



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

ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΓΙΑ ΠΟΛΥΚΥΨΕΛΩΤΑ OFDMA ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΣΤΕΙΑΚΟΓΙΑΝΝΑΚΗ Ν. ΙΩΑΝΝΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ : ΚΑΚΛΑΜΑΝΗ ΔΗΜΗΤΡΑ-ΘΕΟΔΩΡΑ
ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΡΙΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΙΟΣ 2007



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΓΙΑ ΠΟΛΥΚΥΨΕΛΩΤΑ OFDMA ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Στειακογιαννάκη Ν. Ιωάννη

Επιβλέπουσα : Κακλαμάνη Δήμητρα-Θεοδώρα
Αναπληρώτρια καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 24^η Μαΐου 2007

.....
Κακλαμάνη Δ. Ι.

Αναπ. Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

.....
Ουζούνογλου Ν.Κ.

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Βενιέρης Ι. Στ.

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάιος 2007

.....

Στειακογιαννάκης Ν. Ιωάννης

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

Copyright © Στειακογιαννάκης Ν. Ιωάννης

Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Το ασύρματο κανάλι επικοινωνίας συχνά θεωρείται ο αδύναμος κρίκος της τηλεπικοινωνιακής αλυσίδας. Όχι άδικα αν αναλογιστούμε πόσα προβλήματα έχει να αντιμετωπίσει ένα σήμα πληροφορίας που εκπέμπεται από ένα πομπό για να φτάσει σε ένα δέκτη. Μια τεχνική πολλαπλής πρόσβασης, οι απαρχές της οποίας ανάγονται στα μέσα του 20^{ου} αιώνα, η Πολλαπλή Πρόσβαση με Ορθογωνική Διαίρεση Συχνότητας (OFDMA-Orthogonal Frequency Division Multiple Access), είναι ικανή στο να αντιμετωπίζει πολλά από αυτά τα προβλήματα και έτσι σήμερα έχει προταθεί ως ο επικρατέστερος υποψήφιος για τα Δίκτυα Κινητών Επικοινωνιών 4^{ης} Γενιάς (4G) αλλά και τα Ασύρματα Δίκτυα Μητροπολιτικής Περιοχής (WMAN ή WiMAX).

Σκοπός της παρούσης διπλωματικής εργασίας υπήρξε η μελέτη αλγορίθμων διαχείρισης ασυρμάτων πόρων για πολυκυψελωτά συστήματα, τα οποία βασίζονται στην OFDMA τεχνική πολλαπλής πρόσβασης. Οι διαχείριση ασυρμάτων πόρων αποτελεί καίρια και καθοριστικής σημασίας λειτουργία για κάθε ασύρματο δίκτυο. Όπως προέκυψε και από τα προσομοιωτικά αποτελέσματα της παρούσης, οι διαφορετικοί αλγόριθμοι RRM δε μεταβάλλουν μόνον την απόδοση του συστήματος αλλά ακόμα και τη θεώρησή μας για αυτό.

Η παρούσα διπλωματική εργασία, αφού εισάγει τον αναγνώστη στην έννοια του OFDMA παρουσιάζοντας τις βασικές αρχές της τεχνικής αυτής αλλά και στοιχεία από τα διεθνή πρότυπα που ενσωματώνουν το OFDMA, όπως είναι το IEEE 802.16-2004 για τις σταθερές ευρυζωνικές προσβάσεις WiMAX, μελετά τέσσερις διαφορετικούς RRM αλγορίθμους,

- Προσαρμοστικός Αλγόριθμος
- Προσαρμοστικός Αλγόριθμος με Διάσπαση Κυψελών
- Σειριακός Αλγόριθμος
- Συντεταγμένος Αλγόριθμος

Μαζί με τους παραπάνω αλγορίθμους, μελετάται και η επίδραση της τεχνικής της τομεοποίησης στην εφαρμογή του προσαρμοστικού αλγορίθμου.

Πέραν της θεωρητικής ανάλυσης των αλγορίθμων αυτών, ο προσομοιωτικός κώδικας που δημιουργήθηκε, βασισμένος σε κάποιες μάλλον ρεαλιστικές απλουστεύσεις, μας έδωσε τα αποτελέσματα εκείνα τα οποία μετρούν την απόδοση καθενός από τους παραπάνω αλγορίθμους και κρίνουν την καταλληλότητα ή μη για τη χρήση τους σε συγκεκριμένα περιβάλλοντα. Το τελικό συμπέρασμα στο οποίο όμως μας οδήγησαν τα αποτελέσματα αυτά είναι ότι η OFDMA τεχνική είναι σε θέση να προσφέρει πραγματικά ευρυζωνικές υπηρεσίες πάνω από το ασύρματο κανάλι επικοινωνίας.

Λέξεις-Κλειδιά : Πολυπλεξία με Ορθογωνική Διαίρεση Συχνότητας, OFDM, Πολλαπλή Πρόσβαση με Ορθογωνική Διαίρεση Συχνότητας, OFDMA, Διαχείριση Ασυρμάτων Πόρων, RRM, Ευρυζωνική Ασύρματη Πρόσβαση, BWA, Ασύρματα Δίκτυα Μητροπολιτικής Περιοχής, WMAN, WiMAX

Abstract

Wireless communication channel is often considered as the weakest link of telecommunications' chain. Not unfairly, if we consider how many problems an information signal has to encounter as it propagates from its transmitter to a receiver. A multiple access technique, which dates back to the middle of 20th century, Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA), is proved to be able to effectively face many of these problems and, as a result, it has been proposed as the most appropriate candidate not only for Wireless Metropolitan Area Networks (WMAN or WiMAX) but also for Mobile Communications Networks of 4th Generation (4G).

Aim of present diploma dissertation was the study of radio resource management algorithms for multicell systems, based on OFDMA technique of multiple access. Radio Resource Management (RRM) constitutes an operation of vital and decisive importance for every wireless network. The conclusion resulted from the simulation results is that different RRM algorithms not only lead to different capacity for the studying system but also change our viewpoint for it.

Present diploma dissertation, after introducing the reader to OFDMA, presenting both the principles of this multiple access technique and some elements from international standards that incorporate OFDMA, such as IEEE 802.16-2004 for fixed Broadband Wireless Access (BWA), studies four different RRM algorithms, namely,

- Adaptive Algorithm
- Adaptive Algorithm with Reuse Partitioning
- Sequential Algorithm
- Coordinated Algorithm

Furthermore, the well-known technique of sectorization is studied in combination with the Adaptive Algorithm.

Beyond theoretical analysis of above algorithms, simulation code, which was created based on rather realistic assumptions and simplifications, gave us results which measure the capacity that provides each one of the algorithms above and judge the appropriateness or not for use in specific environmental conditions. The final conclusion to which these results lead us is that OFDMA technique is able to offer real broadband services over the wireless communication channel.

