονται χρονικά κατά τυχαίο τρόπο.

Άλλοι παράμετροι των διαλείψεων είναι:

- Μετατόπιση Doppler: Το φαινόμενο εμφανίζεται όταν πομπός και δέκτης βρίσκονται σε σχετική κίνηση μεταξύ τους, με αποτέλεσμα η συχνότητα του λαμβανόμενου σήματος να διαφέρει από αυτή του εκπεμπόμενου.

Η διαφορά μήκους των διαδρομών από την πηγή μέχρι τα ακραία σημεία X και Y είναι

$$\Delta l = d \cdot \cos\theta = v \cdot \Delta t \cdot \cos\theta \quad (6)$$

ενώ η μεταβολή της φάσης του σήματος λήψης

$$\Delta\phi=2\pi*\Delta l/\lambda=2\pi*u*\Delta t*\cos\theta/\lambda \quad (7)$$

Η μεταβολή της φέρουσας συχνότητας, γνωστή ως μετατόπιση Doppler, δίδεται από την ακόλουθη σχέση

$$f_d=\theta*\cos\theta/\lambda \quad (8)$$

Όταν το απομακρυσμένο τερματικό συγκλίνει προς τη διεύθυνση άφιξης του κύματος, η μετατόπιση Doppler είναι θετική, δηλαδή η φέρουσα συχνότητα αυξάνεται. Στην αντίθετη περίπτωση, η μετατόπιση Doppler είναι αρνητική, μειώνοντας τη φέρουσα συχνότητα. Στην πολυδιαδρομική διάδοση, λόγω του φαινομένου Doppler προκαλείται φασματική διασπορά, που προκαλεί φασματική διεύρυνση του σήματος στο πεδίο της συχνότητας.

- Διασπορά καθυστέρησης (delay spread): Προκαλείται όταν το σήμα φτάνει σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, μέσω πολλαπλών διαδρομών, με διαφορετικές γωνίες άφιξης στο δέκτη. Η διαφορά χρόνου μεταξύ της άφιξης της γρηγορότερης και της αργότερης διαδρομής ονομάζεται διασπορά καθυστέρησης.

Εάν d_0 η απόσταση της συντομότερης διαδρομής και d_1+d_2 της μακρύτερης διαδρομής, η διασπορά καθυστέρησης δίνεται από τον τύπο

$$\tau=\frac{d_1+d_2-d_0}{c} \quad (9)$$

- Εύρος ζώνης συνοχής: Αποτελεί την παράμετρο που χαρακτηρίζει τη διασπορά ενός διαύλου στο πεδίο της συχνότητας και είναι μέγεθος αντιστρόφως ανάλογο προς τη διασπορά καθυστέρησης. Παρέχει ένα στατιστικό μέτρο του εύρους ζώνης συχνοτήτων για το οποίο ο διάυλος μπορεί να θεωρηθεί φασματικά επίπεδος, δηλαδή του εύρους όπου η φασματική περιγραφή της συμπεριφοράς του διαύλου είναι σταθερή κατά πλάτος και φάση. Πρακτικά, το εύρος ζώνης συνοχής ορίζεται ως το εύρος συχνοτήτων εντός του οποίου δύο διαφορετικές φασματικές συνιστώσες είναι ισχυρά συσχετισμένες κατά πλάτος. Εάν η απόστασή τους υπερβαίνει την τιμή του εύρους ζώνης τυγχάνουν διαφορετικής αντιμετώπισης από το διάυλο κατά τη διάδοσή τους.
- Χρόνος συνοχής: Εξαιτίας της κίνησης των τερματικών και των σκεδαστών στο περιβάλλον διάδοσης, το επίπεδο του λαμβανόμενου σήματος αυξομειώνεται. Στην πράξη, ο χρόνος συνοχής αποτελεί στατιστικό μέτρο της χρονικής διάρκειας για την οποία η κρουστική απόκριση ενός διαύλου θεωρείται σταθερή ή αμετάβλητη, δηλαδή της χρονικής διάρκειας για την οποία δύο σήματα λήψης είναι ισχυρά συσχετισμένα κατά πλάτος. Όταν το αντίστροφο του εύρους ζώνης του σήματος σταθερής ζώνης υπερβαίνει σημαντικά το χρόνο συνοχής του διαύλου, ο διάυλος μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της μετάδοσης του σήματος, προκαλώντας παραμόρφωση. Δύο σήματα που λαμβάνονται με χρονική απόσταση που υπερβαίνει το χρόνο συνοχής επηρεάζονται διαφορετικά από έναν διάυλο.

4.2.3.1 Διαλείψεις επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα

Οι επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα διαλείψεις κατά τη διάδοση των σημάτων αποτελούν φαινόμενο που οφείλεται σε μερική κατάργηση ενός RF σήματος της διάδοσης - το σήμα φθάνει στο δέκτη από δύο διαφορετικά μονοπάτια και τουλάχιστον μία από τις διαδρομές αλλάζει, επιμηκύνεται ή μειώνεται-.

Δεδομένου ότι η φέρουσα συχνότητα ενός σήματος μεταβάλλεται, το μέγεθος της μεταβολής του πλάτους ποικίλλει. Το εύρος ζώνης συνοχής μετρά το εύρος συχνότητας, η υπέρβαση του οποίου προκαλεί τη διαφορετική αντιμετώπιση των δύο σημάτων από το δίαυλο.

- Στις επίπεδες διαλείψεις (flat fading) το εύρος ζώνης συνοχής του καναλιού είναι μεγαλύτερο από το εύρος ζώνης του σήματος. Συνεπώς, όλες οι συνιστώσες συχνότητας του σήματος διατηρούν τα φασματικά χαρακτηριστικά τους αναλλοίωτα.
- Σε διαλείψεις επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα, το εύρος ζώνης συνοχής του καναλιού είναι μικρότερο από το εύρος ζώνης του σήματος. Συνιστώσες του σήματος με διαφορετικές συχνότητες υφίστανται διαφορετική μεταχείριση κατά τη μετάδοσή τους μέσω διαύλων, οι οποίοι συχνά αναφέρονται ως επιλεκτικοί. Στο πεδίο του χρόνου, ο δίαυλος εμφανίζει διασπορά καθυστέρησης που υπερβαίνει τη διάρκεια συμβόλου, με αποτέλεσμα το σήμα λήψης να προκύπτει ως υπέρθεση πολλαπλών εκδοχών του εκπεμπόμενου σήματος. Οι διαφορετικές αποσβέσεις και χρονικές καθυστερήσεις των συνιστωσών του σήματος οδηγούν σε παραμόρφωση. Οι επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα διαλείψεις οδηγούν σε διασπορά των μεταδιδόμενων συμβόλων, προκαλώντας διασυμβολική παρεμβολή (intersymbol interference, ISI).

Δεδομένου ότι οι διαφορετικές συνιστώσες του σήματος επηρεάζονται ανεξάρτητα, είναι εξαιρετικά απίθανο όλα τα μέρη του σήματος να επηρεαστούν ταυτόχρονα από ισχυρές διαλείψεις (deep fade). Ορισμένα συστήματα διαμόρφωσης, όπως τα OFDM και CDMA, εφαρμόζουν διαφορισμό σε επίπεδο συχνότητας ώστε να παρέχουν ανθεκτικότητα στις διαλείψεις. Ειδικά για την τεχνική OFDM, ο χωρισμός του σήματος ευρείας ζώνης γίνεται σε επιμέρους σήματα στενού εύρους ζώνης αργά διαμορφωμένα, τα οποία υπόκεινται σε επίπεδες και όχι σε επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα διαλείψεις. Η διασυμβολική παρεμβολή αποφεύγεται με την εισαγωγή ενός διαστήματος προστασίας (guard interval) μεταξύ των συμβόλων.

Τα σήματα ηχούς μπορεί επίσης να εκτεθούν σε μετατόπιση Doppler, δημιουργώντας ένα κανάλι μεταβαλλόμενο στο χρόνο. Το φαινόμενο μπορεί να αντιμετωπισθεί με την εφαρμογή κάποιου συστήματος διαφορισμού, για παράδειγμα OFDM με διεμπλοκή υποφέροντος (interleaving) και προς τα εμπρός διόρθωση λάθους (forward error correction), με τη χρήση δύο δεκτών με χωριστές κεραιές που απέχουν $\lambda/4$, ή με ένα ειδικά σχεδιασμένο δέκτη διαφορισμού με δύο κεραιές. Ένας τέτοιος δέκτης συγκρίνει συνεχώς τα σήματα που φθάνουν στα δύο κεραιές και επιλέγει το καλύτερο σήμα.

Συμπερασματικά, η μέση απώλεια διάδοσης αποτελεί ντετερμινιστικό μέγεθος που, εφόσον δε μεταβάλλονται τα χαρακτηριστικά μιας ζεύξης, υπολογίζεται μία φορά, η σκίαση περιγράφει την τυχαία μεταβολή αυτής της μέσης απώλειας διάδοσης και οι διαλείψεις εμφανίζουν τυχαιότητα που οφείλεται σε πλήθος παραγόντων. Και τα τρία είδη εξασθένισης της ισχύος λήψης λαμβάνονται υπόψη κατά τον ισολογισμό ισχύος (link budget) μια ζεύξης, με σκοπό να προσδιοριστούν τα χαρακτηριστικά λειτουργίας.

4.3 PATHLOSS

Ο όρος pathloss αναφέρεται στις απώλειες ισχύος ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος κατά τη διάδοσή του στο χώρο. Οφείλεται σε φαινόμενα, όπως

- απώλειες ελευθέρου χώρου ή αλλιώς απώλειες διάδοσης, που δηλώνουν την εξασθένηση του σήματος κατά τη διάδοσή του
- διάθλαση
- ανάκλαση
- περίθλαση, όταν μέρος του ηλεκτρομαγνητικού κύματος παρεμποδίζεται από αδιαφανές εμπόδιο
- απορρόφηση, που οφείλεται στη διέλευση του σήματος από μέσο μη ορατό

ενώ επηρεάζεται και από παραμέτρους, όπως το περιβάλλον διάδοσης (αστικό, εσωτερικού χώρου), οι ιδιότητες του μέσου διάδοσης (υγρασία, ξηρότητα αέρα για ασύρματες επικοινωνίες) καθώς και η απόσταση πομπού και δέκτη. Λόγω των φαινομένων αυτών, το εκπεμπόμενο σήμα διαχωρίζεται στους παρεμβαλλόμενους σκεδαστές και φτάνει στο δέκτη από διαφορετικές διαδρομές (multipath) παραμορφωμένο, ανάλογα με την ένταση και το σχετικό χρόνο διάδοσης των κυμάτων, καθώς και από το εύρος ζώνης του μεταδιδόμενου κύματος.

Ένα μέρος του εκπεμπόμενου σήματος φτάνει απευθείας στο δέκτη (LOS), ενώ το υπόλοιπο καταλήγει στον τελικό προορισμό μετά από ανακλάσεις και σκεδάσεις στην ατμόσφαιρα ή σε υλικά αντικείμενα (NLOS). Σε κάθε περίπτωση διάδοσης, λαμβάνονται υπόψη και οι δύο περιπτώσεις και εξετάζονται ξεχωριστά.

Ανάλογα με τις ανάγκες και τις απαιτήσεις των ερευνητών έχει αναπτυχθεί πληθώρα μοντέλων τόσο ποιοτικών όσο και ποσοτικών, που αποσκοπούν όχι μόνο στη γενικότερη κατανόηση του φαινομένου της διάδοσης στο ραδιοδιάλυο, αλλά και στην εξαγωγή κανόνων που δίνουν την εξάρτηση των μεταβολών του σήματος από πλήθος παραμέτρων, όπως η συχνότητα, το περιβάλλον, ο τύπος των κεραιών, η κίνηση, η ταχύτητα των δεκτών ή το εύρος ζώνης του εκπεμπόμενου σήματος.

- Τα εμπειρικά μοντέλα προτείνουν απλές σχέσεις που προκύπτουν από στατιστική επεξεργασία πειραματικών δεδομένων. Έχουν ειδική εφαρμογή για συγκεκριμένο εύρος των παραμέτρων τους.
- Τα στατιστικά μοντέλα βασίζονται σε συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας, όπως Rayleigh, Rician και Lognormal.
- Τα αναλυτικά μοντέλα βασίζονται στη φυσική θεώρηση των μηχανισμών διάδοσης και περιγράφουν με μαθηματικό τρόπο τις υποκείμενες διαδικασίες. Χρησιμοποιούν τα πειραματικά δεδομένα για την επιβεβαίωση της εγκυρότητάς τους.

Ειδικά, για το περιβάλλον διάδοσης έχουν διαμορφωθεί διάφορα σενάρια που περιλαμβάνουν διαφορετικές μεταβλητές περιβάλλοντος.

4.3.1 Σενάρια καθορισμού περιβάλλοντος

- a) *A1-Indoor Office*: Οι σταθμοί βάσης βρίσκονται στους διαδρόμους και ορίζονται δυο περιπτώσεις. Μια όταν το τερματικό είναι στο διάδρομο, όπου εμπίπτει στην κατηγορία LOS και η άλλη όταν το τερματικό βρίσκεται σε δωμάτιο, περίπτωση NLOS. Για μεγάλη απόσταση πομπού δέκτη, λαμβάνονται υπόψη και οι απώλειες τοίχου, ενώ για περιπτώσεις όπου ένας από τους δύο βρίσκεται σε διαφορετικό όροφο υπολογίζονται και οι αντίστοιχες απώλειες.
- b) *A2- Indoor to Outdoor*: Περιλαμβάνει σενάριο indoor to outdoor, με τερματικό εκτός κτιρίου και πομπό εντός αυτού.
- c) *B1- Urban Micro-cell*: Αφορά αστικό περιβάλλον τύπου Manhattan σε δίκτυο με μικρές κυψέλες, τα όρια των οποίων καθορίζονται από τα γύρω κτίρια. Το ύψος των κεραιών δεν υπερβαίνει το ύψος των κτιρίων, ενώ, τόσο ο σταθμός βάσης όσο και το τερματικό βρίσκονται εκτός κτιρίου. Στο σενάριο εισάγεται ο όρος «κύριος δρόμος» που αφορά όλους τους δρόμους που βρίσκονται στην περιοχή κάλυψης της κεραίας. Όσοι UE βρίσκονται εντός εμβέλειας εμπίπτουν στην περίπτωση LOS εκτός και αν υπάρχει παρεμπόδιση λόγω κίνησης.
- d) *B2- Bad Urban Micro-cell*: Εισάγει τη χειρότερη περίπτωση αστικού περιβάλλοντος, καθώς ένα μέρος της ενέργειας του σήματος που μεταφέρεται από διαφορετικές διαδρομές ενδέχεται να χαθεί ή να φτάσει με μεγάλο χρόνο καθυστέρησης, αλλοιώνοντας το τελικό σήμα. Ένα αντίστοιχο περιβάλλον περιέχει ανοιχτές περιοχές, όπως πάρκα και επιφάνειες νερού.
- e) *B3- Indoor Hotspot*: Περιγράφει την περίπτωση κλειστού αλλά μεγάλου χώρου με αυξημένη κινητικότητα. Στο χώρο υπάρχει ένα σημείο εκπομπής με μεγάλη αλλά όχι πλήρη παροχή κάλυψης, με μικρή κινητικότητα ενώ, παράλληλα, οι δέκτες κινούνται συνεχώς και ενδέχεται να έχουν αρκετή απόσταση είτε μεταξύ τους είτε από το hotspot.
- f) *B4- Outdoor to Indoor*: Επεκτείνει το σενάριο B1, τοποθετώντας την κεραία σε ύψος μεγαλύτερο από το ύψος του τερματικού και διαμορφωμένο ανάλογα και με το ύψος των κτιρίων. Συμπληρωματικά, στο σενάριο, υπάρχει αυξημένη πυκνότητα χρηστών, γεγονός που αυξάνει τις απαιτήσεις σε φασματική απόδοση και ρυθμό μετάδοσης.
- g) *B5- Stationary Feeders*: Στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιούνται αναμεταδότες για τη διάδοση του σήματος στον τελικό αποδέκτη. Τα τερματικά καταλαμβάνουν συγκεκριμένες θέσεις και το δίκτυο είναι μικρο-κυψελωτό. Οι σκεδαστές που επιδρούν στη διάδοση σχηματίζουν ομάδα (cluster) και θεωρείται ότι ένας από αυτούς κινείται, ενώ οι υπόλοιποι παραμένουν σταθεροί. Στους σκεδαστές οφείλεται το φαινόμενο Doppler που εμφανίζεται στη διάδοση, φαινόμενο που διαμορφώνει περαιτέρω τη φάση των επιμέρους σημάτων που καταλήγουν στο δέκτη. Η κατηγορία αυτή χωρίζεται σε υποπεριπτώσεις. Στην πρώτη κατηγορία το σήμα ανακλάται σε μία μοναδική επιφάνεια και η διάδοση μπορεί να θεωρηθεί εφάμιλλη της διάδοσης ελευθέρου χώρου, χωρίς να εξαρτάται από τα ύψη των κεραιών. Επιπλέον, τα μεγέθη των γωνιών, της καθυστέρησης που εισάγεται και του XPR είναι σταθερά. Στη δεύτερη κατηγορία, παρόλο που τα clusters είναι αρκετά σε αριθμό, η τελική τους επίδραση είναι αμελητέα. Σε αντίθεση με την προηγούμενη περίπτωση, η καθυστέρηση δεν είναι προκαθορισμένη, αλλά ανάλογα με το μέγεθος της απώλειας λαμβάνει συγκεκριμένη τιμή. Για το λόγο αυτό υπάρχουν και τρία διαφορετικά σενάρια. Οι περιπτώσεις B5c και B5d είναι ίδιες με τις B1 και C1 αντίστοιχα, όμως εισάγεται η παράμετρος του φαινομένου Doppler. Η πρώτη χρησιμοποιείται ως το κυρίαρχο σενάριο που περιλαμβάνει αναμετάδοση, με τη διαφορά της ύπαρξης κεραίας αναμετάδοσης και την εισαγωγή της συχνότητας

Doppler, η οποία όμως είναι σταθερή. Επίσης, ορισμένα clusters παραμένουν σταθερά ενώ άλλα θεωρούνται κινούμενα. Στην τελευταία κατηγορία, οι αναμεταδότες βρίσκονται είτε στο ύψος της οροφής του κτιρίου είτε μερικά μέτρα πιο κάτω και εισάγουν παρεμβολές στις συνδέσεις με τα τερματικά.

- h) *C1- Suburban macro-cell*: Περιγράφει περιβάλλον με τις κεραίες των σταθμών βάσης στις οροφές κτιρίων για να παρέχουν ευρεία κάλυψη, ενώ τα τερματικά βρίσκονται στο επίπεδο του δρόμου. Επίσης, το ύψος των κτιρίων είναι χαμηλό και υπάρχουν αρκετές ανοιχτές περιοχές.
- i) *C2- Urban macro-cell*: Αποτελεί ομογενές περιβάλλον με σταθερό σταθμό βάσης πιο πάνω από το επίπεδο των κτιρίων και κινητούς τερματικούς σταθμούς στο επίπεδο του δρόμου. Τα κτίρια δεν έχουν μεγάλο ύψος, για αυτό και εισάγεται μόνο η περίπτωση LOS αφού υπάρχει άμεση επαφή πομπού- δέκτη.
- j) *C3- Bad urban*: Εισάγει ένα περιβάλλον πόλης με ανομοιογένειες λόγω του μη σταθερού ύψους των κτιρίων, των μεγάλων υδάτινων επιφανειών και τις ολοένα αυξανόμενες οικοδομήσιμες περιοχές, που επιδρά στις καθυστερήσεις και στην κατεύθυνση των σημάτων. Επιπρόσθετα, εισάγεται και η επίδραση ενός μεγάλου cluster μακριά από την περιοχή.
- k) *C4- Macro-cell Outdoor to indoor*: Αποτελεί συνένωση των περιπτώσεων A1 για indoor και C2 για outdoor. Ο σταθμός βάσης είναι πάνω από το ύψος των κτιρίων και για το λόγο αυτό η προσέγγιση περιοχών κοντά στο έδαφος προκαλεί στη διάδοση προβλήματα λόγω σκίασης.
- l) *D1- Rural macro-cell*: Περιγράφει διάδοση σε αραιοκατοικημένη περιοχή, με την κεραία του σταθμού βάσης σε μεγαλύτερο ύψος από το μέσο ύψος των κτιρίων, συνθήκες που επιτρέπουν LOS διάδοση σε κάθε τερματικό. Στον υπολογισμό απωλειών προστίθεται μία επιπλέον παράμετρος στην περίπτωση που ο χρήστης βρίσκεται στο εσωτερικό κτιρίου ή κινούμενου οχήματος.
- m) *D2- Moving Networks* : Αποτελεί σενάριο κινούμενου δικτύου τόσο από πλευράς πομπού όσο και από πλευράς δέκτη. Χαρακτηριστικό παράδειγμα η χρήση ασύρματου τηλεπικοινωνιακού δικτύου των τρένων, η τροφοδότηση με σήμα των οποίων γίνεται με τη βοήθεια κινούμενων αναμεταδοτών. Στην πρώτη κατηγορία, οι σταθμοί βάσης βρίσκονται 50 m μακριά από την αποβάθρα με ύψος κεραίας 30 m ή 2 m μακριά με ύψος κεραίας 5 m, το ύψος του τρένου είναι 2,5 m και η ταχύτητα 350 km/h. Δεν προβλέπονται τούνελ στη διαδρομή αλλά ακόμα και η περίπτωση αυτή μπορεί να προσομοιωθεί με τη χρήση κεραίας χαμηλού ύψους. Η δεύτερη περίπτωση, περιλαμβάνει σενάριο εντός του τρένου. Το εσωτερικό του αποτελείται από δύο πατώματα και περιέχει πολλά αντικείμενα δημιουργώντας περίπτωση NLOS μετάδοσης. Επίσης, τα παράθυρα είναι με θερμομονωτικό γυαλί που προκαλεί περαιτέρω εξασθένηση στο σήμα.

Ανάλογα, με το σενάριο διαμορφώνεται κατάλληλα και ο τύπος υπολογισμού των απωλειών. Σύμφωνα με το μοντέλο WINNER-II η γενική εξίσωση για τον υπολογισμό των απωλειών στα διάφορα σενάρια δίνεται από τους τύπους

$$PL=A*\log_{10}(d[m])+B+C*\log_{10}\left(\frac{f_c[GHz]}{5}\right)+X \quad (10)$$

$$PL_{free}=20*\log_{10}(d[m]) +46.4+20*\log_{10}\left(\frac{f_c[GHz]}{5}\right) \quad (11)$$

όπου d η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη σε m, f_c η συχνότητα φέροντος σε GHz, A ο εκθέτης απωλειών, B intercept και C η παράμετρος εξαρτώμενη από τη συχνότητα. Η παράμετρος X αντιπροσωπεύει μια ειδική μεταβλητή που εξαρτάται από εμπόδια που συναντάει το σήμα κατά τη μετάδοσή του, όπως οι απώλειες λόγω ανάκλασης σε τοίχο. Το PL_{free} αποτελεί τις απώλειες ελευθέρου χώρου σε περιβάλλον με σύνδεση LOS, με τις μεταβλητές $A=20$, $B=46.4$ και $C=20$. Στη συνέχεια, παρατίθεται πίνακας με τις τιμές των ανωτέρω παραμέτρων για κάθε σενάριο, καθώς και τις τιμές του παράγοντα σκίασης και τις αποδεκτές τιμές ύψους κεραιών και ακτίνα κυψέλης.

Scenario	Los/NLos	Path loss [dB]	Shadow fading std [dB]	Applicability range, antenna height default values
A1	LOS	$A = 18.7, B = 46.8, C = 20$	$\sigma = 3$	$3m < d < 100m$, $h_{BS} = h_{MS} = 1... 2.5m$
	NLOS	$A = 36.8, B = 43.8, C = 20$ and $X = 5(nw - 1)$ (light walls) or $X = 12(nw - 1)$ (heavy walls)	$\sigma = 4$	same as A1 LOS, nw is the number of walls between the BS and the MS ($nw > 0$ for NLOS)
	NLOS	light walls: $A = 20, B = 46.4, C = 20, X = 5nw$	$\sigma = 6$	same as A1 LOS, nw is the number of walls between BS and MS
		heavy walls: $A = 20, B = 46.4, C = 20, X = 12nw$	$\sigma = 8$	
FL	For any of the cases above, add the floor loss (FL), if the BS and MS are in different floors: $FL = 17 + 4(nf - 1), nf > 0$		nf is the number of floors between the BS and the MS ($nf > 0$)	
A2	NLOS	$PL = PL_b + PL_{tw} + PL_{in}$ $\begin{cases} PL_b = PL_{B1}(d_{out} + d_{in}) \\ PL_{tw} = 14 + 15(1 - \cos(\theta))^2 \\ PL_{in} = 0.5d_{in} \end{cases}$	$\sigma = 7$	$3m < d_{out} + d_{in} < 1000m$, $h_{BS} = 3(nf - 1) + 2m$ $h_{MS} = 1.5$,
B1	LOS	$A = 22.7, B = 41.0, C = 20$ $PL = 40 \log(d_1) + 9.45 - 17.3 \log_{10}(h_{BS}') - 17.3 \log_{10}(h_{MS}') + 2.7 \log_{10}(\frac{f_c}{5})$	$\sigma = 3$	$10m < d_1 < d'BP$ $d'BP < d_1 < 5km$ $h_{BS} = 10m$, $h_{MS} = 1.5m$
	NLOS	$PL = \min(PL(d_1, d_2), PL(d_2, d_1))$ $PL(d_k, d_l) = PL_{LOS}(d_k) + 20 - 10n_f \log_{10}(d_l) + 3 \log_{10}(f_c/5)$ $n_f = \max(2.8 - 0.0024d_k, 1.84)$	$\sigma = 4$	$10m < d_1 < 5km$, $w/2 < d_2 < 2km$ $w = 20m$ (street width)

				$h_{BS}=10\text{m}$, $h_{MS}=1.5\text{m}$ When $0 < d < w/2$, the LOS PL is applied.
B2	NLOS	Same as B1.	$\sigma=4$	
B3	LOS	$A=13.9, B=64.4, C=20$	$\sigma=3$	$5\text{m} < d < 100\text{m}$, $h_{BS} B3=6\text{m}$, $h_{MS}=1.5\text{m}$
	NLOS	$A=37.8, B=36.5, C=23$	$\sigma=4$	Same as B3 LOS
B4	NLOS	Same as A2, except antenna heights		$3\text{m} < d_{out} + d_{in} < 1000\text{m}$, $h_{BS}=10\text{m}$, $h_{MS}=3(nFl-1)+1.5\text{m}$
B5a	LOS	$A=23.5, B=42.5, C=20$	$\sigma=4$	$30\text{m} < d < 8\text{km}$ $h_{BS}=25\text{m}$, $h_{RS}=25\text{m}$
B5c	LOS	Same as B1 LOS, except antenna heights (h_{RS} is the relay antenna height).	$\sigma=3$	$10\text{m} < d < 2000\text{m}$ $h_{BS}=10\text{m}$, $h_{MS}(=h_{RS})=5\text{m}$
B5f	NLOS	$A=23.5, B=57.5, C=23$	$\sigma=8$	$30\text{m} < d < 1.5\text{km}$ $h_{BS}=25\text{m}$, $h_{RS}=15\text{m}$
C1	LOS	$A=23.8, B=41.2, C=20$ $PL=40\log(d)+11.65-16.2\log_{10}(h_{BS})-16.2\log_{10}(h_{MS})+3.8\log_{10}(\frac{f_c}{5})$	$\sigma=4$ $\sigma=6$	$30\text{m} < d < d_{BP}$, $d_{BP} < d < 5\text{km}$, $h_{BS}=25\text{m}$, $h_{MS}=1.5\text{m}$
	NLOS	$PL=(44.9-6.55\log_{10}(h_{BS})\log_{10}(d) + 31.46+5.83\log_{10}(h_{BS})+6\log_{10}(\frac{f_c}{5}))$	$\sigma=8$	$50\text{m} < d < 5\text{km}$, $h_{BS}=25\text{m}$, $h_{MS}=1.5\text{m}$
C2	LOS	$A=26, B=39, C=20$ $PL=40\log(d_1)+13.47-14\log_{10}(h_{BS}')-14\log_{10}(h_{MS}')+6\log_{10}(\frac{f_c}{5})$	$\sigma=6$	$10\text{m} < d < d'_{BP}$ 4) $d'_{BP} < d < 5\text{km}$ C2 $h_{BS}=25\text{m}$, $h_{MS}=1.5\text{m}$
	NLOS	$PL=(44.9-6.55\log_{10}(h_{BS})\log_{10}(d) + 31.46+5.83\log_{10}(h_{BS})+6\log_{10}(\frac{f_c}{5}))$	$\sigma=8$	Same as C1 NLOS
C3	NLOS	Same as C2 NLOS		Same as C2 NLOS
C4	NLOS	$PL=PL_{C2}(d_{out} + d_{in})+17.4+0.5d_{in}-0.8h_{MS}$ where PL_{C2} is the path-loss function of C2 LOS/NLOS scenario. (Use LOS, if BS to wall connection is LOS, otherwise use NLOS)	$\sigma=10$	Same as C2 NLOS See 3) for explanation

				of parameters. $h_{BS}=25m$, $h_{MS}=3nFl$ $+1.5m$
D1	LOS	$A = 21.5, B = 44.2, C = 20$ $PL = 40 \log(d) + 10.5 - 18.5 \log_{10}(h_{BS}) - 18.5 \log_{10}(h_{MS}) + 1.5 \log_{10}(\frac{f_c}{5})$	$\sigma = 4$ $\sigma = 6$	$30m < d < d_{BP}, 6)$ $d_{BP} < d < 10km$, $h_{BS} = 32m$, $h_{MS} = 1.5m$
	NLOS	$PL = (25.1 \log_{10}(d) + 55.4 - 0.13 \log_{10}(h_{BS} - 25)) \log_{10}(d/100) - 0.9 \log_{10}(h_{MS} - 1.5) + 21.3 \log_{10}(\frac{f_c}{5})$	$\sigma = 8$	$50m < d < 5km$, $h_{BS} = 32m$, $h_{MS} = 1.5m$
D2a	LOS	Same as D1 LOS		

Πίνακας 4.2. Παράμετροι σεναρίων

5. LTE

Η είσοδος του διαδικτύου στις ασύρματες επικοινωνίες δημιούργησε την ανάγκη εξασφάλισης μεγαλύτερου ρυθμού μετάδοσης δεδομένων με μεγαλύτερη φασματική απόδοση και μικρότερη καθυστέρηση, εξασφαλίζοντας καλύτερη ποιότητα υπηρεσιών. Οι απαιτήσεις αυτές οδήγησαν στην εξέλιξη των συστημάτων τρίτης γενιάς σε συστήματα τέταρτης γενιάς, τα οποία οφείλουν να ανταποκρίνονται σε συγκεκριμένες προδιαγραφές, όπως αυτές έχουν ανακοινωθεί από την ITU-R.

Οι συγκεκριμένες προδιαγραφές περιλαμβάνουν :

- Χρήση του πρωτοκόλλου TCP/IP για τη μετάδοση των πακέτων
- Για δίκτυα επικοινωνιών ευρείας ζώνης, στα οποία συμπεριλαμβάνονται και τα κυψελωτά, ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης καθορίζεται σε 100 Mbit/s περίπου ενώ για τοπικά δίκτυα περίπου 1 Gbps.
- Δυναμικός τρόπος κατανομής και χρήσης των πόρων του δικτύου με σκοπό την ταυτόχρονη υποστήριξη περισσότερων χρηστών ανά κυψέλη
- Κάθε κανάλι έχει συγκεκριμένη τιμή εύρους ζώνης 5, 10, 15, 20, 25, 40 MHz.
- Η μέγιστη αποδοτικότητα φασματικής γραμμής ορίζεται στα 15 bit/s/Hz στην κάτω ζεύξη και 6,75 bit/s/Hz στην άνω ζεύξη.
- Αντίστοιχα, η μέγιστη αποδοτικότητα φάσματος του συστήματος ορίζεται στα 3 bit/s/Hz στην κάτω ζεύξη και 2.25 bit/s/Hz/cell εσωτερικά των κτιρίων.
- Δυνατότητα παροχής υπηρεσιών υψηλής ποιότητας για υποστήριξη των πολυμέσων επόμενης γενιάς.
- Ομαλά handover μεταξύ ετερογενών δικτύων.

Οι παραπάνω προδιαγραφές, σύμφωνα με τις μέχρι στιγμής εξελίξεις, ικανοποιούνται από τα πρότυπα LTE Advanced και το WirelessMAN-Advanced, γεγονός που έρχεται σε αντιδιαστολή με τους σημερινούς ισχυρισμούς των τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών, οι οποίες προβάλλουν προγενέστερα πρότυπα αυτών ως 4G τεχνολογίες (LTE).

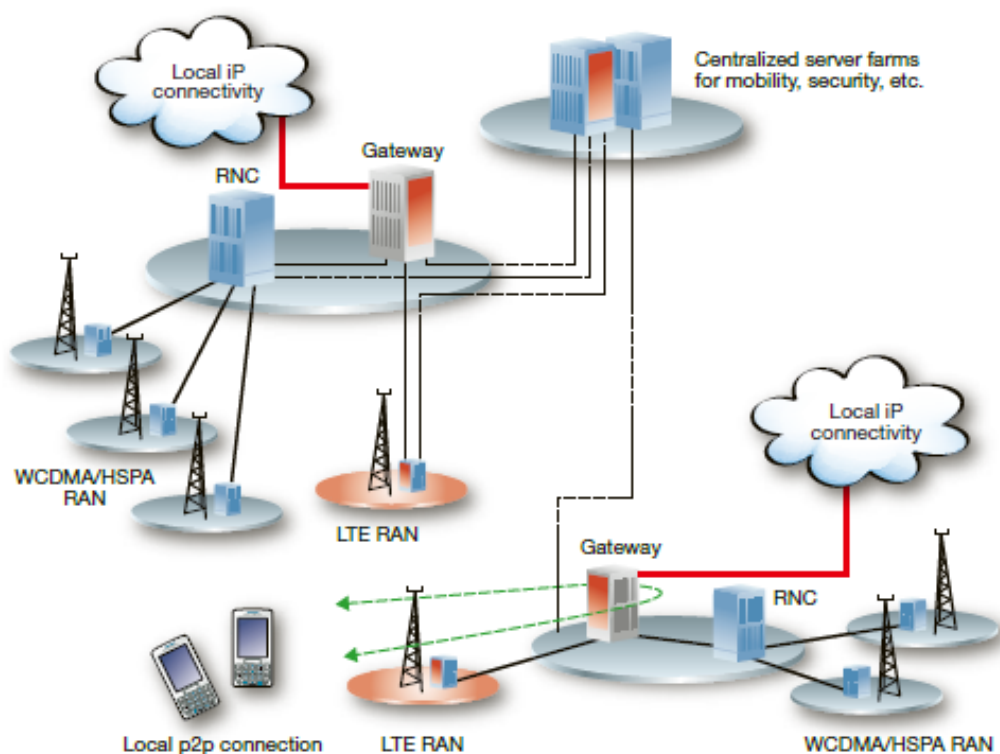
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ 3GPP LTE

Η τεχνολογία των LTE αποτελεί πρότυπο που δημιουργήθηκε από την 3GPP (Third-generation Partnership Project) και αποτελεί την εξέλιξη του προτύπου UMTS, το οποίο χρησιμοποιείται μέχρι σήμερα στα δίκτυα τρίτης γενιάς, οριοθετώντας τη μετάβαση στα δίκτυα τέταρτης γενιάς.

Η τηλεπικοινωνιακή βιομηχανία έχει δημιουργήσει πολλαπλά είδη δικτύων με σκοπό την παροχή διαφόρων ειδών υπηρεσιών όπως σταθερά τηλεφωνικά δίκτυα, κυψελωτά τηλεφωνικά δίκτυα και δίκτυα δεδομένων. Τα μελλοντικά δίκτυα θα χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερο βαθμό ετερογένειας ώστε να υποστηρίζουν τις αυξημένες απαιτήσεις των νέων εφαρμογών σε χαρακτηριστικά όπως διαφορετικά επίπεδα ισχύων μεταφοράς μεταξύ σταθμού βάσης και τερματικού, ενώ καλούνται να λειτουργούν σε περισσότερες ζώνες

συχνοτήτων, που παραχωρούνται για την εξυπηρέτηση των νέων υπηρεσιών, και σε διαφορετικά εύρη ζώνης, ανάλογα με τη διαθεσιμότητα κάθε στιγμή. Επιπλέον, αναπτύσσονται ώστε να παρέχουν περισσότερες επιλογές στη χρήση συστημάτων πολυπλεξίας δεδομένων.

Τα δίκτυα επόμενης γενιάς αναμένεται να παρέχουν τις υπηρεσίες τους βασίζοντας τη λειτουργία τους στο πρωτόκολλο IP, το οποίο μπορεί να διασυνδέει ετερογενή δίκτυα μεταξύ τους. Ο πυρήνας των δικτύων, καθώς φαίνεται στην εικόνα 5.1, παρέχει υψηλή ποιότητα υπηρεσιών σε πλήθος εφαρμογών, ενώ το σύστημα πρόσβασης που παρέχουν, καλύπτει την περίπτωση της κινητικότητας και προσφέρει δυνατότητες δρομολόγησης των πακέτων στον τελικό προορισμό εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα την εύκολη πρόσβαση στο δίκτυο, χαρακτηριστικό κάθε IP δικτύου. Ταυτόχρονα, εξασφαλίζει αξιόπιστη εναλλαγή μεταξύ των διαφορετικών τύπων πρόσβασης, εξασφαλίζοντας ασφάλεια, αυθεντικότητα (authentication) και billing.



Εικόνα 5.1. Τοπολογία δικτύου με χρήση του πρωτοκόλλου IP

Η ανάπτυξη του LTE στοχεύει στην εξασφάλιση υψηλής ταχύτητας μετάδοσης δεδομένων και εφαρμογών πολυμέσων, καθώς το μεγαλύτερο μέρος της τηλεπικοινωνιακής κίνησης αφορά υπηρεσίες δεδομένων, αλλά και στην καλύτερη υποστήριξη των υπηρεσιών φωνής. Ταυτόχρονα, εισάγει στη διαμόρφωση του φυσικού του στρώματος νέες για τα κυψελωτά δίκτυα τεχνικές, που ανταποκρίνονται στην ανάγκη για μετάδοση τόσο δεδομένων πληροφορίας όσο και δεδομένων ελέγχου της ορθής μετάδοσης από το σταθμό βάσης στο τερματικό. Σε αυτές περιλαμβάνονται η τεχνική ορθογωνίας διαμόρφωσης του σήματος

(OFDM), χρησιμοποιώντας OFDMA για διάδοση στην κάτω ζεύξη (downlink) και SC-FDMA στην άνω ζεύξη (uplink), καθώς και τα συστήματα MIMO (Multiple Input Multiple Output) στα οποία πομπός και δέκτης χρησιμοποιούν πολλαπλές κεραιές για να βελτιώσουν την επικοινωνία μεταξύ τους εξασφαλίζοντας στο δίαυλο πολλαπλές εισόδους και εξόδους.

Ο σχεδιασμός αυτός στοχεύει στην ανάπτυξη ασύρματων δικτύων τα οποία οφείλουν να

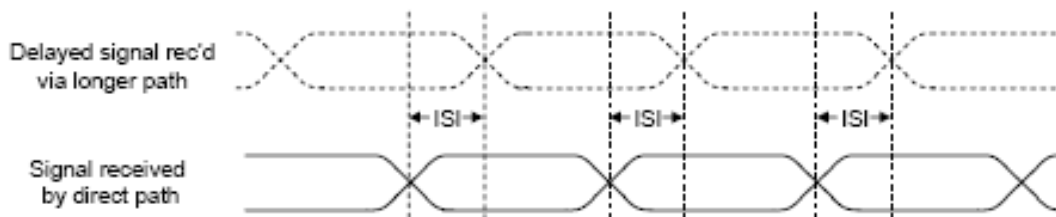
- Υποστηρίζουν μετάδοση σε κανάλια με κλιμακωτό εύρος ζώνης των 1.25, 2.5, 5, 10 και 20 MHz
- Εξασφαλίζουν ρυθμούς δεδομένων ανάλογα με το εύρος ζώνης του συστήματος, όπως 100 Mbps στην κάτω ζεύξη και 50 Mbps στην άνω ζεύξη σε κανάλι των 20 MHz.
- Υποστηρίζουν σύστημα πολλαπλών κεραιών : στην κάτω ζεύξη 4x2, 2x2, 1x2 και 1x1 ενώ στην άνω ζεύξη 1x2 και 1x1
- Βελτιώνουν τη φασματική απόδοση και να μειώνουν την καθυστέρηση μετάδοσης
- Προσφέρουν αξιόπιστη μετάδοση κυρίως σε κινητούς χρήστες με χαμηλή ταχύτητα (<15 km/h) και σε ακτίνα 5 km από το σταθμό βάσης αλλά να εξυπηρετούν ικανοποιητικά και χρήστες με μεγαλύτερη ταχύτητα και σε ακτίνα 5-30 km.

5.2 ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ LTE

Σε ένα ασύρματο κανάλι το σήμα παραμορφώνεται, λόγω της πολυδιαδρομικής διάδοσης, κατά την οποία δημιουργούνται πολλαπλές εκδοχές του σήματος λόγω της ύπαρξης σκεδαστών στο εγγύς περιβάλλον, επιδρώντας στο μέτρο, τη φάση και τη συχνότητα του σήματος με τα οποία φτάνει στο δέκτη. Ανεξάρτητα από το εάν ο πομπός και ο δέκτης έχουν απευθείας οπτική επαφή, το σήμα διαμοιράζεται σε πολλαπλές διαδρομές εξαιτίας της ανάκλασης, περίθλασης ή σκέδασής του σε κτίρια, κινούμενα οχήματα και άλλα παρεμβαλλόμενα αντικείμενα. Τα λαμβανόμενα σήματα προερχόμενα από διαφορετικές διαδρομές διαφέρουν σε πλάτος και φάση αλλοιώνοντας το αρχικό σήμα.

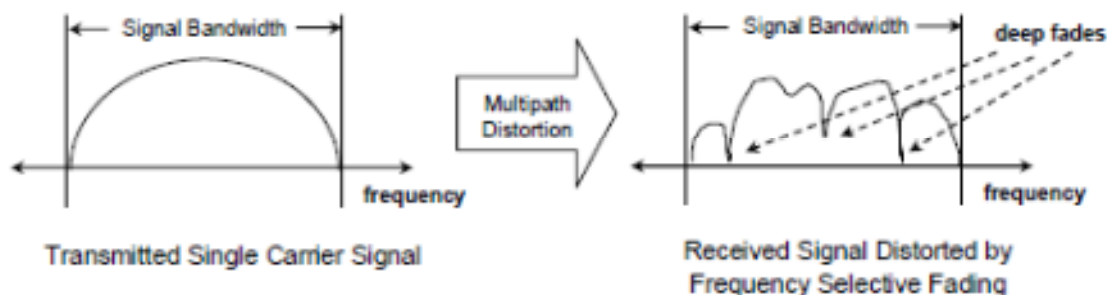
Μέχρι σήμερα, στα κυβελωτά δίκτυα, η μετάδοση στηριζόταν στη διαμόρφωση μονού φέροντος (single carrier modulation). Για υψηλούς ρυθμούς δεδομένων, που χρησιμοποιούνται στα συστήματα τέταρτης γενιάς, δεν κρίνεται αποτελεσματική αφού δεν μειώνει ικανοποιητικά τις επιπτώσεις της πολυδιαδρομικής διάδοσης.

Η καθυστέρηση πολυδιαδρομικής διάδοσης οδηγεί σε χρονική διασπορά και διαλείψεις επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα. Στην περίπτωση αυτή υπάγονται δίαυλοι με επίπεδες διαλείψεις - κατά τις οποίες η ένταση του σήματος μεταβάλλεται με το χρόνο και ισχύει $B < B_c$ και άρα $T > T_c$, όπου B το εύρος ζώνης του σήματος - καθώς και δίαυλοι επιλεκτικοί ως προς τη συχνότητα, οι οποίοι στο πεδίο του χρόνου εμφανίζουν διασπορά καθυστέρησης που υπερβαίνει τη διάρκεια του συμβόλου, με αποτέλεσμα το σήμα λήψης να προκύπτει ως υπέρθεση πολλαπλών εκδοχών του εκπεμπόμενου. Τα πολλαπλά αντίγραφα υπόκεινται σε διαφορετικές αποσβέσεις και χρονικές καθυστερήσεις οδηγώντας σε παραμόρφωση του σήματος. Προκαλείται, επίσης, διασυμβολική παρεμβολή κατά την οποία, λόγω της χρονικής καθυστέρησης, το λαμβανόμενο σήμα ενδέχεται να ταυτοποιηθεί ως γειτονικό σύμβολο, φαινόμενο που εντείνεται σε υψηλές ταχύτητες δεδομένων.



Εικόνα 5.2. Διασυμβολική παρεμβολή λόγω χρονικής καθυστέρησης πολυδιαδρομικής διάδοσης

Στην περιοχή της συχνότητας, τα σήματα που προκύπτουν από την πολυδιαδρομική διάδοση, εμφανίζονται μετατοπισμένα ως προς τη φάση, συνθέτοντας διάυλο επιλεκτικό ως προς τη συχνότητα. Στο δέκτη κάποιες συχνότητες μέσα στα όρια του σήματος θεωρούνται ως constructive παρεμβολή (γραμμικός συνδυασμός των σημάτων σε φάση) και συνυπολογίζονται στο τελικό σήμα και κάποιες ως destructive παρεμβολή (γραμμικός συνδυασμός εκτός φάσης) που παραμορφώνουν περισσότερο το τελικό σήμα.



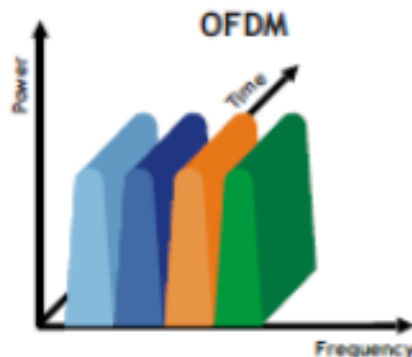
Εικόνα 5.3. Επίδραση της χρονικής διασποράς σε κανάλι επιλεκτικό ως προς τις διαλείψεις συχνότητας

Η OFDM διαμόρφωση μειώνει τις παρεμβολές στο πεδίο του χρόνου δημιουργώντας καλύτερες συνθήκες διάδοσης στον ασύρματο διάυλο.

5.2.1 OFDM

Στην ορθογώνια διαμόρφωση η αύξηση του ρυθμού μετάδοσης των δεδομένων δεν βασίζεται στην αύξηση της ταχύτητας μετάδοσης συμβόλου. Τα συστήματα OFDM διαχωρίζουν το διαθέσιμο εύρος ζώνης σε στενότερα φέροντα (subcarriers) και προωθούν τα δεδομένα σε παράλληλες ροές. Κάθε φέρον (subcarrier) διαμορφώνεται με τη χρήση διαφόρων επιπέδων διαμόρφωσης, όπως QPSK, QAM, 64QAM ή και υψηλότερης τάξης ανάλογα με την

επιθυμητή ποιότητα σήματος. Κάθε OFDM σύμβολο αποτελεί γραμμικό συνδυασμό στιγμιαίων (instantaneous) σημάτων σε κάθε φέρον (subcarrier) στο κανάλι και έχει μεγαλύτερο μέγεθος από τα σύμβολα του συστήματος διαμόρφωσης μονού φέροντος, θεωρώντας ίσο ρυθμό μετάδοσης.



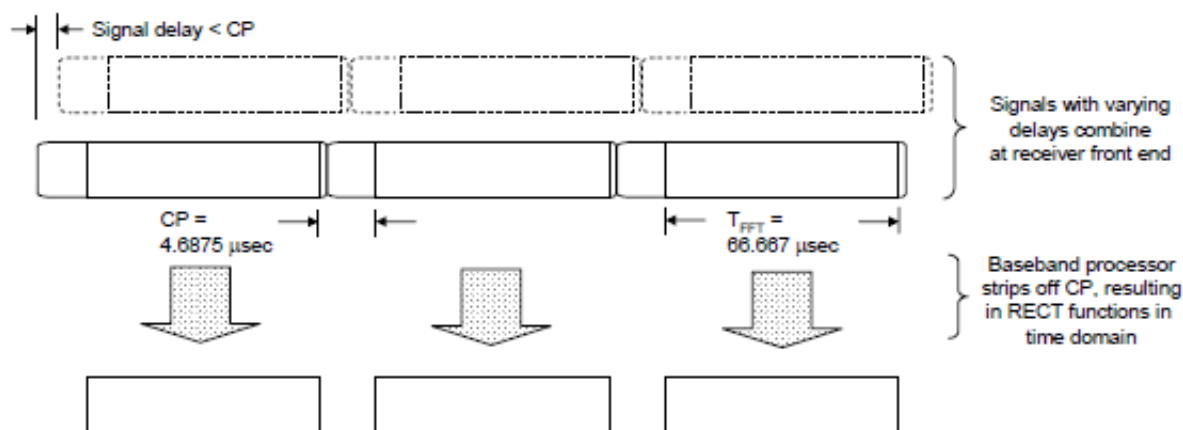
Εικόνα 5.4. OFDM. Κάθε συχνότητα μεταφέρει μοναδική πληροφορία

Δύο είναι οι αξιοσημείωτες πλευρές του OFDM. Αρχικά, κάθε σύμβολο περιλαμβάνει κυκλικό πρόθεμα CP (cyclic prefix) μέσω του οποίου αντιμετωπίζεται η διασυμβολική παρεμβολή. Δεύτερον, τα φέροντα (subcarrier) βρίσκονται σε μικρή απόσταση μεταξύ τους εξοικονομώντας εύρος ζώνης, χωρίς ωστόσο να υπάρχει παρεμβολή μεταξύ τους (inter carrier interference, ICI).

5.2.1.1 OFDM και Διασυμβολική παρεμβολή

Κάθε σύμβολο OFDM στο πεδίο του χρόνου αποτελείται από δυο μέρη, το κυκλικό πρόθεμα, η διάρκεια του οποίου καθορίζεται από το βαθμό της χρονικής διασποράς ανάλογα με την εφαρμογή, και την περίοδο FFT (TFFT) $T_{fft}=66.67 \mu s$.

Δύο σήματα, προερχόμενα από διαφορετικές διαδρομές, παρεμβάλλονται μεταξύ τους στο πεδίο του χρόνου. Μέρος της πληροφορίας του προηγούμενου συμβόλου, που ανήκει στην περιοχή FFT μπορεί με την υπέρθεση, λόγω καθυστέρησης, να ενσωματωθεί στο κυκλικό πρόθεμα του επόμενου συμβόλου. Εάν η διάρκεια του κυκλικού προθέματος είναι κατάλληλη, η παρεμβολή δεν επηρεάζει την περιοχή FFT και δεν αλλοιώνει την πληροφορία του επόμενου συμβόλου. Έτσι, η μόνη παρεμβολή οφείλεται σε πολλαπλά στο χρόνο αντίγραφα του παρόντος συμβόλου.

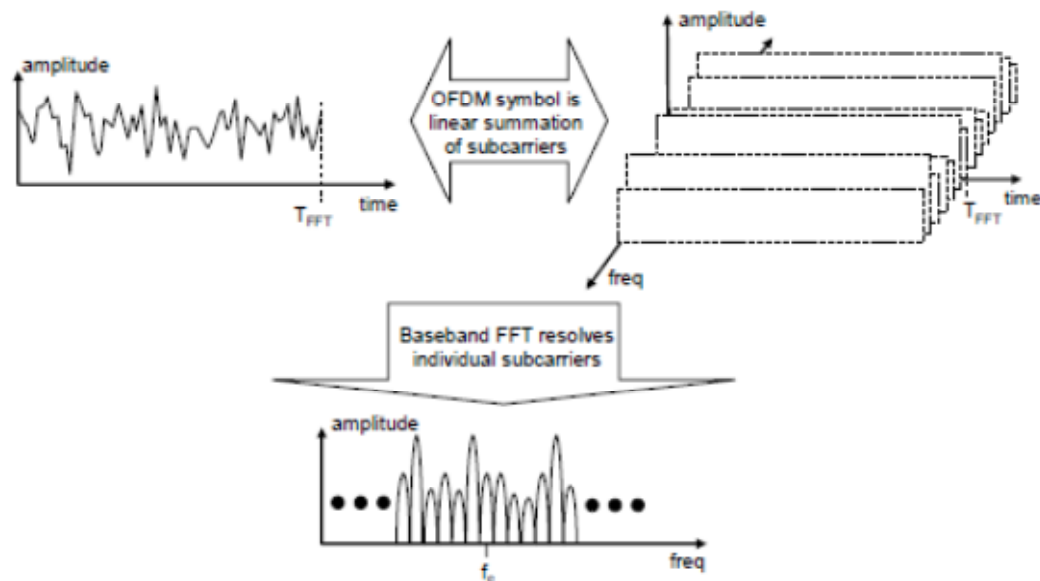


Εικόνα 5.5. Αντιμετώπιση της διασυμβολικής παρεμβολής από τη χρήση OFDM

Με τον τρόπο αυτό, το κυκλικό πρόθεμα (cyclic prefix) λειτουργεί ως μία περιοχή απομόνωσης, όπου πληροφορία με καθυστέρηση από προηγούμενα σύμβολα μπορεί να αποθηκευθεί. Ο δέκτης πρέπει να αποκλείσει δείγμα του κυκλικού προθέματος, το οποίο καταστράφηκε λόγω της καθυστέρησης του προηγούμενου συμβόλου κατά την επιλογή του δείγματος του νέου συμβόλου OFDM. Το αποτέλεσμα δίνει έναν τριγωνικό παλμό σε κάθε υπο-φερον με σταθερό πλάτος σε περίοδο T_{fft} . Οι τριγωνικοί παλμοί δίνουν τη δυνατότητα τα υποφεροντα να είναι κοντά χωρίς να υπάρχει παρεμβολή. Αυτό δημιουργεί ένα SINC διάγραμμα στο πεδίο συχνοτήτων με μοναδικά τοποθετημένα zero-crossings σε διαστήματα των 15 kHz, ακριβώς στο κέντρο της συχνότητας του φέροντος. Με τον τρόπο αυτό, είναι εύκολη η δειγματοληψία στη κεντρική συχνότητα κάθε φέροντος χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η παρεμβολή από γειτονικά φέροντα.

Περαιτέρω, μια ημιτονοειδής ακολουθία με καθυστέρηση δεν επηρεάζει τη συχνότητα της επόμενης, παρά μόνο το πλάτος και τη φάση. Ωστόσο, η χρήση cyclic prefix έχει ένα σοβαρό μειονέκτημα, τη μείωση του καθαρού ρυθμού μετάδοσης καθώς αποστέλλεται περαιτέρω μη χρήσιμη πληροφορία.

Μετά την προσθήκη του κυκλικού προθέματος το σήμα εκπέμπεται και φτάνει στο δέκτη. Εκεί, αφού αφαιρεθεί, το σήμα περνάει στο στάδιο του ευθύ μετασχηματισμού Fourier. Πριν τη διαδικασία μετατρέπεται από σειριακή μορφή σε παράλληλη. Ο FFT λαμβάνει έναν αριθμό μιγαδικών σημείων και το καθένα από αυτά αντιστοιχίζεται σε ένα subcarrier. Η διαδικασία που ακολουθείται μετατρέπει το σήμα από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο της συχνότητας. Στη συνέχεια, ακολουθεί η διαδικασία της αποδιαμόρφωσης. Το κάθε φέρον αντιστοιχίζεται σε ένα μιγαδικό σημείο και, στη συνέχεια, σε ένα σύμβολο και άρα σε σειρά bits και μετατρέπεται και πάλι σε σειριακή μορφή.



Εικόνα 5.6. FFT του συμβόλου OFDM εμφανίζει διακριτά υπο-φέροντα (subcarriers)

5.2.1.2 Μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα του OFDM

Η χρήση του OFDM είναι διευρυμένη καθώς η χρήση του έχει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις μονοφαινομενικές μεταδόσεις. Κάποια από αυτά τα πλεονεκτήματα είναι :

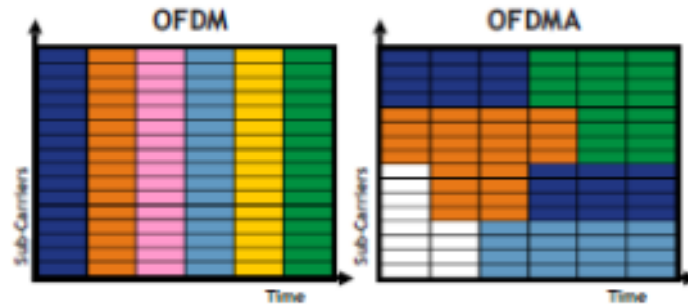
- Ανθεκτικότητα σε πολυδιαδρομικό περιβάλλον διάδοσης
- Εύκολη ισοστάθμιση
- Ευκολία υλοποίησης σε Software Radio
- Ανθεκτικότητα σε κρουστικό θόρυβο και γενικά σε παρεμβολές στενής ζώνης
- Αποδοτικότητα φάσματος (Spectral Efficiency)
- Δυναμικά μεταβαλλόμενος ρυθμός μετάδοσης

Ωστόσο, υπάρχουν και μειονεκτήματα τα οποία θα πρέπει να αντιμετωπίζονται:

- Ευπάθεια σε προβλήματα συγχρονισμού λόγω φαινομένου Doppler και αποκλίσεων συχνότητας ταλαντωτών (oscillator) κατά την αποδιαμόρφωση
- Υψηλή τιμή λόγου Μέγιστης-προς-Μέση ισχύ (PARP).

5.2.2 OFDMA

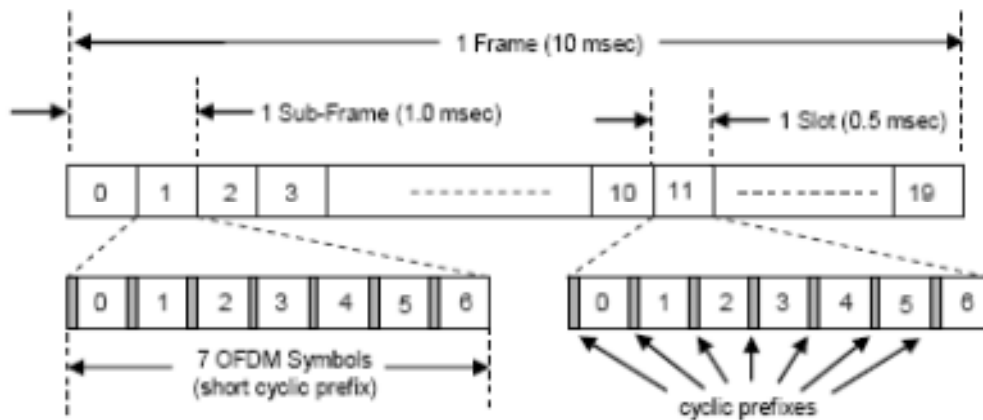
Το σχήμα OFDMA είναι το σχήμα πολυπλεξίας που χρησιμοποιείται στη κάτω ζεύξη στη τεχνολογία των LTE. Παρ' όλο που εισάγει επιπρόσθετη πολυπλοκότητα στον προγραμματισμό των πηγών, προσφέρει πλεονεκτήματα σε θέματα φασματικής απόδοσης και καθυστέρησης.



Εικόνα 5.7. OFDM, OFDMA

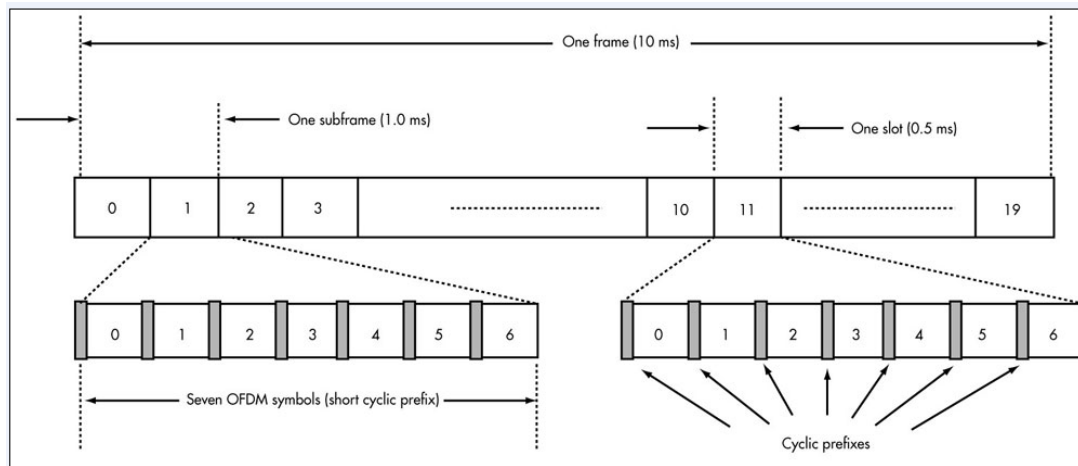
Στους χρήστες κατανέμεται συγκεκριμένος αριθμός φερόντων για προκαθορισμένο χρόνο, το οποίο σε ορολογία της τεχνολογίας LTE ορίζεται ως resource blocks. Τα resource blocks έχουν διάσταση χρόνου και διάσταση συχνότητας και η ανάθεσή τους καθορίζεται από το σταθμό βάσης (eNodeB).

Η γενική δομή πλαισίου έχει την ακόλουθη μορφή



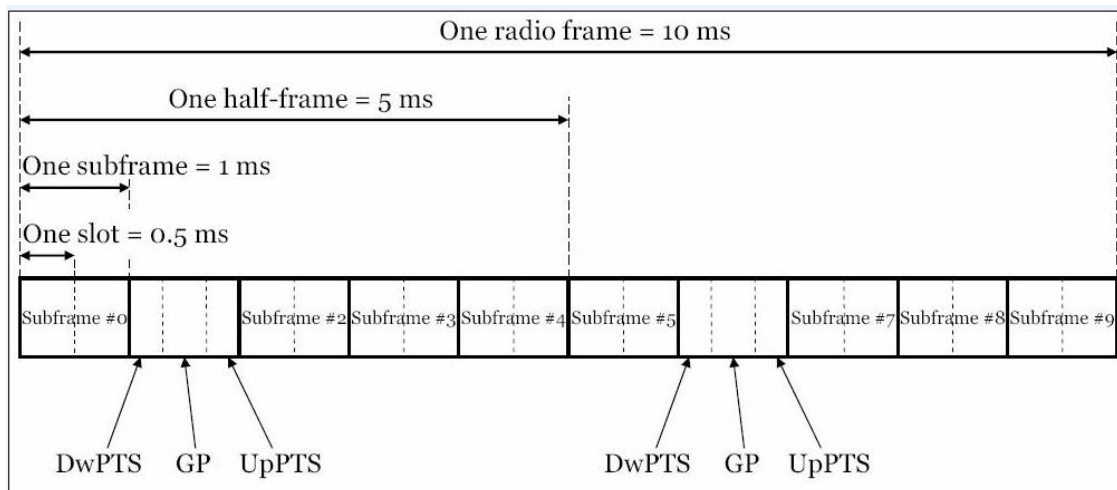
Εικόνα 5.8. Γενική δομή πλαισίου LTE

Ειδικότερα, υπάρχουν δύο είδη πλαισίων : ένα όταν γίνεται χρήση της TDD και το δεύτερο με τη χρήση FDD. Το πρώτο είδος περιλαμβάνει πλαίσιο το οποίο αποτελείται από 20 χρονοσχιμές (slots) διάρκειας 0.5 ms.



Εικόνα 5.9. Δομή πλαισίου LTE με τη χρήση FDD

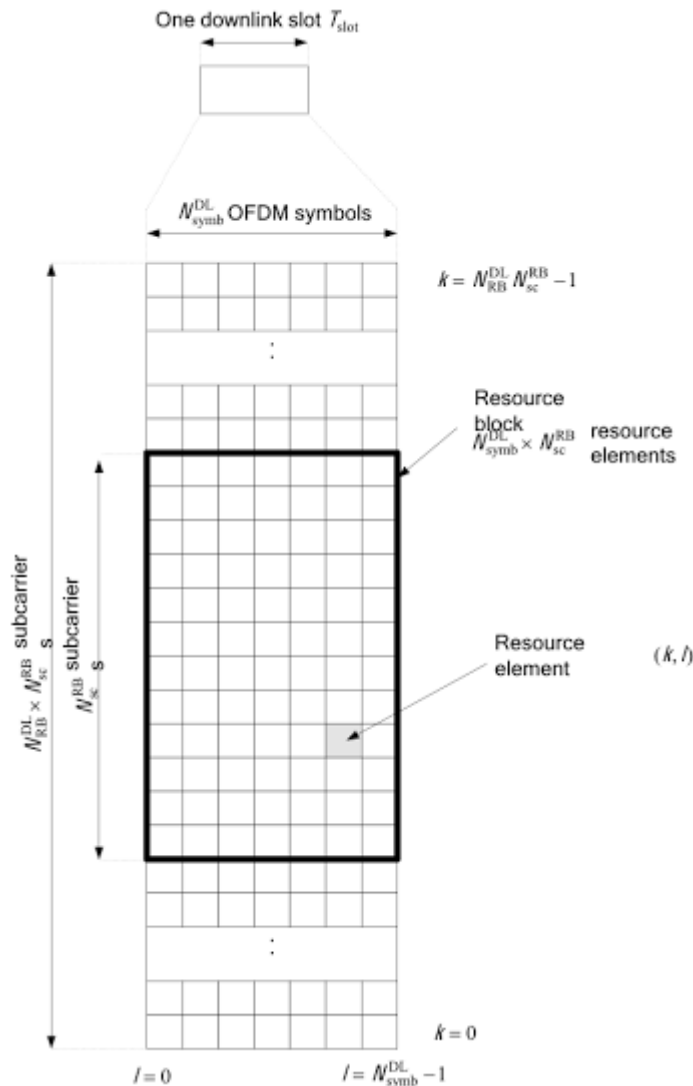
Στο δεύτερο τύπο, το πλαίσιο χωρίζεται σε δύο ίσα υποπλαίσια. Ανάλογα με την switch περίοδο, τουλάχιστον ένα από τα δύο υποπλαίσια περιλαμβάνει ένα ειδικό υποπλάισιο το οποίο περιέχει τρία πεδία για τη switch πληροφορία: Downlink Pilot Time Slot (DwPTS), Guard Period (GP) και Uplink Pilot Time Slot (UpPTS). Εάν η περίοδος είναι 10 ms η παραπάνω πληροφορία καταλαμβάνει ένα υποπλάισιο, εάν είναι 5 ms καταλαμβάνει και τα δυο υποπλαίσια.



Εικόνα 5.10. Δομή πλαισίου LTE με τη χρήση TDD

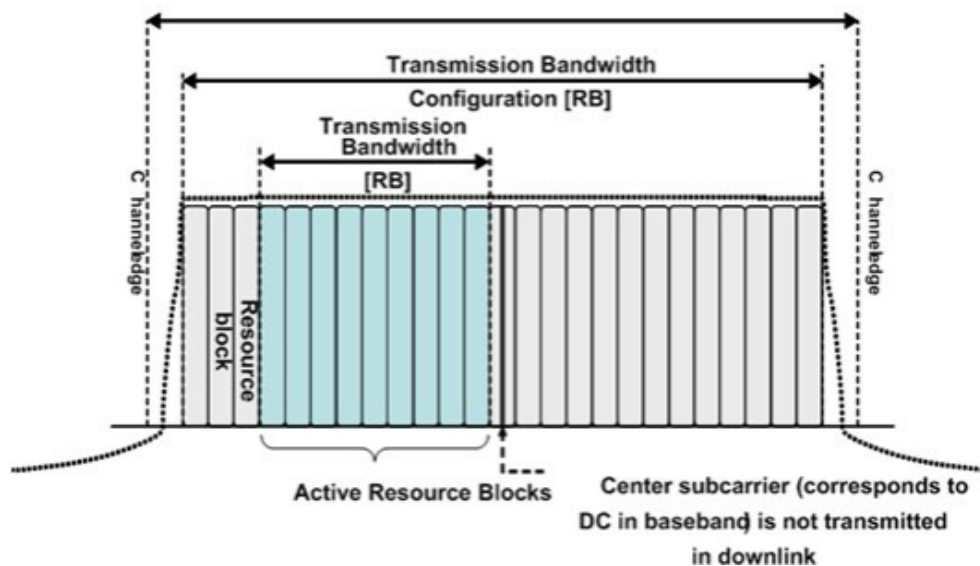
Όπως φαίνεται στα παραπάνω διαγράμματα κάθε πλαίσιο διαρκεί 10 ms και χωρίζεται σε δέκα υποπλαίσια του 1 ms. Κάθε subframe χωρίζεται σε δυο χρονοσχισμές. Το μικρότερο τμήμα του πλαισίου ορίζεται ως Resource Element, το οποίο αντιστοιχεί σε ένα φέρον 15 KHz ενός συμβόλου. Ομάδα αυτών συνθέτουν ένα Resource Block, το οποίο μετράται σε φέροντα ανά σύμβολο. Κάθε Resource Block αποτελείται από 12 subcarriers, στη διάσταση της συχνότητας, και έξι ή επτά σύμβολα, στη διάσταση του χρόνου. Ο τελικός αριθμός των συμβόλων καθορίζεται από το κυκλικό πρόθεμα (CP). Όταν χρησιμοποιείται κανονικό cyclic

prefix, το resource block περιλαμβάνει επτά σύμβολα, ενώ το εκτεταμένο κυκλικό πρόθεμα περιορίζει τα σύμβολα σε έξι.



Εικόνα 5.11. Downlink Resource Grid

Το εύρος ζώνης του καναλιού ορίζεται ως το εύρος μετρημένο από τη χαμηλότερη έως την υψηλότερη άκρη του καναλιού. Η άκρη του καναλιού αντιστοιχεί σε συχνότητα ίση με τη κεντρική συχνότητα \pm (εύρος του καναλιού/2). Το εύρος ζώνης μετάδοσης καθορίζεται από τα ενεργά Resource Blocks κατά τη μεταφορά. Όσο αυξάνεται το εύρος ζώνης αυξάνεται και ο αριθμός των blocks. Το εύρος ζώνης μεταφοράς δηλώνει το μέγιστο αριθμό resource blocks για συγκεκριμένο εύρος ζώνης καναλιού, αριθμός ο οποίος πολλαπλασιασμένος με 180 kHz δίνει το μέγιστο κατειλημμένο εύρος ζώνης.



Εικόνα 5.12. Channel Bandwidth, Transmission Bandwidth Configuration, Transmission Bandwidth

Ανάλογα με το εύρος ζώνης καναλιού που χρησιμοποιείται τα παραπάνω μεγέθη διαμορφώνονται ως εξής :

Transmission BW	1.25 MHz	2.5 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz	
Sub-frame duration	0.5 ms						
Sub-carrier spacing	15 kHz						
Sampling frequency	192 MHz (1/2 x 3.84 MHz)	3.84 MHz	7.68 MHz (2 x 3.84 MHz)	15.36 MHz (4 x 3.84 MHz)	23.04 MHz (6 x 3.84 MHz)	30.72 MHz (8 x 3.84 MHz)	
FFT size	128	256	512	1024	1536	2048	
OFDM sym per slot (short/long CP)	7/6						
CP length (usec/ samples)	Short	(4.69/9) x 6, (5.21/10) x 1	(4.69/18) x 6, (5.21/20) x 1	(4.69/36) x 6, (5.21/40) x 1	(4.69/72) x 6, (5.21/80) x 1	(4.69/108) x 6, (5.21/120) x 1	(4.69/144) x 6, (5.21/160) x 1
	Long	(16.67/32)	(16.67/64)	(16.67/128)	(16.67/256)	(16.67/384)	(16.67/512)

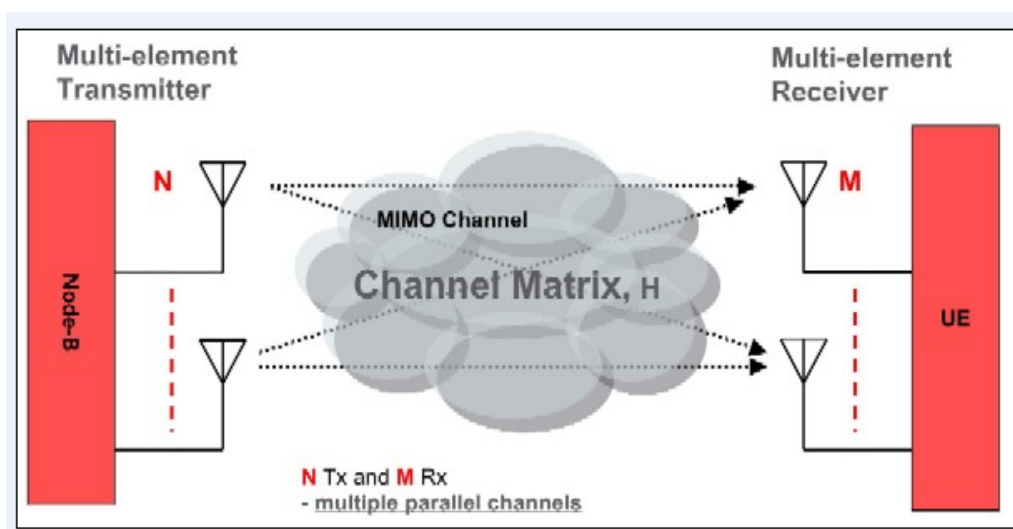
Πίνακας 5.1. Available Downlink Bandwidth

Σε αντίθεση με άλλα δίκτυα, τα LTE δίκτυα δε χρησιμοποιούν το προοίμιο του πακέτου που αποστέλλεται σε επίπεδο φυσικού στρώματος για λειτουργίες όπως η εκτίμηση καναλιού, σήματος ή για χρονικό συγχρονισμό. Αντ' αυτού ειδικά σήματα αναφοράς εμπεριέχονται στα resource blocks και μεταδίδονται κατά τη διάρκεια του πρώτου και του πέμπτου OFDM συμβόλου όταν υπάρχει το κανονικό κυκλικό πρόθεμα και κατά τη διάρκεια του πρώτου και

του τέταρτου OFDM συμβόλου για εκτεταμένο κυκλικό πρόθεμα. Τα σύμβολα αναφοράς μεταδίδονται κάθε έξι subcarriers.

5.2.3 Συστήματα MIMO

Τα συστήματα MIMO αποτελούν φυσική επέκταση της εξέλιξης στην τεχνολογία ασύρματων επικοινωνιών. Περιγράφουν συστήματα στα οποία πομπός και δέκτης χρησιμοποιούν πολλαπλές κεραιές για να βελτιώσουν την επικοινωνία μεταξύ τους και ο διάλογος έχει πολλαπλές εισόδους και εξόδους.



Εικόνα 5.13. Σύστημα MIMO

Η χρήση των MIMO συστημάτων στις ασύρματες επικοινωνίες βασίζεται στην αυξανόμενη φασματική αποδοτικότητα που προσφέρει. Χωρίς την απαίτηση πρόσθετου εύρους ζώνης και αύξησης της ισχύος μεταφοράς, αυξάνει το throughput των δεδομένων και την απόσταση της σύνδεσης. Ο στόχος αυτός επιτυγχάνεται διαμοιράζοντας τη διατιθέμενη ισχύ σε όλες τις κεραιές. Με τον τρόπο αυτό, δημιουργεί

- κέρδη ισχύος, γνωστά και με την ορολογία array gain, που συμβάλλουν στην αύξηση του ρυθμού bps σε κάθε Hz του εύρους ζώνης, εκμεταλλευόμενα και την πόλωση των κεραιών μεταξύ τους, τη χώρο-χρονική (space-time) κωδικοποίηση και την αμοιβαία σύζευξη των κεραιών μεταξύ τους, και
- κέρδη διαφορισμού για να βελτιωθεί η αξιοπιστία του καναλιού μειώνοντας τις παρεμβολές και αυξάνοντας τον σηματοθορυβικό λόγο SNIR.

Το κέρδος ισχύος αποτελεί έναν πίνακα που εμφανίζει το κέρδος ισχύος κάθε κεραιάς από την πλευρά του συστήματος εκπομπής προς κάθε κεραιά του συστήματος λήψης. Το συνολικό κέρδος είναι ανάλογο του μεγέθους του πίνακα, με την προϋπόθεση ότι τα στοιχεία της κεραιάς βρίσκονται σε χώρο χωρίς πολλές παρεμβολές, ώστε οι πλευρικοί λοβοί να διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα, και το μέγεθος του πίνακα να μην υπερβαίνει το διπλάσιο

του μήκους κύματος. Υπό αυτές τις συνθήκες, το κέρδος ισχύος είναι ανεξάρτητο και του αριθμού των στοιχείων της κεραίας.

Το κέρδος διαφορισμού αποτελεί το λόγο σήματος προς παρεμβολή (SNIR) εκφράζοντας το ποσό της ισχύος που θα μειωθεί όταν χρησιμοποιούνται δύο ή περισσότερα διαφορετικά κανάλια μετάδοσης σήματος με διαφορετικά χαρακτηριστικά μεταξύ τους, μία τεχνική που χαρακτηρίζεται με τον όρο *spatial diversity*. Όσο μεγαλύτερο το κέρδος που επιτυγχάνεται, τόσο μικρότερη επίδραση υπάρχει από φαινόμενα παρεμβολής όπως οι διαλείψεις.

Σε ένα σύστημα MIMO, οι ζεύξεις περιγράφονται από ένα πίνακα διαύλου

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1N_t} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2N_t} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_r N_t} & h_{2N_t} & \dots & h_{N_r N_t} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Κάθε γραμμή αντιστοιχεί σε μία κεραία λήψης και κάθε στήλη σε μία κεραία εκπομπής. Η γνώση του πίνακα από την πλευρά και του πομπού και του δέκτη, αποτελεί σημαντική παράμετρο, καθώς τους παρέχει πληροφορίες για τις ακριβείς παραμέτρους της ζεύξης. Σε άλλη περίπτωση, γίνεται υπόθεση για τη στατιστική συμπεριφορά του.