Keywords : Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA, Radio Resource Management, RRM, Broadband Wireless Access, BWA, Wireless Area Metropolitan Networks, WMAN, WiMAX

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία συντάχθηκε το ακαδημαϊκός έτος 2006-2007 στη Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου υπό την επίβλεψη της Αναπληρώτριας Καθηγήτριας κας Κακλαμάνης, προς την οποία θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου για την εποικοδομητική της συνεργασία.

Κατά την υλοποίηση και συγγραφή της παρούσης, ουσιαστική υπήρξε η συμβολή και βοήθεια του Διδάκτορα και Ερευνητή Ηλεκτρολόγου Μηχανικού και Μηχανικού Υπολογιστών κ. Τσούλου, τον οποίο επίσης οφείλω να ευχαριστήσω για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα ζήτημα που αφορά τις ασύρματες επικοινωνίες του σήμερα αλλά και του αύριο.

Ξεχωριστά θα ήθελα να ευχαριστήσω την Υποψήφια Διδάκτορα της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών δίδα Ζαρμπούτη. Η αμέριστη συμπαράσταση και βοήθεια της, η επιμονή και υπομονή της αλλά και το ιδιαίτερο ενδιαφέρον της για το ζήτημα που η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται, αποτέλεσαν καθοριστικούς παράγοντες για την ολοκλήρωσή της.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στην οικογένεια μου και ξεχωριστά στους γονείς μου, Νικόλαο και Φρειδερίκη Στειακογιαννάκη, για την υποστήριξη που μου παρέχουν όλα αυτά τα χρόνια, υλική και κυρίως ηθική. Αποτελούν για μένα ένα σύστημα αναφοράς, μια βάση πάνω στην οποία μπόρεσα να χτίσω. Θα ήθελα τέλος να ευχαριστήσω φίλους και συμφοιτητές, συνοδοιπόρους στη φοιτητική μου ζωή και όχι μόνον.

Με ιδιαίτερο σεβασμό, θα ήθελα να αφιερώσω το πόνημά μου αυτό στη μνήμη της Ρεγγώς και του Πεταλόκωστα, ρίζες στο μεγάλο δέντρο της ζωής.

Κατάλογος περιεχομένων

Περίληψη.....	5
Abstract.....	7
Ευχαριστίες.....	9
Ευρετήριο πινάκων.....	15
Κατάλογος εικόνων.....	17
Κεφάλαιο 1ο	
Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα.....	19
1.1 Σύντομη Ιστορική Αναδρομή.....	20
1.2 Εξέλιξη Ασύρματων Συστημάτων Επικοινωνιών.....	22
1.2.1 Κυψελωτά Συστήματα 1ης Γενιάς.....	22
1.2.2 Κυψελωτά Συστήματα 2ης Γενιάς.....	22
1.2.2.1 GSM (900/1800).....	23
1.2.2.2 IS-54, IS-136 και IS-95.....	23
1.2.2.3 Personal Digital Cellular (PDC).....	24
1.2.3 Κυψελωτά Συστήματα 3ης Γενιάς.....	24
1.2.4 Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα Επικοινωνιών (WLANs).....	25
Κεφάλαιο 2ο	
WMANs:	
Το πρότυπο IEEE 802.16	
Δίκτυα WiMAX.....	27
2.1 Το πρότυπο IEEE 802.16.....	28
2.1.1 Φυσικό Στρώμα (PHY).....	29
2.1.1.1 WirelessMAN-SC.....	30
2.1.1.2 WirelessMAN-SCa.....	30
2.1.1.3 WirelessMAN-OFDM.....	31
2.1.1.4 WirelessMAN-OFDMA.....	32
2.1.1.5 WirelessHUMAN.....	32
2.1.2 Στρώμα Ελέγχου Προσπέλασης Μέσου (MAC).....	33
2.1.2.1 Υπόστρωμα Ασφάλειας.....	33
2.1.2.2 Κοινό Υπόστρωμα MAC.....	33
2.1.2.3 Υπόστρωμα Σύγκλισης, εξαρτώμενο από την υπηρεσία.....	35
2.2 Δίκτυα WiMAX – παρελθόν, παρόν & μέλλον.....	37
2.2.1 Η αγορά των προσωπικών ευρυζωνικών υπηρεσιών.....	37
2.2.2 Τι έχει να προσφέρει το WiMAX.....	39
2.2.2.1 Υψηλές επιδόσεις.....	39
2.2.2.2 Ευελιξία.....	39
2.2.2.3 Προχωρημένη αρχιτεκτονική βασισμένη στο IP.....	40
2.2.2.4 Ελκυστική οικονομία.....	40
2.2.3 Who is who στον κόσμο του WiMAX.....	41
2.2.3.1 WiMAX Forum™ - Η σκοπιά των επιχειρήσεων.....	41
2.2.3.2 IEEE & ETSI – Η σκοπιά των προτύπων.....	43
Κεφάλαιο 3ο	
Το Ασύρματο Κανάλι Διάδοσης	
OFDM – OFDMA.....	45
3.1 Διάδοση στο ασύρματο κανάλι επικοινωνίας.....	46
3.1.1 Απώλειες Διαδρομής (path loss) - Μοντέλα διάδοσης (propagation models).....	46
3.1.1.1 Εκθετικό Μοντέλο Διάδοσης.....	46
3.1.1.2 COST-Hata-Model ή Extended Okumura-Hata Model.....	47
3.1.2 Σκίαση (shadowing).....	47
3.1.3 Πολύοδη Διάδοση (multipath) – Φαινόμενο Doppler.....	48
3.1.4 Παρεμβολές (Interference).....	51
3.1.4.1 Θόρυβος.....	51
3.1.4.2 Ομοδιαυλική Παρεμβολή.....	52
3.1.4.3 Παρεμβολές Γειτονικών Διαύλων.....	53