Αποδεικνύεται ότι η χωρητικότητα του συστήματος είναι

$$C = B * \log_2 \left[\det \left(I_{N_r} + \frac{P}{N_t \sigma_w^2} H H^H \right) \right] \text{ για } N_r < N_t \quad (11)$$

και

$$C = B * \log_2 \left[\det \left(I_{N_t} + \frac{P}{N_r \sigma_w^2} H H^H \right) \right] \text{ για } N_r > N_t \quad (12)$$

ενώ, με ανάλυση του MIMO σε παράλληλους διαύλους

$$C = B * \sum_{i=1}^{R_H} \log_2 \left(1 + \frac{\lambda_i P}{N_t \sigma_w^2} \right) \quad (13)$$

5.3 LTE-ADVANCED

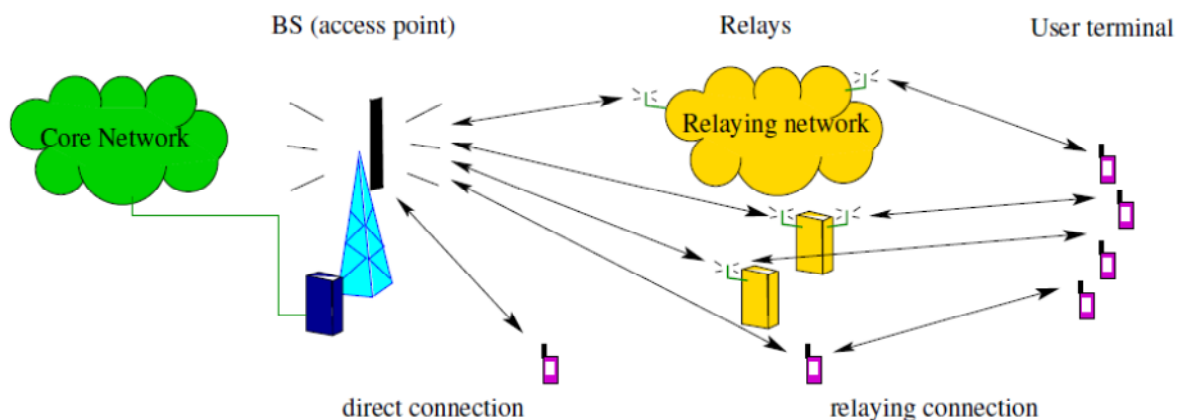
Το LTE-Advanced αποτελεί μία εξελιγμένη έκδοση των LTE που περιλαμβάνει διορθώσεις λαθών που προέκυψαν από την εφαρμογή του σε πραγματικά δίκτυα. Περαιτέρω στόχος της ανάπτυξης του είναι να φτάσει και να ξεπεράσει τις απαιτήσεις της ITU για την πιστοποίηση της τεχνολογίας ως τέταρτης γενιάς. Το LTE Advanced θα πρέπει να είναι συμβατό με τους LTE εξοπλισμούς και να λειτουργεί στις ζώνες συχνοτήτων που παρέχονται. Ένα από τα πλεονεκτήματά του αποτελεί η ικανότητά του να λειτουργεί σε ανεπτυγμένες τοπολογίες δικτύων, όπως ετερογενή δίκτυα με συνδυασμό μακροκυψελών με κόμβους χαμηλής ισχύος, όπως picocells, femtocells και κόμβους αναμετάδοσης ενώ, επιπλέον, βελτιώνει τη χωρητικότητα και την κάλυψη και εισάγει πολυφέροντα, τα οποία χρησιμοποιούν ultra wide εύρος ζώνης, πάνω από 100 MHz φάσματος υποστηρίζοντας υψηλούς ρυθμούς δεδομένων.

Μελλοντικές απαιτήσεις που πρέπει να πληροί αποτελούν τα ακόλουθα:

- Υποστήριξη σταθμών βάσεων αναμεταδοτών
- Multipoint σημείο μετάδοσης και λήψης
- Ευέλικτη χρήση φάσματος
- Cognitive Radio
- Αυτόνομη και αυτόματη διαμόρφωση των δικτύων

6. ΑΝΑΜΕΤΑΔΟΣΗ

Ο κύριος σκοπός της συσκευής αναμετάδοσης είναι η βελτίωση στη σύνδεση μεταξύ μιας πηγής και ενός προορισμού. Λαμβάνει το σήμα από τον κόμβο πηγή, το ενισχύει και το προωθεί προς τον κόμβο προορισμού. Με τη βοήθεια του αναμεταδότη η επικοινωνία μπορεί να είναι γίνεται πιο γρήγορα ή/και σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Στο πλαίσιο της ραδιοεπικοινωνίας, η αναμετάδοση έχει χρησιμοποιηθεί επί πολλές δεκαετίες υπό διάφορες ονομασίες: επαναλήπτης, γέφυρα, ασύρματος δρομολογητής, ad-hoc ή multihop δίκτυα, κλπ.



Εικόνα 6.1. Ασύρματο περιβάλλον επικοινωνιών

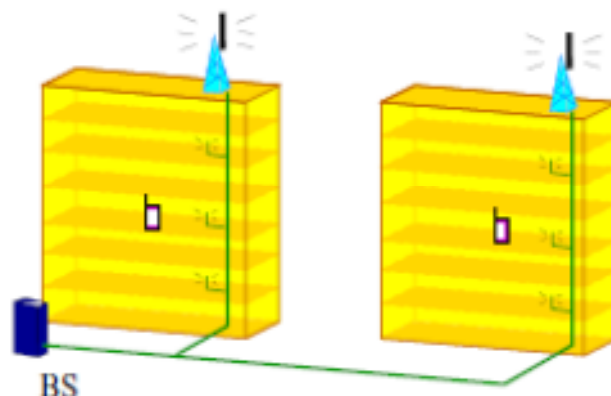
Παρά τη μακρά ιστορία της έννοιας, η αναμετάδοση έχει λάβει πολλή προσοχή κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας. Τεχνικά, ο κύριος λόγος για αυτό το ανανεωμένο ενδιαφέρον οφείλεται στις εξελίξεις στην τεχνολογία των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, εξέλιξη που δίνει τη δυνατότητα προώθησης σήματος μέσω συσκευών χαμηλού κόστους. Αυτό έχει μετατοπίσει το ενδιαφέρον από το σχεδιασμό των κεραιών και RF συσκευών, όπως οι αναμεταδότες, προς την εντατική επεξεργασία σήματος και τη διαχείριση των πόρων (RRM, Radio resource Management), όπως των ασύρματων δρομολογητών. Αναμφισβήτητα, αυτό μπορεί επίσης να αλλάξει τον τρόπο με τον οποίο οι αναμεταδότες θα χρησιμοποιηθούν στην ανάπτυξη των ασύρματων δικτύων.

Ένας δεύτερος, οικονομικός, λόγος για την ανανέωση του ενδιαφέροντος μπορεί να βρεθεί στο ευρύτερο πλαίσιο του κλάδου των τηλεπικοινωνιών. Παρά το γεγονός ότι η πάγια – κινητή – σύγκλιση έχει αναπτυχθεί πιο αργά απ' ό, τι αναμενόταν, παρουσιάζεται μια συνεχής αύξηση της ασύρματης μετάδοσης δεδομένων και των απαιτήσεων των πελατών σε ταχύτητα στις ευρείας περιοχής κάλυψης ασύρματες συνδέσεις. Με γνώμονα πάντα την αποδοτική χρήση του φάσματος, στο σχεδιασμό των νέων δικτύων λαμβάνεται υπόψιν και η οικονομική πλευρά των νέων τεχνολογικών επιλογών που προτείνονται. Η επιλογή της χρήσης αναμεταδοτών για την ανάπτυξη ενός ασύρματου δικτύου εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η χρησιμοποιούμενη από τους αναμεταδότες τεχνολογία και το κόστος ανάπτυξης και λειτουργίας ενός διαφορετικού δικτύου.

6.1 ΤΥΠΟΙ ΑΝΑΜΕΤΑΔΟΣΗΣ

6.1.1 Κατανεμημένα συστήματα κεραιών (DAS)

Πολλά radio heads συνδέονται σε αυτή τη διάταξη σε ένα σταθμό βάσης (BS), μέσω της ενσύρματης σύνδεσης, όπως απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα.



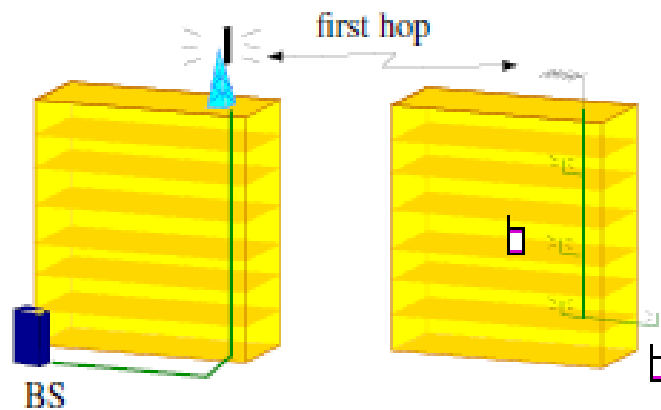
Εικόνα 6.2. Distributed Antenna System (DAS)

Στην απλούστερη (παθητική) περίπτωση, οι radio heads συνδέονται μέσω ομοαξονικών καλωδίων. Σε πιο προηγμένες λύσεις, το σήμα υποβάλλεται σε επεξεργασία και ενισχύεται κοντά στο radio head, και στη συνέχεια διαβιβάζεται στο BS για παράδειγμα μέσω οπτικής σύνδεσης (οπτικές ίνες). Αυτό το είδος χρησιμοποιείται συνήθως για τη βελτίωση των συνδέσεων και επομένως για την παροχή υπηρεσιών στις λεγόμενες τρύπες στην κάλυψη, όπως σε σήραγγες ή σε εσωτερικούς χώρους. Σε ένα κυψελωτό σύστημα, η διάταξη αυτή επεκτείνει την κάλυψη της κυψέλης αλλά δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία νέων κυψελών.

Μια κοινή τεχνική πτυχή των αναμεταδοτών είναι ότι σε ένα κατανεμημένο σύστημα κεραιών, οι άκρες τοποθετούνται πιο κοντά στα τερματικά από ό, τι σε ένα παραδοσιακό κυψελωτό δίκτυο. Επιπλέον, ένα σημαντικό μέρος του λαμβανόμενου σήματος στο σταθμό βάσης είναι στην πραγματικότητα ο θόρυβος από τις κεραίες.

6.1.2 Inband RF επαναλήπτης on-channel

Αυτή είναι ίσως η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη διάταξη σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας και απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα.



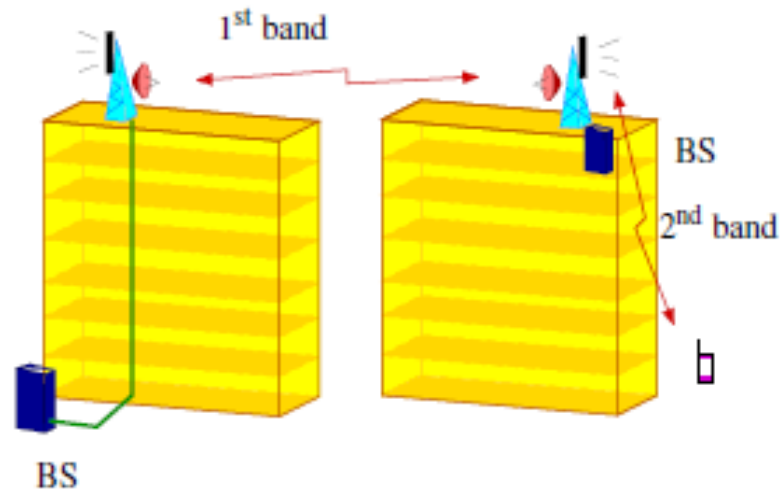
Εικόνα 6.3. On Channel RF επαναλήπτης

Το σήμα που λαμβάνεται από μια κεραία είναι ενισχυμένο και αναμεταδίδεται στο ίδιο κανάλι, αλλά από διαφορετική κεραία. Η μέγιστη ισχύς ενίσχυσης είναι περιορισμένη από την απομόνωση μεταξύ των δύο κεραιών. Παρόμοια με την DAS, αυτό το σύστημα επεκτείνει την κάλυψη της κυψέλης. Επιπλέον, ο επαναλήπτης ενισχύει και το θόρυβο και τις παρεμβολές, γεγονός που θα μπορούσε να δημιουργήσει πρόβλημα για τη διαστασιολόγηση της ανοδικής ζεύξης ενός RF δικτύου. Θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για εσωτερική κάλυψη. Σε αντίθεση με το κατανομημένο σύστημα κεραιάς, η οποία απαιτεί την εγκατάσταση των καλωδίων, η απόσταση μεταξύ του BS και του επαναλήπτη θα μπορούσε να είναι πολύ μεγαλύτερη. Συνεπώς, χρησιμοποιείται και για την κάλυψη των κενών στη μετάδοση σε υπαίθριο περιβάλλον.

Η απόδοση ενός τέτοιου συστήματος εξαρτάται από το πώς το σύστημα κεραιάς είναι σχεδιασμένο, έτσι ώστε η απομόνωση μεταξύ των δύο κεραιών να είναι όσο το δυνατόν υψηλότερη. Ένας κακός σχεδιασμός ή μια εσφαλμένη ανάπτυξη του συστήματος δεν μπορεί να αντισταθμιστεί μέσω της έξυπνης διαχείρισης των πόρων.

6.1.3 Out-of-band αναμετάδοση

Η χρήση του ξεκίνησε όταν έγινε διαθέσιμο επιπλέον φάσμα στο δίκτυο. Το πιο κοινό παράδειγμα είναι η χρήση μιας μικροκυματικής σύνδεσης ως κορμός για έναν BS σε ένα κυψελωτό δίκτυο, όπως απεικονίζεται στην εικόνα.

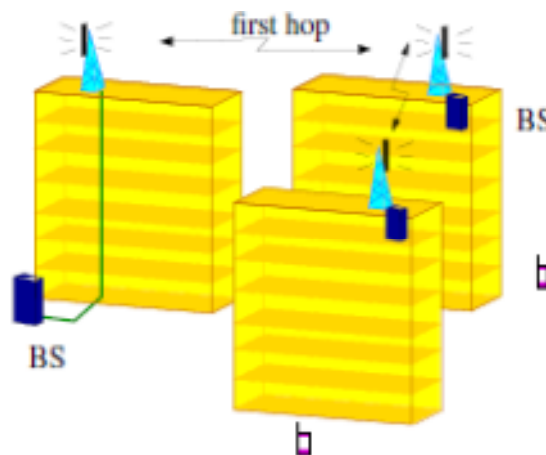


Εικόνα 6.4. Αναμετάδοση Out of Band

Με τη χρήση υψίσυχνου φέροντος και ιδιαίτερα κατευθυντικής κεραίας, αυτές οι συνδέσεις μπορούν να προγραμματιστούν για την αποφυγή παρεμβολών από άλλες συνδέσεις. Η ίδια βασική διάταξη έχει βοηθήσει σε εφαρμογές στις οποίες ο κορμός ενός σημείου πρόσβασης στο WLAN γίνεται, για παράδειγμα, στη ζώνη των 5 GHz (IEEE 802.11a), 3,5 GHz (WiMAX), ή ακόμα και των 2 GHz (UMTS/3G). Αν και αυτή η διάταξη μοιάζει με εκείνη ενός in-band συστήματος μετεγκατάστασης, στην πραγματικότητα, αποτελείται από δύο ανεξάρτητα δίκτυα που συνδέονται μέσω μιας γέφυρας. Επομένως, η διαχείριση των πόρων αντιμετωπίζεται ξεχωριστά για τις δύο ζώνες.

6.1.4 Inband αναμεταδότης με μετατόπιση καναλιού

Η παρούσα διάταξη εμφανίζεται λιγότερο συχνά. Σε αντίθεση με την out-of-band αναμετάδοση, η επικοινωνία σε όλες τις συνδέσεις γίνεται μέσω της ίδιας ομάδας πόρων και με την ίδια τεχνολογία.



Εικόνα 6.5. Αναμετάδοση με μετατόπιση Καναλιού (channel shift)

Σε αντίθεση με την αναμετάδοση πάνω στο κανάλι, το εισερχόμενο σήμα σε αυτό το σύστημα προωθείται σε ένα διαφορετικό, ορθογώνιο κανάλι. Στην περίπτωση που η μετατόπιση γίνεται στη συχνότητα, επιτρέπεται στις δύο κεραιές του επαναλήπτη να τοποθετηθούν πολύ πιο κοντά απ' ό,τι στην περίπτωση ενός παραδοσιακού επαναλήπτη. Αυτό χαλαρώνει τις απαιτήσεις σχετικά με το ύψος του ιστού της κεραιάς και, τελικά, οδηγεί σε εξοικονόμηση κόστους. Εκτός αυτού, η παρούσα διάταξη καλύπτει, επίσης, την περίπτωση κατά την οποία η μετατόπιση μπορεί να γίνει στο χρόνο, στην οποία περίπτωση ο αναμεταδότης είναι στην πραγματικότητα ένας ασύρματος δρομολογητής. Ως εκ τούτου, επιτρέπει εφαρμογές κατά τις οποίες δημιουργείται γύρω από τον αναμεταδότη μια κυψέλη. Δηλαδή η backhaul σύνδεση μεταφέρει όχι μόνο τα δεδομένα των χρηστών, αλλά και όλη τη σηματοδότηση ελέγχου που απαιτείται από έναν BS. Παραδείγματα τέτοιας προσέγγισης είναι το Ricochet δίκτυο.

6.2 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΑΝΑΜΕΤΑΔΟΣΗΣ

Όσο η επεξεργασία σήματος είχε υψηλό κόστος και ο χρόνος απόσβεσης των σταθμών βάσης ήταν μεγάλος, η προτίμηση των αναλογικών λύσεων ήταν ένας χαμηλού κόστους τρόπος για τη βελτίωση της απόδοσης του δικτύου. Η αναλογική μετάδοση δίνει το πλεονέκτημα της επαναχρησιμοποίησης του εγκατεστημένου εξοπλισμού από διάφορους τύπους συστημάτων και προτύπων. Όμως, η ανάπτυξη ολοκληρωμένων κυκλωμάτων έχει συμβάλλει στη δημιουργία χαμηλού κόστους συσκευών με συνεχώς αυξανόμενη ισχύ επεξεργασίας.

Ο κυριότερος τεχνικός λόγος για την ανάπτυξη δικτύων με αναμεταδότες βασίζεται στην κάλυψη της ανάγκης για υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης. Όταν ένα δίκτυο αναβαθμίζεται για υψηλότερα ποσοστά δεδομένων, με τους σταθμούς βάσης να βρίσκονται στις αρχικές θέσεις, η κάλυψη της περιοχής, όταν θα γίνει η επίτευξη του νέου ρυθμού δεδομένων, θα είναι μικρότερη σε σύγκριση με την προηγούμενη κατάσταση του δικτύου, κατά την οποία ο ρυθμός μετάδοσης ήταν μικρότερος. Η έλλειψη κάλυψης αντιμετωπίζεται με τη χρήση τεχνικών αναμετάδοσης (repeaters).

6.3 ΔΙΚΤΥΑ ΑΝΑΜΕΤΑΔΟΣΗΣ

6.3.1 Δίκτυο Ricochet

Τα δίκτυα πολλαπλών μεταβάσεων μελετήθηκαν τη δεκαετία του '80. Το πρώτο εμπορικό σύστημα που βασίζεται σε αυτές τις τεχνικές ήταν το δίκτυο Ricochet της Mettricom. Η ανάπτυξη του δικτύου ξεκίνησε στην Καλιφόρνια το 1994 και έγινε εμπορικά διαθέσιμο το Σεπτέμβριο 1995. Το δίκτυο προσέφερε ασύρματη πρόσβαση στο Internet, κυρίως σε μεμονωμένους και εταιρικούς χρήστες με φορητούς υπολογιστές. Από το 1997, προσέφερε πρόσβαση σε υπηρεσία, στην οποία οι πελάτες ήταν μόνιμα συνδεδεμένοι με το δίκτυο, με ρυθμό δεδομένων από 10 έως 30 kbps.

Η αρχιτεκτονική αυτού του δικτύου πλέγματος αποτελείται από

- (α) ασύρματα μόντεμ για τον τελικό χρήστη,
- (β) ασύρματα routers, τα οποία συνήθως τοποθετούνται στους πυλώνες φωτισμού στο δρόμο, και
- (γ) ενσύρματα σημεία πρόσβασης τα οποία δρομολογούν την κίνηση δεδομένων από και προς το σταθερό δίκτυο.

Το δίκτυο χρησιμοποιεί μια δυναμική ασύρματη δρομολόγηση, η οποία βασίζεται στην αυτόματη «ανακάλυψη» γείτονα και στη γεωγραφική ταυτότητα των συσκευών. Το δίκτυο λειτούργησε στη 902- 928 MHz και 2400-2483.5 MHz ζώνη χωρίς άδεια, καθώς και στα 2305- 2360 MHz για τα οποία είχε Metricom άδεια σε ορισμένους οικονομικούς τομείς US6.

6.3.2 Τεχνικές αναμετάδοσης και κυβελωτά δίκτυα

Ο Drucker (1988) είναι ένας από τους πρώτους repeater που χρησιμοποιήθηκε για να υλοποιήσει την ιδέα της αναμετάδοσης σε κυβελωτά δίκτυα και στόχευε στην επέκταση και βελτίωση της κάλυψης ενός δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Οι προσπάθειες τυποποίησης για το GSM περιλαμβάνουν μόνο επαναλήπτες, οι οποίοι ενίσχυαν και προωθούσαν τα σήματα στην ίδια συχνότητα. Στην περίπτωση αυτή, η ενίσχυση ισχύος από τον επαναλήπτη θα πρέπει να είναι 15 db κάτω από την τιμή κατά την οποία οι κεραίες πομπού και δέκτη είναι απομονωμένες. Αυτό σημαίνει ότι η μεταδιδόμενη ισχύς πρέπει να ελέγχεται σε σχέση με την ισχύ εισόδου, έτσι ώστε να χρησιμοποιείται μια σταθερή ισχύς ενίσχυσης, και ως εκ τούτου, οι δυνατότητες μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας εξαρτώνται από το σενάριο δικτύου για το οποίο ο αναμεταδότης έχει αναπτυχθεί .

Στις αρχικές roll-out φάσεις των κινητών κυβελωτών συστημάτων, όπως το GSM, μεγαλύτερη σημασία δίνεται στην κάλυψη που παρέχεται σε εξωτερικούς χώρους, όπου το pathloss μεταξύ του τερματικού και του επαναλήπτη είναι συγκρίσιμο με εκείνο μεταξύ του τερματικού και του σταθμού βάσης. Ωστόσο, καθώς η υπηρεσία γίνεται όλο και πιο δημοφιλής, μεγάλο μέρος της τηλεπικοινωνιακής κίνησης γίνεται προς εσωτερικούς χώρους.

Στην περίπτωση του GSM και των συνακόλουθων προτύπων, όπως το UMTS, αυτά περιέχουν εξειδικεύσεις για αναμεταδότες RF. Αυτό σημαίνει ότι ο αναμεταδότης δεν περιλαμβάνεται στην αρχιτεκτονική του δικτύου, δεδομένου ότι είναι διαφανής σε όλους τους αλγορίθμους και τα πρωτόκολλα, από τη διαχείριση της κινητικότητας μέχρι την εγκατάσταση τηλεφωνικής συνδιάλεξης.

Ωστόσο, τα δίκτυα πολλαπλών μεταβάσεων (multihop) θεωρούνται το μέλλον στα LTE Advanced δίκτυα. Ειδικότερα, η έννοια της αυτοργάνωσης των σταθμών βάσης φέρνει ένα βήμα πιο κοντά την ιδέα των δικτύων πολλαπλών βημάτων: η προτεινόμενη συσκευή μπορεί να λειτουργήσει τόσο ως σταθμός βάσης και ως αναμεταδότης όταν η σύνδεση backhaul δεν προβλέπεται. Έτσι δρομολογείται η αλλαγή στην αντιμετώπιση των αναμεταδοτών από απλούς επαναλήπτες σε συσκευές με λειτουργικότητα σταθμού βάσης.

6.4 ΑΝΑΜΕΝΟΜΕΝΑ ΟΦΕΛΗ ΑΠΟ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΑΝΑΜΕΤΑΔΟΤΩΝ

6.4.1 Τεχνικά αποτελέσματα

Outage Probability

Πολλές θεωρητικές εργασίες δείχνουν ότι τα κέντρα της κυψέλης μπορούν να προβλέπουν τη χωρική diversity που απαιτείται για να υπολογιστεί η πιθανότητα διακοπής. Αυτό μπορεί να ερμηνευθεί υπό την έννοια ότι ο ρυθμός δεδομένων που παρέχεται στον τελικό χρήστη μπορεί να αυξηθεί, οδηγώντας στην αύξηση της χωρητικότητας του διαύλου. Αυτά τα αποτελέσματα συνήθως λαμβάνονται με απλά μοντέλα, για παράδειγμα Rayleigh fading κανάλια, τα οποία δεν λαμβάνουν υπόψη το γεγονός ότι η μέση ισχύς εξασθένησης διαφέρει μεταξύ των συνδέσεων.

Link Budget

Με τη σωστή τοποθέτηση του αναμεταδότη, οι δύο συνδέσεις του, μια με το σταθμό βάσης και μία με τον τελικό χρήστη, καλύπτουν μικρότερες αποστάσεις και υφίστανται διαλείψεις σκίασης μικρότερης κλίμακας, συγκριτικά με τον κύριο δίαυλο. Επιπλέον, οι κεραίες του έχουν συνήθως υψηλότερο κέρδος από την κεραία του τερματικού, η οποία βελτιώνει περαιτέρω τη σύνδεση των αναμεταδοτών. Αυτό σημαίνει ότι η μέση ισχύς φέροντος που περιήλθε στο κόμβο προορισμού είναι βελτιωμένη. Σε ένα θόρυβο-περιορισμένο περιβάλλον, π.χ. σε ένα σενάριο μοναδικού χρήστη, ο βελτιωμένος σηματοθορυβικός λόγος (SNR) μπορεί να ερμηνευθεί είτε ως βελτίωση της χωρητικότητας, προσφέροντας υψηλή ταχύτητα δεδομένων σε καθορισμένη κάλυψη περιοχή, είτε ως επέκταση της κάλυψης, παρέχοντας καθορισμένο ρυθμό δεδομένων σε μεγαλύτερη περιοχή.

Ενίσχυση της χωρητικότητας σε σενάρια με πολλαπλούς χρήστες

Το trade-off μεταξύ χωρητικότητας και κάλυψης είναι περίπλοκο, γιατί περιλαμβάνει την ανακατανομή του φάσματος μεταξύ των χρηστών του συστήματος. Έτσι, η χρήση των αναμεταδοτών οδηγεί στην εξασφάλιση είτε υψηλότερου ρυθμού δεδομένων σε ίδιο αριθμό χρηστών, δηλαδή υψηλότερο λόγο σήματος προς θόρυβο συν παρεμβολή (SNIR), ή στην παροχή της ίδιας ταχύτητας δεδομένων σε περισσότερους χρήστες, δηλαδή αυστηρότερη επαναχρησιμοποίηση των πόρων. Ωστόσο, και οι δύο περιπτώσεις αντιστοιχούν στην παροχή υψηλότερης διεκπεραιωτικής ικανότητας του συστήματος ή φασματικής αποδοτικότητας για το ίδιο μέγεθος κυψέλης. Το ισοδύναμο της επέκτασης κάλυψης είναι ότι η ίδια φασματική αποδοτικότητα μπορεί να παρέχεται σε μεγαλύτερες κυψέλες με αραιές υποδομές των σταθμών βάσης.

«Δικαιοσύνη» σε δίκτυα πολλαπλών βημάτων

Μια πτυχή που σχετίζεται με την απόδοση των δικτύων πολλαπλών χρηστών είναι η ποιότητα των υπηρεσιών, που συχνά αναφέρεται ως «δικαιοσύνη». Δεδομένου ότι ο αριθμός των πόρων που είναι απαραίτητοι για την παροχή υπηρεσιών σε ένα ορισμένο επίπεδο εξαρτάται από την θέση του χρήστη, υπάρχει ένα trade-off μεταξύ της χωρητικότητας του

συστήματος (π.χ. αριθμός εξυπηρετούμενων χρηστών, συγκεντρωτική διακίνηση) και της εξάπλωσης του QoS των τερματικών, ιδιαίτερα της εξάπλωσης του ρυθμού δεδομένων των τελικών χρηστών. Η χρήση αναμεταδότη μπορεί να ενισχύσει τους ρυθμούς δεδομένων των χρηστών που διαφορετικά θα έπεφταν σε κενά κάλυψης, ώστε να υπάρχει πιο δίκαιο σύστημα διακίνησης δεδομένων. Από την άλλη πλευρά, οι πόροι που απελευθερώνονται από έναν χρήστη, μπορούν να ανακατανεμηθούν σε άλλους χρήστες, έτσι ώστε η απόδοση του συστήματος να είναι βελτιωμένη.

6.4.2 Άλλα οφέλη της αναμετάδοσης

Redundancy

Οι αναμεταδότες μπορούν να αναπτυχθούν ώστε να παρέχουν πλεονάζουσα κάλυψη. Σε πιθανή βλάβη του εξοπλισμού, η τηλεπικοινωνιακή κίνηση επαναδρομολογείται χωρίς τον επηρεασμό της κάλυψης.

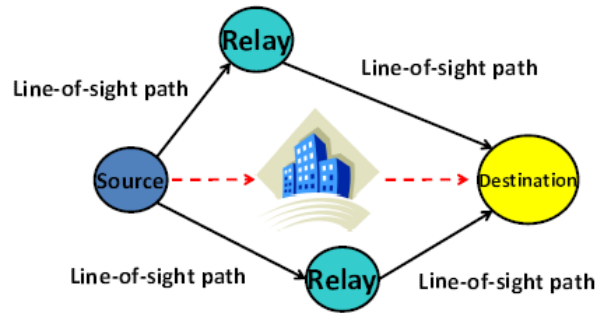
Κινητικότητα

Λόγω των διαλείψεων σκίασης, το σχήμα της κυψέλης δεν είναι αυστηρά καθορισμένο. Στην πραγματικότητα, η περιοχή κάλυψης ενός BS συχνά αποτελείται από αρκετές ασύνδετες περιοχές, ιδιαίτερα στις αστικές περιοχές. Λόγω αυτής της ασυνέχειας κάλυψης, ο αριθμός των handover είναι πολύ μεγάλος σε ένα τέτοιο περιβάλλον, ακόμη και αν η κάλυψη κάθε σταθμού βάσης είναι αρκετά μεγάλη. Οι αναμεταδότες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αναδιαμόρφωση του σχήματος της κυψέλης. Ωστόσο, εάν η περιοχή κάλυψης που δημιουργούν θεωρηθεί νέα κυψέλη, ο αριθμός των handover θα αυξηθεί.

6.5 ΣΧΗΜΑΤΑ ΑΝΑΜΕΤΑΔΟΣΗΣ

Η υποβοηθούμενη από αναμεταδότες επικοινωνία είναι μια πολλά υποσχόμενη στρατηγική για την ικανοποίηση των απαιτήσεων του τελικού χρήστη για ποιότητα υπηρεσιών σε περιπτώσεις όπου ένας συνδυασμός των τεχνικών MIMO και OFDM αποδεικνύεται ότι είναι ανεπαρκής .

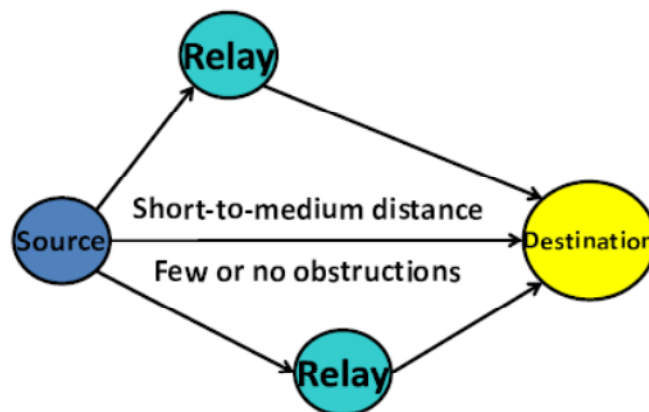
Ένα σενάριο πρακτικού ενδιαφέροντος για επικοινωνία με τη συμβολή αναμεταδότη απεικονίζεται στην εικόνα.



Εικόνα 6.6. Διάταξη όπου η απευθείας διαδρομή περιέχει εμπόδιο και η αναμετάδοση γίνεται μέσω των line-of-sight διαδρομών των αναμεταδοτών

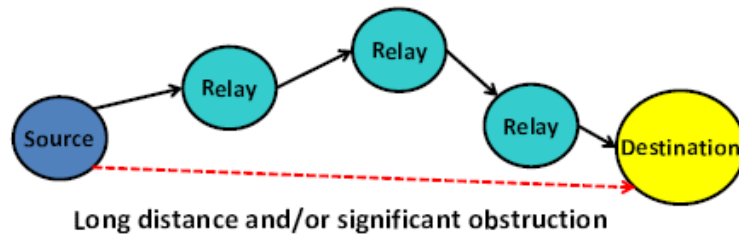
Μια πηγή επιθυμεί να επικοινωνήσει με τον προβλεπόμενο προορισμό της, ωστόσο, η άμεση διαδρομή μεταξύ τους μπλοκάρεται. Αντί της μετάδοσης διαμέσου του εμποδίου, κατά την οποία θα υπάρχουν υψηλά μεγέθη απωλειών, απορρίπτεται η απευθείας σύνδεση και η πηγή μπορεί να εκμεταλλευτεί το γεγονός ότι έχει ανεμπόδιστη line-of-sight (με οπτική επαφή) διαδρομή προς τους δύο ενδιάμεσους κόμβους αναμετάδοσης. Οι ενδιάμεσοι κόμβοι μπορούν να λάβουν το σήμα με ασύρματη μετάδοση από την πηγή και να τα επεξεργαστούν. Στη συνέχεια, δρομολογούν το πακέτο στον προορισμό, μέσω line-of-sight διαδρομών. Η αναμετάδοση έχει το πλεονέκτημα της επίτευξης συντομότερων συνδέσεων από την άμεση διαδρομή, το οποίο προτιμάται συγκριτικά με την απευθείας διαδρομή.

Ο όρος relay-assisted signaling (σηματοδοσία με τη βοήθεια αναμεταδοτών) περιλαμβάνει αρκετά διαφορετικά μοντέλα επικοινωνίας. Σε ένα από αυτά, μια πηγή μπορεί να επικοινωνήσει απευθείας με τον προβλεπόμενο προορισμό αλλά το τερματικό δεν μπορεί να αποκωδικοποιήσει το σήμα, λόγω του θορύβου ή λόγω σφάλματος εκτίμησης καναλιού από την πηγή. Στην περίπτωση αυτή, οι αναμεταδότες βοηθούν τον προορισμό στην αποκωδικοποίηση του μηνύματος.



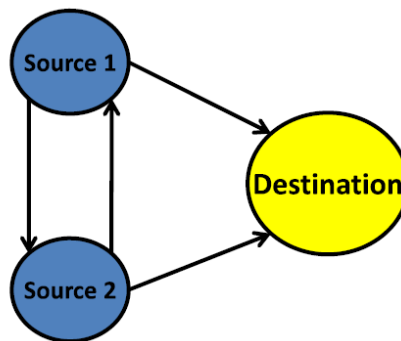
Εικόνα 6.7. Διάταξη στην οποία οι αναμεταδότες χρησιμοποιούνται εάν υπάρχουν λάθη αποκωδικοποίησης στην απευθείας διαδρομή

Η αναμετάδοση με πολλαπλές μεταβάσεις (multihop) είναι ένας άλλος τύπος υποβοηθούμενης μετάδοσης σήματος, όπου η πηγή δεν μπορεί άμεσα να διαβιβάσει το σήμα στον προορισμό της, όπως φαίνεται στο σχήμα. Η διαδρομή πηγής-προορισμού μπορεί να περιλαμβάνει εμπόδια στην άμεση σύνδεσή τους. Στο μοντέλο αυτό, η πηγή μπορεί να μεταδώσει το μήνυμά της μέσω ενδιάμεσων ασύρματων αναμεταδοτών μέχρι να φτάσει στον προβλεπόμενο προορισμό.



Εικόνα 6.8. Αναμετάδοση μέσω πολλαπλών μεταβάσεων, απουσία απευθείας σύνδεσης πομπού-δέκτη

Η αναμετάδοση συνεργατικής ποικιλομορφίας είναι ένας τρίτος τύπος υποβοηθούμενης από αναμεταδότη επικοινωνίας, όπου το δίκτυο αποτελείται από πολλαπλές πηγές, που η καθεμία έχει τα δικά της δεδομένα να μεταδώσει. Όπως φαίνεται στο σχήμα, οι πολλαπλές πηγές συνεργάζονται για να μεταδίδουν μηνύματα τους είτε σε ένα κοινό προορισμό είτε σε ένα σύνολο προορισμών. Η κατάσταση αυτή μοντελοποιεί ένα σενάριο όπου καμία πηγή δεν μπορεί μεμονωμένα να πληροί την απαίτηση για QoS για τον προβλεπόμενο προορισμό της, αλλά αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη βοήθεια ενός άλλου κόμβου-πηγή.



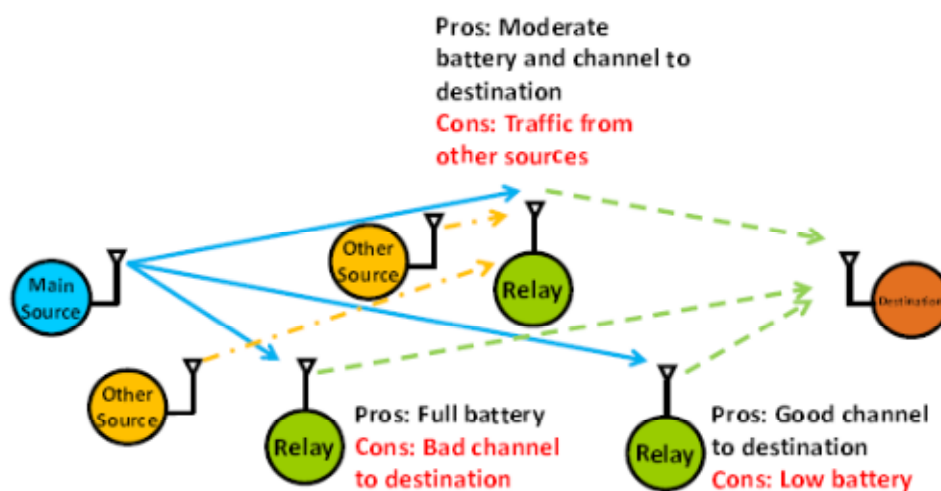
Εικόνα 6.9. Συνεργασία μεταξύ πηγών και μετάδοση μηνυμάτων στον προορισμό

6.6 ΕΠΙΛΟΓΗ ΑΝΑΜΕΤΑΔΟΤΗ

Το πρόβλημα επιλογής αναμεταδότη είναι δύσκολο και πολύπλευρο, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.10.

Σε αυτό το παράδειγμα, μία κύρια πηγή χρειάζεται να επιλέξει αναμεταδότη για να βοηθήσει τη διαβίβαση του σήματος προς τον προορισμό του. Μπορεί να προτιμηθεί αναμεταδότης με

ισχυρό κέρδος καναλιού φυσικού στρώματος προς τον προορισμό, καθώς αυτό θα διευκολύνει τον προορισμό στην ανάκτηση του αρχικού μηνύματος. Ο αναμεταδότης θα μπορούσε να είναι μέρος ενός δικτύου αισθητήρων και να έχει μικρή διάρκεια ζωής, όμως, απαιτείται η εισαγωγή ενός κύκλου ύπνου (sleep cycle) για τη διατήρηση της ισχύος. Εναλλακτικά, η πηγή μπορεί να επιλέξει αναμεταδότη με πλήρως φορτισμένη μπαταρία, ο οποίος θα έχει κέρδος καναλιού σε επίπεδο φυσικού στρώματος προς τον προορισμό σημαντικά ασθενέστερη από εκείνη της πρώτης περίπτωσης. Μια τρίτη επιλογή για την πηγή θα ήταν ένας αναμεταδότης, που έχει και ένα αξιοπρεπές κέρδος καναλιού και ένα εύλογο ποσό ισχύος της μπαταρίας. Ενδέχεται, όμως, να εξυπηρετεί και άλλες πηγές του ασύρματου δικτύου, καθυστερώντας την άμεση προώθηση του σήματος στον προορισμό.



Εικόνα 6.10. Απεικόνιση διαδικασία επιλογής αναμεταδότη

Λαμβάνοντας υπόψη τα δυνητικά οφέλη της απόδοσης και του κόστους που σχετίζονται με τη relay-assisted σηματοδότηση, είναι σαφές ότι το πρόβλημα επιλογής αναμεταδότη έχει αυξημένη σημασία. Αν και είναι δύσκολο να προσδιοριστούν μια σειρά από αναμεταδότες που βελτιστοποιούν την ισορροπία μεταξύ όλων των παραμέτρων του συστήματος, πολύτιμες πληροφορίες μπορούν να αποκτηθούν από απλές στρατηγικές επιλογής, οι οποίες επικεντρώνονται σε ένα υποσύνολο των παραμέτρων του συστήματος.

6.7 ΑΝΑΜΕΤΑΔΟΣΗ ΣΕ 4G- LTE ADVANCED

Η αναμετάδοση είναι ένα από τα χαρακτηριστικά που προτείνονται για το 4G LTE Advanced σύστημα. Ο στόχος της LTE αναμετάδοσης είναι να ενισχύσει τόσο την κάλυψη όσο και τη χωρητικότητα.

Ένας από τους βασικούς λόγους για τη χρήση της τεχνολογίας LTE είναι τα υψηλά ποσοστά των δεδομένων που μπορούν να επιτευχθούν. Ωστόσο, όλες οι τεχνολογίες μειονεκτούν

παρέχοντας μειωμένες ταχύτητες δεδομένων στην άκρη της κυψέλης, όπου τα επίπεδα σήματος είναι χαμηλότερα και τα επίπεδα παρεμβολής είναι συνήθως υψηλότερα.

Η χρήση τεχνολογιών, όπως MIMO, OFDM και προηγμένων τεχνικών διόρθωσης σφαλμάτων βελτιώνουν την απόδοση κάτω από πολλές προϋποθέσεις αλλά δεν μετριάζουν πλήρως τα προβλήματα που εμφανίζονται στην άκρη της κυψέλης. Καθώς οι ήδη χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες έχουν εξαντλήσει τις δυνατότητές τους στο έπακρο και δεν προσφέρουν βελτίωση της κατάστασης, είναι απαραίτητο να βρεθούν λύσεις που θα βελτιώνουν την απόδοση με συγκριτικά χαμηλό κόστος. Μία λύση που βρίσκεται στο στάδιο της έρευνας και προτείνεται είναι η χρήση του LTE αναμεταδότη.

6.7.1 Εισαγωγή στους LTE αναμεταδότες

Η LTE αναμετάδοση διαφοροποιείται από την περίπτωση χρήσης ενός επαναλήπτη, ο οποίος απλά αναμεταδίδει το σήμα. Κάθε αναμεταδότης θα λαμβάνει, θα αποδιαμορφώνει και θα αποκωδικοποιεί τα δεδομένα, θα έχει τη δυνατότητα διόρθωσης λαθών και, στη συνέχεια, θα επανεκπέμπει το νέο σήμα. Με τον τρόπο αυτό, ενισχύεται η προσπάθεια διατήρησης της ποιότητας του σήματος, το οποίο δεν υφίσταται παραμόρφωση από χαμηλό σηματοθορυβικό λόγο κατά τη χρήση επαναλήπτη.

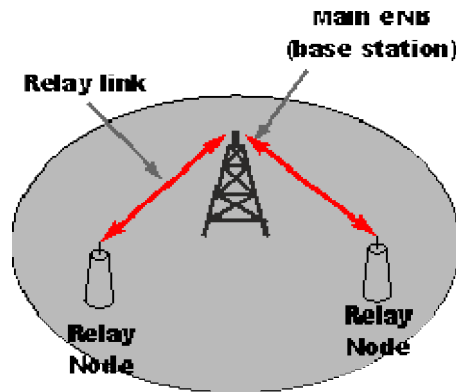
Για έναν LTE αναμεταδότη, οι τελικοί χρήστες επικοινωνούν με τον κόμβο αναμετάδοσης, ο οποίος επικοινωνεί με το σταθμό βάσης. Οι κόμβοι αναμετάδοσης υποστηρίζουν προαιρετικά λειτουργικότητα υψηλότερου στρώματος, δηλαδή δεν περιορίζονται μόνο σε λειτουργικότητες χαμηλότερων στρωμάτων, όπως καθαρή μετάδοση, αλλά μπορούν να αποκωδικοποιήσουν τα δεδομένα προερχόμενα από το σταθμό βάσης και να επανακωδικοποιήσουν δεδομένα πριν αυτά αποσταλούν στον τελικό χρήστη.

Η δομή του συστήματος αναμετάδοσης των LTE δε βασίζεται στη δημιουργία δικτύου στηριζόμενο σε ενσύρματο κορμό, αντίθετα, οι αναμεταδότες, καταλαμβάνοντας σταθερές θέσεις, προωθούν τα μηνύματα μεταξύ κινητών τερματικών και σταθμών βάσης με τη βοήθεια multihop επικοινωνίας.

6.7.2 Πλεονεκτήματα στη χρήση αναμετάδοσης στα LTE

Αύξηση της πυκνότητας του δικτύου

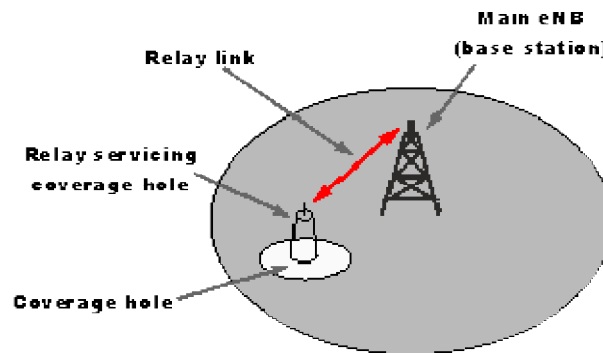
Οι LTE κόμβοι αναμετάδοσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολύ εύκολα σε καταστάσεις, όπου στόχος είναι η αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου, αυξάνοντας τον αριθμό των eNBs, ώστε να εξασφαλιστούν καλύτερα επίπεδα σήματος για όλους τους χρήστες. Η εγκατάσταση των LTE αναμεταδοτών δεν είναι δύσκολη και δεν απαιτεί ξεχωριστή δομή δικτύου, ενώ η τοποθέτησή τους δεν γίνεται σε δυσπρόσιτα σημεία αλλά σε βολικές θέσεις, όπως λάμπες φωτισμού στο δρόμο και τοίχους.



Εικόνα 6.11. Αύξηση πυκνότητας δικτύου

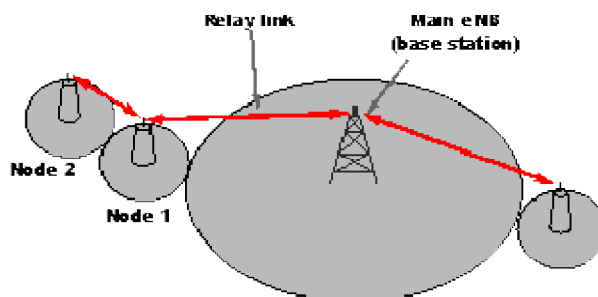
Επέκταση του δικτύου κάλυψης

Η τεχνική της χρήσης αναμεταδοτών αποτελεί καλή λύση για την παροχή υπηρεσιών σε σημεία στα οποία υπήρχαν κενά κάλυψης, χωρίς την εγκατάσταση επιπλέον σταθμού βάσης.



Εικόνα 6.12. Επέκταση κάλυψης δικτύου και εξυπηρέτηση κενών κάλυψης

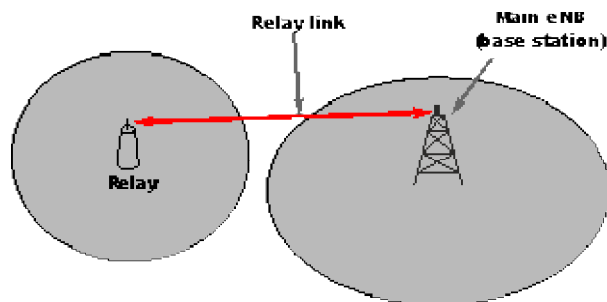
Επιπλέον, οι LTE κόμβοι αναμετάδοσης, δίνουν τη δυνατότητα αύξησης της κάλυψης έξω από την κύρια περιοχή εξυπηρέτησης του σταθμού βάσης, με την τοποθέτηση κεραιών υψηλού κέρδους σε κατάλληλη θέση ώστε να διατηρηθούν οι καλές συνθήκες επικοινωνίας.



Εικόνα 6.13. Επέκταση κάλυψης

Γρήγορο roll-out του δικτύου

Χωρίς την ανάγκη εγκατάστασης σταθερού δικτύου, ή, ενδεχομένως την εγκατάσταση μεγάλων κεραιών, οι LTE αναμεταδότες προσφέρουν μια πολύ εύκολη μέθοδο επέκτασης της κάλυψης κατά τη διάρκεια πρόωρου roll-out του δικτύου. Δηλαδή, στην αρχή της λειτουργίας οι LTE αναμεταδότες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τις ανάγκες του δικτύου, μέχρι να γίνουν μελέτες και δοκιμές και να αντικατασταθούν από σταθερούς σταθμούς βάσης και να διαμορφωθεί η τελική εικόνα του δικτύου.



Εικόνα 6.14. Fast Roll-out για ανάπτυξη του δικτύου

6.7.3 LTE αναμετάδοση full & half duplex

Ο LTE κόμβος αναμετάδοσης μπορεί να λειτουργήσει σε ένα από τα δύο σενάρια:

Half-Duplex

Ένα half-duplex σύστημα παρέχει επικοινωνία και στις δύο κατευθύνσεις, αλλά όχι ταυτόχρονα - οι εκπομπές πρέπει να πολυπλέκονται στο χρόνο. Για έναν LTE αναμεταδότη, αυτό απαιτεί προσεκτικό προγραμματισμό. Απαιτείται ο RN κόμβος να συντονίζει την κατανομή των πόρων του με τα τερματικά, στο uplink, και το σταθμό βάσης, στο downlink. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση στατικών λύσεων εκ των προτέρων σχεδιασμένων, ή πιο δυναμικών, οι οποίες, όμως, απαιτούν μεγαλύτερη νοημοσύνη και επικοινωνία των δικτύων για μεγαλύτερη ευελιξία και βελτιστοποίηση.

Full Duplex

Για full duplex, τα συστήματα είναι σε θέση να μεταδίδουν και να λαμβάνουν την ίδια στιγμή. Για LTE κόμβους αναμετάδοσης η διαδικασία γίνεται στην ίδια συχνότητα. Ο κόμβος λαμβάνει το σήμα, το επεξεργάζεται και στη συνέχεια το διαβιβάζει στην ίδια συχνότητα με μια μικρή καθυστέρηση, μικρότερης διάρκειας από τη διάρκεια του πλαισίου. Για την επίτευξη full duplex, πρέπει να υπάρχει καλή απομόνωση μεταξύ των κεραιών εκπομπής και λήψης.

Κατά την εξέταση της πλήρους ή half duplex αναμετάδοσης σε συστήματα LTE υπάρχει ένα trade-off μεταξύ της απόδοσης και του κόστους του αναμεταδότη. Η απόδοση του δέκτη είναι

κρίσιμη, καθώς η απομόνωση της κεραίας πρέπει να είναι αρκετά υψηλή ώστε να επιτρέπεται η ταυτόχρονη μετάδοση και λήψη όταν μόνο ένα κανάλι χρησιμοποιείται.

6.7.4 LTE τύποι αναμεταδότη

Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι κόμβων LTE αναμετάδοσης. Ωστόσο, πριν από τον καθορισμό του κατάλληλου τύπου που θα προτιμηθεί για τις ανάγκες κάθε δικτύου, είναι απαραίτητο να εξετάσουμε τους διαφορετικούς τρόπους λειτουργίας.

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό γνώρισμα του LTE κόμβου αναμετάδοσης είναι η φέρουσα συχνότητα στην οποία λειτουργεί. Υπάρχουν δύο τρόποι λειτουργίας:

- **Inband** : Ο κόμβος αναμετάδοσης χαρακτηρίζεται ως "Inband" εάν η σύνδεση μεταξύ του σταθμού βάσης και του κόμβου είναι στην ίδια συχνότητα φέροντος με τη σύνδεση αναμεταδότη-τερματικού.
- **Outband** : Για outband κόμβους αναμετάδοσης LTE, οι σύνδεσμοι σταθμός βάσης-αναμεταδότης και αναμεταδότης-τελικός χρήστης έχουν διαφορετικές συχνότητες φέροντος.

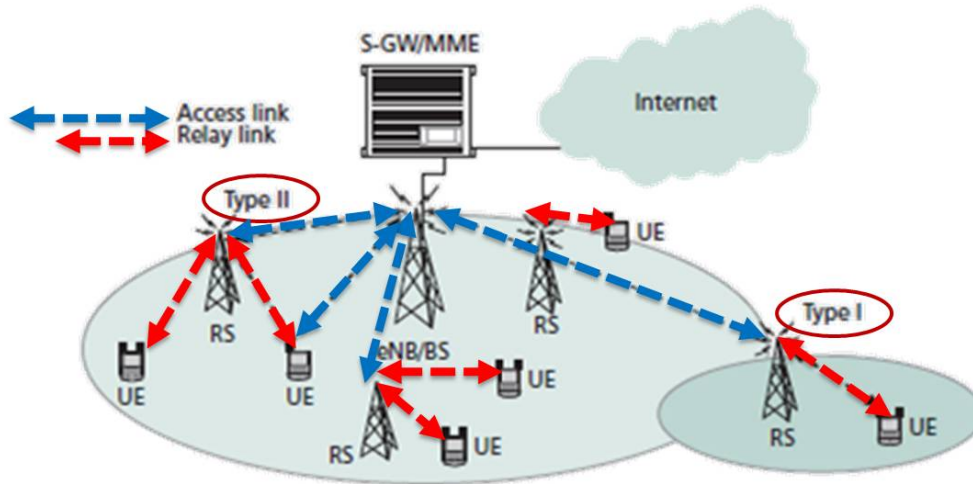
Για τους κόμβους αναμετάδοσης LTE, υπάρχουν δύο βασικά είδη που προτείνονται, αν και υπάρχουν υποδιαιρέσεις σε αυτούς τους βασικούς τύπους:

- **Type 1** LTE κόμβος αναμετάδοσης: Στην κατηγορία αυτή, οι αναμεταδότες ελέγχουν με τη δική τους «ταυτότητα» τις κυψέλες τους, συμπεριλαμβανομένης της μετάδοσης των δικών τους καναλιών συγχρονισμού και συμβόλων αναφοράς. Ο τύπος 1 φαίνεται σαν να υποστηρίζει το πρότυπο 8 eNB και το πρότυπο 8 UE's, γεγονός που εξασφαλίζει συμβατότητα με παλαιότερες εκδόσεις. Ο βασικός τύπος 1 αναμεταδότη LTE παρέχει ημιαμφίδρομες και inband μεταδόσεις.

Υπάρχουν δύο ακόμη επιμέρους είδη σε αυτή την κατηγορία:

- **Τύπος 1.α:** Αποτελεί outband κόμβο αναμετάδοσης, με κοινά στοιχεία με τον τύπο 1, με μοναδική διαφοροποίηση τη λειτουργία του σε σύστημα πλήρους διπλεξίας, δηλαδή λαμβάνει και εκπέμπει την ίδια στιγμή.
- **Τύπος 1.β:** Πρόκειται για inband κόμβο. Παρέχει επαρκή απομόνωση μεταξύ των κεραίων που χρησιμοποιούνται για τις BS-RN και τις RN-UE συνδέσεις, γεγονός που επιτυγχάνεται με κεραίες μεγάλης κατευθυντικότητας και εξειδικευμένες τεχνικές ψηφιακής επεξεργασίας σήματος, αν και υπάρχουν επιπτώσεις κόστους στην εφαρμογή του. Η απόδοση αυτών των κόμβων αναμένεται να είναι παρόμοια με εκείνη των femtocells.
- **Τύπος 2** κόμβος αναμετάδοσης LTE:
Οι LTE κόμβοι αναμετάδοσης δεν έχουν δική τους ταυτότητα στην κυψέλη και μοιάζουν ακριβώς όπως η κύρια κυψέλη, με αποτέλεσμα κανένα τερματικό να μην μπορεί να διακρίνει εάν ένας κόμβος είναι σταθμός βάσης ή αναμεταδότης. Οι πληροφορίες ελέγχου μεταδίδονται από το σταθμό βάσης και τα δεδομένα των τελικών χρηστών από τους αναμεταδότες.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται σχηματικά η διαφορά των δύο τύπων αναμεταδοτών.



Εικόνα 6.15. Λειτουργία κωφελωτού δικτύου με τους δύο τύπους αναμεταδοτών

7. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Οι τεχνολογίες που έχουν αναπτυχθεί για τη μετάδοση των σημάτων σε ασύρματο τηλεπικοινωνιακό περιβάλλον και η διάταξη του τηλεπικοινωνιακού συστήματος εντός της κυψέλης στοχεύουν στην αποτελεσματικότητα των επικοινωνιών και στη παροχή καλύτερης ποιότητας υπηρεσιών. Οι LTE αναμεταδότες, αποτελώντας μέρος της τηλεπικοινωνιακής διάταξης συμβάλλουν στην πλήρωση των κενών κάλυψης της κυψέλης και προσφέρουν κάλυψη στα άκρα αυτής αυξάνοντας την πυκνότητα του δικτύου. Παράλληλα, οι επαυξημένες λειτουργίες, εκτός της ενίσχυσης και αναμετάδοσης, που τους ανατίθενται, ελέγχοντας τα πακέτα δεδομένων για την εξασφάλιση της ορθής μετάδοσής τους, βελτιώνουν την ποιότητα υπηρεσιών που προσφέρεται.

Σε ένα αστικό περιβάλλον, το πλήθος των εμποδίων που παρεμβάλλονται ανάμεσα σε πομπό και δέκτη είναι μεγάλο και η φύση αυτών ποικίλλει, δημιουργώντας προβλήματα στη μετάδοση των σημάτων καθότι οι απώλειες που εισάγονται είναι υψηλές, εξασθενώντας το σήμα. Η βελτίωση της αξιοπιστίας του δικτύου επιτυγχάνεται με τη χρήση αναμεταδοτών.

Αναγνωρίζοντας τη συμβολή της λειτουργίας των αναμεταδοτών στο σύγχρονο ασύρματο τηλεπικοινωνιακό δίκτυο, στα πλαίσια της διπλωματικής, προσομοιώθηκε η τηλεπικοινωνιακή κίνηση ενός LTE συστήματος σε μικρο-κυψελωτό αστικό περιβάλλον, το οποίο αποτελείται από ένα σταθμό βάσης στο κέντρο της κυψέλης και τρεις LTE-A αναμεταδότες. Πρόκειται για out-band αναμεταδότες, οι οποίοι ενδέχεται να εκπέμπουν προς το δέκτη σε διαφορετικό κανάλι από ότι ο πομπός, ανάλογα με τα κανάλια που είναι διαθέσιμα ή τις απαιτήσεις της συγκεκριμένης σύνδεσης, και διαχωρίζουν τα κανάλια uplink και downlink, με τη διαδρομή της καθόδου (downlink) να γίνεται, στην παρούσα εργασία, αντικείμενο μελέτης. Στη λειτουργία του συγκεκριμένου είδους αναμεταδοτών συμβάλλει η εξασφάλιση επιπλέον φάσματος από τη μετάβαση στη ψηφιακή τηλεόραση. Η τηλεπικοινωνιακή κίνηση αφορά τον αριθμό των χρηστών που λαμβάνουν το επιθυμητό σήμα τελικά είτε από το σταθμό βάσης είτε από αναμεταδότη, με κύριο μέγεθος, πάνω στο οποίο βασίστηκε ο προσδιορισμός της, να αποτελεί η συνολική ισχύς μετάδοσης του σήματος είτε ως μοναδικό κριτήριο είτε ως παράμετρος άλλων μεγεθών, όπως ο ρυθμός μετάδοσης.

Κύριος σκοπός τέθηκε ο προσδιορισμός της βέλτιστης θέσης των LTE αναμεταδοτών στην κυψέλη για τη μεγιστοποίηση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης, με κριτήρια την ελάχιστη συνολική ισχύ του συστήματος αλλά και το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης, ώστε να επιτευχθεί βελτίωση στην ποιότητα υπηρεσιών του ασύρματου τηλεπικοινωνιακού περιβάλλοντος. Επιπλέον, οι αναμεταδότες δημιουργούν γύρω τους μια ξεχωριστή περιοχή στην οποία έχει δοθεί συγκεκριμένο εύρος ζώνης. Η δημιουργία μια τέτοιας διάταξης συμβάλλει στη μείωση της απόστασης επαναχρησιμοποίησης της συχνότητας σε ένα κυψελωτό σύστημα.

7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο προσδιορισμός της θέσης των αναμεταδοτών προσεγγίζεται στις προσομοιώσεις μέσω της εφαρμογής διάφορων σεναρίων.

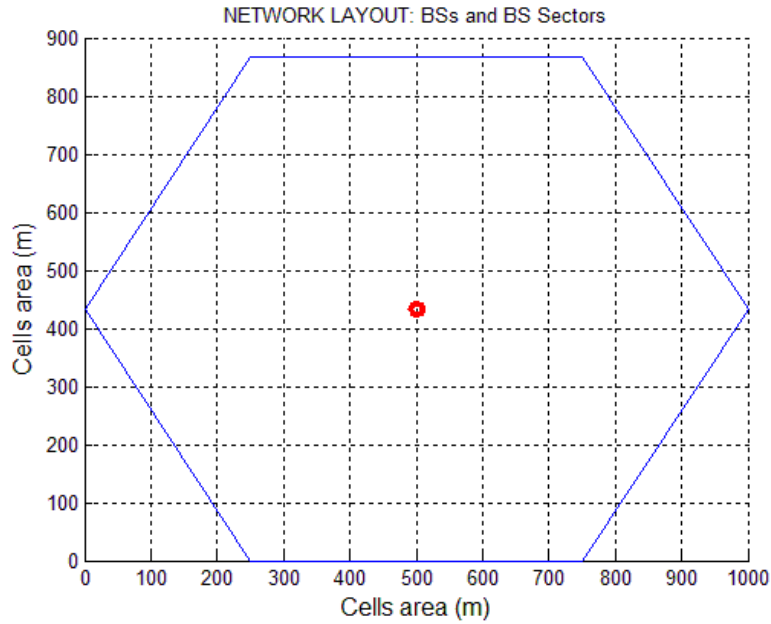
Αρχικά, στα δύο πρώτα σενάρια, ο υπολογισμός των απωλειών ισχύος του συστήματος βασίστηκε στο γενικό μοντέλο απωλειών, που αποτελεί γενικευμένο τρόπο υπολογισμού της ισχύος, όπως περιγράφεται και στο σχετικό κεφάλαιο ακολούθως. Με κριτήριο τη συνολική κατανάλωση ισχύος του συστήματος και το ρυθμό μετάδοσης, προσδιορίστηκε η αποτελεσματικότερη θέση των αναμεταδοτών, η οποία συγκεντρώνει και το μεγαλύτερο αριθμό χρηστών.

Στη συνέχεια, για τα υπόλοιπα σενάρια με SISO σύστημα κεραιών αλλά και με MIMO, ο υπολογισμός του pathloss βασίζεται στις ακριβείς εξισώσεις για το μικροκυψελωτό περιβάλλον της προσομοίωσης. Σε αντίθεση με το γενικό μοντέλο απωλειών, στην προκειμένη περίπτωση, οι απώλειες εξαρτώνται εκτός από την απόσταση, από φαινόμενα όπως η σκίαση και οι διαλείψεις, επιδράσεις που διαμορφώνουν την τελική τιμή των απωλειών, η οποία υπολογίζεται από το πρόγραμμα winner II. Ως κριτήριο προσδιορισμού της θέσης των αναμεταδοτών τέθηκε αρχικά η απόσταση, ώστε να επιβεβαιωθούν τα αποτελέσματα με βάση τα προηγούμενα σενάρια. Έπειτα, μετρήθηκε ο αριθμός των χρηστών των αναμεταδοτών σε κάθε πιθανή θέση με κριτήριο την ελάχιστη κατανάλωση ισχύος του συστήματος. Στο επόμενο σενάριο, τόσο η απόσταση όσο και η ισχύς λαμβάνεται υπόψη, με επιπρόσθετα στοιχεία το εύρος ζώνης που τελικά διαθέτει ο αναμεταδότης για τη σύνδεσή του με το δέκτη, αφού μέρος αυτού χρησιμοποιείται για την κάλυψη των δικών του αναγκών, αλλά και τη μείωση της ισχύος λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης, όπου πάλι υπολογίζεται η τηλεπικοινωνιακή κίνηση συναρτήσει της θέσης των αναμεταδοτών. Στο τελευταίο σενάριο λήφθηκαν δεδομένα τηλεπικοινωνιακής κίνησης για σταθερές θέσεις αναμεταδοτών, οι οποίες επιλέχθηκαν με βάση τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων των προηγούμενων σεναρίων. Οι δύο τελευταίες υλοποιούνται και για συστήματα MIMO.

7.2 ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

7.2.1 Διάταξη προσομοίωσης

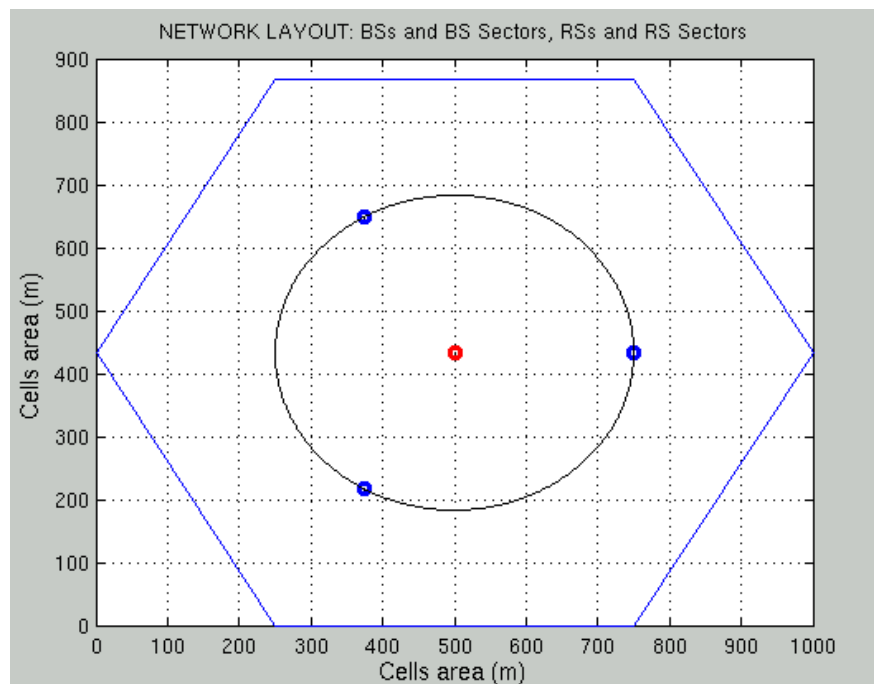
Στο πείραμα υλοποιήθηκαν δυο διαφορετικές διατάξεις. Σε πρώτη φάση, η διάταξη του πειράματος περιλαμβάνει μια εξαγωνική κυψέλη με έναν σταθμό βάσης (eNodeB) στο κέντρο της και τα κινητά τερματικά καταλαμβάνουν τυχαίες θέσεις μέσα στην κυψέλη. Όλοι οι χρήστες αιτούνται στο σταθμό βάσης για την εξυπηρέτησή τους.



Διάταξη 1- Κυψέλη με ένα σταθμό βάσης στο κέντρο

Στη δεύτερη περίπτωση, η προηγούμενη διάταξη, εκτός από τον κόμβο βάσης τοποθετημένο στο κέντρο, περιλαμβάνει τρεις αναμεταδότες σε μεταβλητή απόσταση από το σταθμό βάσης και κινητά τερματικά σε τυχαίες θέσεις μέσα στην κυψέλη. Οι αναμεταδότες μεταβάλλουν τη θέση τους, διατηρώντας, ωστόσο, σταθερό τον προσανατολισμό τους εντός της κυψέλης. Κάποιοι από τους χρήστες εξυπηρετούνται απευθείας από το σταθμό βάσης και οι υπόλοιποι επιλέγουν διαδρομή μέσω των αναμεταδοτών.

Και στις δύο περιπτώσεις που εξετάζονται, οι χρήστες βρίσκονται σε συνεχή κίνηση, με σταθερή ταχύτητα, γεγονός που για κάθε χρονική στιγμή μεταβάλλει τις συντεταγμένες της θέσης τους. Από τη μελέτη των ανωτέρω διατάξεων θα γίνει προσέγγιση της βέλτιστης θέσης των αναμεταδοτών για την καλύτερη εξυπηρέτηση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης.



Διάταξη 2- Κυψέλη με ένα σταθμό βάσης στο κέντρο και τρεις αναμεταδότες

7.2.2 Περιβάλλον- Σενάριο προσομοίωσης

Ο ακόλουθος πίνακας δείχνει, συνοπτικά, τα δεδομένα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση.

Παράμετροι	Τιμές
LTE Mode	FDD
eNodeB ισχύς λειτουργίας	46 dBm
Ισχύς λειτουργίας αναμεταδότη	23 dBm
Ταχύτητα Χρηστών	60 km/h
Συχνότητα Φέροντος	2 GHz
Εύρος ζώνης καναλιού	10 MHz
Θέσεις κινητών τερματικών	Τυχαίες εντός της κυψέλης με διαφορετικές ανάγκες σε εύρος ζώνης και ισχύ σήματος
Path Loss Model	Urban Micro-cell
Multipath Channel Model	ITU vehicular
Αριθμός κεραιών σε κάθε κόμβο	1 / 4
Ακτίνα Εξαγωνικής Κυψέλης, R	1000 m

Πίνακας 7.1- Δεδομένα του συστήματος

Η τεχνική FDD δηλώνει ότι η μετάδοση και λήψη σημάτων επιτυγχάνεται ταυτόχρονα χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικές συχνότητες (full duplex). Καθίσταται, έτσι, δυνατή η ταυτόχρονη λήψη και μετάδοση, καθώς πομπός και δέκτης δεν χρησιμοποιούν την ίδια

συχνότητα και χρησιμοποιούν διαφορετικά κανάλια. Στο πείραμα λαμβάνεται υπόψη μόνο η μετάδοση στην κάτω ζεύξη (downlink).

Η μέγιστη ισχύς λειτουργίας του σταθμού βάσης καθορίζεται στα 46 dBm, τιμή που αποτελεί την καθορισμένη τιμή λειτουργίας κόμβου βάσης στα συστήματα LTE στην κάτω ζεύξη για κάθε χρήστη. Το εύρος ζώνης καναλιού, το οποίο για το πείραμα αποτελεί και το εύρος ζώνης της διάταξης, επιλέγεται 10 MHz. Οι χρήστες είναι κινούμενοι, με ταχύτητα καθορισμένη από τις παραμέτρους του προγράμματος στα 60 km/h.

Ο υπολογισμός της ισχύος, όπως θα αναφερθεί και στη συνέχεια, στηρίχθηκε και στο απλό μοντέλο διάδοσης, αλλά, επίσης, και στις εξισώσεις υπολογισμού των απωλειών για αστικό μικρο-κυψελωτό περιβάλλον. Αφορά αστικό περιβάλλον εξαγωνικό ή τύπου Manhattan, που χρησιμοποιήθηκε στο δεύτερο σκέλος της προσομοίωσης, σε δίκτυο με μικρές κυψέλες, τα όρια των οποίων καθορίζονται από τα γύρω κτίρια, καθώς πομπός και δέκτης βρίσκονται εκτός κτιρίου.

7.2.3 Κριτήρια επιλογής θέσης αναμεταδοτών

Στις προσομοιώσεις για την εύρεση της βέλτιστης θέσης αναμεταδότη, το κριτήριο καθορισμού της διαφοροποιείται και ακολουθούνται τέσσερις διαφορετικές μέθοδοι, οι οποίες βασίζονται τα αποτελέσματά τους σε μια από τις τρεις διαφορετικές παραμέτρους,

α) την απαιτούμενη από τον πομπό ισχύ μετάδοσης,

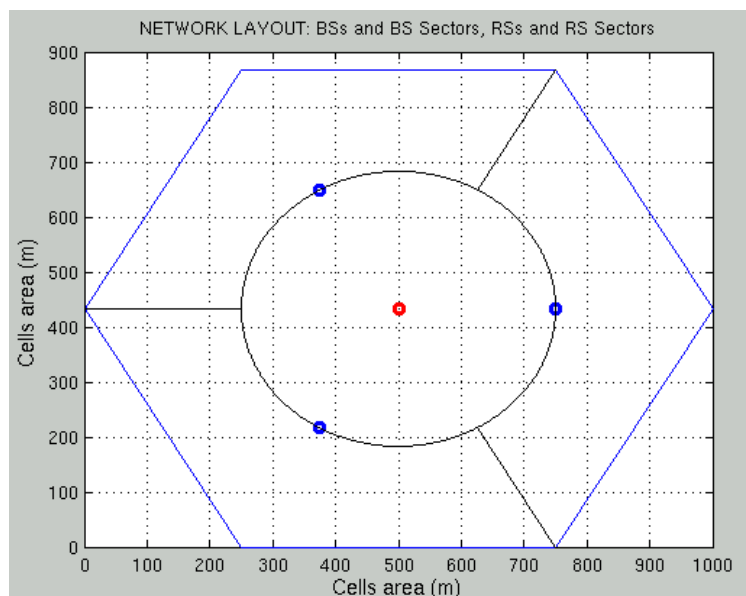
β) τον απαιτούμενο ρυθμό μετάδοσης και

γ) τη θέση του χρήστη σε καθορισμένες περιοχές.

- Η πρώτη μέθοδος στηρίζεται στην ιδέα της επέκτασης της κυψέλης και της εξυπηρέτησης των κενών κάλυψης, που δημιουργούνται εντός αυτής. Από το σύνολο των χρηστών της κυψέλης, όσοι χρειάζονται για την εξυπηρέτησή τους ισχύ μικρότερη του ανώτατου ορίου λειτουργίας του σταθμού βάσης, 46 dBm, θα λάβουν το σήμα μετάδοσης από το σταθμό βάσης. Σε αντίθετη περίπτωση, αιτούνται για εξυπηρέτηση στους αναμεταδότες. Εάν, η ισχύς μετάδοσης υπερβαίνει τα 23 dBm, ανώτατο όριο λειτουργίας των αναμεταδοτών, οι χρήστες δεν εξυπηρετούνται. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί την απαιτούμενη ισχύ μετάδοσης ως κριτήριο για την κατανομή των χρηστών.
- Η δεύτερη μέθοδος βασίζεται στην ιδέα της χρήσης των αναμεταδοτών για μείωση της συνολικής κατανάλωσης ισχύος του συστήματος και μόνο. Στο πλαίσιο της προσέγγισης αυτής, οι χρήστες έχοντας απαίτηση μια συγκεκριμένη στάθμη σήματος λήψης, ανιχνεύουν την απαιτούμενη ισχύ για την εξυπηρέτησή τους από την πλευρά τόσο του σταθμού βάσης όσο και των αναμεταδοτών και επιλέγουν τη διαδρομή που θα οδηγήσει στη μικρότερη κατανάλωση ισχύος κατά τη μετάδοση. Σε αυτή τη μέθοδο, κριτήριο αξιολόγησης είναι, επίσης, η ισχύς μετάδοσης.
- Η τρίτη μέθοδος προσανατολίζεται στη δημιουργία τεσσάρων γεωγραφικών ξεχωριστών περιοχών εντός της ίδιας κυψέλης. Η μια θα οριοθετείται από έναν νοητό κύκλο, τον οποίο δημιουργούν οι αναμεταδότες, ενώ οι υπόλοιπες τρεις

εξυπηρετούνται από κάθε έναν από τους τρεις αναμεταδότες και μόνο. Σκοπός της μελέτης μιας τέτοιας διάταξης, αποτελεί η μελέτη της λειτουργίας του συστήματος, όταν από τη θέση των αναμεταδοτών δημιουργούνται περιοχές που εξυπηρετούνται αυστηρά από το σταθμό βάσης ή τους αναμεταδότες. Στο διάγραμμα 2 φαίνεται ο χωρισμός της κυψέλης σε δύο περιοχές. Ο διαχωρισμός κατανέμει του χρήστες σε δύο κατηγορίες:

- οι εσωτερικοί χρήστες, σε ακτίνα r_{int} γύρω από το σταθμό βάσης, οι οποίοι εξυπηρετούνται απευθείας από αυτόν
- οι εξωτερικοί χρήστες έξω από αυτήν την ακτίνα, οι οποίοι εξυπηρετούνται από τους αναμεταδότες.