3.1.4.4 Διασυμβολική παρεμβολή.....	53
3.2 Βασικές αρχές του OFDM.....	54
3.2.1 Ορθογωνιότητα.....	54
3.2.2 Block διάγραμμα πομπού – δέκτη ενός συστήματος OFDM.....	56
3.2.3 Κωδικοποίηση & Διεμπλοκή (Coding & Interleaving).....	57
3.2.4 Σχήμα Διαμόρφωσης (Symbol Mapping – Modulation).....	58
3.2.5 Διαμόρφωση OFDM – Διακριτός Μετασχηματισμός Fourier (DFT).....	60
3.2.6 Διάστημα Φύλαξης (Guard Interval) – Ορισμός παραθύρου (Windowing).....	60
3.3 OFDMA.....	63
Κεφάλαιο 4ο	
Διαχείριση Ασυρμάτων Πόρων	
Radio Resource Management (RRM).....	65
4.1 Βασικές αρχές διαχείρισης ασυρμάτων πόρων.....	66
4.1.1 Πολλαπλή πρόσβαση.....	66
4.1.2 Η ανάγκη για υποστήριξη QoS.....	66
4.1.3 Η ανάγκη για διαχείριση πόρων.....	67
4.1.3.1 Σταθερή εκχώρηση πόρων.....	67
4.1.3.2 Τυχαία εκχώρηση πόρων.....	67
4.1.3.3 Δυναμική εκχώρηση πόρων.....	68
4.2 OFDMA RRM.....	69
4.2.1 Μοντέλο κυψελωτού συστήματος OFDMA.....	69
4.2.2 Σχέσεις ελέγχου ισχύος.....	71
4.2.3 Ορισμός του προβλήματος διαχείρισης πόρων.....	73
4.2.3.1 Σενάριο CBR.....	73
4.2.3.2 Σενάριο VBR.....	74
4.2.3.3 Τροποποίηση για τη ζεύξη ανόδου.....	74
Κεφάλαιο 5ο	
Αλγόριθμοι RRM.....	75
5.1 Προσαρμοστικός Αλγόριθμος RRM.....	76
5.1.1 Σχεδιαστικές υποθέσεις.....	76
5.1.2 Κύριος αλγόριθμος RRM.....	77
5.1.2.1 Βήμα 1ο: Εκχώρηση χρήστη σε σταθμό βάσης.....	80
5.1.2.2 Βήμα 2ο: Εκχώρηση φερόντων σε χρήστες.....	80
5.1.2.3 Βήμα 3ο: Ανά φέρον bit loading και έλεγχος ισχύος.....	84
5.2 Προσαρμοστικός Αλγόριθμος RRM με χωρισμό σε Τομείς – Sectors.....	87
5.2.1 Διάγραμμα ακτινοβολίας κεραιών τομέων.....	87
5.2.2 Μοντελοποίηση της πολυδιαδρομικής διάδοσης.....	88
5.2.3 Τροποποιήσεις προσαρμοστικού αλγορίθμου για την εφαρμογή τομεοποίησης.....	90
5.2.3.1 Κέρδος λαμβανόμενης ισχύος.....	90
5.2.3.2 Κέρδος ισχύος παρεμβολής.....	91
5.2.3.3 Εκχώρηση διαύλων.....	92
5.3 Προσαρμοστικός αλγόριθμος RRM με διάσπαση κυψελών (Reuse Partitioning).....	93
5.3.1 Μοντέλο Συστήματος.....	94
5.3.2 Ομάδες Επαναχρησιμοποίησης.....	94
5.3.3 Τροποποιήσεις προσαρμοστικού αλγορίθμου για την εφαρμογή διάσπασης κυψελών.....	96
5.4 Σειριακός αλγόριθμος RRM.....	98
5.4.1 Κύριος αλγόριθμος RRM.....	98
5.4.1.1 Βήμα 1ο: Εκχώρηση του χρήστη σε σταθμό βάσης.....	101
5.4.1.2 Βήμα 2ο: Εκχώρηση φερόντων στο χρήστη.....	101
5.4.1.3 Βήμα 3ο: Ανά φέρον bit loading και έλεγχος ισχύος.....	101
5.5 Συντεταγμένος αλγόριθμος RRM.....	103
5.5.1 Συντεταγμένη εκχώρηση φερόντων.....	103
5.5.2 Μετατροπή του Σειριακού αλγορίθμου RRM σε Συντεταγμένο αλγόριθμο RRM.....	103
5.6 Σύνοψη.....	104
Κεφάλαιο 6ο	
Προσομοίωση Αλγορίθμων RRM.....	105
6.1 Παράμετροι του πολυκυψελωτού OFDMA συστήματος.....	106

6.1.1 Χωρική τοποθέτηση.....	106
6.1.2 Φασματικοί πόροι.....	107
6.1.3 Χρήστες του συστήματος.....	108
6.1.4 Σταθμός βάσης – BS κυψελών.....	110
6.1.5 Τερματικός εξοπλισμός χρηστών.....	110
6.1.6 Ασύρματος δίαυλος επικοινωνίας.....	110
6.1.7 Διαστασιολόγηση του συστήματος – Προϋπολογισμός ζεύξης (Link Budget).....	111
6.1.7.1 Ευαισθησία Δέκτη.....	111
6.1.7.2 Μέγιστη απόσταση χρήστη-BS – Ακτίνα κυψελών.....	112
6.1.8 Εισαγωγή νέων χρηστών στο σύστημα – Ζητήματα σύγκλισης των αλγορίθμων.....	113
6.1.9 Χωρισμός σε τομείς - Διάσπαση κυψελών.....	114
6.2 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων.....	115
6.2.1 Σενάριο 1ο – Μοναδικό Επίπεδο Διαμόρφωσης.....	115
6.2.1.1 Εκπεμπόμενη Ισχύς.....	115
6.2.1.2 Προσφερόμενος Ρυθμός Δεδομένων.....	118
6.2.2 Σενάριο 2ο – Χρήση όλων των Διαθέσιμων Διαμορφώσεων.....	127
6.2.2.1 Προσφερόμενος Ρυθμός Δεδομένων.....	127
6.2.2.2 Κατανομή OFDMA φερόντων.....	128
6.2.3 Σενάριο 3ο – Χωρισμός σε τομείς χρήση μοναδικής διαμόρφωσης.....	131
6.2.3.1 Εκπεμπόμενη Ισχύς.....	132
6.2.3.2 Προσφερόμενος ρυθμός δεδομένων.....	133
6.2.3.3 Κατανομή Χρηστών.....	135
6.2.4 Σενάριο 4ο - Χωρισμός σε τομείς χρήση όλων των διαθέσιμων διαμορφώσεων.....	137
6.2.4.1 Εκπεμπόμενη Ισχύς.....	138
6.2.4.2 Προσφερόμενος ρυθμός δεδομένων.....	138
6.2.4.3 Κατανομή χρηστών.....	139
6.2.4.4 Κατανομή OFDMA φερόντων.....	140
6.3 Συμπεράσματα.....	142
6.3.1 Προσαρμοστικός RRM Αλγόριθμος.....	142
6.3.1.1 Πλεονεκτήματα.....	142
6.3.1.2 Μειονεκτήματα.....	142
6.3.2 Προσαρμοστικός RRM Αλγόριθμος με Τομεοποίηση.....	143
6.3.3 Προσαρμοστικός RRM Αλγόριθμος με Διάσπαση Κυψελών.....	143
6.3.3.1 Πλεονεκτήματα.....	143
6.3.3.2 Μειονεκτήματα.....	143
6.3.4 Σειριακός RRM Αλγόριθμος.....	143
6.3.4.1 Πλεονεκτήματα.....	143
6.3.4.2 Μειονεκτήματα.....	144
6.3.5 Συντεταγμένος RRM Αλγόριθμος.....	144
Βιβλιογραφία.....	145