Διάγραμμα 7.1- Χωρισμός της κυψέλης σε διακριτές περιοχές

- Η τέταρτη μέθοδος χρησιμοποιεί ως κριτήριο επιλογής το ρυθμό μετάδοσης που εξασφαλίζεται με τη χρήση αναμεταδότη ή με τη χρήση του σταθμού βάσης. Ο ρυθμός μετάδοσης προκύπτει από τον τύπο

$$R(\text{SNR}, W) = W * \log(1 + \text{SNR}) \quad (14)$$

$\text{SNR} = \frac{P_r}{N}$, με P_r την ισχύ λήψης και N το θόρυβο. Η ισχύς λήψης, ωστόσο, δεν είναι η αρχική απαιτούμενη. Το σήμα φτάνει στο δέκτη από διαφορετικές οδούς λόγω της πολυδιαδρομικής διάδοσης. Κάθε διαδρομή χαρακτηρίζεται από μια συγκεκριμένη καθυστέρηση διάδοσης και από τη σχετική ισχύ, που ισούται με το λόγο της ισχύος που μεταδίδεται από το μονοπάτι προς το σύνολο της ισχύος του σήματος. Εάν η καθυστέρηση υπερβαίνει μια συγκεκριμένη τιμή, το σήμα της διαδρομής θεωρείται παρεμβολή και αφαιρείται από το σύνολο ισχύος στο δέκτη.

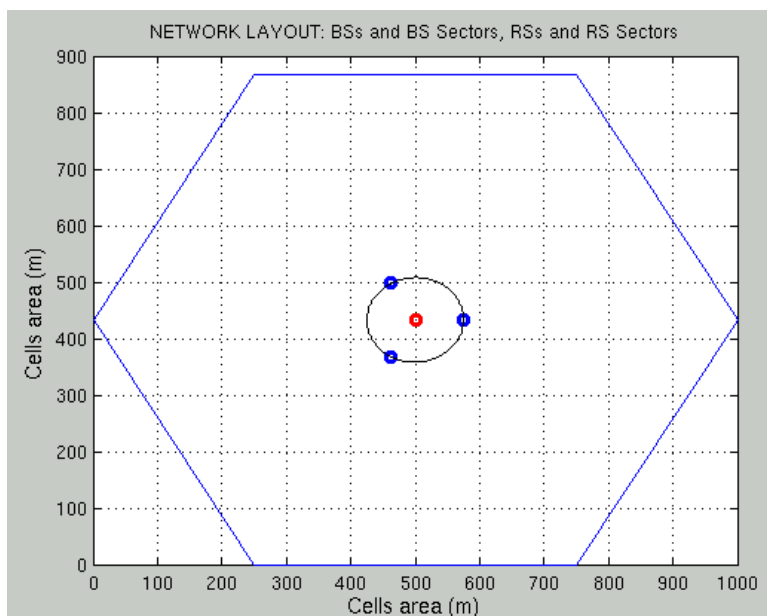
7.2.4 Μεταβολή στις θέσεις των αναμεταδοτών

Οι αναμεταδότες που χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση δεν καταλαμβάνουν σταθερές θέσεις. Η θέση τους μεταβάλλεται κάθε 25 m από το κέντρο έως την άκρη της κυψέλης. Η

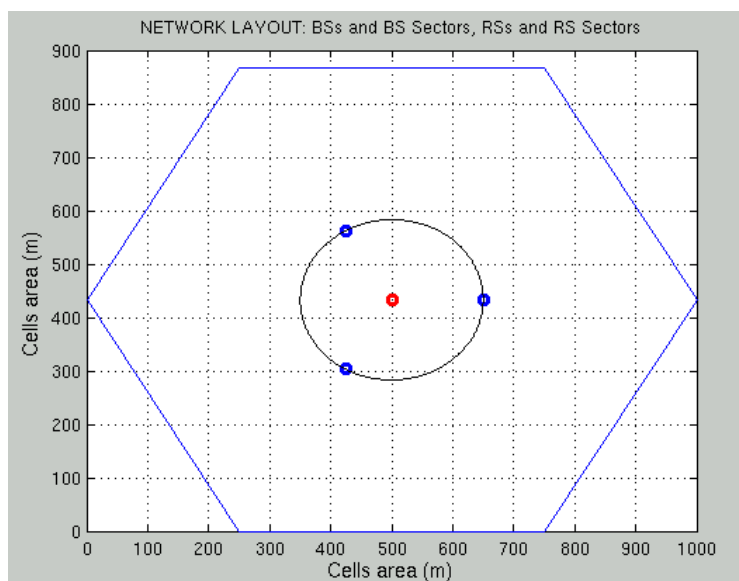
θέση τους θα πρέπει να μεταβάλλεται σε νοητή ευθεία πάνω στην ακτίνα της κυψέλης. Για το λόγο αυτό και οι γωνίες προσανατολισμού καθορίζονται ως $\theta_1=0^\circ$, $\theta_2=120^\circ$ και $\theta_3=120^\circ$.

Ενδεικτικά, η εύρεση των συντεταγμένων των αναμεταδοτών προκύπτει από τη γεωμετρία της κυψέλης. Θεωρώντας τη διάταξη του σχήματος εύκολα διακρίνεται ο χωρισμός σε δύο μέρη, τον κυκλικό δίσκο και το υπόλοιπο μέρος της κυψέλης.

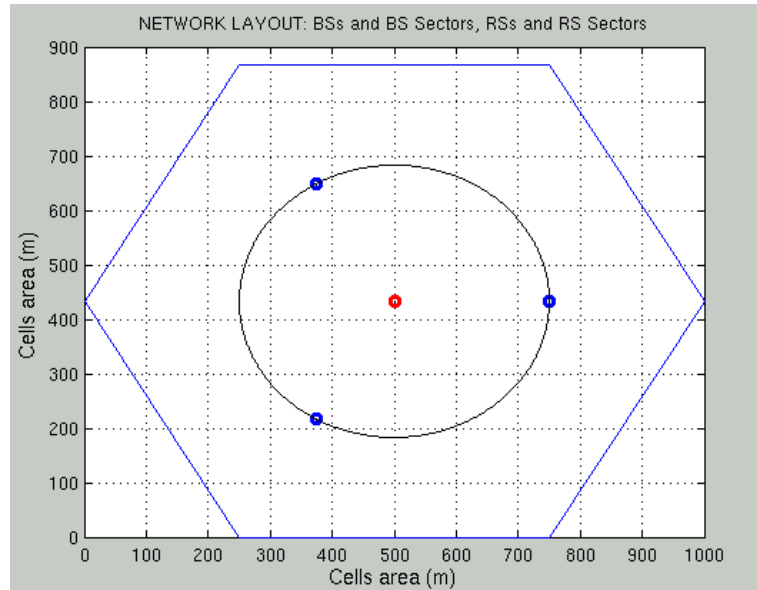
Στις ακόλουθες εικόνες φαίνεται η θέση των αναμεταδοτών σε απόσταση 75 m, 150m, 250 m και 400 m από το κέντρο της κυψέλης.



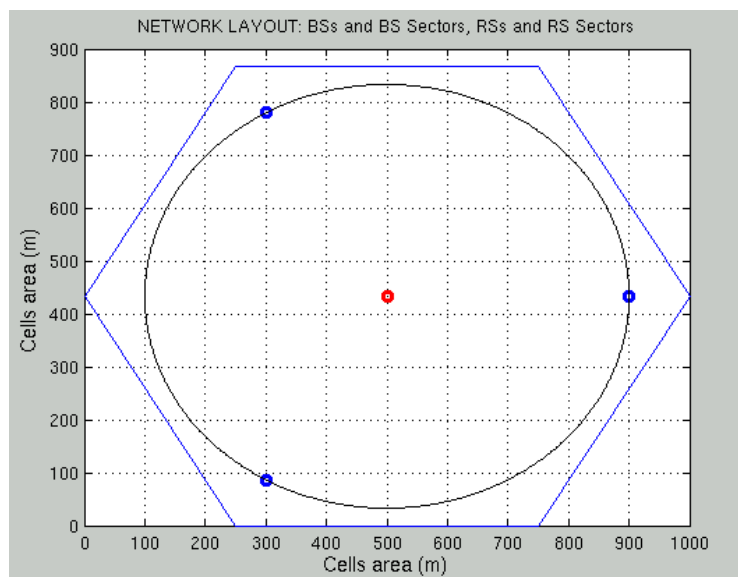
Διάγραμμα 7.2-Θέση αναμεταδοτών σε απόσταση 75 m από το κέντρο



Διάγραμμα 7.3-Θέση αναμεταδοτών σε απόσταση 150 m από το κέντρο



Διάγραμμα 7.4-Θέση αναμεταδοτών σε απόσταση 250 m από το κέντρο



Διάγραμμα 7.5-Θέση αναμεταδοτών σε απόσταση 400 m από το κέντρο

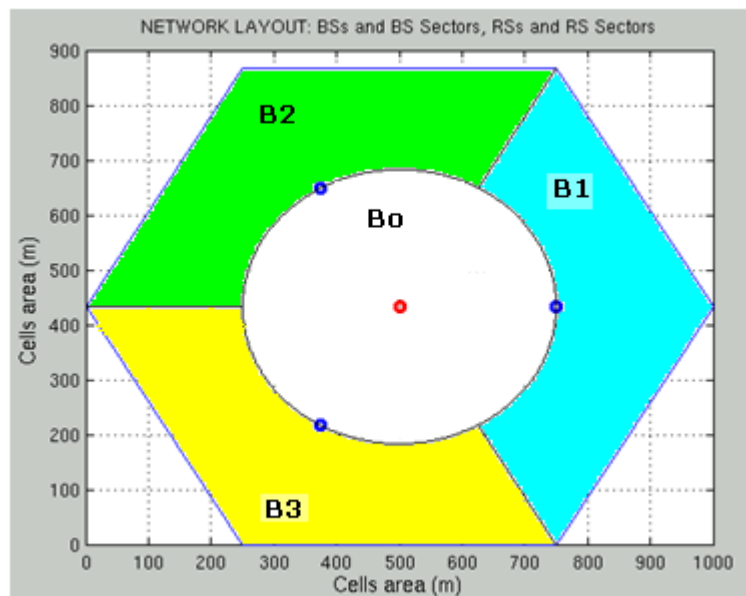
Οι αναμεταδότες βρίσκονται στην περιφέρεια του κύκλου. Η ακτίνα R , που ενώνει το κέντρο με κάθε κορυφή τίθεται ίση με 1000 m. Έστω, η ακτίνα του κύκλου που σχηματίζουν οι αναμεταδότες είναι ίση με 250 m, μια χρονική στιγμή. Θεωρώντας καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων, εύκολα, συνάγεται ότι ο πρώτος αναμεταδότης βρίσκεται στη θέση $(750, 250\sqrt{3})$. Οι άλλοι δύο αναμεταδότες είναι συμμετρικοί ως προς τον άξονα y , επομένως, οι συντεταγμένες τους είναι $(375, 375\sqrt{3})$ και $(375, 125\sqrt{3})$.

7.2.5 Χωρισμός του εύρους ζώνης

Ο ρόλος του αναμεταδότη δεν περιορίζεται μόνο στην ενίσχυση και επανεκπομπή του λαμβανόμενου σήματος. Εφόσον οι υπηρεσίες που προσφέρονται είναι πολύπλοκες και βασίζονται στην προώθηση των πακέτων θα πρέπει να συμβάλλουν και στον έλεγχο της ορθής και γρήγορης μετάδοσής του. Οι αναμεταδότες είναι επιφορτισμένοι με την αποστολή να αυξήσουν τόσο το throughput όσο και την περιοχή κάλυψης.

Συγκεκριμένα, μία κατηγορία αναμεταδοτών στοχεύει στην επέκταση της περιοχής κάλυψης στους κινούμενους κόμβους πέρα από το βεληνεκές της βάσης και στην περαιτέρω ανάπτυξη των κυψελών που αποτελούν κύρια δίοδο πρόσβασης των χρηστών στην ασύρματη επικοινωνία. Σε δεύτερη κατηγορία υπάγονται αναμεταδότες, οι οποίοι βοηθούν τους χρήστες μέσω της βάσης να διορθώσουν την ποιότητα των υπηρεσιών και τη χωρητικότητα της σύνδεσης. Ωστόσο, για να ανταπεξέλθει χρησιμοποιεί μηχανισμούς προώθησης δεδομένων που κοστίζουν ισχύ και εύρος ζώνης στον αναμεταδότη, εύρος ζώνης το οποίο αναπληρώνεται από τον κόμβο προορισμού. Στις προσομοιώσεις θα θεωρηθεί η χρήση του δεύτερου τύπου αναμεταδότη.

Στο διάγραμμα 7.6, φαίνεται ο διαμοιρασμός του εύρους ζώνης B μιας κυψέλης στο σταθμό βάσης και στους αναμεταδότες.



Διάγραμμα 7.6- Διαμοιρασμός εύρους ζώνης B στην κυψέλη

Περιορισμός εσωτερικών χρηστών

Εάν δ είναι ο συνολικός αριθμός των χρηστών στην κυψέλη,

$$n_o = A_{int} * \delta \quad (15)$$

είναι ο αριθμός των εσωτερικών χρηστών και

$$n_1=n_2=n_3=\delta \cdot \frac{A_{tot}-A_{int}}{3} \quad (16)$$

ο αριθμός των χρηστών κάθε αναμεταδότη.

Ο συνολικός αριθμός των χρηστών προκύπτει

$$n_{tot}=n_0+2 \cdot \sum_{r=1}^3 n_r \quad (17)$$

αφού θεωρείται μία σύνδεση για τους εσωτερικούς χρήστες και δύο για σύνδεση με τη βοήθεια του αναμεταδότη, εφόσον περιλαμβάνει τις διαδρομές BS-RS και RS-MS.

Το εύρος ζώνης για την εσωτερική περιοχή προκύπτει

$$B_0=B \frac{n_0+\sum_{r=1}^3 n_r}{n_0+2 \cdot \sum_{r=1}^3 n_r}=B \frac{1}{2-A_{int}/A_{tot}} \quad (18)$$

και για την εξωτερική περιοχή, για κάθε αναμεταδότη, θεωρώντας ίση κατανομή,

$$B_r=\frac{B}{3} \frac{1-A_{int}/A_{tot}}{2-A_{int}/A_{tot}} \quad (19)$$

Στη μέθοδο αυτή το απαιτούμενο εύρος ζώνης για τη λειτουργία των αναμεταδοτών καλύπτεται από το εύρος ζώνης της εσωτερικής περιοχής, B_0 . Αυτό οδηγεί σε αύξηση της καταναλισκόμενης ισχύος από το σταθμό βάσης για τη σύνδεση με τους χρήστες, ώστε να αντισταθμίσει την απώλεια εύρους ζώνης και να διατηρήσει τη ποιότητα του σήματος.

Θεωρώντας σταθερό τον αριθμό των χρηστών στην κυψέλη, στην περίπτωση που η εσωτερική περιοχή είναι μικρή, $r_{int}=0$, το διατιθέμενο στην περιοχή αυτή εύρος ζώνης είναι μικρό όπως προκύπτει από τον τύπο (17). Οι εξωτερικοί χρήστες επομένως, θα είναι περισσότεροι σε αριθμό. Ο σταθμός βάσης θα πρέπει να ικανοποιεί τις απαιτήσεις για εύρος ζώνης και των τριών αναμεταδοτών για την αυξημένη κίνηση που έχουν να διαχειριστούν. Επομένως, αυξάνεται και η συνολική ενέργεια.

Περιορισμός εξωτερικών χρηστών

Στην κατηγορία αυτή, το εύρος ζώνης για την εσωτερική περιοχή προκύπτει

$$B_0=B \frac{n_0}{n_0+2 \cdot \sum_{r=1}^3 n_r}=B \frac{A_{int}/A_{tot}}{2-A_{int}/A_{tot}} \quad (20)$$

και για την εξωτερική περιοχή για κάθε αναμεταδότη, θεωρώντας ίση κατανομή για κάθε αναμεταδότη

$$B_r=\frac{2B}{3} \frac{1-A_{int}/A_{tot}}{2-A_{int}/A_{tot}} \quad (21)$$

Αντίθετα με την πρώτη μέθοδο, το εύρος ζώνης των εσωτερικών χρηστών είναι εξασφαλισμένο, αλλά το εύρος ζώνης κάθε εξωτερικής περιοχής θα πρέπει να καλύπτει τις ανάγκες της σύνδεσης του αναμεταδότη με το σταθμό βάσης.

Όταν η εσωτερική περιοχή είναι μεγαλύτερη, το B_r είναι μικρό και χρειάζεται μεγαλύτερο ποσό ενέργειας για να καλύψει και τη σύνδεση (0, r), το κέρδος της οποίας είναι μικρότερο όσο πιο κοντά ο αναμεταδότης είναι στο r_{int} , και τις συνδέσεις των αναμεταδοτών με τους χρήστες.

Ο διαχωρισμός των περιοχών και η ανάθεση συγκεκριμένου εύρους ζώνης διευκολύνει την ανάθεση διαφορετικών καναλιών συχνότητας στο σύστημα.

7.2.6 Κινητικότητα χρηστών

Οι χρήστες εντός της κυψέλης δεν παραμένουν σταθεροί. Κινούνται με σταθερή ταχύτητα $MsVelocity = 60\text{km/h}$. Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, δεν αλλάζουν μόνο οι θέσεις των αναμεταδοτών. Η διάταξη μελετάται και για διάφορες χρονικές στιγμές, από 1 sec έως 100 sec, γεγονός που μεταβάλλει τη θέση των χρηστών, $(MsXY_x, MsXY_y)$.

Για τον καθορισμό των τελικών συντεταγμένων κάθε φορά χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις της μηχανικής και λαμβάνεται υπόψη ο προσανατολισμός των χρηστών, $MsDirection$. Έτσι, η τελική θέση προκύπτει από τις εξισώσεις:

$$MsXY_x = MsXY_x + MsVelocity * \cos(MsDirection) * (time) \quad (22)$$

$$MsXY_y = MsXY_y + MsVelocity * \sin(MsDirection) * (time) \quad (23)$$

Υπάρχει πιθανότητα κάθε χρονική στιγμή κάποιος από τους χρήστες να βγαίνει εκτός του ορίου της κυψέλης. Στην περίπτωση αυτή, η εξυπηρέτησή τους δεν γίνεται από τους σταθμούς της κυψέλης και ο χρήστης δε λαμβάνεται υπόψη.

7.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΙΣΧΥΩΝ

Για τις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκαν δύο μοντέλα υπολογισμού της ισχύος. Γενικά, η τελική εκτίμηση της ισχύος γίνεται μέσω της σχέσης

$$P_{trans} = P_{received} + Losses \quad (24)$$

με P_{trans} η ισχύς μετάδοσης, $P_{received}$ η ισχύς λήψης του χρήστη και $Losses$ οι απώλειες του συστήματος, υπολογισμένες κάθε φορά για το περιβάλλον μετάδοσης που μελετάται. Η παραπάνω σχέση είναι σε dB.

Η ισχύς λήψης και στα δύο μοντέλα είναι η ίδια και ταυτίζεται με τις απαιτήσεις των χρηστών για ισχύ λήψης. Η ισχύς επιλέγεται από το διάστημα $[-80, -70]$ dBm.

Οι απώλειες διάδοσης υπολογίζονται με δύο τρόπους, οριοθετώντας τη διαφορά μεταξύ των δυο μοντέλων που χρησιμοποιούνται. Στα πρώτα σενάρια που υλοποιούνται χρησιμοποιείται το γενικό μοντέλο απωλειών, ως μια πιο θεωρητική προσέγγιση του προβλήματος. Στα υπόλοιπα, χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις οι απώλειες, όπως αυτές προέκυψαν από το πρόγραμμα της winner II για το συγκεκριμένο περιβάλλον που επιλέχθηκε, το αστικό μικρο-κυβελωτό.

Ακολούθως, παρουσιάζονται συνοπτικά και τα δυο μοντέλα υπολογισμού της ισχύος.

7.3.1 Επιλογή διαδρομής μετάδοσης- Γενικό μοντέλο απωλειών διάδοσης

Η επιλογή της διαδρομής, αρχικά, καθορίζεται από το απλό μοντέλο διάδοσης. Η γενική εξίσωση που χρησιμοποιείται είναι :

$$P_R = P_T K \left(\frac{d_o}{d} \right)^\gamma \quad (25)$$

Σε dB η απώλεια διάδοσης γράφεται

$$L(\text{dB}) = 10 \log(P_R/P_T) = K(\text{dB}) - 10\gamma \log\left(\frac{d_o}{d}\right) \quad (26)$$

όπου K σταθερά που εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της κεραίας, d_o η απόσταση από την οποία αρχίζει η μακρινή περιοχή της κεραίας και γ ο εκθέτης απωλειών. Η παράμετρος K, τίθεται ίση με την απόσβεση ελευθέρου χώρου σε απόσταση d_o

$$K(\text{dB}) = 20 \log\left(\frac{\lambda}{4\pi d_o}\right) \quad (27)$$

Στο πείραμα λαμβάνεται υπόψη μόνο η προώθηση των δεδομένων στην κάτω ζεύξη, διαδικασία που δεν επηρεάζεται από τυχόν κίνηση στην άνω ζεύξη.

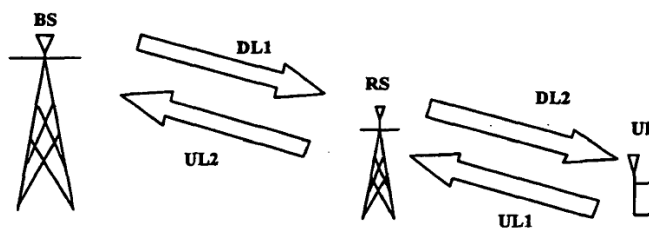
Κάθε σύνδεση χαρακτηρίζεται από το κέρδος σύνδεσης (link gain). Όπως αναφέρθηκε, στην πραγματικότητα, η ισχύς δεν ενισχύεται κατά τη διαδρομή πομπού- δέκτη. Αντίθετα, λόγω απωλειών διάδοσης και θορύβου το σήμα φτάνει εξασθενημένο στο δέκτη. Το κέρδος σύνδεσης δίνεται από τον τύπο

$$\rho_{ij} = k d_{ij}^{-\gamma} \quad (28)$$

Επομένως, για κάθε διαδρομή η λαμβανόμενη ισχύς είναι της μορφής

$$P_R = P_T \rho_{ij} \quad (29)$$

Στον κώδικα matlab, με δεδομένη την ισχύ στην οποία λειτουργούν ο αναμεταδότης και ο χρήστης υπολογίζεται η απαιτούμενη ισχύς την οποία θα πρέπει να παρέχει ο σταθμός βάσης, καθώς και την ισχύ για όλη τη διαδρομή BS-RS-MS, την οποία θα πρέπει να παρέχει ο αναμεταδότης.



Εικόνα 7.1- Downlink και Uplink συνδέσεις μεταξύ BS-RS-UE

7.3.2 Επιλογή διαδρομής μετάδοσης- Απώλειες μικρο-κυψελωτού αστικού περιβάλλοντος

Η μέγιστη ισχύς λειτουργίας του σταθμού βάσης καθορίζεται στα 46 dBm, τιμή που αποτελεί την καθορισμένη τιμή λειτουργίας κόμβου βάσης στα LTE στην κάτω ζεύξη.

Η κεραία κάθε χρήστη χαρακτηρίζεται από μια συγκεκριμένη τιμή ισχύος, κάτω από την οποία το σήμα που λαμβάνεται δεν έχει την επιθυμητή ποιότητα, χαρακτηριστικό που αποκαλείται ευαισθησία του δέκτη. Σύμφωνα με τον πίνακα υπολογισμού των παραμέτρων της σύνδεσης για τα LTE, ή αλλιώς ισολογισμός σύνδεσης (link budget), η ευαισθησία του δέκτη είναι -106,4 dBm. Ωστόσο, λαμβάνεται ένα περιθώριο στην ισχύ του δέκτη της τάξης των 20-30 dBm. Η επιθυμητή ισχύς λήψης στη συγκεκριμένη περίπτωση προσομοίωσης επιλέγεται από το χρήστη και επιλέχθηκε να είναι στο διάστημα [-80, -70 dBm]. Για κάθε ένα χρήστη επιλέχθηκε τυχαία μια από τις τιμές του διαστήματος και ορίστηκε ως η ισχύς λήψης P_r του δέκτη.

Η εξίσωση των απωλειών μετάδοσης μεταβάλλεται ανάλογα με το σενάριο που χρησιμοποιείται. Στην περίπτωση του αστικού μικροκυψελωτού περιβάλλοντος δίνεται από τον τύπο

$$PL=40\log(d_1)+9.45-17.3\log_{10}(h_{BS}')-17.3\log_{10}(h_{MS}')+2.7\log_{10}\left(\frac{f_c}{5}\right) \quad (30)$$

όπου $A = 22.7$, $B = 41.0$, $C = 20$ για LOS συνδέσεις και

$$PL=\min(PL(d_1, d_2), PL(d_2, d_1)) \quad (31)$$

$$PL(d_k, d_l)=PL_{LOS}(d_k)+20-10n_f\log_{10}(d_l)+3\log_{10}(f_c/5) \quad (32)$$

$$n_f = \max(2.8 - 0.0024d_k, 1.84) \quad (33)$$

για NLOS συνδέσεις. Για NLOS συνδέσεις ο παράγοντας σκίασης είναι ίσος με 4 ενώ για LOS συνδέσεις ίσος με 3.

Το πρόγραμμα της winner II συνυπολογίζει τον παράγοντα σκίασης και βγάζει τελική τιμή του path loss.

Η ισχύς που απαιτείται από τον πομπό είναι

$$P_{tx}=P_r+a*PL \quad (34)$$

Η παράμετρος a λαμβάνει τιμές 0,4 έως 1. Η αύξηση της τιμής της, αυξάνει τη σημασία των απωλειών για τον πομπό, ο οποίος αναγκάζεται να διαθέσει μεγαλύτερο ποσό ενέργειας στη σύνδεση.

Η ισχύς υπολογίζεται για κάθε κινητό τερματικό. Οι χρήστες υπολογίζουν την ισχύ που απαιτεί κάθε αναμεταδότης αλλά και ο σταθμός βάσης για να τους μεταδώσει το σήμα και ανάλογα με τον αναμεταδότη ή με το σταθμό βάσης μέσω του οποίου ελαχιστοποιείται η συνολική ισχύς, δηλαδή το άθροισμα των ισχύων για τις συνδέσεις σταθμού βάσης-αναμεταδότη και αναμεταδότη-κινητού τερματικού, γίνεται η τελική επιλογή σταθμού εξυπηρέτησης. Για τους χρήστες με άμεση σύνδεση στο σταθμό βάσης, εάν η ισχύς

λειτουργίας υπερβεί το ανώτατο όριο των 46 dBm δεν θα εξυπηρετηθούν. Αντίστοιχα, εάν η ισχύς λειτουργίας του αναμεταδότη υπερβαίνει τα 23 dBm οι χρήστες απορρίπτονται.

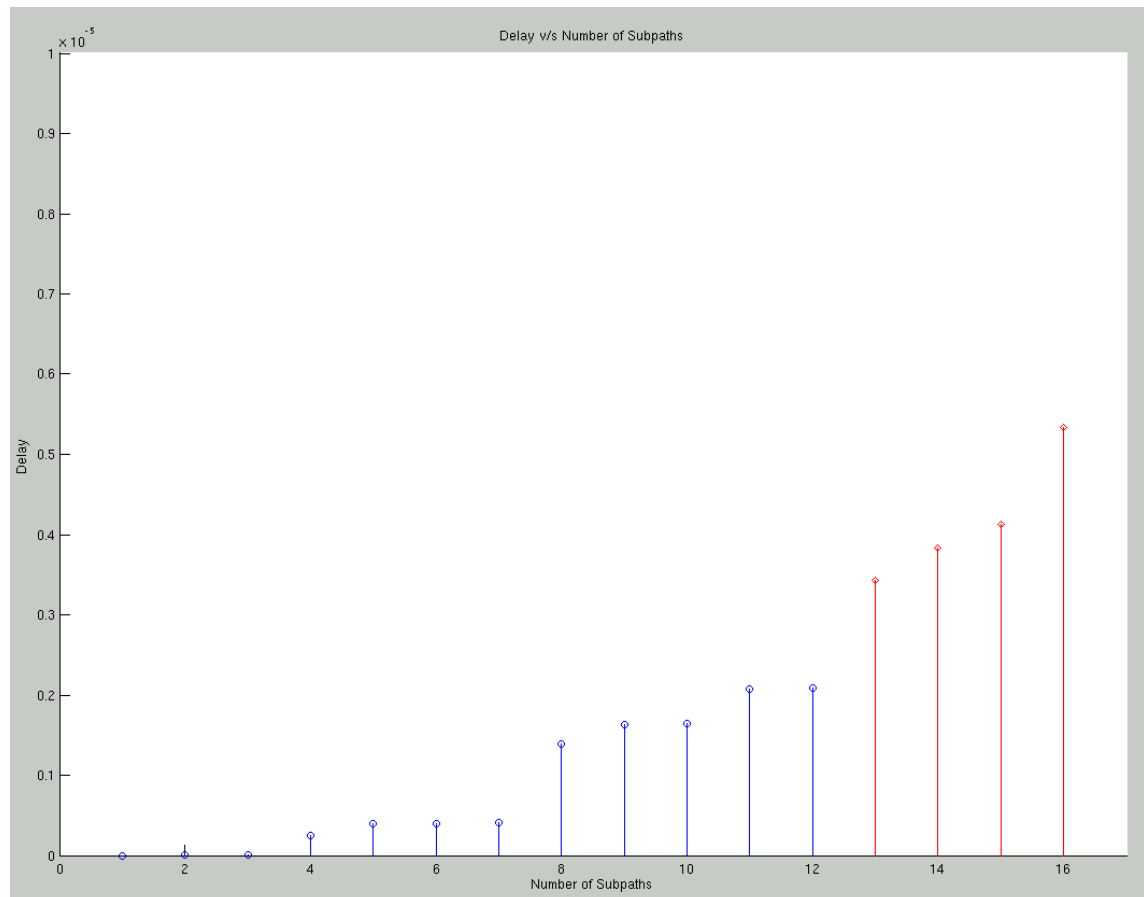
7.3.3 Υπολογισμός τελικής ισχύος στο δέκτη λόγω καθυστερήσεων σε κάθε διαδρομή μετάδοσης του σήματος

Στην εφαρμογή της τέταρτης μεθόδου που περιγράφεται παρακάτω, λαμβάνεται υπόψη σε μεγαλύτερο βαθμό η πολυδιαδρομική διάδοση του σήματος. Το εκπεμπόμενο σήμα, λόγω φυσικών εμποδίων στην άμεση διαδρομή πομπού- δέκτη, καθόσον θεωρείται NLOS μετάδοση, δε μεταδίδεται απευθείας στο δέκτη, αλλά διαχωρίζεται στους παρεμβαλλόμενους σκεδαστές και φτάνει στο δέκτη από διαφορετικές διαδρομές.

Σε κάθε μια από τις διαδρομές σημειώνεται διαφορετική καθυστέρηση κατά τη μετάδοση του σήματος. Στην απευθείας διαδρομή, η καθυστέρηση ορίζεται στα 0 sec και στις υπόλοιπες διαδρομές η τιμή που υπολογίζεται είναι η τιμή της καθυστέρησης της συγκεκριμένης διαδρομής ως προς την απευθείας διαδρομή. Στην περίπτωση που η καθυστέρηση υπερβαίνει μια καθορισμένη χρονική τιμή, το σήμα της συγκεκριμένης διαδρομής θεωρείται παρεμβολή στο δέκτη και η σχετική ισχύς του αφαιρείται από τη συνολική ισχύ που καταλήγει στο κινητό τερματικό. Η τελική λαμβανόμενη ισχύς θα είναι μικρότερη από την εκπεμπόμενη.

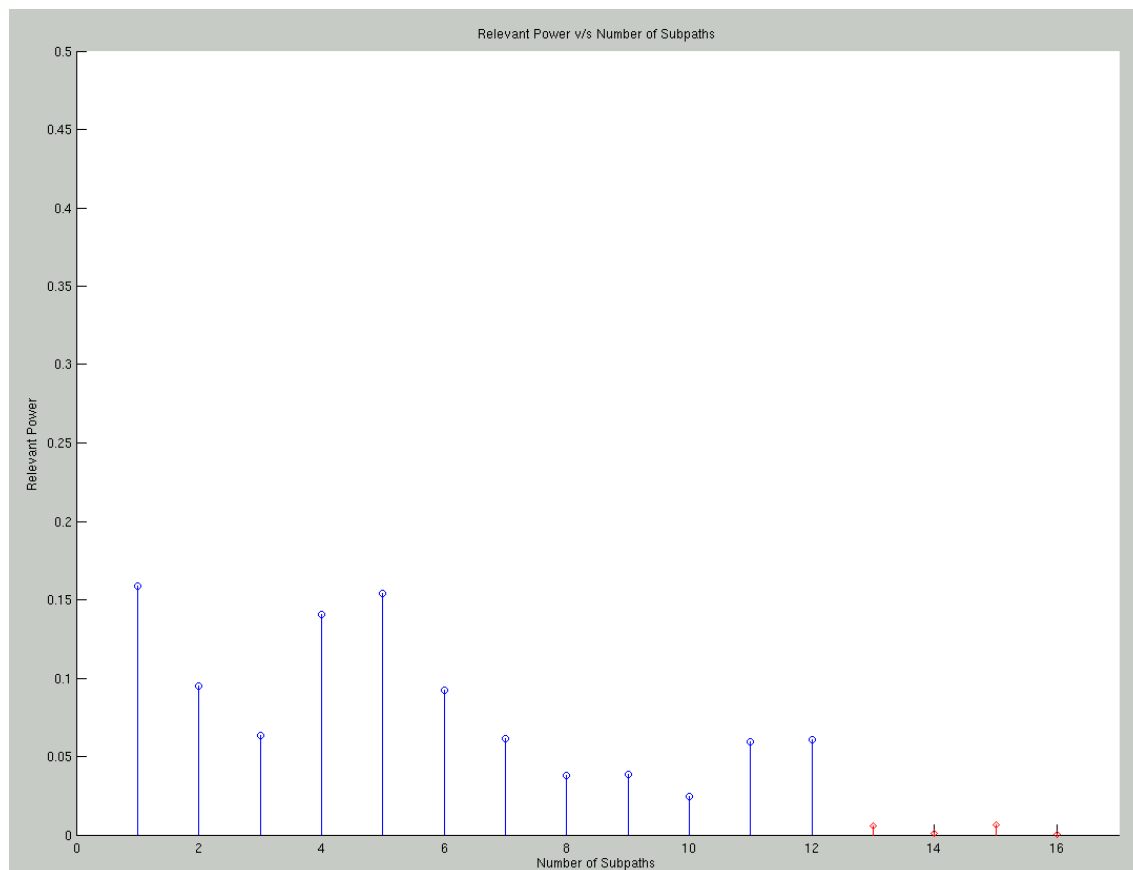
Το περιβάλλον που επιλέχθηκε είναι αστικό μικρο-κυψελωτό και οι συνδέσεις θεωρήθηκαν NLOS. Από το λογισμικό της winner II για το συγκεκριμένο σενάριο, ο αριθμός των διαδρομών στις οποίες διαχωρίζεται το σήμα είναι 16. Η χρονική τιμή που επιλέχθηκε ως όριο επιλογής συμβαλλόμενης ή παρεμβαλλόμενης διαδρομής ορίστηκαν τα 2,4 μs, τιμή που αποτελεί τη μέση χρονική καθυστέρηση κατά τη μετάδοση στο σενάριο που επιλέχθηκε.

Από το σύστημα των 200 χρηστών επιλέγεται ένας χρήστης για τον οποίο γίνεται ο υπολογισμός της χρονικής καθυστέρησης κάθε διαδρομής. Στο επόμενο διάγραμμα, αποτυπώνεται η καθυστέρηση αυτή. Με μπλε χρώμα αναπαριστώνται οι διαδρομές με καθυστέρηση μικρότερη του ορίου, άρα συμβαλλόμενες διαδρομές, και με κόκκινο χρώμα οι διαδρομές με μεγάλη καθυστέρηση, οι οποίες ανιχνεύονται ως παρεμβολή στο δέκτη.



Διάγραμμα 7.7 – Χρονική καθυστέρηση σε κάθε διαδρομή του σήματος

Στο διάγραμμα 7.7 φαίνονται οι 12 πρώτες διαδρομές να έχουν ανεκτή καθυστέρηση ώστε να μην έχουν καταλυτική επίδραση στην παραμόρφωση του σήματος, σε αντίθεση με τις 4 τελευταίες, οι οποίες και προκαλούν αλλοίωση του αρχικού σήματος στο δέκτη. Τα αποτελέσματα έχουν άμεσο αντίκτυπο στην τελική ισχύ του λαμβανόμενου σήματος. Ακολούθως παρουσιάζεται το διάγραμμα σχετικής ισχύος- διαδρομής



Διάγραμμα 7.8- Σχετική ισχύς σε κάθε διαδρομή του σήματος

Στο διάγραμμα 7.8, με μπλε χρώμα οι σχετικές ισχύεις των διαδρομών συμβάλλουν στο δέκτη και αθροίζονται στην τελική ισχύ αυτού. Οι σχετικές ισχύεις των παρεμβαλλόμενων διαδρομών στην προκειμένη περίπτωση είναι μικρές, ωστόσο, ενδέχεται να μειώνουν την ισχύ σε βαθμό ώστε με τις δεδομένες απώλειες περιβάλλοντος, που στο συγκεκριμένο σενάριο είναι αρκετά μεγάλες, να αλλοιώνουν το σήμα και ο δέκτης να μην εξυπηρετείται.

7.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

7.4.1 Προσέγγιση θέσης αναμετάδοσης σε σύστημα με έναν χρήστη με χρήση του γενικού μοντέλου απωλειών

Σε πρώτη φάση, με καθαρά θεωρητικό προσανατολισμό, θα γίνει η εκτίμηση της θέσης ενός αναμεταδότη για ένα χρήστη, τοποθετημένο στην άκρη της κυψέλης .

Ο κώδικας προσομοίωσης περιλαμβάνει δύο μέρη:

- Δεδομένων των δυσμενέστερων συνθηκών που υφίσταται ο χρήστης στην άκρη της κυψέλης, στο πρώτο μέρος υπολογίζεται για τον απομακρυσμένο χρήστη η ισχύς που

απαιτείται για τη μετάδοση του σήματος από το σταθμό βάσης απουσία αναμεταδότη.

- Στο δεύτερο μέρος, η μετάδοση χρησιμοποιεί αναμεταδότη. Η ισχύς υπολογίζεται σε δύο φάσεις. Σε πρώτη φάση υπολογίζεται η ισχύς που απαιτείται από το σταθμό βάσης για μετάδοση στον αναμεταδότη, ενώ, σε δεύτερη φάση γίνεται ο υπολογισμός της απαιτούμενης ισχύος από τον αναμεταδότη προς το κινητό τερματικό στην άκρη της κυψέλης. Το άθροισμα των δυο ισχύων αντιπροσωπεύει τη συνολική ισχύ, η οποία εξαρτάται από τις αποστάσεις BS-RS και RS-MS. Σε διάστημα 0 έως 1000 και κάθε 25 μέτρα τοποθετείται ο αναμεταδότης και υπολογίζεται σε κάθε θέση η συνολική ισχύς. Στο σημείο όπου η ισχύς ελαχιστοποιείται εξάγεται από τον επαναληπτικό βρόχο και αποτελεί το σημείο τοποθέτησης του αναμεταδότη.