Ευρετήριο πινάκων

Πίνακας 1.1: Χαρακτηριστικά HIRERLAN συστημάτων.....	26
Πίνακας 2.1: Ασύρματες Διεπαφές του προτύπου 802.16.....	30
Πίνακας 6.1: Ρυθμός Δεδομένων ανά φέρον	108
Πίνακας 6.2: Ελάχιστος αριθμός φερόντων για την κάλυψη του αιτούμενου ρυθμού δεδομένων	109
Πίνακας 6.3: Παράμετροι κεραιάς BS στην περίπτωση της τομεοποίησης	110
Πίνακας 6.4: SNIR _{min} για τις επιτρεπόμενες διαμορφώσεις	112
Πίνακας 6.5: Σενάριο 1ο – Συνολικός Προσφερόμενος Ρυθμός Συστήματος.....	124
Πίνακας 6.6: Σενάριο 2ο - Πλήθος OFDMA φερόντων που χρησιμοποιούνται ανά κυψέλη.....	130
Πίνακας 6.7: Σενάριο 3ο – Κατανομή χρηστών στις κυψέλες του συστήματος – OFDMA σύστημα 7 κυψελών.....	135
Πίνακας 6.8: Σενάριο 3ο – Κατανομή χρηστών συστήματος με βάση τον αιτούμενο ρυθμό δεδομένων	136
Πίνακας 6.9: Σενάριο 4ο – Κατανομή χρηστών με βάση τον αιτούμενο ρυθμό δεδομένων – OFDMA σύστημα 7 κυψελών.....	140
Πίνακας 6.10: Σενάριο 4ο – Κατανομή χρηστών σε κυψέλες – OFDMA σύστημα 7 κυψελών.....	140
Πίνακας 6.11: Σενάριο 4ο – Πλήθος OFDMA φερόντων ανά κυψέλη – OFDMA σύστημα 7 κυψελών	140

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 2.1: 802.16 Μοντέλο Αναφοράς Συστήματος	29
Εικόνα 2.2: Έσοδα από υπηρεσίες φωνής και δεδομένων στην Κορέα (2004).....	37
Εικόνα 2.3: Λογότυπο των εγκεκριμένων προϊόντων του WiMAX Forum.....	42
Εικόνα 2.4: Διεθνείς φορείς που έχουν ανακοινώσει δοκιμές WiMAX	43
Εικόνα 3.1: Διαγραμματική Απεικόνιση των απωλειών διάδοσης.....	48
Εικόνα 3.2: FDM εννέα φερόντων.....	54
Εικόνα 3.3: OFDM εννέα φερόντων	55
Εικόνα 3.4: Τρία subcarriers εντός ενός OFDM συμβόλου	55
Εικόνα 3.5: Φάσμα των ατομικών subcarriers	56
Εικόνα 3.6: Block Διάγραμμα μονόδρομου P2P OFDM συστήματος μετάδοσης	57
Εικόνα 3.7: Αστερισμοί διαμορφώσεων QPSK, 16-QAM, 64-QAM	59
Εικόνα 3.8: Εισαγωγή του κυκλικού προθέματος	61
Εικόνα 3.9: Σχήμα του εκπεμπόμενου παλμού	62
Εικόνα 3.10: Πόροι του OFDM	63
Εικόνα 4.1: Παράδειγμα απεικόνισης κυψελωτού OFDMA συστήματος.....	69
Εικόνα 5.1: Κύρια ρουτίνα του Προσαρμοστικού RRM αλγορίθμου.....	79
Εικόνα 5.2: Υπορουτίνα Εκχώρησης Φερόντων του Προσαρμοστικού RRM Αλγορίθμου.....	82
Εικόνα 5.3: Υπορουτίνα Bit Loading και Ελέγχου Ισχύος του Προσαρμοστικού RRM Αλγορίθμου..	86
Εικόνα 5.4: Διαγράμματα ακτινοβολίας κεραιών.....	88
Εικόνα 5.5: Λαπλασιανή Κατανομή.....	89
Εικόνα 5.6: Κέρδος κατευθυντικής κεραιάς συμπεριλαμβάνοντας την πολύοδη διάδοση.....	90
Εικόνα 5.7: Διάσπαση κυψέλης σε περιοχές επαναχρησιμοποίησης.....	94
Εικόνα 5.8: Σχεδίαση Κυψελωτού Συστήματος.....	96
Εικόνα 5.9: Κύρια ρουτίνα του Σειριακού RRM Αλγορίθμου.....	100
Εικόνα 5.10: Υπορουτίνα Bit Loading και Ελέγχου Ισχύος του Σειριακού RRM Αλγορίθμου.....	102
Εικόνα 6.1: OFDMA σύστημα 7 κυψελών.....	106
Εικόνα 6.2: OFDMA σύστημα 19 κυψελών.....	107
Εικόνα 6.3: Σενάριο 1ο – Διάγραμμα CDF εκπεμπόμενης ισχύος κεντρικής κυψέλης – OFDMA σύστημα 7 κυψελών.....	116
Εικόνα 6.4: Σενάριο 1ο – Διάγραμμα CDF εκπεμπόμενης ισχύος κεντρικής κυψέλης – OFDMA σύστημα 19 κυψελών.....	117
Εικόνα 6.5: Σενάριο 1ο – Διάγραμμα CDF του προσφερόμενου ρυθμού δεδομένων προς τους χρήστες της κεντρική κυψέλης – OFDMA σύστημα 7 κυψελών.....	118
Εικόνα 6.6: Σενάριο 1ο – Διάγραμμα CDF του προσφερόμενου ρυθμού δεδομένων προς τους χρήστες της κεντρική κυψέλης – OFDMA σύστημα 19 κυψελών.....	119
Εικόνα 6.7: Σενάριο 1ο – Διάγραμμα CDF του προσφερόμενου ρυθμού δεδομένων προς τους χρήστες της κεντρική κυψέλης – Προσαρμοστικός Αλγόριθμος RRM.....	120
Εικόνα 6.8: Σενάριο 1ο – Διάγραμμα CDF του προσφερόμενου ρυθμού δεδομένων προς τους χρήστες της κεντρική κυψέλης – Σειριακός Αλγόριθμος RRM.....	121
Εικόνα 6.9: Σενάριο 1ο – Διάγραμμα CDF του προσφερόμενου ρυθμού δεδομένων προς τους χρήστες της κεντρική κυψέλης – Συντεταγμένος Αλγόριθμος RRM.....	122
Εικόνα 6.10: Σενάριο 1ο – Διάγραμμα CDF του προσφερόμενου ρυθμού δεδομένων προς τους χρήστες της κεντρική κυψέλης – Προσαρμοστικός Αλγόριθμος RRM με διάσπαση κυψελών	123
Εικόνα 6.11: Σενάριο 1ο - Κατανομή χρηστών με βάση τον αιτούμενο ρυθμό δεδομένων – OFDMA σύστημα 7 κυψελών.....	125
Εικόνα 6.12: Σενάριο 1ο - Κατανομή χρηστών με βάση τον αιτούμενο ρυθμό δεδομένων – OFDMA σύστημα 19 κυψελών.....	126
Εικόνα 6.13: Σενάριο 2ο – Διάγραμμα CDF προσφερόμενου ρυθμού δεδομένων της κεντρικής κυψέλης ενός OFDMA συστήματος.....	127
Εικόνα 6.14: Σενάριο 2ο – Κατανομή διαμόρφωσης OFDMA φερόντων με βάση των αιτούμενο ρυθμό δεδομένων των χρηστών στους οποίους εκχωρούνται για ένα OFDMA σύστημα 7 κυψελών.....	128
Εικόνα 6.15: Σενάριο 2ο – Κατανομή διαμόρφωσης OFDMA φερόντων ως προς την απόσταση των	

χρηστών που εκχωρούνται από τον εξυπηρετούμενο σταθμό βάσης για ένα OFDMA σύστημα 7 κυψελών.....	129
Εικόνα 6.16: Σενάριο 2ο – Επαναχρησιμοποίηση OFDMA φερόντων εντός ενός OFDMA συστήματος 7 κυψελών.....	131
Εικόνα 6.17: Σενάριο 3ο – Διάγραμμα CDF εκπεμπόμενης ισχύος κεντρικής κυψέλης – OFDMA σύστημα 7 κυψελών.....	132
Εικόνα 6.18: Σενάριο 3ο – Διάγραμμα CDF εκπεμπόμενης ισχύος κεντρικής κυψέλης – OFDMA σύστημα 19 κυψελών.....	133
Εικόνα 6.19: Σενάριο 3ο – Διάγραμμα CDF προσφερόμενου ρυθμού δεδομένων κεντρικής κυψέλης – OFDMA σύστημα 7 κυψελών.....	134
Εικόνα 6.20: Σενάριο 3ο – Διάγραμμα CDF προσφερόμενου ρυθμού δεδομένων κεντρικής κυψέλης – OFDMA σύστημα 19 κυψελών.....	135
Εικόνα 6.21: Χωρική κατανομή χρηστών αιτούμενου ρυθμού δεδομένων 512kbps – OFDMA σύστημα 7 κυψελών.....	137
Εικόνα 6.22: Σενάριο 4ο – Διάγραμμα CDF εκπεμπόμενης ισχύος κεντρικής κυψέλης – OFDMA σύστημα 7 κυψελών.....	138
Εικόνα 6.23: Σενάριο 4ο – Διάγραμμα CDF του προσφερόμενου ρυθμού δεδομένων από την κεντρική κυψέλη – OFDMA σύστημα 7 κυψελών.....	139
Εικόνα 6.24: Σενάριο 4ο – Επαναχρησιμοποίηση OFDMA φερόντων εντός ενός OFDMA συστήματος 7 κυψελών.....	141

Κεφάλαιο 1ο

Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα

Το παρόν εισαγωγικό κεφάλαιο πραγματεύεται τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, την ιστορία, το παρόν και το μέλλον τους, με ιδιαίτερη έμφαση να δίνεται κύρια στις ασύρματες επικοινωνίες και δίκτυα. Σε μια ιστορία που η διάρκειά της δεν υπερβαίνει τους δύο αιώνες ζωής, ίσως να περίμενε κάποιος πως λίγα μπορούν να ειπωθούν. Η ανάγκη όμως του ανθρώπου για επικοινωνία οδήγησε σε ταχύτερη ανάπτυξη τον τομέα των (τηλε)επικοινωνιών, με αποτέλεσμα να έχει αφήσει πίσω της ένα πλούσιο και αξιοσημείωτο έργο αλλά και ένα ευρύ,πρόσφορο πεδίο έρευνας για τα χρόνια που θα επακολουθήσουν.

1.1 Σύντομη Ιστορική Αναδρομή

Από τα αρχαία ακόμη χρόνια, υπάρχει οικονομική σχέση μεταξύ του εμπορίου και των μεταφορών από τη μια μεριά, και της ανταλλαγής πληροφοριών από την άλλη. Αρχικά η πληροφορία μεταφερόταν μέσω της υποδομής που υπήρχε για τις φυσικές μεταφορές και, κατά συνέπεια, μεταφερόταν μεταξύ τόπων που υπήρχαν εμπορικές δραστηριότητες, όπως πχ μεταξύ των πόλεων. Με την έλευση των τηλεπικοινωνιών, η σχέση μεταξύ των διαδρομών μεταφοράς της πληροφορίας και των διαδρομών των φυσικών μεταφορών άλλαξε δραματικά [1].

Μία από τις πρωταρχικές εφευρέσεις μεγίστης σημασίας για τις επικοινωνίες υπήρξε η εφεύρεση του ηλεκτρικού στοιχείου από τον Alesandro Volta το 1799. Η εφεύρεση αυτή επέτρεψε στον Samuel Morse να αναπτύξει τον ηλεκτρικό τηλεγράφο του οποίου την επίδειξη έκανε το 1837.

Επόμενος σταθμός υπήρξε η τηλεφωνία, η οποία γεννήθηκε με την εφεύρεση του τηλεφώνου τη δεκαετία του 1870. Ο Alexander Graham Bell κατοχύρωσε ευρεσιτεχνία για την εφεύρεση της τηλεφωνίας το 1876 και το 1877 ίδρυσε την Τηλεφωνική Εταιρία Bell (Bell Telephony Company). Οι πρώτες παραλλαγές συστημάτων τηλεφωνίας ήταν σχετικά απλές και παρείχαν υπηρεσίες για αποστάσεις μερικών εκατοντάδων μιλίων.

Σημαντικές εφευρέσεις που έδωσαν ώθηση στην ανάπτυξη της τηλεφωνίας υπήρξαν η εφεύρεση του μικροφώνου άνθρακα και του επαγωγικού πηνίου. Η εφεύρεση της τριόδου λυχνίας κενού από τον Lee De Forest το 1906 κατέστησε δυνατή την εισαγωγή ενισχυτών σήματος στα συστήματα τηλεφωνικής επικοινωνίας και επέτρεψε έτσι τη μετάδοση τηλεφωνικού σήματος σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Η αυτόματη μεταγωγή ήταν μια άλλη σημαντική πρόοδος στην ανάπτυξη της τηλεφωνίας. Ο πρώτος αυτόματος μεταγωγέας, που αναπτύχθηκε το 1897 από τον Strowger, ήταν ένας ηλεκτρομηχανικός “βηματικός” (step-by-step) μεταγωγέας. Μετά από αρκετά χρόνια ανάπτυξης στα εργαστήρια Bell Telephone, τέθηκε σε λειτουργία ένας ψηφιακός μεταγωγέας τον Ιούνιο του 1960.