Οι πιθανές θέσεις προσδιορίστηκαν θεωρώντας το σταθμό βάσης, τον αναμεταδότη και τον κινητό χρήστη ευθυγραμμισμένους πάνω στην ακτίνα του εξαγώνου. Η επιλογή βασίστηκε σε δύο λόγους :

- Από τη γεωμετρία της κυψέλης προκύπτει ότι η ακτίνα του εξαγώνου αντιπροσωπεύει τη μεγαλύτερη απόσταση κέντρου- άκρου. Η ευθυγράμμιση προς οποιαδήποτε άλλη απόσταση δεν θα ήταν εξίσου αποδοτική και δε θα αντιπροσώπευε τη χειρότερη περίπτωση, στην οποία το τερματικό βρίσκεται σε μία από τις κορυφές του εξαγώνου.
- Εφόσον οι αναμεταδότες είναι ίδιοι ως προς την ισχύ λειτουργίας, παρ' όλο που οι θέσεις των τερματικών δεν μπορούν να προβλεφθούν, θα πρέπει θεωρητικά εξ αρχής να μοιράζονται την τηλεπικοινωνιακή κίνηση. Επομένως, ο χώρος που εξυπηρετούν χωρίζεται σε τρία ίσα μέρη, τόσο σε επίπεδο εμβαδού όσο και σε επίπεδο εύρους ζώνης. Η επιλογή της θέσης του αναμεταδότη φαίνεται να είναι στο κέντρο της υποπεριοχής αυτής.

7.4.2 Προσέγγιση θέσης αναμεταδότη με κριτήριο το ρυθμό μετάδοσης με χρήση του γενικού μοντέλου απωλειών

Στην προσομοίωση έγιναν οι εξής παραδοχές:

- Θεωρείται διάταξη 200 χρηστών κινούμενων σε τυχαίες κατευθύνσεις με σταθερή ταχύτητα. Κατά τη διάρκεια της κίνησής τους, μεταβάλλεται η τελική τους θέση. Η αρχική τους θέση θεωρήθηκε κοντά στο κέντρο ώστε για το χρονικό διάστημα που μελετάται οι χρήστες δεν φεύγουν από τα όρια της κυψέλης. Για κάθε θέση υπολογίζεται η απόσταση τόσο από το σταθμό βάσης όσο και από τον κάθε έναν αναμεταδότη.
- Με τη χρήση του γενικού μοντέλου απωλειών υπολογίζεται η ισχύς από το σταθμό βάσης και από τους αναμεταδότες. Αρχικά, επιλέγεται ο αναμεταδότης με την ελάχιστη κατανάλωση ισχύος. Για το συγκεκριμένο αναμεταδότη και για το σταθμό βάσης αντικαθιστώντας στην εξίσωση (14) του ρυθμού μετάδοσης τις αντίστοιχες ισχείς, υπολογίζεται ο ρυθμός μετάδοσης.
- Για τη διαχείριση του εύρους ζώνης υπάρχουν δυο περιπτώσεις για τους αναμεταδότες. Η μετάδοση των δεδομένων τους, τα οποία είναι απαραίτητα για

τη λειτουργία τους, επιβαρύνει είτε τη διαθέσιμη χωρητικότητα σε Resource Blocks, τα οποία χρησιμοποιούνται από το σταθμό βάσης είτε Resource Blocks που έχουν καθοριστεί να ικανοποιούν τις μεταδόσεις των αναμεταδοτών προς τους χρήστες. Στην παρούσα φάση θεωρείται ότι επιβαρύνει τα κανάλια συχνοτήτων, που έχουν αποδοθεί στους αναμεταδότες για τη σύνδεσή τους με τους χρήστες. Για το λόγο αυτό, θεωρείται ότι σε κάθε subframe που μεταδίδεται με δεδομένα, το 70% των διαθέσιμων resource blocks διατίθεται για το downlink από τον αναμεταδότη στους χρήστες και το 30% για τις υπόλοιπες ανάγκες των αναμεταδοτών, προσέγγιση η οποία επιδρά και στο ρυθμό μετάδοσης από την πλευρά του αναμεταδότη καθώς πλέον θα δίνεται από τον τύπο

$$R=0,7*W*\log(1+SNR) \quad (35)$$

με $R(SNR, W)=W*\log(1+SNR)$ (36)

η εξίσωση υπολογισμού του ρυθμού μετάδοσης, όπου W το εύρος ζώνης της σύνδεσης,

$$SNR=\frac{\rho P}{W} \quad (37)$$

ο σηματοθορυβικός λόγος, ρ το κέρδος σύνδεσης, P η ισχύς.

Τελικά, στο χρήστη γίνεται ο υπολογισμός των δυο ρυθμών μετάδοσης και επιλέγεται η μεγαλύτερη, αφού θα εγγυάται καλύτερη ποιότητα υπηρεσιών.

Στα μοντέλα που ακολουθούν, ο υπολογισμός των απωλειών γίνεται από το πρόγραμμα της winner II για μικροκυβελωτό αστικό περιβάλλον.

7.4.3 Προσομοίωση επιβεβαίωσης επέκτασης κυψέλης

Σκοπός της προσομοίωσης είναι η προσέγγιση της ποσοστιαίας αύξησης της εξυπηρέτησης των χρηστών με τη χρήση αναμεταδοτών, λαμβάνοντας υπόψη τους αυστηρούς περιορισμούς στην ισχύ λειτουργίας κατά τη μετάδοση.

Η προσομοίωση περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

- Σε πρώτη φάση, υπολογίζονται για κάθε τελική θέση των χρηστών οι απώλειες τόσο για τη διαδρομή MS-BS όσο και για τις διαδρομές RS-MS. Στην περίπτωση των απωλειών από τους αναμεταδότες προς τους χρήστες, οι απώλειες υπολογίζονται για κάθε πιθανή θέση των αναμεταδοτών.
- Για τη διαδρομή μεταξύ σταθμού βάσης και αναμεταδότη οι απώλειες θεωρούνται ότι καλύπτονται από τον αναμεταδότη. Ο αναμεταδότης δε χρησιμοποιείται σαν απλός επαναλήπτης, αλλά επεξεργάζεται και αποστέλλει, στη συνέχεια, το σήμα στον παραλήπτη ενισχύοντάς το. Θεωρείται ότι η ενίσχυση καλύπτει τις απώλειες της διαδρομής BS-RS.
- Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας την εξίσωση (24) υπολογίζεται η ισχύς που απαιτείται από το σταθμό βάσης για κάθε χρήστη κάθε χρονική στιγμή. Εάν αυτή υπερβαίνει τα 46 dBm ο χρήστης απορρίπτεται.

- Με τη βοήθεια της εξίσωσης (24), υπολογίζεται η ισχύς που απαιτείται για τον κάθε αναμεταδότη. Επιλέγεται η διαδρομή MS-RS που εξασφαλίζει την ελάχιστη κατανάλωση ισχύος. Εάν υπερβαίνει τα 23 dBm τότε απορρίπτεται.
- Τελικά, υπολογίζονται οι συνολικοί χρήστες που θα λάβουν σήμα από το σταθμό βάσης και ο αριθμός εκείνων, οι οποίοι θα εξυπηρετηθούν από τους αναμεταδότες.

7.4.4 Προσέγγιση θέσης αναμεταδότη με κριτήριο ελάχιστη κατανάλωση ισχύος με απώλειες αστικού μικρο-κυψελωτού περιβάλλοντος

Όπως στην προηγούμενη περίπτωση υπολογίζονται οι απώλειες για όλες τις διαδρομές χρηστών-σταθμού βάσης-αναμεταδοτών, για κάθε τελική θέση αναμεταδοτών και χρηστών.

Ωστόσο, πριν την επιλογή υπολογίζονται οι ισχύεις για τις διαδρομές MS-RS ΚΑΙ BS-MS. Σε κάθε περίπτωση και για κάθε χρονική στιγμή επιλέγεται η διαδρομή με την ελάχιστη ισχύ.

Σε κάθε διαφορετική θέση αναμεταδοτών και για κάθε χρονική στιγμή υπολογίζεται ο συνολικός αριθμός των χρηστών που επιλέγουν το σταθμό βάσης και εκείνων που επιλέγουν τους αναμεταδότες.

7.4.5 Προσέγγιση θέσης αναμεταδότη με κριτήριο την απόσταση με απώλειες αστικού μικρο-κυψελωτού περιβάλλοντος

Οι αναμεταδότες τοποθετούνται σε συμμετρική θέση στο εσωτερικό της κυψέλης, σχηματίζοντας ανά δύο γωνία 120°. Για κάθε διαφορετική θέση από το σταθμό βάσης σχηματίζουν κύκλο, ο οποίος οριοθετεί δυο περιοχές, την εσωτερική και την εξωτερική. Η πρώτη περιλαμβάνει χρήστες που εξυπηρετούνται από το σταθμό βάσης ενώ η δεύτερη διαμοιράζεται στους αναμεταδότες, όπως αποτυπώνεται στο διάγραμμα 3.1 .

Οι χρήστες επιλέγουν τον αναμεταδότη που βρίσκεται στην πιο κοντινή απόσταση.

Η μελέτη της παραπάνω διάταξης στοχεύει σε πρωταρχική προσέγγιση της θέσης των αναμεταδοτών, χωρίς επιπλέον περιορισμούς ισχύος.

7.4.6 Προσέγγιση θέσης αναμεταδότη με τη χρήση του ρυθμού μετάδοσης με απώλειες αστικού μικρο-κυψελωτού περιβάλλοντος

Στο τελευταίο μοντέλο που εξετάζεται λαμβάνεται υπόψη η πολυδιαδρομική διάδοση.

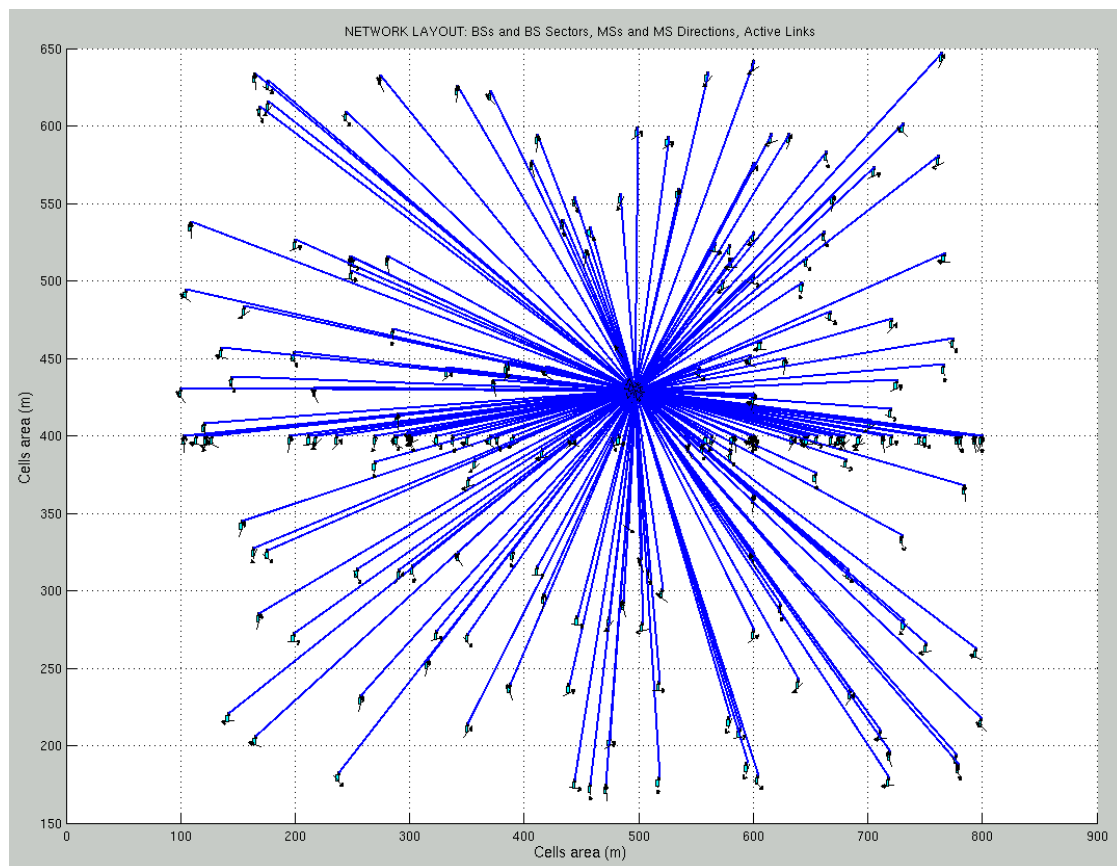
- Αρχικά, για κάθε χρήστη υπολογίζονται οι καθυστερήσεις σε κάθε μια από τις διαδρομές στις οποίες διαχωρίζεται το σήμα. Εάν σε κάποια από αυτές η τιμή είναι μεγαλύτερη των 2.4 μs τότε θεωρείται παρεμβολή.

- Υπολογίζονται οι απώλειες για τις συνδέσεις BS-MS και RS-MS από το πρόγραμμα της winner II για το συγκεκριμένο περιβάλλον.
- Η σχετική ισχύς των παρεμβαλλόμενων διαδρομών αφαιρείται από τη συνολική και λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες προκύπτει η τελική ισχύς που λαμβάνει τελικά ο δέκτης. Σχηματίζεται, κατόπιν, και ο σηματοθορυβικός λόγος που θα χρησιμοποιηθεί στην εξίσωση του ρυθμού μετάδοσης.
- Στην εξίσωση εισάγεται και το εύρος ζώνης. Ο αναμεταδότης εκτός από τη σύνδεση MS-RS θα πρέπει να στείλει και τα δικά του δεδομένα στο σταθμό βάσης αφού συμβάλλει στην περαιτέρω επεξεργασία του σήματος και σε παρόμοιες επιπρόσθετες λειτουργίες που απαιτούν εύρος ζώνης. Τα διατιθέμενα στη σύνδεση resource blocks θεωρήθηκαν το 70% των αρχικών.
- Για κάθε χρήστη έγινε επιλογή της σύνδεσης που εξασφαλίζει μεγαλύτερο ρυθμό μετάδοσης.
- Η διαδικασία επαναλήφθηκε για κάθε χρήστη, για κάθε χρονική στιγμή στο διάστημα [0 100] sec και για όλες τις πιθανές θέσεις αναμεταδοτών από το κέντρο προς την άκρη της κυψέλης.

8. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ

8.1 ΓΕΝΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Στο πλαίσιο του πειράματος, τοποθετήθηκαν 200 χρήστες εντός της κυψέλης, οι οποίοι αιτούνται για εύρος ζώνης ταυτόχρονα στο σταθμό βάσης, με δεδομένη την ισχύ λήψης την οποία επιθυμούν να έχουν.



Διάγραμμα 8.1- Συνδέσεις 200 χρηστών με το σταθμό βάσης

Στη συνέχεια, η επιλογή του σταθμού βάσης από τους χρήστες δεν είναι τυχαία αλλά εξαρτάται από την ισχύ εκπομπής, την οποία θα διαθέσει ο κόμβος, η οποία δεν πρέπει, ωστόσο, να υπερβαίνει το όριο των 46 dBm.

8.2 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΧΡΗΣΤΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΔΟΣΗ

Αρχικά, θα γίνει αναφορά στις απώλειες, όπως αυτές προέκυψαν από το πρόγραμμα winner II και για τους 200 χρήστες για μετάδοση σε μικρο-κυψελωτό περιβάλλον. Οι τιμές αυτών παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα

131.3098	130.6434	121.6780	110.2633	133.5597
102.4297	124.3840	137.2143	121.4815	128.689
133.6578	128.8516	135.7698	131.6811	119.5375
131.3569	130.5601	120.7675	124.3352	124.2331
136.6763	131.0063	129.5111	121.5048	133.6773
127.5322	116.9398	131.6685	137.2067	116.4846
135.7882	137.6156	135.7822	128.6558	110.4988
136.8351	122.9274	128.7001	132.9553	124.2124
131.3195	128.6091	139.2108	128.7706	123.2749
137.7697	124.2125	130.8197	133.3964	111.2283
117.0323	130.0624	134.845	128.0435	113.4292
135.7135	136.8724	133.2618	127.6317	119.1909
124.1834	133.7122	132.7404	123.2718	133.1594
125.3965	124.0277	118.6601	131.4351	135.4749
127.2208	138.8371	136.4703	134.1298	129.1483
125.7292	131.0355	130.6014	129.7902	134.8244
131.5556	113.9286	130.4383	135.7020	120.7765
134.4861	133.7711	133.9993	127.4143	132.3232
124.5003	127.9026	135.4921	125.8605	130.4444
119.5649	122.1255	136.8044	135.9558	128.1134
133.1679	138.8335	106.4751	116.8854	128.7248
128.9582	135.3801	125.0463	135.0595	133.1313
125.4445	115.7410	134.3879	139.1768	126.0998
130.4656	125.1702	130.0201	124.0596	137.1695
118.2418	127.6756	132.7263	128.7194	121.6315
135.7514	122.5583	97.3315	132.5978	133.7736
130.7511	116.5355	136.2941	130.6975	126.6207
132.2263	105.7369	131.2547	132.6776	137.3622
129.2397	136.8921	134.5259	125.1621	121.8166
130.5465	137.2026	133.7829	136.3662	133.3622
120.2021	106.8385	127.7071	120.7509	132.2047
131.8485	133.6573	132.6528	137.1159	135.2864
139.3065	134.9813	135.5867	119.0263	132.6338
135.4987	130.2307	112.5323	132.0461	125.7366
134.3104	133.7977	117.8258	127.3637	122.1087
133.2137	128.2505	125.0033	131.6247	130.0249
136.5861	123.7042	130.6352	133.5084	100.0264
132.3885	126.8714	136.7954	125.8459	126.2801
134.0321	136.5249	127.4396	137.5522	135.6687
130.5774	139.4299	129.5706	133.8511	123.4151

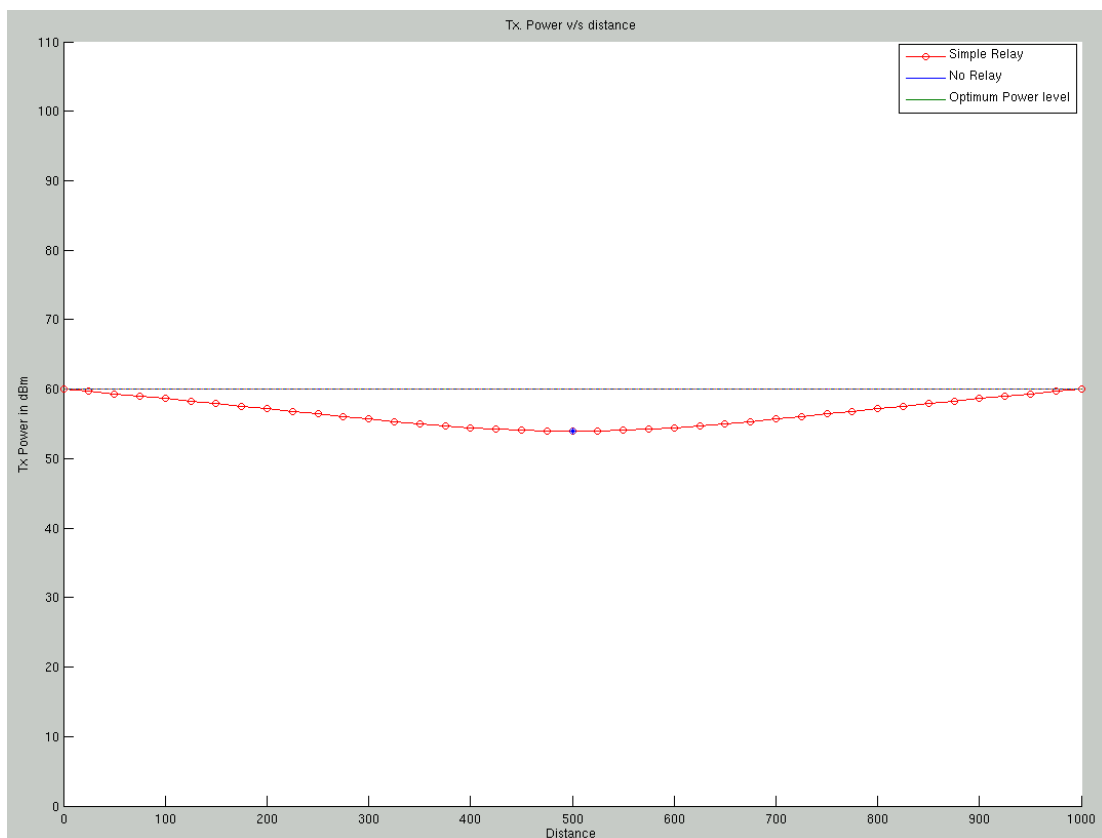
Πίνακας 8.1- Απώλειες όπως προέκυψαν από το winner II για 200 χρήστες.

Ο μέσος όρος απωλειών κυμαίνεται γύρω στα 130 dB και είναι ιδιαίτερα υψηλός. Στα αστικά μικροκυβελωτά συστήματα, οι κεραίες είναι τοποθετημένες σε μικρό ύψος και εκπέμπουν σε μικρή ισχύ. Έτσι, το σήμα επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από εξωγενείς παράγοντες, οι οποίοι λόγω του αστικού περιβάλλοντος δημιουργούν περιβάλλον μεγάλης πυκνότητας σε σκεδαστές, εξασθενώντας το σήμα. Ακόμα και στην περίπτωση των αναμεταδοτών, κατά την οποία η απόσταση τερματικών και αναμεταδοτών είναι μικρότερη από την αντίστοιχη τερματικού-σταθμού βάσης, η τιμή των απωλειών μειώνεται κατά 4-5 dB.

8.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΓΕΝΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΑΠΩΛΕΙΩΝ

8.3.1 Θέση αναμεταδότη σε σύστημα με έναν χρήστη

Η προσομοίωση στο matlab σχηματικά αποτυπώνεται στο ακόλουθο διάγραμμα.



Διάγραμμα 8.2- Εύρεση βέλτιστης θέσης αναμεταδότη με χρήση του γενικό μοντέλου απωλειών σε σύστημα ενός χρήστη

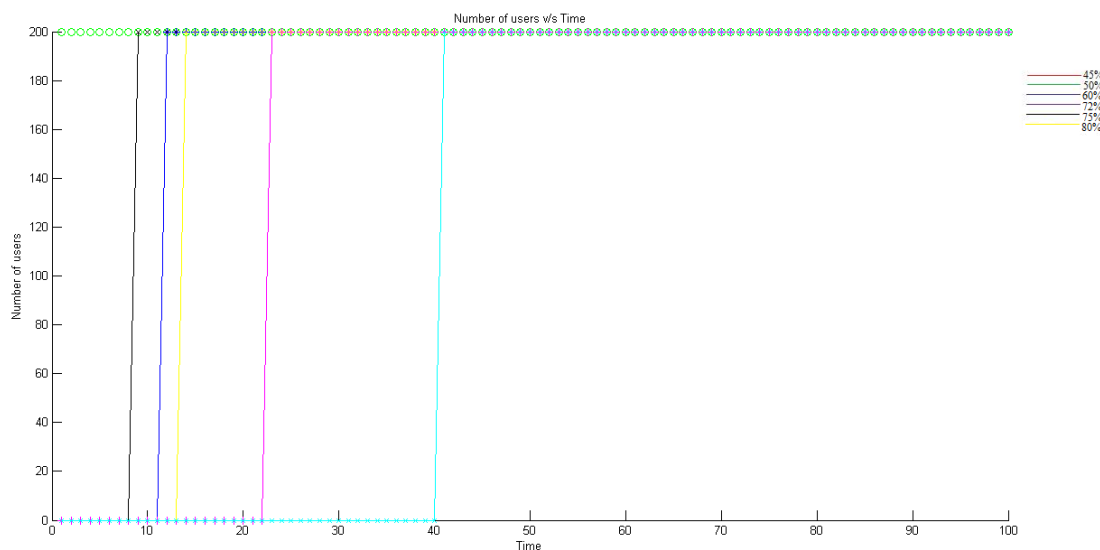
Όπως φαίνεται, για έναν χρήστη στην άκρη της κυψέλης με ισχύ λειτουργίας μεγάλη, εφάμιλλη του αναμεταδότη, απαιτεί η θέση του αναμεταδότη να βρίσκεται στη μέση της απόστασης MS-BS.

8.3.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης με κριτήριο το ρυθμό μετάδοσης

Στα αποτελέσματα της προσομοίωσης, υπήρχαν θέσεις των αναμεταδοτών, στις οποίες εξ αρχής οι αναμεταδότες εξυπηρετούσαν το σύνολο των χρηστών, ενώ στις υπόλοιπες ο σταθμός βάσης θεωρητικά θα έπρεπε να εξυπηρετήσει των σύνολο των τερματικών.

Ωστόσο, μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσίασαν τα αποτελέσματα κατά τη χρονική τους εξέλιξη. Εξαιρώντας τις παραπάνω περιπτώσεις, υπήρχαν σημεία στα οποία, καθώς μεταβάλλεται ο χρόνος, οι αναμεταδότες ενεργοποιούνταν μετά από ένα διάστημα. Αυτό συμβαίνει επειδή περισσότεροι χρήστες απομακρύνονταν από το κέντρο της κυψέλης. Στο τέλος του χρονικού διαστήματος, γύρω από συγκεκριμένες θέσεις αναμεταδοτών, οι αναμεταδότες εξυπηρετούν το σύνολο των χρηστών. Οι θέσεις αυτές είναι και οι επιθυμητές.

Στις εικόνες φαίνονται τα αποτελέσματα από τρεις προσομοιώσεις, για θέσεις που παρουσίασαν τη συγκεκριμένη συμπεριφορά.

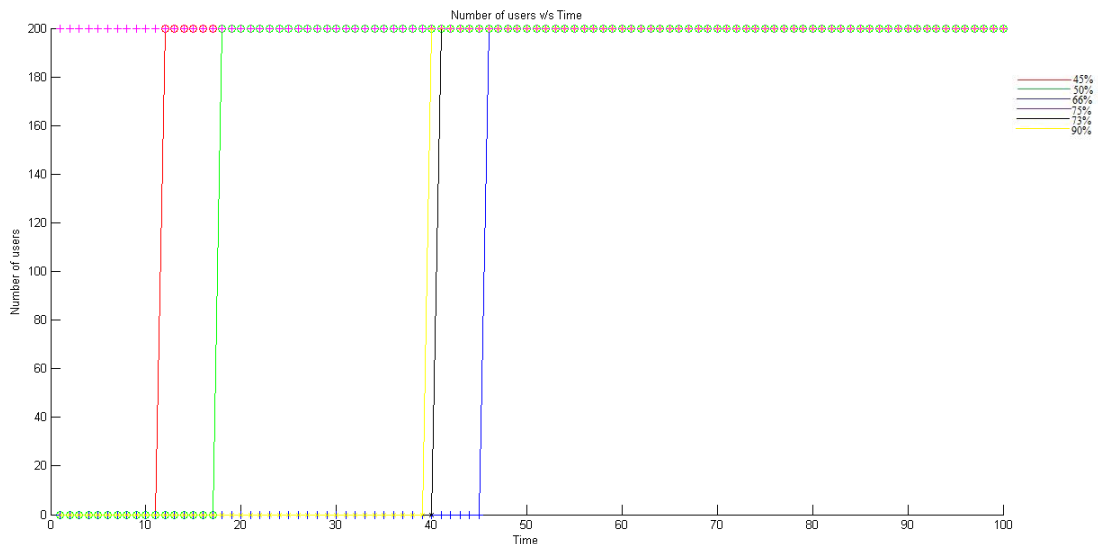


Διάγραμμα 8.3- Τηλεπικοινωνιακή κίνηση κυψέλης 200 χρηστών με χρήση του γενικού μοντέλου απωλειών με κριτήριο το ρυθμό μετάδοσης_1

Στην πρώτη προσομοίωση, η κόκκινη γραμμή και η πράσινη γραμμή προσεγγίζουν τη μέση της απόστασης BS-MS (45% και 50% αντίστοιχα της ακτίνας της κυψέλης). Η πρώτη ενεργοποιείται στα 22 sec και η άλλη προτιμάται εξ αρχής από όλους τους χρήστες. Η μπλε γραμμή προσεγγίζει το 60% της ακτίνας και ενεργοποιείται στα 11 sec.

Προσεγγίζοντας την άκρη της κυψέλης, η μωβ γραμμή ενεργοποιείται στα 22 sec εκπροσωπώντας το 72% της ακτίνας και η μαύρη στα 8 sec, στο 75%. Η κίτρινη γραμμή, στο 80% της ακτίνας γύρω στα 15 sec.

Η τελευταία γραμμή στο 90% της ακτίνας ενεργοποιείται αργά στα 40 sec, αναμενόμενο αποτέλεσμα εφόσον οι χρήστες πληθαίνουν στην άκρη της κυψέλης μετά από συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

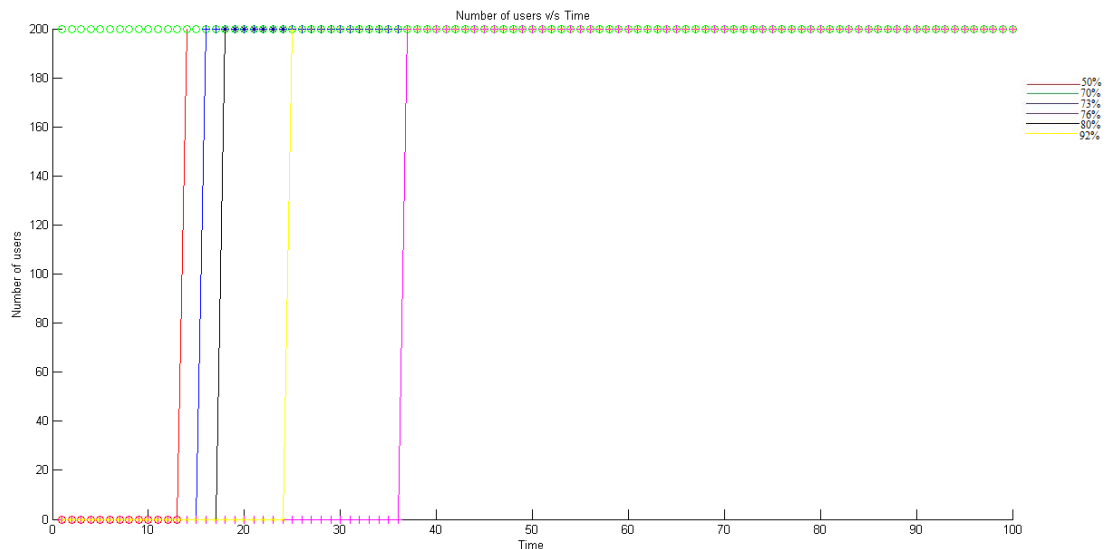


Διάγραμμα 8.4- Τηλεπικοινωνιακή κίνηση κυψέλης 200 χρηστών με χρήση του γενικού μοντέλου απωλειών με κριτήριο το ρυθμό μετάδοσης_2

Κοντά στο 50% της ακτίνας, βρίσκονται η κόκκινη και η πράσινη γραμμή. Η μεν αποτελεί περίπτωση όπου εξ αρχής προτιμάται από τους χρήστες και η δεύτερη ενεργοποιείται περίπου στα 18 sec.

Κοντά στο 66% της ακτίνας, η μπλε γραμμή καθυστερεί να παρέχει καλύτερες τιμές ισχύος και ενεργοποιείται στα 45 sec. Η πιο γρήγορη ενεργοποίηση παρατηρείται στο 75% της απόστασης (μωβ γραμμή) ενώ στο 73% (μαύρη γραμμή) παρατηρείται ενεργοποίηση στα 40 sec.

Στην άκρη της κυψέλης, όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, υπάρχει καθυστέρηση περίπου 40 sec για ενεργοποίηση του αναμεταδότη.



Διάγραμμα 8.5- Τηλεπικοινωνιακή κίνηση κυψέλης 200 χρηστών με χρήση του γενικού μοντέλου απωλειών με κριτήριο το ρυθμό μετάδοσης_3

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από αυτήν την προσομοίωση δίνουν άμεση ενεργοποίηση στα 13 sec στον αναμεταδότη στο 50% της απόστασης (κόκκινη γραμμή). Εν συνεχεία κοντά στο 75 % οι γραμμές πράσινη, μπλε και μωβ ενεργοποιούνται στα 0, 15 και 35 sec αντίστοιχα. Τέλος, ο αναμεταδότης στο 80% της ακτίνας εμφανίζεται στα 15 sec (μαύρη γραμμή) και κοντά στο άκρο της κυψέλης στα 25 sec (κίτρινη γραμμή).

Κοινό χαρακτηριστικό όλων των προσομοιώσεων με την πάροδο του χρόνου αποτελεί η αυξημένη χρήση των αναμεταδοτών, όταν η θέση αυτών βρίσκεται στο 60%-80% της ακτίνας της κυψέλης. Σταδιακά, όλοι οι αναμεταδότες στις αποστάσεις αυτές ενεργοποιούνται και εξυπηρετούσαν τους χρήστες. Αντίθετα, κοντά στο 50 % της απόστασης, σε όσες θέσεις οι αναμεταδότες είχαν ενεργοποιηθεί εξ αρχής, ο αριθμός αυτός παρέμεινε και μέχρι το τέλος της προσομοίωσης. Γύρω από αυτήν τη θέση δεν υπήρχαν περαιτέρω ενεργοποιήσεις αναμεταδοτών.

Από τις παραπάνω προσομοιώσεις εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- Οι αναμεταδότες στο άκρο της κυψέλης δεν εξυπηρετούν μαζικά τους χρήστες σε όλες τις παρεμφερείς θέσεις (85%-100% της ακτίνας της κυψέλης) αλλά σε μεμονωμένες και αρχίζουν να είναι χρήσιμοι για το σύστημα μόνο όταν οι χρήστες κινούνται στα άκρα της κυψέλης, γεγονός που φαίνεται από την ενεργοποίησή τους σε μεταγενέστερη από την αρχική χρονική στιγμή.
- Γρήγορα ενεργοποιούνται οι αναμεταδότες στις θέσεις γύρω από το 50% της ακτίνας, λογικό αφού οι χρήστες αρχίζουν να απομακρύνονται από το κέντρο. Ωστόσο, δεν ενεργοποιούνται σε όλες τις θέσεις γύρω από αυτήν την απόσταση αλλά σε ορισμένες εξ αυτών.
- Οι αναμεταδότες κοντά στο 60 % της απόστασης ενεργοποιούνταν πιο γρήγορα συγκριτικά με τους αντίστοιχους στο 75% της απόστασης. Ωστόσο, από το 70%-80% της ακτίνας, οι αναμεταδότες ενεργοποιούνταν σε κάθε ενδιάμεση θέση, σε αντίθεση με τις υπόλοιπες αποστάσεις.

8.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΜΕ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΑΠΟ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ WINNER II

8.4.1 Αποτελέσματα προσομοίωσης επέκτασης και προσομοίωσης με κριτήριο την απόσταση

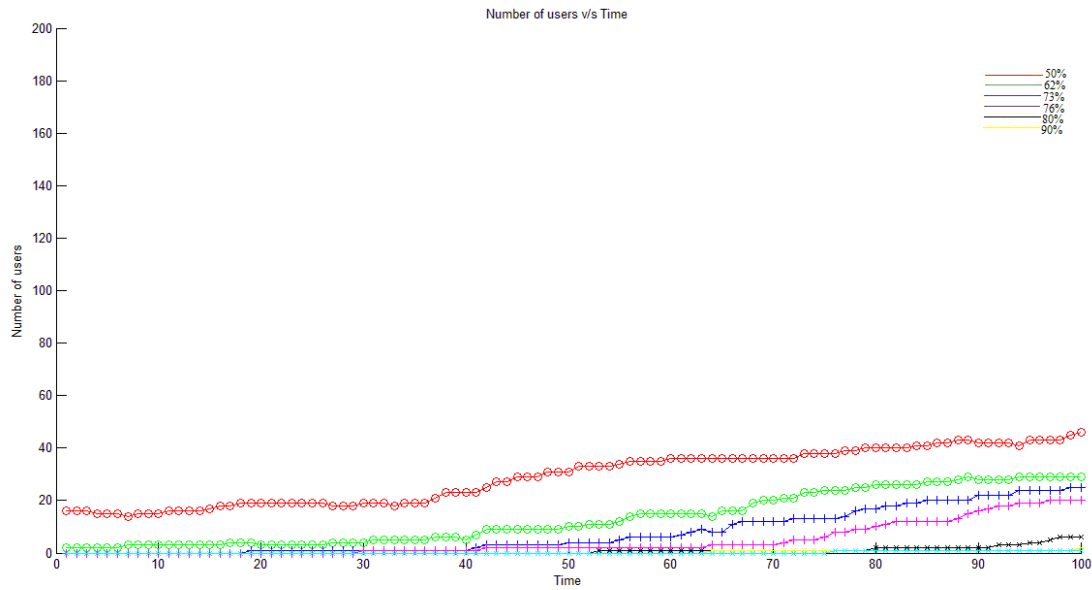
Στην πρώτη προσομοίωση για την απόδειξη της επέκτασης, ο αριθμός των χρηστών καθορίστηκε στους 20. Ακολούθως, αποτυπώνονται οι μεγαλύτερες τιμές του αριθμού των χρηστών, οι οποίοι συνδέθηκαν με τους αναμεταδότες και ο αντίστοιχος αριθμός των χρηστών που εξυπηρετήθηκαν από το σταθμό βάσης. Ενδεικτικά,

Αριθμός Αναμεταδοτών	Χρηστών	Αριθμός Χρηστών Σταθμού Βάσης	Ποσοστό Επέκτασης
5		8	62,5%
6		6	100%
6		9	66,67%
6		10	60%
5		11	45%
7		10	70%
6		7	85,71%
6		8	75%
4		7	57,14%

Πίνακας 8.2- Ποσοστιαία επέκταση της κυψέλης σε αριθμό χρηστών

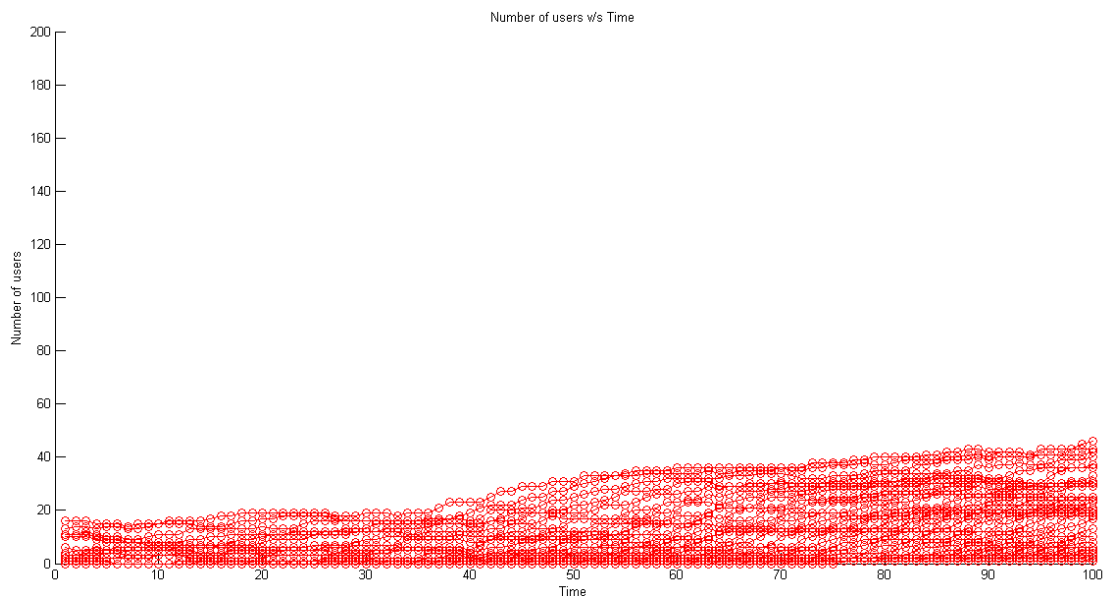
Εξαιρώντας την ακραία τιμή του 100%, οι υπόλοιπες τιμές κυμαίνονται κατά μέσο όρο κοντά στο 60%. Στις ακόλουθες προσομοιώσεις, η αναλογία μεταξύ των χρηστών διατηρείται και ο αριθμός των χρηστών που συνδέονται με το σταθμό βάσης δεν αποτελεί αντικείμενο μελέτης.