Στον αντίποδα των ενσύρματων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων βρίσκονται τα ασύρματα συστήματα. Η ανάπτυξη των ασύρματων επικοινωνιών έχει τις ρίζες της στις εργασίες των Oersted, Faraday, Gauss, Maxwell και Hertz. Βασίζόμενος στις εργασίες των Oersted, Faraday, Gauss και Ampere, ο Maxwell το 1864 προέβλεψε την ύπαρξη ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και διατύπωσε τη βασική ηλεκτρομαγνητική θεωρία του, η οποία βρίσκεται σε χρήση εδώ και περισσότερο από έναν αιώνα. Η θεωρία του Maxwell επαληθεύτηκε πειραματικά από τον Hertz ο 1887.

Το 1894, μια ευαίσθητη διάταξη ονομαζόμενη coherer, η οποία μπορούσε να συλλαμβάνει ραδιοσήματα, χρησιμοποιήθηκε από τον εφευρέτη της, τον Oliver Lodge, για να επιδειχθεί ασύρματη επικοινωνία σε απόσταση περίπου 140m. Ο Guglielmo Marconi έγινε διάσημος για την ανάπτυξη της ασύρματης τηλεγραφίας. Ο Marconi το 1895 επέδειξε ασύρματη μετάδοση ραδιοσημάτων σε μια απόσταση περίπου 2km.

Η εφεύρεση της τριόδου ενισχύτριας λυχνίας κενού, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, κατέστησε δυ-

νατή τη ραδιοφωνία στις αρχές του εικοστού αιώνα. Η ραδιοφωνία διαμόρφωσης πλάτους (amplitude modulation, AM) εγκαινιάστηκε το 1920, όταν ο ραδιοσταθμός KDKA του Pittsburg βγήκε στον αέρα. Μια άλλη σημαντική πρόοδος στις ραδιοεπικοινωνίες προήλθε από την εφεύρεση της διαμόρφωσης συχνότητας (frequency modulation, FM) από τον Edwin Armstrong, ο οποίος το 1933 κατασκεύασε και επέδειξε το πρώτο σύστημα επικοινωνίας FM.

Το πρώτο σύστημα τηλεόρασης κατασκευάστηκε στις ΗΠΑ από τον V. K. Zworykin και επιδείχθηκε το 1929. Η εμπορική εκπομπή τηλεόρασης άρχισε στο Λονδίνο το 1936 από το BBC (British Broadcasting Corporation).

Η ανάπτυξη των τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών τα τελευταία πενήντα χρόνια υπήρξε αναμφισβήτητα εκπληκτική. Η εφεύρεση του transistor το 1947 από τους Walter Brattain, John Bardeen και William Shockley, του ολοκληρωμένου κυκλώματος το 1958 από τους Jack Kilby και Robert Noyce, και του laser από τους Townes και Schawlow το 1958, έκαναν δυνατή την ανάπτυξη ηλεκτρονικών κυκλωμάτων μικρών διαστάσεων, χαμηλής ισχύος, μικρού βάρους και υψηλού ρυθμού λειτουργίας, που χρησιμοποιήθηκαν στην κατασκευή συστημάτων δορυφορικών επικοινωνιών, συστημάτων ραδιοζεύξεων ευρείας ζώνης και συστημάτων οπτικών επικοινωνιών. Ο δορυφόρος Telestar I τέθηκε σε τροχιά το 1962 και χρησιμοποιήθηκε ως αναμεταδότης σήματος TV μεταξύ Ευρώπης και ΗΠΑ.

Πρόσφατα, τα περισσότερα ενσύρματα συστήματα επικοινωνιών αντικαθίστανται από καλώδια οπτικών ινών που παρέχουν εξαιρετικά μεγάλο εύρος ζώνης, καθιστώντας δυνατή τη μετάδοση μεγάλης ποικιλίας υπηρεσιών φωνής, δεδομένων, video και πολυμέσων. Στο σημείο αυτό θα ήταν παράλειψη να μη σημειωθεί η προσφορά του Δημήτριου Χόνδρου, ο οποίος, μαζί με τον P. Debye το 1910, εκτόνησαν την πρώτη ερευνητική εργασία που ασχολήθηκε με τη διάδοση σε διηλεκτρικούς κυματοδηγούς [2].

Η κυβελωτή ραδιοεπικοινωνία κινητών έχει αναπτυχθεί προσφέροντας υπηρεσίες φωνής σε συνδρομητές που κινούνται με αυτοκίνητα, τραίνα και λεωφορεία. Δίκτυα υψηλού ρυθμού επικοινωνιών συνδέουν και μια μεγάλη ποικιλία περιφερειακών διατάξεων, κατεσπαρμένες κυριολεκτικά σ' όλο τον κόσμο. Σήμερα γινόμαστε μάρτυρες μιας σημαντικής ανάπτυξης στην εισαγωγή και χρήση υπηρεσιών προσωπικών επικοινωνιών που περιλαμβάνουν μετάδοση φωνής, δεδομένων και video. Δίκτυα δορυφόρων και οπτικών ινών παρέχουν τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες μεγάλου εύρους ζώνης (πολύ υψηλού ρυθμού) περίπου σ' ολόκληρο τον κόσμο. Με τα ζητήματα όμως αυτά θα ασχοληθούμε λεπτομερέστερα στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου [3].

1.2 Εξέλιξη Ασύρματων Συστημάτων Επικοινωνιών

Αρχικά, τα πρώτα συστήματα επικοινωνιών χρησιμοποιήθηκαν από αστυνομικά τμήματα σε πόλεις των ΗΠΑ για λόγους δημόσιας ασφάλειας. Η πρώτη εμφάνιση κινητής ασύρματης ζεύξης πραγματοποιείται στους 2 μεγακύκλους γύρω στα 1921 στα πλαίσια των αναγκών της αστυνομίας του Detroit [4]. Το 1934 εγκαταστάθηκαν σε 252 αστυνομικά τμήματα τα πρώτα συστήματα κινητών επικοινωνιών που χρησιμοποιούσαν αναλογική διαμόρφωση πλάτους (AM). Με την εισαγωγή το 1935 της διαμόρφωσης συχνότητας (FM), όπως αναφέρθηκε παραπάνω, όλα τα συστήματα κινητών επικοινωνιών υιοθέτησαν την FM διαμόρφωση. Στη δεκαετία του 1960, η AT&T Bell Labs καθώς και άλλες εταιρίες τηλεπικοινωνιών, ανέπτυξαν τις βασικές αρχές των κυβελωτών συστημάτων. Η βασική ιδέα ήταν ο χωρισμός μιας περιοχής κάλυψης σε μικρές κυψέλες, κάθε μία από τις οποίες επαναχρησιμοποιεί διαύλους, ώστε να αυξηθεί η χωρητικότητα των συστημάτων. Μόλις όμως το 1976, όταν η τεχνολογία ήταν πλέον ώριμη και ικανή να προσφέρει την απαραίτητη υποδομή, το WARC (World Administrative Radio Conference) ενέκρινε την απόδοση συχνοτήτων για κυβελωτά συστήματα στην περιοχή των 800/900MHz θέτοντας τη βάση για την ανάπτυξη εμπορικών συστημάτων.