Χρησιμοποιώντας το μοντέλο που χωρίζει σε συγκεκριμένες περιοχές την κυψέλη, αποδεικνύεται ότι οι αναμεταδότες κοντά στο κέντρο της κυψέλης υποστηρίζουν περισσότερους χρήστες, συγκριτικά με τις υπόλοιπες πιθανές θέσεις αυτών. Καθώς αυξάνεται η απόστασή τους από το κέντρο, οι αναμεταδότες κοντά στα άκρα εξυπηρετούν καλύτερα τους απομακρυσμένους χρήστες, οι οποίοι σε αριθμό είναι ελάχιστοι. Τα αναμενόμενα αποτελέσματα φαίνονται και στις επόμενες εικόνες



Διάγραμμα 8.6- Αριθμός χρηστών συναρτήσει του χρόνου με τη χρήση του κριτηρίου της απόστασης

Οι περισσότεροι χρήστες εξυπηρετούνται από τους αναμεταδότες, όταν εκείνοι βρίσκονται κοντά στο κέντρο της κυψέλης. Ο απόλυτος διαχωρισμός δε συμβάλλει σε σημαντική αύξηση των εξυπηρετούμενων χρηστών εντός της κυψέλης αλλά δείχνει τα οφέλη για τους απομακρυσμένους χρήστες, όπως φαίνεται και ακολούθως. Το διάγραμμα αποτυπώνει τον αριθμό των τερματικών που εξυπηρετούνται από απομακρυσμένο αναμεταδότη στο χρονικό διάστημα [0 100] sec.



Διάγραμμα 8.7- Διάγραμμα αριθμού απομακρυσμένων χρηστών της κυψέλης συναρτήσει του χρόνου

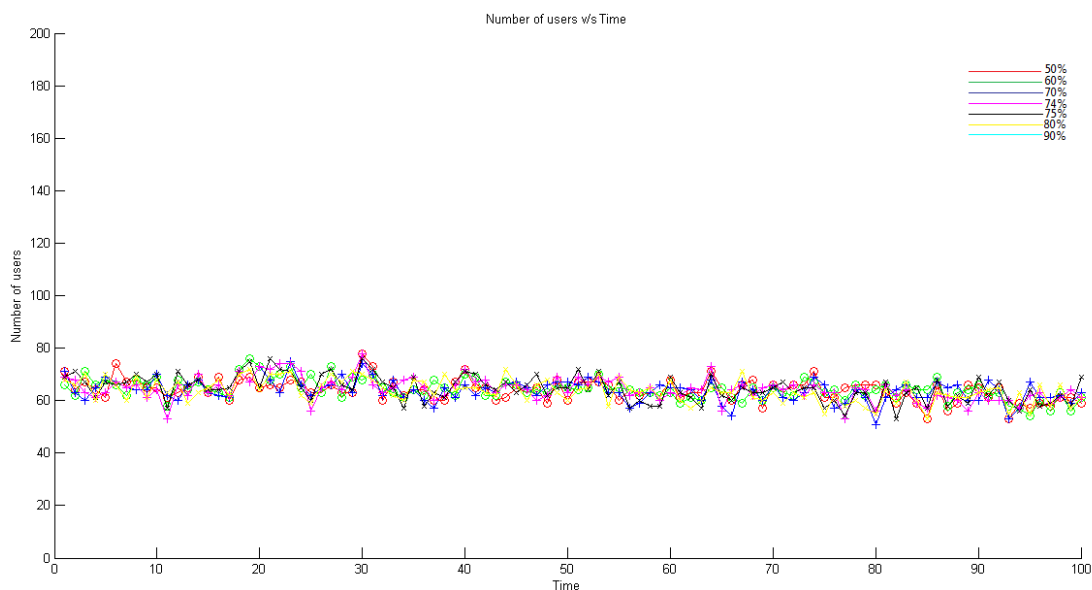
Επομένως,

- επιβεβαιώνεται η επέκταση της κυψέλης. Ο αριθμός των εξυπηρετούμενων χρηστών αυξάνεται κατά μέσο όρο 60% συγκριτικά με τους χρήστες που συνδέονται με το σταθμό βάσης.
- η μέθοδος με κριτήριο την απόσταση έχει αποτελέσματα εφάμιλλα της μεθόδου όπου χρησιμοποιείται το γενικό μοντέλο υπολογισμού απωλειών, κύρια παράμετρος του οποίου είναι η εξάρτηση από την απόσταση. Η προτιμότερη θέση τοποθέτησης αναμεταδότη κρίνεται στο 50% της ακτίνας της κυψέλης.
- τα αποτελέσματα της τελευταίας μεθόδου, δίνουν τις πρώτες ενδείξεις για αποτελεσματικότερη διαχείριση των χρηστών που κινούνται στα άκρα της κυψέλης.

8.4.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης με κριτήριο την επίτευξη ελάχιστης ισχύος συστήματος

Στην προσομοίωση, από τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τον αριθμό των χρηστών που εξυπηρετούνται από τους αναμεταδότες, επιλέγονται για απεικόνιση οι θέσεις όπου παρατηρείται ο μεγαλύτερος αριθμός χρηστών τόσο ως προς την παράμετρο του χρόνου όσο και προς την παράμετρο της θέσης των αναμεταδοτών θέσης.

Ακολούθως αποτυπώνονται τα αποτελέσματα,



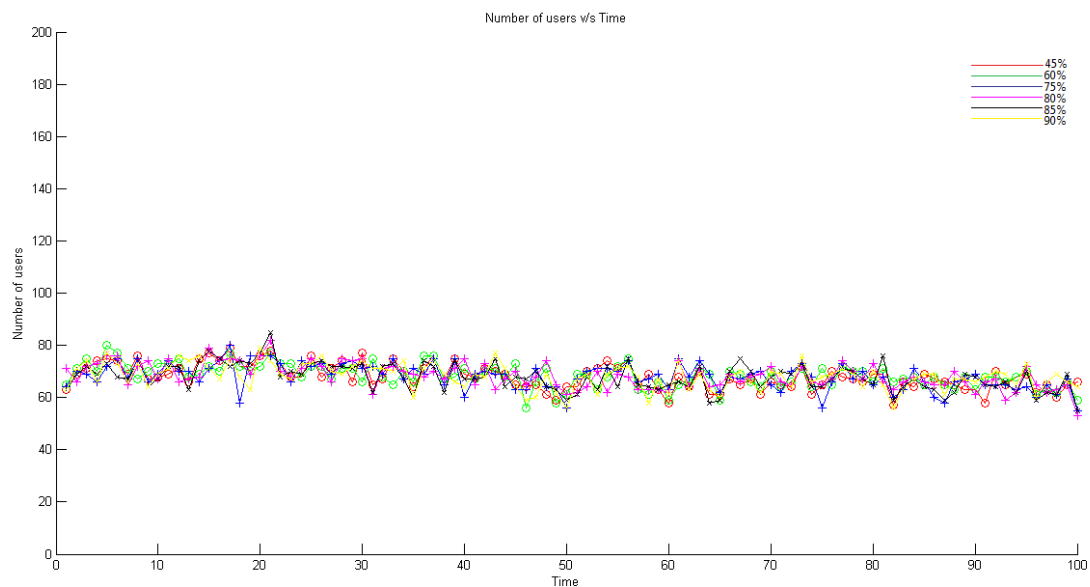
Διάγραμμα 8.8- Τηλεπικοινωνιακή κίνηση κυψέλης 200 χρηστών με κριτήριο την ελαχιστοποίηση της ισχύος και απώλειες μέσω winner Π_1

Στο χρονικό διάστημα 0-20 sec υπερिशύουν οι αναμεταδότες με θέσεις 75%, 70%, 74%, 60%, 80% και 90% της ακτίνας της κυψέλης.

Στο χρονικό διάστημα 20-50 sec, οι θέσεις μεταβάλλονται και κατατάσσονται ως 70%, 75%, 60%, 74%, 80%, 90%. Τα αποτελέσματα δε διαφέρουν σημαντικά, ενώ ο αναμεταδότης με τη μικρότερη απόσταση από το σταθμό βάσης δεν υπερिशχύει, όπως και θα αναμενόταν.

Στο διάστημα 50-70 sec, τα αποτελέσματα διαμορφώνονται ως εξής : 74%, 75%, 70%, 90%, 80% και 60% της ακτίνας της κυψέλης. Όπως αναμενόταν ο αναμεταδότης με τη χαμηλότερη απόσταση δεν εξυπηρετεί αρκετούς χρήστες ενώ ο αριθμός των χρηστών αυξήθηκε για τους πιο απομακρυσμένους αναμεταδότες.

Τέλος, στο διάστημα 70-100 sec τα αποτελέσματα αποτυπώνονται ως εξής, 74%, 75%, 90%, 80%, 70%, 60% της ακτίνας. Οι αναμεταδότες κοντά στο 75% διατηρούν υψηλά ποσοστά είτε οι χρήστες βρίσκονται εντός κυψέλης είτε αυτοί πλησιάζουν στα άκρα.

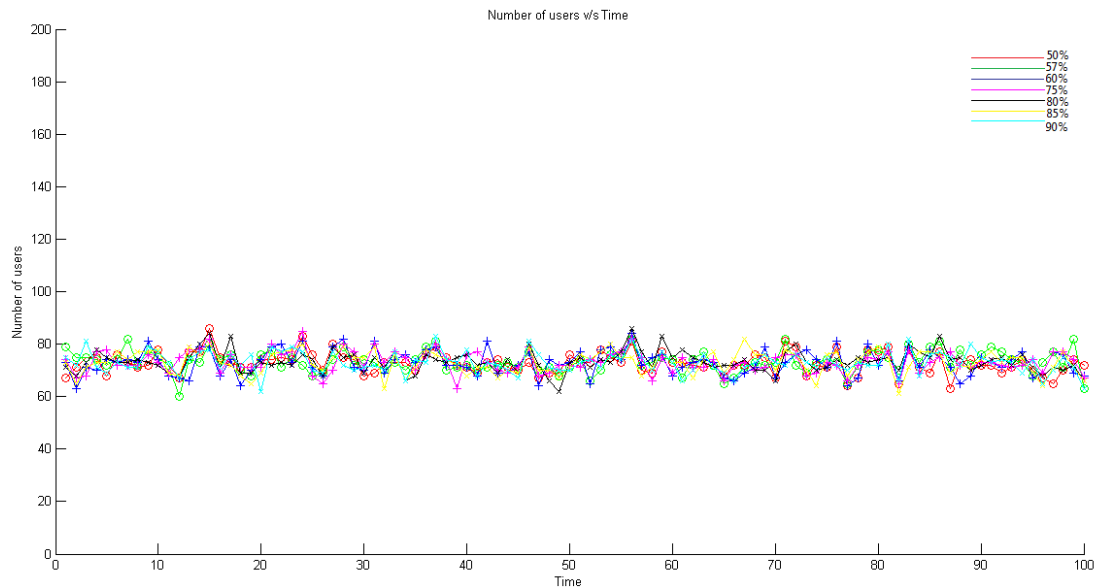


Διάγραμμα 8.9- Τηλεπικοινωνιακή κίνηση κυψέλης 200 χρηστών με κριτήριο την ελαχιστοποίηση της ισχύος και απώλειες μέσω winner Π_2

Στο διάστημα 0-20 sec οι αναμεταδότες κατά φθίνουσα σειρά χρηστών είναι 45%, 60%, 75%, 80%, 85%, 90%. Στην προσομοίωση αυτή, τα αποτελέσματα σε αυτό το χρονικό διάστημα είναι αναμενόμενα.

Σε διάστημα 20-50 sec, περισσότερους χρήστες εξυπηρετούν οι αναμεταδότες σε θέσεις 75% και 80% της ακτίνας της κυψέλης, ακολουθούν οι πιο κοντινοί, 45% και 60% και εν τέλει οι πιο απομακρυσμένοι, στο 80%, 85% και 90% της ακτίνας. Παρόμοια εικόνα εμφανίζεται και στο επόμενο διάστημα, με τη διαφορά ότι οι πιο κοντινοί έρχονται τελευταίοι σε αριθμό χρηστών και οι πιο απομακρυσμένοι ακολουθούν τους πρώτους.

Τέλος, οι κοντινοί σε απόσταση αναμεταδότες δεν εξυπηρετούν μεγαλύτερο αριθμό χρηστών από τους υπόλοιπους. Επίσης, οι υπόλοιποι αναμεταδότες εναλλάσσονται σε αριθμό με αποτέλεσμα τόσο οι αναμεταδότες σε απόσταση 75% όσο και εκείνοι σε 80%-90% να προτιμώνται το ίδιο.

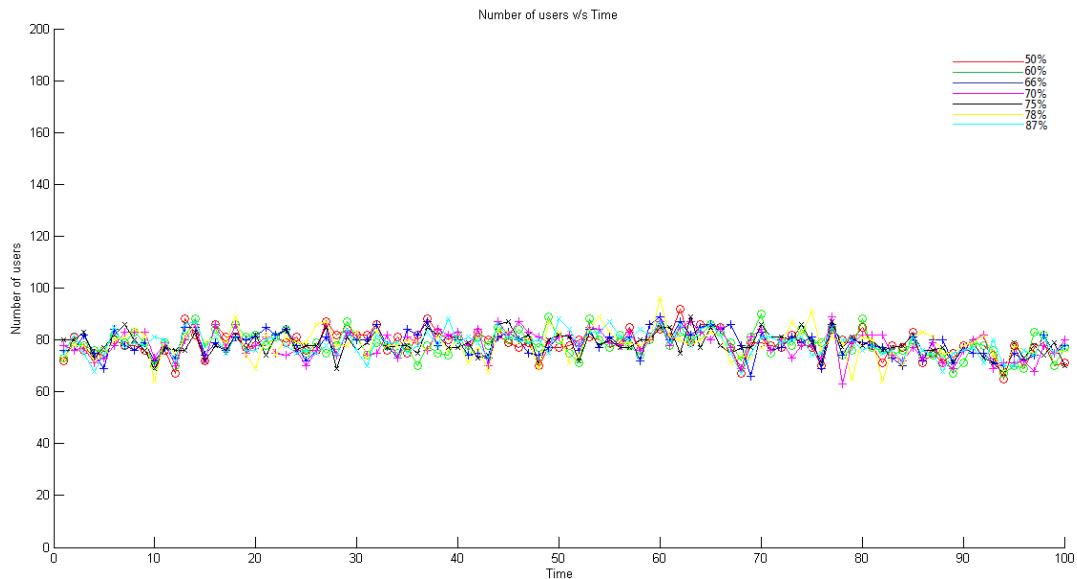


Διάγραμμα 8.10- Τηλεπικοινωνιακή κίνηση κυψέλης 200 χρηστών με κριτήριο την ελαχιστοποίηση της ισχύος και απώλειες μέσω winner II_3

Στα διαστήματα 0-20 sec και 20-50 sec υπερισχύουν οι αναμεταδότες σε απόσταση 75% και 60%. Στη συνέχεια, έπονται οι κοντινοί αναμεταδότες σε αποστάσεις 50% και 57% της ακτίνας και ο αναμεταδότης σε απόσταση 80%. Τέλος, οι πιο απομακρυσμένοι, 85% και 90% της απόστασης δεν καταφέρνουν να εξυπηρετούν μεγαλύτερο αριθμό από τους υπόλοιπους.

Στο επόμενο διάστημα, 50-70 sec, οι απομακρυσμένοι δεν προτιμώνται όσο οι πιο κοντινοί ενώ υπερισχύουν εκείνοι που βρίσκονται σε απόσταση 60% και, εν συνεχεία, εκείνοι που βρίσκονται σε απόσταση 75% της ακτίνας.

Στο τελευταίο χρονικό διάστημα, οι απομακρυσμένοι αναμεταδότες εξυπηρετούν περισσότερους χρήστες, ακολουθούν οι αναμεταδότες σε αποστάσεις 75% και 60% και στη συνέχεια οι πιο κοντινοί αναμεταδότες, όπως αναμενόταν.



Διάγραμμα 8.11- Τηλεπικοινωνιακή κίνηση κυψέλης 200 χρηστών με κριτήριο την ελαχιστοποίηση της ισχύος και απώλειες μέσω winner Π_4

Στην τελευταία προσομοίωση, στο πρώτο χρονικό διάστημα, οι πιο κοντινοί αναμεταδότες εξυπηρετούν μεγαλύτερο αριθμό ενώ το μικρότερο αριθμό χρηστών, οι πιο απομακρυσμένοι. Στο διάστημα 20-70 sec , από τους αναμεταδότες σε αποστάσεις 75%, 66% και 78% της ακτίνας της κυψέλης εξυπηρετούνται οι περισσότεροι χρήστες, στη συνέχεια, προτιμώνται οι απομακρυσμένοι και, τέλος, οι πιο κοντινοί. Στο τελευταίο διάστημα, δεν υπάρχει μεγάλη διαφορά στα αποτελέσματα ανάμεσα στους αναμεταδότες των μεσαίων αποστάσεων και των μακρινών, και τελευταίοι σε αριθμό χρηστών έρχονται οι πιο κοντινοί αναμεταδότες.

Συμπερασματικά,

- Οι αναμεταδότες που βρίσκονται κοντά στο σταθμό βάσης, δεν υπολείπονται σε αριθμό χρηστών έναντι των άλλων θέσεων αλλά δεν μπορούν να εξυπηρετήσουν χρήστες πολύ απομακρυσμένους.
- Οι αναμεταδότες κοντά στα όρια της κυψέλης έχουν χαμηλά ποσοστά για κοντινές αλλά και οι επιδόσεις στις μεσαίες αποστάσεις δεν είναι σταθερές.
- Σε αποστάσεις γύρω στο 75%, παρατηρείται μεγαλύτερος αριθμός χρηστών και για το λόγο αυτό θέσεις κοντά σε αυτήν αποτυπώνονται στα διαγράμματα και μελετώνται. Οι επιδόσεις των αναμεταδοτών στη θέση αυτή αποδεικνύεται καλή τόσο σε μεσαίες όσο και σε απομακρυσμένες αποστάσεις.
- Ο αριθμός των χρηστών δεν σημειώνει μεγάλες διαφορές. Παρόλο που αλλάζει η θέση των χρηστών, η συμμετρία των αναμεταδοτών, έχει ως αποτέλεσμα κάθε στιγμή ένας αναμεταδότης να μπορεί να εξυπηρετήσει το χρήστη. Στη συνέχεια, εάν η ισχύς δεν υπερβαίνει σε τιμή την αντίστοιχη του σταθμού βάσης επιλέγεται.
- Τέλος, οι αριθμητικές διαφορές των χρηστών στις διάφορες θέσεις με πρώτη παρατήρηση δε διαφέρουν. Ωστόσο, όσο αυξάνεται ο χρόνος ο συνολικός αριθμός των χρηστών στην κυψέλη μειώνεται, οπότε εάν τα αποτελέσματα αναχθούν στο συνολικό αριθμό κάθε χρονική στιγμή γίνεται εμφανής η διαφορά τους.

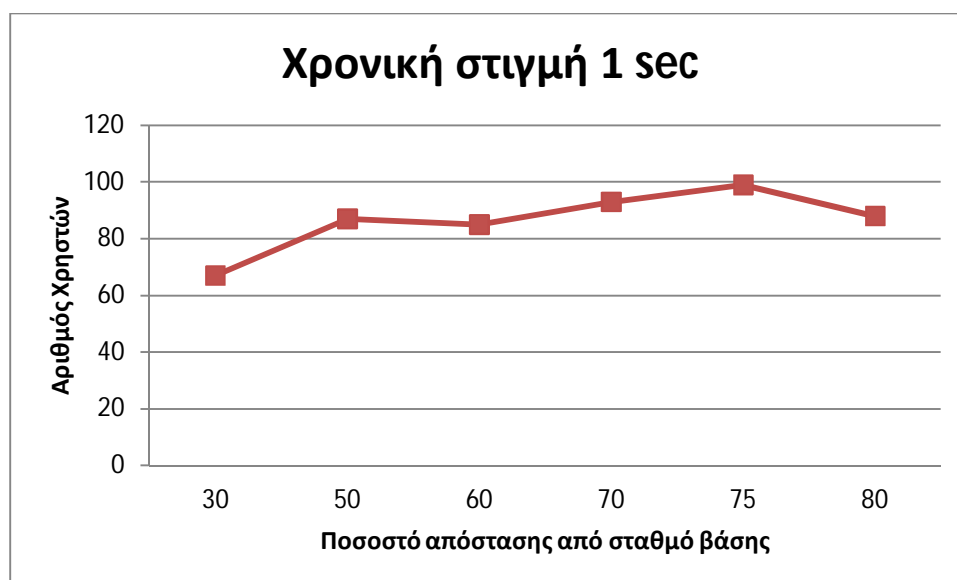
8.4.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης με τη χρήση του κριτηρίου του ρυθμού μετάδοσης

Ακολουθώντας τη διαδικασία, όπως αυτή περιγράφηκε στην παράγραφο 7.4.6, προέκυψαν οι χρήστες που εξυπηρετούνται από τους αναμεταδότες σε κάθε τελική θέση αυτών.

Λαμβάνοντας υπόψη και τα ανωτέρω αποτελέσματα, οι θέσεις των αναμεταδοτών που μελετήθηκαν ήταν στο 30%, 50%, 60%, 70%, 75% και 80% της ακτίνας της κυψέλης, αφού σε αυτές τις αποστάσεις είχαν παρατηρηθεί στις προηγούμενες προσομοιώσεις οι μεγαλύτεροι αριθμοί χρηστών.

Επίσης, στα διαγράμματα θεωρήθηκαν τρεις χρονικές στιγμές 1 sec, 50 sec και 90 sec για την περιγραφή της κατάστασης των χρηστών εντός της κυψέλης. Για κάθε χρονική στιγμή υπολογίστηκαν για κάθε θέση αναμεταδοτών οι καθυστερήσεις στις διαφορετικές διαδρομές διάδοσης του σήματος προς το δέκτη και για κάθε θέση, την κάθε χρονική στιγμή επιλέχθηκε η μεγαλύτερη ισχύς λήψης.

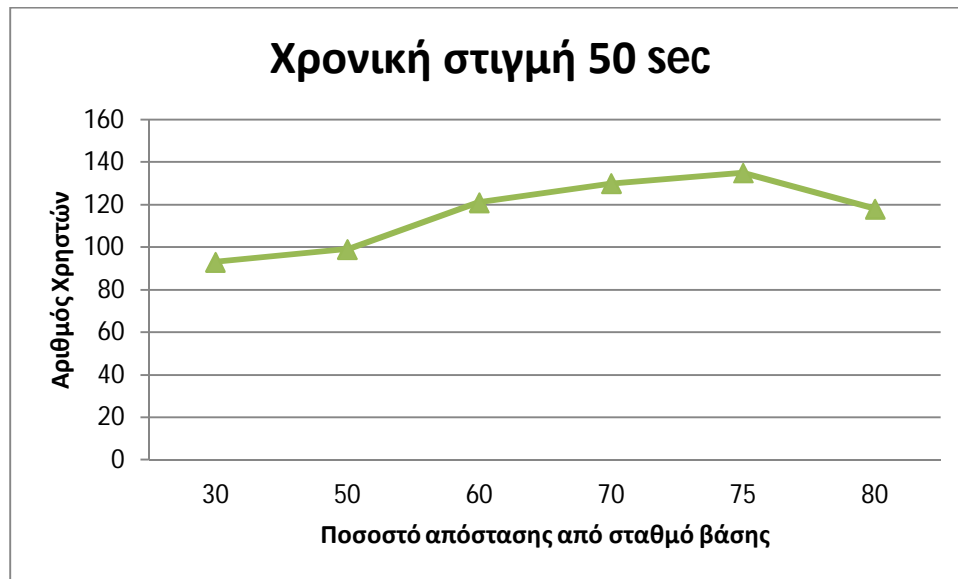
Τα αποτελέσματα φαίνονται στα ακόλουθα διαγράμματα:



Διάγραμμα 8.12- Αριθμός χρηστών σε συγκεκριμένες θέσεις αναμεταδοτών τη χρονική στιγμή 1 sec-Κριτήριο ρυθμού μετάδοσης και απώλειες μέσω winner II

Ο συνολικός αριθμός των χρηστών σε κάθε έναν από τους τρεις αναμεταδότες είναι μικρότερος από τον αντίστοιχο του σταθμού βάσης. Εφόσον, οι χρήστες δεν βρίσκονται σε σημαντική απόσταση από το κέντρο της κυψέλης επιλέγουν το σταθμό βάσης, από τον οποίο η προσφερόμενη χωρητικότητα είναι μεγαλύτερη, ενώ η ισχύς λήψης λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης δε διαφέρει σημαντικά στις συνδέσεις BS-MS και RS-MS, αφού οι απώλειες στις αντίστοιχες διαδρομές δεν παρουσιάζουν μεταβολές άνω των 10 dB.

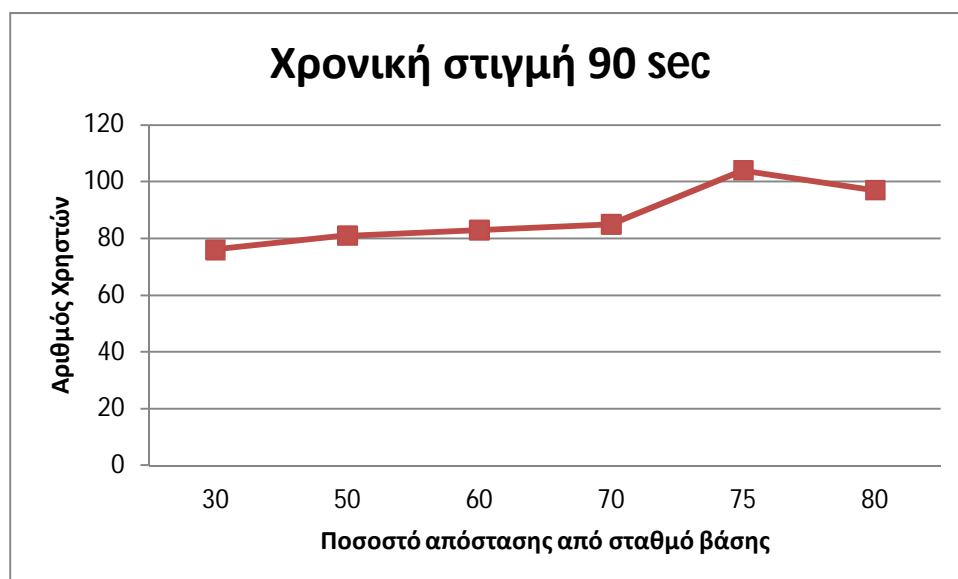
Οι διαφορές στον αριθμό των χρηστών δεν είναι σημαντικές αλλά φαίνεται ότι υπερτερεί η απόσταση 75%.



Διάγραμμα 8.13- Αριθμός χρηστών σε συγκεκριμένες θέσεις αναμεταδοτών τη χρονική στιγμή 50 sec-Κριτήριο ρυθμού μετάδοσης και απώλειες μέσω winner II

Η χρονική στιγμή των 50 sec απεικονίζει μια αντιπροσωπευτική κατάσταση της κυψέλης, όπως αυτή διαμορφώνεται λόγω της κινητικότητας των χρηστών. Οι χρήστες έχουν τυχαίες κατευθύνσεις και καταλαμβάνουν τυχαίες θέσεις σε όλη την έκταση της κυψέλης ενώ αρχίζουν ορισμένοι και βγαίνουν εκτός ορίων κυψέλης.

Η απομάκρυνση από το σταθμό βάσης αυξάνει την απαιτούμενη ισχύ από αυτόν για τη λειτουργία των χρηστών και η επιλογή αναμεταδότη φαίνεται καλύτερη λύση. Για το λόγο αυτό, αυξάνεται ο αριθμός των συνδέσεων RS-MS. Καθώς απομακρύνονται οι αναμεταδότες από το σταθμό βάσης συνδέονται με περισσότερους χρήστες ενώ κοντά στα άκρα ο αριθμός αυτός μειώνεται.



Διάγραμμα 8.14- Αριθμός χρηστών σε συγκεκριμένες θέσεις αναμεταδοτών τη χρονική στιγμή 90 sec-Κριτήριο ρυθμού μετάδοσης και απώλειες μέσω winner II

Ο συνολικός αριθμός των χρηστών εντός κυψέλης έχει μειωθεί και πολλοί χρήστες κινούνται προς τα όρια της κυψέλης. Οι αναμεταδότες συνεχίζουν να εξυπηρετούν μεγάλο αριθμό χρηστών, μικρότερο από την προηγούμενη περίπτωση, με τις θέσεις κοντά στο 75% να συγκεντρώνουν τα μεγαλύτερα ποσοστά χρηστών.

Συμπερασματικά, ο μεγαλύτερος αριθμός των χρηστών παρατηρείται σε απόσταση στο 75% της ακτίνας της κυψέλης στις αντιπροσωπευτικές τιμές που επιλέχθηκαν. Τις πρώτες χρονικές στιγμές, οι αριθμοί των χρηστών των αναμεταδοτών δεν έχουν μεγάλη διαφορά, η οποία αρχίζει να διαφαίνεται στο μέσο της χρονικής στιγμής και να διατηρείται μέχρι το τέλος.

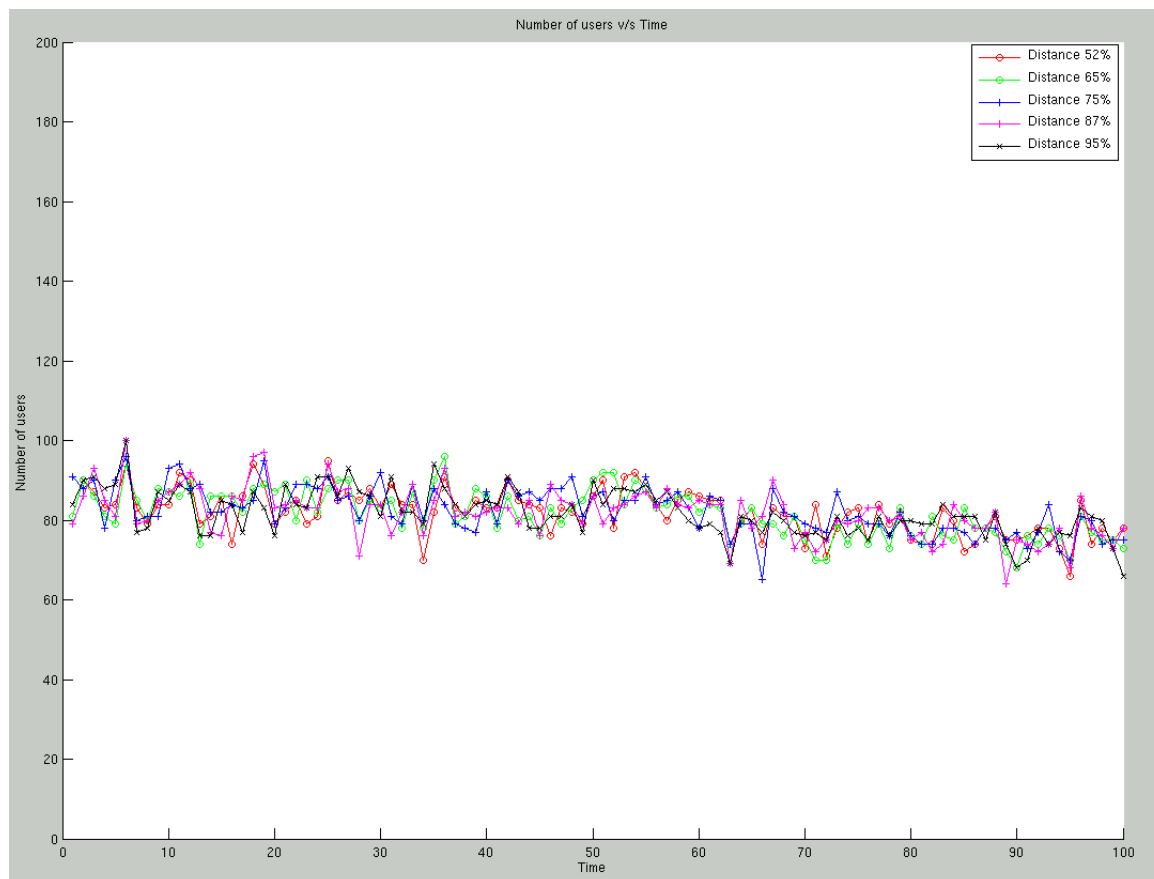
8.5 ΧΡΗΣΗ ΚΕΡΑΙΩΝ ΜΙΜΟ ΣΤΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΜΕ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΤΗΝ ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΙΣΧΥΟΣ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΑΙ ΤΟΥ ΡΥΘΜΟΥ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ

Οι κεραιές ΜΙΜΟ, αποτελώντας μέρος της εξέλιξης των ασυρμάτων επικοινωνιών, θα πρέπει να μελετηθούν στις προσομοιώσεις, καθώς η συμβολή τους θα είναι καθοριστική για τις παραμέτρους που εξετάζονται. Καταρχήν, αναμένεται βελτίωση των αποτελεσμάτων στην ασύρματη επικοινωνία και, ακόμη, στην περίπτωση του προσδιορισμού της βέλτιστης θέσης των αναμεταδοτών που μελετάται, θα δώσει πιο ακριβείς θέσεις για πιο σύγχρονο ασύρματο περιβάλλον.

Κατά την προσομοίωση θεωρήθηκε σύστημα ΜΙΜΟ 4x4 και για τη μετάδοση του σήματος δεν απαιτεί πρόσθετο εύρος ζώνης και αύξηση της ισχύος μεταφοράς.

8.5.1 Αποτελέσματα προσομοίωσης με κριτήριο την ελάχιστη ισχύ στο σύστημα με τη χρήση κεραιών ΜΙΜΟ

Η διαδικασία που χρησιμοποιήθηκε είναι η ίδια και στο σύστημα SISO που περιγράφεται στην παράγραφο 7.4.4. Ακολουθούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων

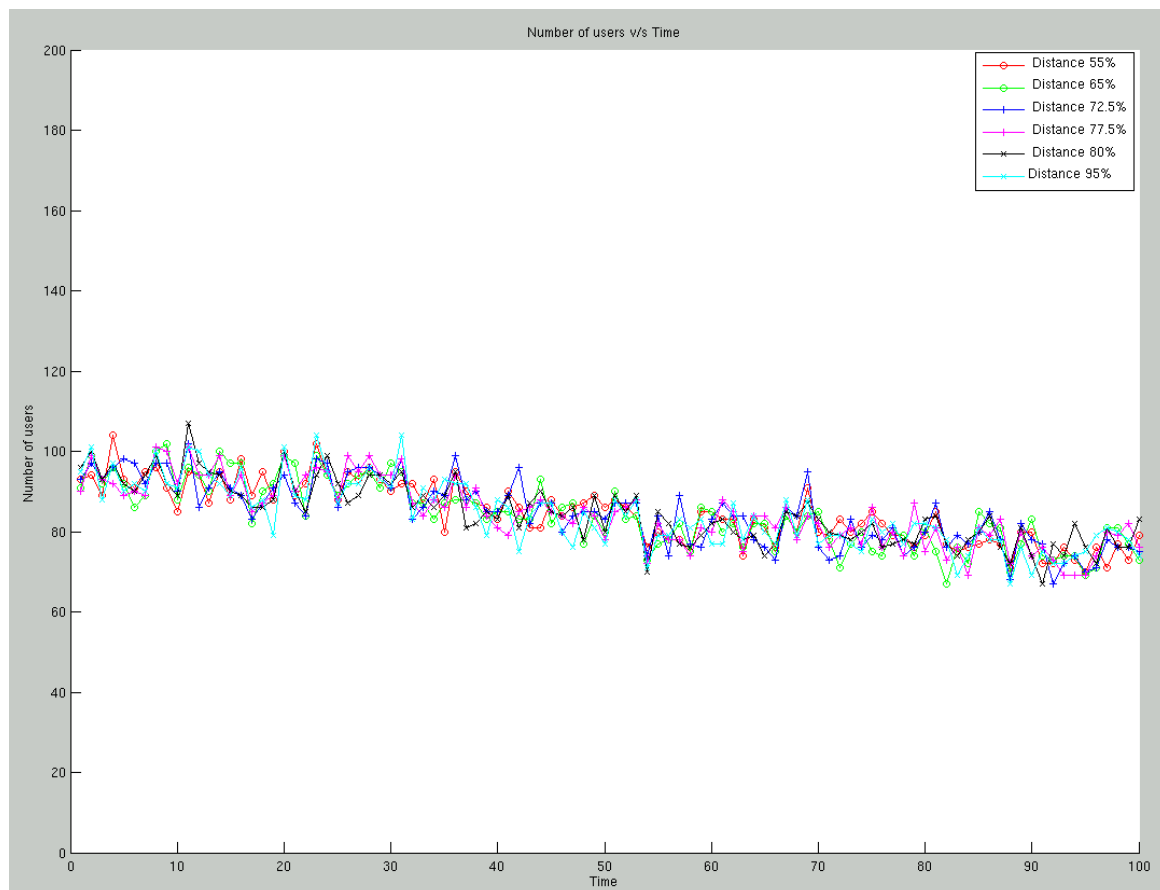


Διάγραμμα 8.15- Τηλεπικοινωνιακή κίνηση κυψέλης 200 χρηστών με κριτήριο την ελαχιστοποίηση της ισχύος και απώλειες μέσω winner II-MIMO κεραίες_1

Χωρίζοντας το διάγραμμα σε τέσσερα χρονικά διαστήματα, παρατηρείται στο πρώτο διάστημα 0-20 sec υπερισχύουν οι αναμεταδότες σε απόσταση 65% και 52% από το σταθμό βάσης και ακολουθούν οι αναμεταδότες σε απόσταση 87%, 75% και 95%. Οι χρήστες βρίσκονται εντός της κυψέλης και κοντά στο σταθμό βάσης και προτιμούν τους πιο κοντινούς σε αυτόν αναμεταδότες.