1.2.1 Κυβελωτά Συστήματα 1ης Γενιάς

Το πρώτο παγκοσμίως κυβελωτό σύστημα που λειτούργησε ήταν στην Ιαπωνία το 1979 από την Nippon Telephone and Telegraph (NTT). Το σύστημα χρησιμοποιούσε 600 FM αμφίδρομα κανάλια με εύρος 25KHz στα 925-940/870-885MHz. Το 1981, η Ericsson ανέπτυξε το πρώτο ευρωπαϊκό κυβελωτό σύστημα, το NMT 450, στη ζώνη 450-470MHz, το οποίο μετεξελίχθηκε σε NMT900, στη ζώνη 890-915/917-950MHz το 1986. Το 1983 αναπτύχθηκε το πρώτο δοκιμαστικό κυβελωτό σύστημα στην Αμερική, το AMPS, από την AT&T στο Σικάγο, στη ζώνη 824-849/869-894MHz, με εύρος διαύλου τα 30KHz. Τα NTT, NMT450, NMT900, AMPS, ETACS, JTACS, C-450 αποτελούν κυβελωτά συστήματα πρώτης γενιάς.

Βασικά χαρακτηριστικά των συστημάτων πρώτης γενιάς είναι η αναλογική FM διαμόρφωση καθώς και η τεχνική FDD για την αμφιδρόμηση. Η φασματική πυκνότητα ισχύος του διαμορφωμένου σήματος στα συστήματα FDD πρέπει να ελέγχεται προσεκτικά, ώστε η ακτινοβολούμενη ισχύς σε γειτονικούς διαύλους να είναι 60-80dB χαμηλότερα από την επιθυμητή. Όλα τα προαναφερθέντα συστήματα χρησιμοποιούσαν μια απόσταση 45MHz μεταξύ των συχνοτήτων εκπομπής και λήψης, τέτοια ώστε να είναι εφικτή η υλοποίηση του διπλέκτη με επαρκή απομόνωση των δύο συχνοτήτων.

1.2.2 Κυβελωτά Συστήματα 2ης Γενιάς

Η μετάβαση από την πρώτη γενιά κυβελωτών συστημάτων προς τη δεύτερη γενιά σηματοδοτείται και οριοθετείται από την εγκατάλειψη των αναλογικών διαμορφώσεων και στροφή προς τις ψηφιακές τεχνικές. Η μετάβαση προς τις ψηφιακές επικοινωνίες οφείλεται αφενός μεν στην ανάπτυξη της μι-

κροηλεκτρονικής τεχνολογίας, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, αφετέρου δε στις επαναστατικές εργασίες των Nyquist και Shannon, οι οποίοι, μαζί με άλλους αξιόλογους επιστήμονες και μηχανικούς των αρχών του 20ου αιώνα, έθεσαν τα θεμέλια της θεωρίας της πληροφορίας αλλά και τα βασικά όρια στα ψηφιακά συστήματα επικοινωνιών. Χρονιά-ορόσημο είναι το 1948, όταν ο Shannon έδωσε το άνω όριο για τη χωρητικότητα ενός AWGN καναλιού.

Στα κυψελωτά συστήματα 2ης γενιάς συγκαταλέγονται όλα τα υπάρχοντα και λειτουργούντα συστήματα. Στηρίζονται στις τεχνικές TDMA ή DS-CDMA για την πρόσβαση των χρηστών στον ασύρματο δίαυλο και για τις ΗΠΑ μεν είναι τα IS-54 και IS-95, για δε την Ευρώπη το GSM και για την Ιαπωνία το PDC.

1.2.2.1 GSM (900/1800)

Το σύστημα GSM σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε εξ' ολοκλήρου στην Ευρώπη και είναι το πλέον επιτυχημένο κυψελωτό σύστημα παγκοσμίως. Η σχεδιάσή του ξεκίνησε το 1982 ως πανευρωπαϊκή προδιαγραφή και λειτούργησε το 1992 σαν το πρώτο ψηφιακό κυψελωτό σύστημα. Στηρίζεται σε TDMA τεχνική, με 200kHz απόσταση φερόντων, αλλά συνδυάζει και την FDMA τεχνική με FDD. Κάθε φέρον έχει 8 διαύλους με διάρκεια χρονοσχισμής 0.577msec, ενώ χρησιμοποιεί την τεχνική ψηφιακής διαμόρφωσης GMSK με τελικό ρυθμό μετάδοσης 270.8kbps. Οι συχνότητες λειτουργίας είναι 890-915/935-960MHz. Υποστηρίζει υπηρεσίες φωνής (13kbps) και δεδομένων μέχρι 9.6kbps. Σήμερα το GSM είναι το πιο διαδεδομένο σύστημα παγκοσμίως και υλοποιήθηκε από 500 παρόχους σε 158 χώρες, παρέχοντας υπηρεσίες σε 400 εκ. χρήστες (Οκτώβριος 2000) καλύπτοντας το 59% της αγοράς των ασύρματων δικτύων.

Μια τροποποίηση του GSM900 είναι το GSM1800 ή DCS1800, το οποίο λειτουργεί στις ζώνες συχνοτήτων 1710-1785/1805-1880MHz. Το σύστημα έχει βελτιστοποιηθεί για τερματικές συσκευές χειρός με μέγιστη ισχύ το 1W ή τα 250mW και υποστηρίζει την επικάλυψη macrocells και picocells.

1.2.2.2 IS-54, IS-136 και IS-95

Στις ΗΠΑ αναπτύχθηκαν δύο διαφορετικά συστήματα 2ης γενιάς, το IS-54 με τεχνική TDMA και το IS-95 με τεχνική CDMA. Και τα δύο συστήματα σχεδιάστηκαν ώστε να είναι συμβατά με το σύστημα AMPS. Η IS-54 προδιαγραφή, που πολλές φορές καλείται USDC (US Digital Cellular), καθορίζει τερματικά διπλού τρόπου λειτουργίας, συμβατά με το AMPS αλλά και ικανά για ψηφιακή σηματοδότηση βασισμένη στο TDMA (3 χρονοσχισμές ανά φέρον), με απόσταση φερόντων τα 30kHz, με διαμόρφωση $\pi/4$ -DQPSK, με τελικό ρυθμό μετάδοσης τα 48.6kbps. Οι συχνότητες λειτουργίας είναι ίδιες με εκείνες του AMPS (824-894MHz). Το σύστημα υποστηρίζει δύο τύπους διαύλων σηματοδότησης ελέγχου, ένα για το ψηφιακό με ρυθμό 48.6kbps και ένα για τους διαύλους του AMPS με ρυθμό 10kbps. Εξέλιξη του IS-54 είναι το IS-136, που παρέχει τη δυνατότητα αποστολής μικρών μηνυμάτων, και υποστηρίζει κλειστές ομάδες χρηστών. Τα τερματικά του IS-136 δεν είναι συμβατά με εκείνα

του IS-54 γιατί το IS-136 έχει διαύλους σηματοδότησης ελέγχου μόνο στα 48.6kbps.