Η εικόνα αλλάζει στο επόμενο χρονικό διάστημα 20-50 sec, στο οποίο οι αναμεταδότες στο 75% της ακτίνας επιλέγονται από περισσότερους χρήστες, έπειτα στο 87% και ακολουθούν 65%, 52% και, τέλος, οι πιο απομακρυσμένοι στο 95% της ακτίνας.

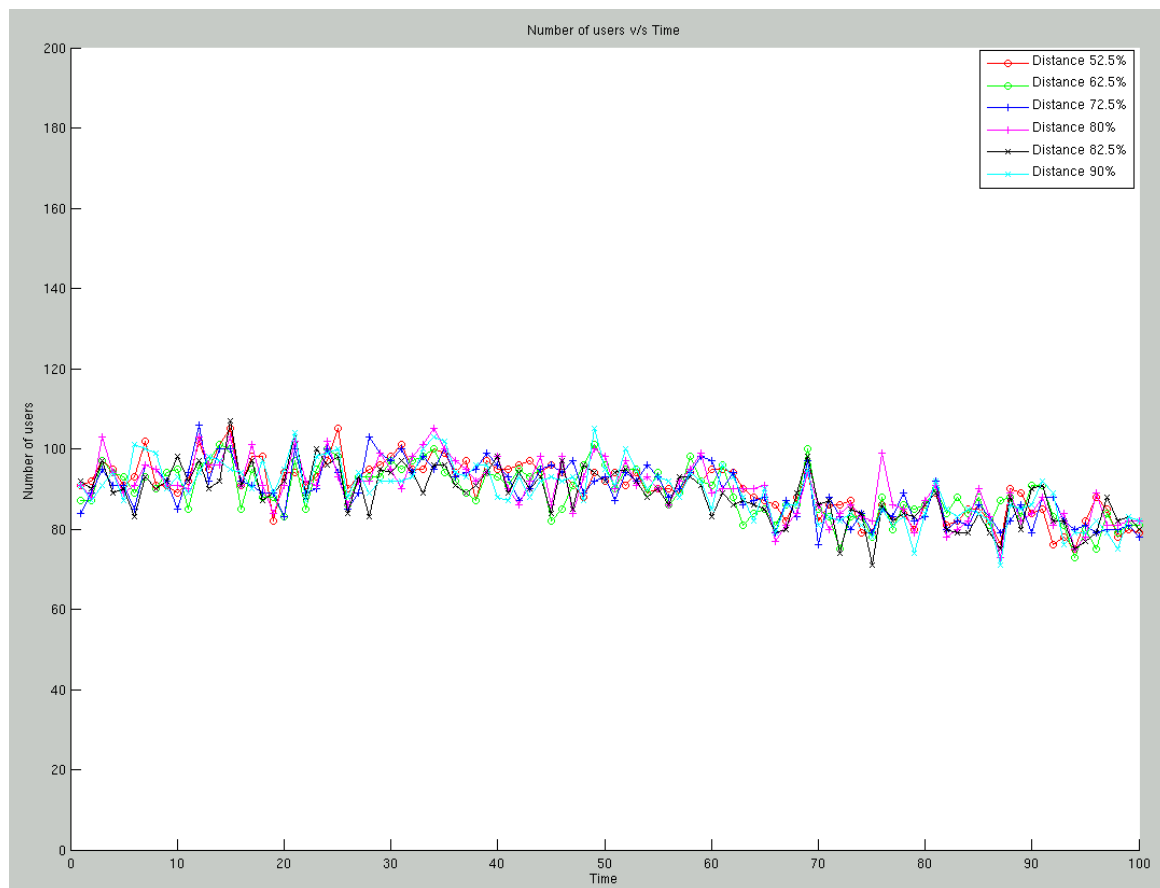
Στα δυο επόμενα διαστήματα 50-80 sec και 80-100 sec παρουσιάζονται ίδια αποτελέσματα με τους αναμεταδότες να κατατάσσονται ως εξής 75%, 87%, 95%, 65%, 52% της ακτίνας. Με την πάροδο του χρόνου, οι χρήστες οδεύουν προς την άκρη της κυψέλης και για αυτό προτιμώνται οι πιο απομακρυσμένοι αναμεταδότες.



Διάγραμμα 8.16- Τηλεπικοινωνιακή κίνηση κυψέλης 200 χρηστών με κριτήριο την ελαχιστοποίηση της ισχύος και απώλειες μέσω winner II-MIMO κεραίες_2

Παρόμοια αποτελέσματα αποτυπώνονται και στη δεύτερη προσομοίωση. Στο χρονικό διάστημα 0-20 sec προτιμώνται οι πιο κοντινοί αναμεταδότες 55%, 65% και στη συνέχεια, οι αναμεταδότες σε αποστάσεις 72.5%, 80% και 77.5%, με τον αναμεταδότη στο 80% της ακτίνας να έχει και τη μέγιστη τιμή στο διάστημα αυτό. Τέλος, ο πιο απομακρυσμένος αναμεταδότης στο 95% της απόστασης δεν εξυπηρετεί συγκριτικά μεγαλύτερο αριθμό τερματικών.

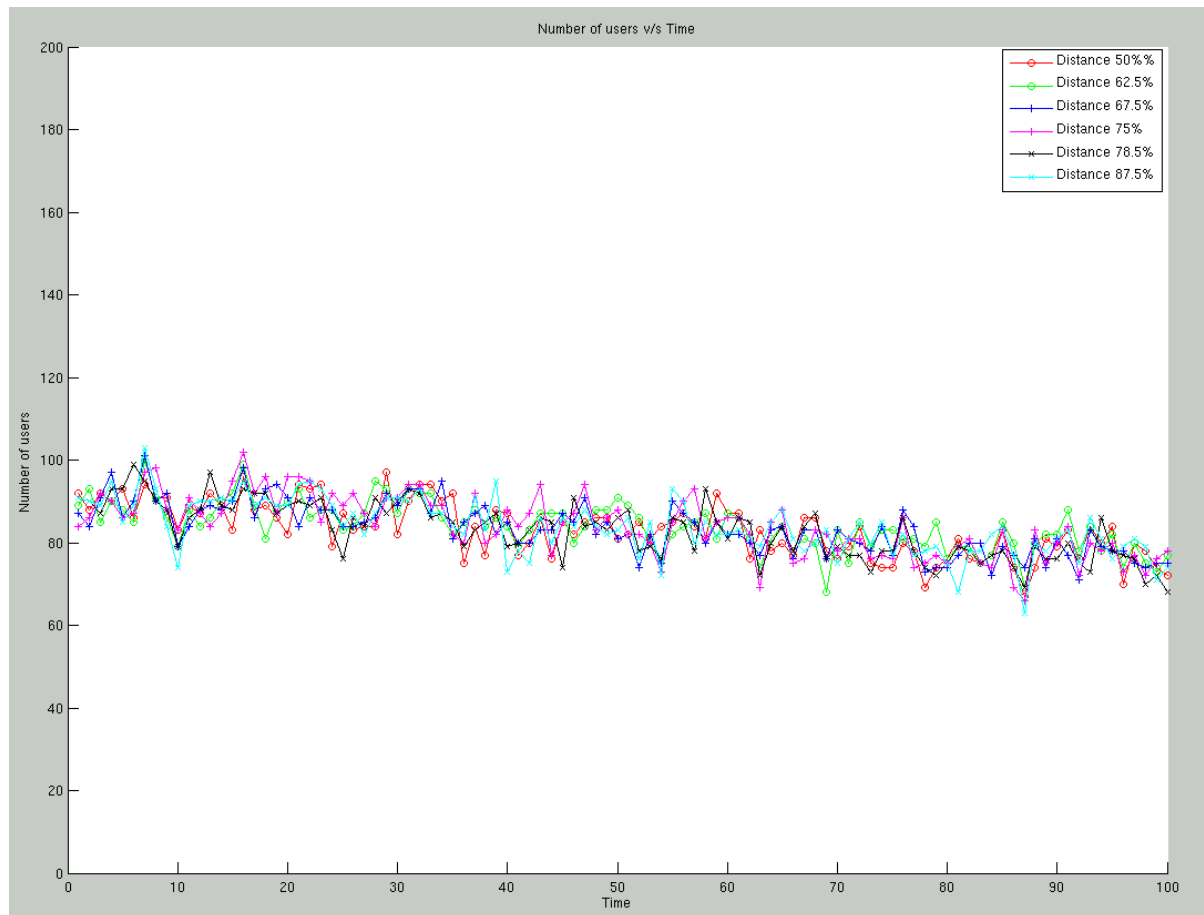
Από τα 20 sec και έπειτα, υπερτερούν οι αναμεταδότες στις θέσεις 80% και 77.5% με παρόμοια αριθμητικά αποτελέσματα. Μέχρι τα 50 sec, εξυπηρετούν περισσότερους χρήστες οι αναμεταδότες στις πιο μικρές αποστάσεις 72.5%, 65% και 55% της ακτίνας και τέλος, ο πιο απομακρυσμένος 95%. Η κατάταξη αλλάζει από 50-80 sec με τον αναμεταδότη στο 95% της απόστασης να εξυπηρετεί περισσότερους και στη συνέχεια, οι πιο κοντινοί. Παρόμοια αποτελέσματα αποτυπώνονται και στο τελευταίο διάστημα.



Διάγραμμα 8.17- Τηλεπικοινωνιακή κίνηση κυψέλης 200 χρηστών με κριτήριο την ελαχιστοποίηση της ισχύος και απώλειες μέσω winner II-MIMO κεραίες_3

Τα αποτελέσματα δεν εμφανίζουν πολλές διαφορές στο πρώτο χρονικό διάστημα, με τους κοντινούς να προτιμώνται και, προοδευτικά, οι πιο μακρινοί. Στα επόμενα διαστήματα, σταθεροποιούνται τα αποτελέσματα και αρχικά προτιμάται ο αναμεταδότης στο 80% της απόστασης, έπειτα 77.5% και 72.5%, έπειτα οι κοντινοί και, τέλος, ο αναμεταδότης στο 90% της απόστασης.

Μετά τα 50 sec, αυξάνονται τα αριθμητικά αποτελέσματα για τον πιο απομακρυσμένο αναμεταδότη και, ταυτόχρονα, μειώνονται για τους πιο κοντινούς με τη σειρά να διαμορφώνονται ως εξής 80%, 82.5%, 72.5% και 90% και, τέλος, 62.5% και 52.5% της ακτίνας της κυψέλης.



Διάγραμμα 8.18- Τηλεπικοινωνιακή κίνηση κυψέλης 200 χρηστών με κριτήριο την ελαχιστοποίηση της ισχύος και απώλειες μέσω winner II-MIMO κεραίες_4

Αναλύοντας τα συνολικά αποτελέσματα δεν υπάρχει μεγάλη διαφοροποίηση. Υπερισχύουν οι αναμεταδότες στο 78.5% και 75% της απόστασης και, στη συνέχεια στο 67.5% και 87.5% της απόστασης, με τον πρώτο στα πρώτα δευτερόλεπτα και το δεύτερο στα επόμενα να υπερισχύουν, ενώ λιγότερους συνολικά χρήστες εξυπηρετούν οι πιο κοντινοί εκτός από τα πρώτα sec.

Από τις παραπάνω προσομοιώσεις προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

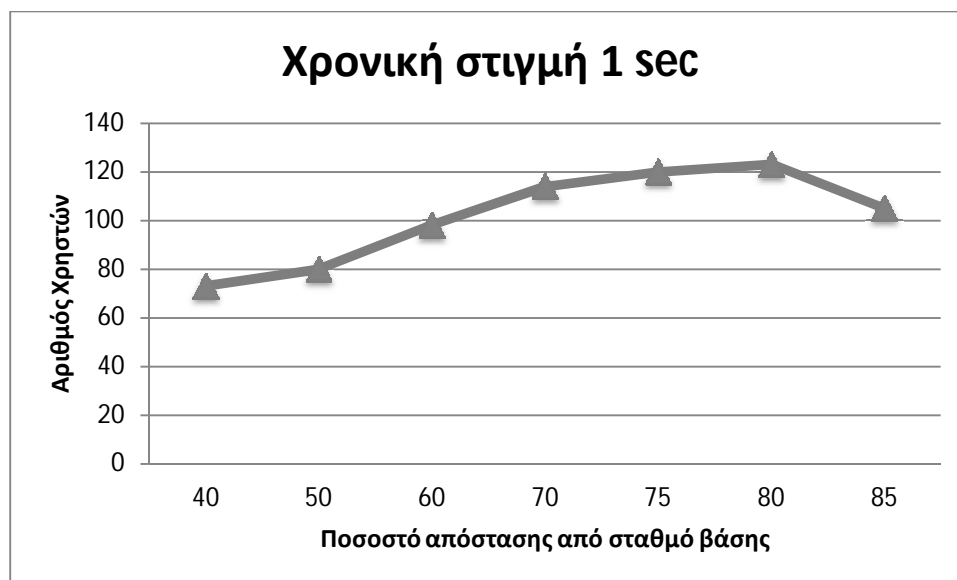
- Οι κοντινοί αναμεταδότες επιλέγονται τις πρώτες χρονικές στιγμές και για μικρό χρονικό διάστημα, καθώς οι χρήστες βρίσκονται στο εσωτερικό της κυψέλης και με μεγαλύτερη πιθανότητα πλησιέστερα στο σταθμό βάσης.
- Ο πιο απομακρυσμένος αναμεταδότης, ενώ στα πρώτα δευτερόλεπτα δεν επιλέγεται από πολλούς χρήστες, όπως και αναμενόταν, καθώς δεν είναι πολλοί εξαρχής οι χρήστες στις άκρες της κυψέλης, στη συνέχεια, μέχρι το τέλος του χρονικού διαστήματος, επιλέγεται πρώτος από τους χρήστες, όπως και αναμενόταν, εφόσον κινούνται προς τα άκρα της κυψέλης.
- Στο μεγαλύτερο χρονικό διάστημα περισσότερους χρήστες εξυπηρετούν οι αναμεταδότες στις θέσεις 75%-85% περίπου, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από τα αποτελέσματα και των ενδιάμεσων σε αυτές τις θέσεις αναμεταδοτών, τα

αποτελέσματα των οποίων, καθότι παρόμοια, δεν αποτυπώνονται στο διάγραμμα. Τα αποτελέσματα αυτά είναι σταθερά σε όλο το χρονικό διάστημα, πέραν των πρώτων δευτερολέπτων, με εναλλαγές μεταξύ τους.

8.5.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης με κριτήριο το ρυθμό μετάδοσης με τη χρήση κεραιών MIMO

Στην προσομοίωση οι αναμεταδότες καταλαμβάνουν σταθερές θέσεις, σε αποστάσεις 40%, 50%, 60%, 70%, 75%, 80% και 85% της ακτίνας της κυψέλης. Για κάθε χρήστη, ο οποίος έχει συγκεκριμένη απαίτηση σε ισχύ λήψης υπολογίστηκαν οι καθυστερήσεις στη μετάδοση του σήματος για κάθε διαφορετική διαδρομή. Στις διαδρομές με μεγάλη καθυστέρηση, η ισχύς των σημάτων τους αφαιρέθηκαν από τη συνολική ισχύ των σημάτων που έλαβε ο δέκτης.

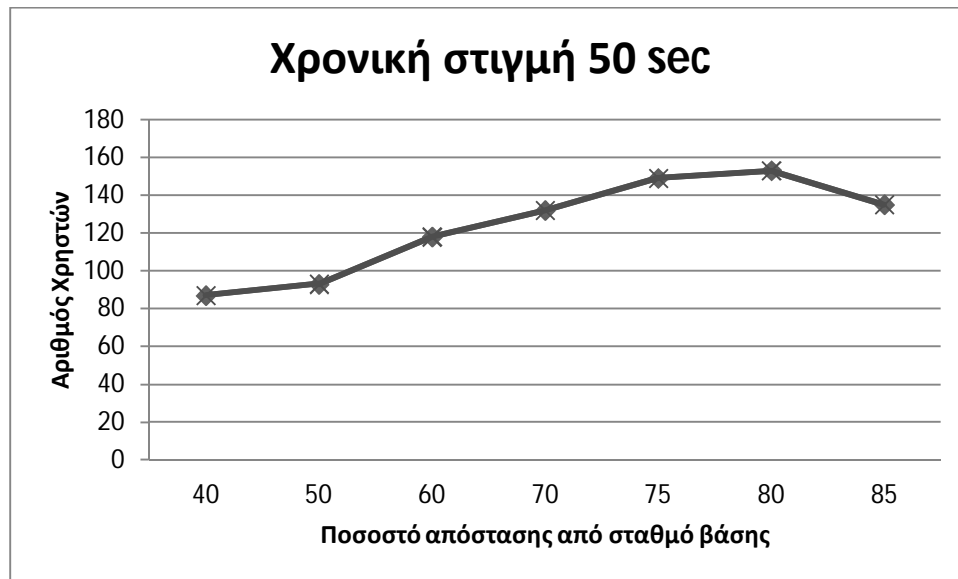
Στα διαγράμματα θεωρήθηκαν όπως και στην περίπτωση του SISO συστήματος τρεις χρονικές στιγμές 1 sec, 50 sec και 90 sec. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι:



Διάγραμμα 8.19- Αριθμός χρηστών σε συγκεκριμένες θέσεις αναμεταδοτών τη χρονική στιγμή 1 sec-Κριτήριο ρυθμού μετάδοσης και απώλειες μέσω winner II-MIMO κεραιές

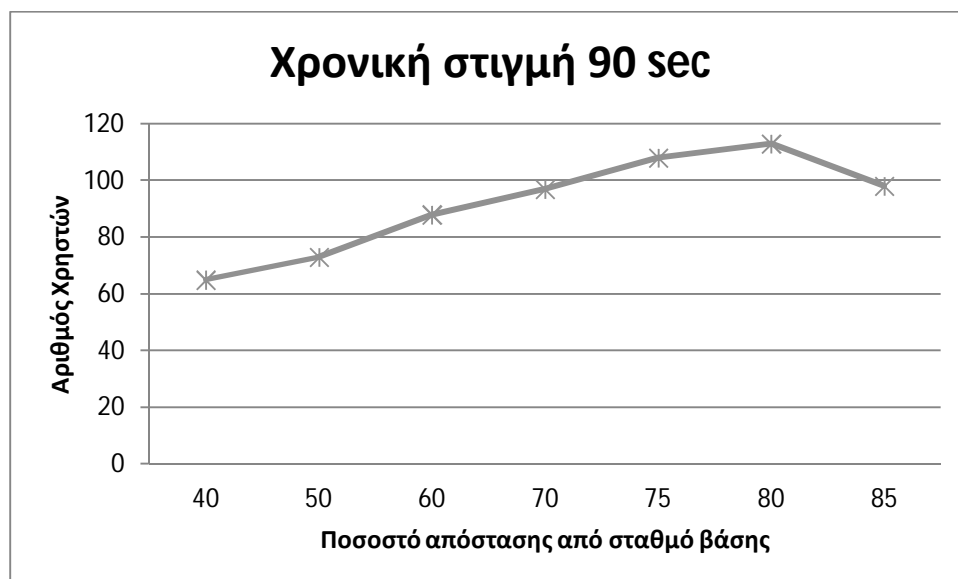
Στην αρχή της μελέτης του συστήματος, κάθε αναμεταδότης εξυπηρετεί λιγότερους από το σταθμό βάσης, και οι τελευταίοι βρίσκονται κυρίως μακριά από το κέντρο της κυψέλης. Οι περισσότεροι στο εσωτερικό επιλέγουν τη σύνδεση BS-MS λόγω μικρότερης κατανάλωσης ισχύος και επειδή διατίθενται περισσότερα resource blocks άρα και καλύτερος ρυθμός μετάδοσης.

Παρατηρείται μεγαλύτερος αριθμός χρηστών σε απόσταση 75%-80% της ακτίνας της κυψέλης και η διαφορά χρηστών σε σύγκριση με τους πιο κοντινούς στο σταθμό βάσης είναι μεγάλη.



Διάγραμμα 8.20- Αριθμός χρηστών σε συγκεκριμένες θέσεις αναμεταδοτών τη χρονική στιγμή 50 sec-Κριτήριο ρυθμού μετάδοσης και απώλειες μέσω winner II-MIMO κεραίες

Η χρονική στιγμή των 50 sec δίνει αντιπροσωπευτική εικόνα για την κατάσταση του συστήματος. Οι χρήστες έχουν μετακινηθεί στην κυψέλη, κάποιους από τους οποίους έχουν βγει και εκτός ορίων της κυψέλης. Οι αποστάσεις 70%-80% κυριαρχούν και επιλέγονται περισσότερο από τους χρήστες.



Διάγραμμα 8.21- Αριθμός χρηστών σε συγκεκριμένες θέσεις αναμεταδοτών τη χρονική στιγμή 90 sec-Κριτήριο ρυθμού μετάδοσης και απώλειες μέσω winner II-MIMO κεραίες

Αποτυπώνει την τελική κατάσταση του συστήματος. Αρκετοί χρήστες έχουν αποχωρήσει από την κυψέλη και οι υπόλοιποι απομακρύνονται από το κέντρο της κυψέλης. Οι χρήστες είναι σαφώς λιγότεροι αριθμητικά και οι περισσότεροι επιλέγουν τους αναμεταδότες, με την απόσταση των 80% να υπερिशύει.

Συμπερασματικά, στο 80% της ακτίνας της κυψέλης, παρατηρείται ο μεγαλύτερος αριθμός εξυπηρετούμενων χρηστών από πλευράς αναμεταδοτών σε κάθε μια από τις τρεις αντιπροσωπευτικές στιγμές που επιλέχθηκαν. Σε σύγκριση με τη SISO διάταξη κεραιών, παρατηρείται αύξηση της εμβέλειας του σταθμού βάσης, ο οποίος και προτιμάται σε μεγαλύτερες αποστάσεις.

9. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ- ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

9.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΕΡΑΙΩΝ SISO

Αναλύοντας τα αποτελέσματα των δύο θεωρητικών ως προς τον τρόπο υπολογισμού της ισχύος μοντέλων, καταδεικνύεται η άμεση συσχέτισή τους με την απόσταση των χρηστών από τους αναμεταδότες και από το σταθμό βάσης. Η εξίσωση του γενικού μοντέλου απωλειών που χρησιμοποιήθηκε εξαρτάται εκτός από το περιβάλλον και από το κέρδος της σύνδεσης και από την απόσταση, όπως προκύπτει από τους τύπους (24), (27) και (28).

- Στο πρώτο θεωρητικό μοντέλο που εφαρμόστηκε έγινε η μελέτη διάταξης με έναν αναμεταδότη και ένα χρήστη. Η βέλτιστη θέση αναμεταδότη προσδιορίστηκε στο μέσο της απόστασης έτσι ώστε τόσο η ισχύς που καταναλώνεται από το σταθμό βάσης όσο και από τον αναμεταδότη να είναι η ελάχιστη δυνατή συνολικά.
- Στο δεύτερο θεωρητικό μοντέλο, δημιουργήθηκε σύστημα 200 χρηστών και έγινε ταυτόχρονη μελέτη στο επίπεδο του χρόνου και της θέσης του αναμεταδότη ως προς το σταθμό βάσης και το χρήστη, χρησιμοποιώντας το ρυθμό μετάδοσης ως μέγεθος σύγκρισης.
 - Αναλύοντας τα αποτελέσματα ως προς την απόσταση, αρχικά, όλοι οι χρήστες επιλέγουν το σταθμό βάσης για εξυπηρέτηση και καθώς απομακρύνονται από το κέντρο αρχίζουν να μεταπίπτουν στους αναμεταδότες. Σε θέσεις κοντά στο 50% της απόστασης χρήστη-σταθμού βάσης αρχίζουν συνολικά οι χρήστες να χρησιμοποιούν τους αναμεταδότες. Αυτό, ωστόσο, δεν παρατηρείται στο σύνολο των γειτονικών θέσεων. Στο σημείο αυτό, οι χρήστες βρίσκονται στο μεταίχμιο και η διαφορά στο ρυθμό μετάδοσης από το σταθμό βάσης και από τους αναμεταδότες είναι ελάχιστη. Στο 70% έως το 80% της απόστασης σε όλες τις ενδιάμεσες θέσεις γίνεται η χρήση των αναμεταδοτών, καθώς εξυπηρετεί αποδοτικότερα και τους απομακρυσμένους χρήστες της κυψέλης.
 - Παρόμοια συμπεράσματα συνάγονται και από την ανάλυση σε επίπεδο του χρόνου. Πιο γρήγορα μπαίνουν σε λειτουργία οι αναμεταδότες που βρίσκονται στο 50% της απόστασης και προοδευτικά στο 70%, ενώ οι πιο απομακρυσμένοι από το κέντρο καθυστερούν στην ενεργοποίηση για την εξυπηρέτηση των χρηστών. Σε ορισμένες περιπτώσεις υπερισχύουν οι μεσαίες αποστάσεις 65%-75% αλλά αποτελούν εξαιρέσεις, καθώς στα αποτελέσματα υπεισέρχεται ο τυχαίος καθορισμός των τιμών της ισχύος και της αρχικής θέσης των χρηστών.

Η δεύτερη θεωρητική προσέγγιση επιβεβαιώνει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συστήματος με έναν χρήστη. Στον τύπο του ρυθμού μετάδοσης, η ισχύς που υπεισέρχεται στον υπολογισμό εξαρτάται εκτός από την ισχύ εκπομπής και από το κέρδος της σύνδεσης,

μέγεθος αντιστρόφως ανάλογο με την απόσταση. Επομένως, στο μέσο της απόστασης θα υπάρχει καλύτερη κατανομή της ισχύος.

Αναλύοντας τα πειραματικά μοντέλα στα οποία έγινε υπολογισμός των απωλειών μέσω του προγράμματος winner II, στη μελέτη του συστήματος εισέρχονται περισσότεροι παράγοντες που επηρεάζουν τη μετάδοση του σήματος. Οι εξισώσεις απωλειών είναι ακριβείς και διαφοροποιούνται ανάλογα με το περιβάλλον της κυψέλης ενώ λαμβάνουν υπόψη και τη σκίαση, τα ύψη των κεραιών και τη συχνότητα λειτουργίας, εκτός της απόστασης. Η προσομοίωση θεωρεί περιβάλλον πολυδιαδρομικής διάδοσης αναλύοντας τα χαρακτηριστικά, όπως σχετική ισχύς και καθυστέρηση, της κάθε διαδρομής.

- Δημιουργώντας σύστημα 200 χρηστών με ένα σταθμό βάσης και τρεις αναμεταδότες, αρχικά, έγινε προσέγγιση της λειτουργίας των αναμεταδοτών ως επαναλήπτη που ενισχύει και επανεκπέμπει το σήμα, ώστε να διευρύνεται ο αριθμός των χρηστών που εξυπηρετούνται από την κυψέλη, κατά την οποία έγινε ποσοτική επιβεβαίωση της επέκτασης της κυψέλης.
- Στη συνέχεια, τίθεται το κριτήριο της απόστασης για την επιλογή σύνδεσης μέσω σταθμού βάσης ή μέσω αναμεταδότη, προσεγγίζοντας με τον τρόπο αυτό το θεωρητικό μοντέλο, με τις συνθήκες του περιβάλλοντος να καθορίζονται ακριβέστερα μέσω του προγράμματος. Προέκυψαν παρόμοια αποτελέσματα, με το μέσο της απόστασης χρήστη-σταθμού βάσης να αποτελεί την καλύτερη πιθανή θέση τοποθέτησης του αναμεταδότη. Αναμενόμενο, καθώς η απόσταση είναι το σημαντικό μέγεθος του θεωρητικού μοντέλου. Ωστόσο, η χρήση των εξισώσεων κίνησης για ταυτόχρονη μελέτη του συστήματος συναρτήσει της κινητικότητας των χρηστών, δίνει σημαντικά αποτελέσματα που αφορούν την αποδοτικότερη διαχείριση των απομακρυσμένων MS της κυψέλης.
- Στην τρίτη προσομοίωση, λαμβάνεται υπόψη η παράμετρος της ισχύος των χρηστών και τίθεται ως κριτήριο επιλογής διαδρομής μετάδοσης του σήματος, ώστε να υπάρχει μικρότερη κατανάλωση ισχύος στο σύστημα. Από τα διαγράμματα, φαίνεται ο συνολικός αριθμός να κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα σε κάθε προσομοίωση, γεγονός που οφείλεται στη συμμετρία των αναμεταδοτών. Σε επίπεδο χρόνου, δεν διακρίνεται σημαντική διαφορά στα διαγράμματα (αριθμού χρηστών)-(χρόνου), ωστόσο, εάν ληφθεί υπόψη και η κινητικότητα των χρηστών, τα αναγωγικά αποτελέσματα είναι πιο ενδεικτικά. Με την πάροδο του χρόνου ορισμένοι χρήστες βγαίνουν εκτός ορίων κυψέλης μειώνοντας το συνολικό αριθμό ώστε ο λόγος $\frac{\text{αριθμός μεταδόσεων RS-MS}}{\text{αριθμός μεταδόσεων RS-MS} + \text{αριθμός μεταδόσεων BS-MS}}$ να αυξάνεται. Στα πρώτα sec του χρονικού διαστήματος, οι αναμεταδότες σε αποστάσεις 50% υπερισχύουν ενώ στο τέλος του χρονικού διαστήματος οι απομακρυσμένοι αναμεταδότες εξυπηρετούν τους πιο μακρινούς χρήστες, οι οποίοι έχουν πληθύνει, εξυπηρετώντας καλύτερα τις ανάγκες του συστήματος. Ωστόσο, σε αποστάσεις κοντά στο 75% της απόστασης BS-MS η τοποθέτηση του αναμεταδότη δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα στα όρια του χρονικού διαστήματος και υπερτερεί στο μεγαλύτερο μέρος αυτού.
- Στην τελευταία προσομοίωση, λαμβάνονται υπόψη οι πραγματικές συνθήκες πολυδιαδρομικής διάδοσης, κατά την οποία οι διαδρομές, όπου η καθυστέρηση των

επιμέρους σημάτων στα οποία χωρίζονται τα αρχικά, υπολογίζεται και εάν υπερβαίνει συγκεκριμένη τιμή, η σχετική ισχύς της συγκεκριμένης οδού αφαιρείται από το τελικό σήμα και θεωρείται παρεμβολή. Η ισχύς αυτή υπεισέρχεται στη μελέτη του συστήματος μέσω της εξίσωσης του ρυθμού μετάδοσης, η οποία επιπλέον επηρεάζεται από το θόρυβο. Εκτός αυτού, λόγω των αυξημένων λειτουργιών τους, οι αναμεταδότες καταλαμβάνουν το 30% του εύρους ζώνης το χρησιμοποιούν για δικές τους μεταδόσεις προς το σταθμό βάσης, επομένως, το 70% των resource blocks διατίθεται για τη σύνδεση MS-RS, ανασταλτικός παράγοντας για τους χρήστες να προτιμήσουν τους αναμεταδότες.

Πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για τη μέση χρονική τιμή και για τις ακραίες τιμές του χρονικού διαστήματος και σε θέσεις γύρω στο 75% παρατηρήθηκε ο μεγαλύτερος αριθμός εξυπηρετούμενων χρηστών. Για κοντινές αποστάσεις θα προτιμηθεί ο σταθμός βάσης λόγω περισσότερων resource blocks στη διάθεση της μετάδοσης και σε μακρινές αποστάσεις, η καθυστέρηση στις διαδρομές αυξάνεται λόγω των εμποδίων και της μεγαλύτερης απόστασης, μειώνοντας την ισχύ.

Με το αποτέλεσμα αυτό επιβεβαιώνεται το αποτέλεσμα και της προηγούμενης προσομοίωσης καθιστώντας τις θέσεις κοντά στο 75% της απόστασης την πλέον κατάλληλη.

9.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ MIMO

Η χρήση της τεχνολογίας πολλαπλών κεραιών βελτίωσε τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, επιβεβαιώνοντας τα οφέλη για τα οποία και αναπτύχθηκαν και προτιμώνται στα σύγχρονα ασύρματα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα. Αναλύοντας και τα δύο σενάρια προσομοιώσεων που εξάγονται τα εξής συμπεράσματα συγκριτικά και με τις προσομοιώσεις χωρίς σύστημα πολλαπλών κεραιών:

- Η πρώτη εμφανής αλλαγή των αποτελεσμάτων είναι ο αριθμός χρηστών που εξυπηρετούνται συνολικά από το σύστημα και κατ' επέκταση από τους αναμεταδότες. Η αύξηση αυτή προσεγγίζει το ποσοστό του 25%. Σε αυτούς περιλαμβάνονται χρήστες, οι οποίοι δεν είχαν επιτυχή σύνδεση στην περίπτωση των μονών κεραιών. Οι κεραιές MIMO ελαττώνουν τις συνέπειες της πολυδιαδρομικής διάδοσης, η οποία είναι επιζήμια ειδικά για το είδος του σεναρίου περιβάλλοντος που επιλέχθηκε, λόγω αυξημένων απωλειών. Η μείωση των απωλειών και των παρεμβολών, με ταυτόχρονη διατήρηση των ισχύων λειτουργίας σταθμού βάσης και αναμεταδοτών στα ίδια επίπεδα τιμών, αυξάνουν την ισχύ λήψης στο δέκτη και υπάρχουν περισσότερες επιτυχημένες συνδέσεις.
- Η τελική απόσταση από το σταθμό βάσης, στην οποία η τοποθέτηση των αναμεταδοτών εξυπηρετεί περισσότερους χρήστες, είναι λίγο μεγαλύτερη από την αντίστοιχη στο SISO σύστημα. Ο σταθμός βάσης φαίνεται να κυριαρχεί σε μεγαλύτερη περιοχή από την προηγούμενη, καθότι οι απώλειες έχουν μειωθεί. Οι χρήστες διατηρώντας την ίδια κινητικότητα αργούν να φύγουν από την εμβέλειά του και να μεταπηδήσουν στους αναμεταδότες. Το γεγονός επιβεβαιώνεται από τα χαρακτηριστικά των κεραιών MIMO, η χρήση των οποίων τείνει να αυξήσει την

απόσταση BS-MS που τερματικό και σταθμός βάσης έχουν επιτυχή σύνδεση, οδηγώντας στην επέκταση της κυψέλης.

- Παρόμοια αποτελέσματα εμφανίζονται και στην περίπτωση των αναμεταδοτών, η εμβέλεια των οποίων αυξήθηκε ώστε να αντέχουν τις απαιτήσεις και των πολύ απομακρυσμένων από το κέντρο χρηστών.
- Η χρήση κεραιών MIMO επέφερε θετικά αποτελέσματα και στο ρυθμό μετάδοσης. Γενικά, αυξήθηκε το κέρδος σύνδεσης και η ταυτόχρονη μείωση των απωλειών αύξησε το SNR στον τύπο του ρυθμού μετάδοσης. Σε αυτό συνέβαλλε και η ελάχιστη, σε σύγκριση με την προηγούμενη περίπτωση, μείωση της ισχύος από τις πολλαπλές διαδρομές μετάδοσης του σήματος. Οι αναμεταδότες βρίσκουν βέλτιστη θέση γύρω στο 80% της απόστασης, λόγω των περισσότερων resource blocks που διατίθενται στη σύνδεση από το σταθμό βάσης. Το πλήθος των χρηστών στους αναμεταδότες αυξάνεται προοδευτικά με την αύξηση της απόστασης BS-RS ενώ αυξάνεται δίνοντας αντιπροσωπευτική εικόνα του συστήματος στα 50 sec και μειώνεται ελαφρώς στα 90 sec, λόγω αλλαγής κυψέλης των χρηστών.
- Ο τύπος του αναμεταδότη που επιτελεί παραπάνω λειτουργίες μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ανεξάρτητος βοηθητικός σταθμός βάσης βοηθώντας στην αναχρησιμοποίηση συχνοτήτων. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι σε κάθε αναμεταδότη, υπό τις ανωτέρω προϋποθέσεις, συνδέεται εφάμιλλος με το σταθμό βάσης αριθμός χρηστών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Bandwidth Sharing for Relaying in Cellular Systems, Narayanan Krishnan, Roy D. Yates, Narayanan B. Mandayam, Jignesh S. Panchal
- [2] www.wikipedia.org
- [3] LTE: The Future of Mobile Broadband Technology, white paper, verizonwireless
- [4] Συστήματα Κινητών Επικοινωνιών, Αθανάσιος Κανατάς, Φίλιππος Κωνσταντίνου, Γεώργιος Πάντος, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2008
- [5] www.3gpp.org
- [6] www.ieeeahn.org
- [7] Cellular Communications, Web ProForum Tutorials, The International Engineering Consortium
- [8] www.radio-electronics.com
- [9] Δίκτυα Υπολογιστών, Andrew S. Tanenbaum, Τέταρτη Αμερικανική Έκδοση, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2003
- [10] Κεραίες Ασύρματες Ζεύξεις, Χ. Καψάλης, Π. Κωττής, Εκδόσεις Τζιόλας, 2008
- [11] Ασύρματες Επικοινωνίες, Παναγιώτης Γ. Κωττής, Παντελής- Δανιήλ Μ. Αράπογλου, Εκδόσεις Τζιόλας, 2011
- [12] Winner II, Chanell Models, IST-4-027756 Winner II, D1.1.2v1
- [13] Overview of the 3GPP Long Term Evolution Physical Layer, white paper, freescale semiconductor 07/2007
- [14] Key features of the LTE radio interface, Erik Dahlman, Anders Furuskar, Ylva Jading, Magnus Lindstorm and Stefan Parkvall, Ericsson Review No. 2, 2008
- [15] LTE Resource Guide, www.us.anritsu.com, 2009, Anritsu Company
- [16] OFDM Simulation Using Matlab, Smart Antenna Research Laboratory, Dr. Mary Ann Ingram, Guillermo Acosta, August, 2000
- [17] Studies on the Viability of Cellular Multihop Networks with Fixed Relays, Bogdan Timus, Doctoral Dissertation in Telecommunications, Stockholm, Sweden 2009, KTH Information and Communication Technology
- [18] Relay-Assisted Communication: Fundamental Limits and Selection Strategies, Caleb K. Lo, B.S.; M.S.E., Dissertation, The University of Texas at Austin, December 2008
- [19] MIMO Wireless Communication, Daniel W. Bliss, Keith W. Forsythe, and Amanda M. Chan, Lincoln Laboratory Journal, Volume 15, Number 1, 2005
- [20] <http://www.raymaps.com/index.php/winner-ii-path-loss-model/>

[21] LTE-SAE architecture and performance, Per Beming, Lars Frid, Goran Hall, Peter Malm, Thomas Noren, Magnus Olsson and Goran Rune, Ericsson review No. 3, 2007