Το Μάρτιο του 1992 υιοθετήθηκε ένα επιπλέον σύστημα, το IS-95, που βασίζεται στην τεχνική CDMA και προτάθηκε από την Qualcomm. Χρησιμοποιεί διασπορά φάσματος Direct Sequence και παρουσιάζει ασυμμετρία ζεύξης, χρησιμοποιώντας διαφορετικές τεχνικές για την ευθεία και την αντίστροφη ζεύξη. Σε κάθε κινητό σταθμό σε μια κυψέλη, αποδίδεται ένας διαφορετικός κώδικας, παρέχοντας έτσι πλήρη ορθογωνιότητα μεταξύ των χρηστών. Οι συχνότητες λειτουργίας είναι ίδιες με το AMPS και το IS-54, αλλά έχουν αποδοθεί και επιπλέον συχνότητες στην περιοχή (1.8-2GHz). Η επιτυχία του IS-95 αλλά και η πολλά υποσχόμενη τεχνική της διασποράς φάσματος που χρησιμοποιεί, το κατέστησαν οδηγό και βάση εκκίνησης για τα συστήματα 3ης γενιάς.

1.2.2.3 Personal Digital Cellular (PDC)

Το PDC αναπτύχθηκε στην Ιαπωνία από το 1989 και στηρίζεται στις αρχές του IS-54, με TDMA τεχνική πολλαπλής πρόσβασης (3 χρονοσχισμές ανά φέρον), απόσταση φερόντων τα 25kHz, διαμόρφωση $\pi/4$ -DQPSK, με τελικό ρυθμό μετάδοσης τα 42kbps. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό του PDC είναι η διαφορισιμότητα στην κεραία του κινητού σταθμού. Οι συχνότητες λειτουργίας είναι 810-1501MHz.

1.2.3 Κυβελωτά Συστήματα 3ης Γενιάς

Η μετάβαση από τα κυβελωτά συστήματα 1ης γενιάς σε εκείνα της 2ης γενιάς σηματοδεύτηκε από την εισαγωγή ψηφιακών τεχνικών, που έδωσαν τη δυνατότητα παροχής υπηρεσιών φωνής σε μεγάλους πληθυσμούς και μεγάλες γεωγραφικές εκτάσεις, λόγω της πολύ καλής ποιότητας της φωνητικής υπηρεσίας. Η δυνατότητα όμως υποστήριξης υπηρεσιών δεδομένων είναι περιορισμένη στα 2ης γενιάς συστήματα και η ανάγκη για παροχή υπηρεσιών με υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, ώστε να μεταδίδονται εικόνες υψηλής ποιότητας και video πραγματικού χρόνου, ή να παρέχεται πρόσβαση στο Διαδίκτυο με υψηλές ταχύτητες, οδήγησε στη σχεδίαση των συστημάτων 3ης γενιάς. Το βασικό χαρακτηριστικό τους 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 από τα 3ης γενιάς συστήματα είναι οι εξής:

- Ρυθμοί μετάδοσης μέχρι και 2Mbps.
- Μεταβαλλόμενος ρυθμός μετάδοσης για δυνατότητα προσφοράς εύρους ζώνης κατά απαίτηση.
- Πολυπλεξία υπηρεσιών, με διαφορετικές απαιτήσεις ως προς την ποιότητα (πχ φωνή, video, πακέτα δεδομένων), στην ίδια σύνδεση.
- Μεταβαλλόμενες απαιτήσεις ως προς την καθυστέρηση, ανάλογα με την ευαισθησία της υπηρεσίας ως προς την καθυστέρηση.
- Μεταβαλλόμενες απαιτήσεις ποιότητας ανάλογα με την υπηρεσία, από 10% FER

(Frame Error Rate) ως 10^{-6} FER.

- Συνύπαρξη 2ης και 3ης γενιάς συστημάτων και υποστήριξη μεταπομπής μεταξύ των συστημάτων για βελτίωση της κάλυψης και εξισορρόπηση του τηλεπικοινωνιακού φορτίου.
- Υποστήριξη ασύμμετρης τηλεπικοινωνιακής κίνησης στην ευθεία και αντίστροφη ζεύξη (πχ όπως στο web browsing όπου η κίνηση στην ευθεία ζεύξη είναι πολύ μεγαλύτερη από την αντίστροφη).
- Μεγάλη φασματική απόδοση.
- Συνύπαρξη FDD και TDD συστημάτων.

Οι ραδιοεπαφές που έχουν αναπτυχθεί για τα συστήματα 3ης γενιάς, που από την ITU καλούνται IMT-2000, είναι το WCDMA ή UTRA, το multicarrier-CDMA ή cdma2000 και το EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution). Οι συχνότητες που αποδόθηκαν από το WARC'92 για τα 3ης γενιάς συστήματα είναι διαφορετικές για κάθε περιοχή. Ο λόγος είναι οι ζώνες συχνοτήτων που είχαν καταλάβει τα συστήματα 2ης γενιάς σε κάθε περιοχή. Ιδιαίτερα για την Ευρώπη, οι συχνότητες που αποδόθηκαν είναι 2*60MHz (1920-1980MHz uplink, 2110-2170MHz downlink) για WCDMA FDD συστήματα, 25MHz (1900-1920MHz & 2020-2025MHz) για TDD συστήματα με υποχρέωση έκδοση άδειας και 10MHz (2010-2020MHz) για TDD συστήματα χωρίς αδειοδότηση (SPA, Self Provided Applications) [5].

1.2.4 Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα Επικοινωνιών (WLANs)

Τα ασύρματα LANs παρέχουν υπηρεσίες δεδομένων υψηλού ρυθμού μετάδοσης σε μια μικρή περιοχή, με κινητικότητα χρηστών. Παγκοσμίως τα συστήματα αυτά λειτουργούν στην ISM (Industrial Scientific & Medical) ζώνη συχνοτήτων γιατί δεν απαιτείται άδεια λειτουργίας. Παραδείγματα ISM ζωνών είναι η περιοχή των 2.4GHz, των 5.2GHz και των 17GHz, με κάποιες παραλλαγές ανά περιοχή. Βέβαια, το πλεονέκτημα της μη αδειοδότησης μετατρέπεται εύκολα σε μειονέκτημα, αν αναλογιστούμε ότι στην ίδια ζώνη συχνοτήτων λειτουργούν παρόμοια συστήματα, αυξάνοντας τις υφιστάμενες παρεμβολές. Για το λόγο αυτό το WLAN συστήματα πρέπει να εκπέμπουν με περιορισμένη ισχύ ανά μονάδα εύρους ζώνης και για να το πετύχουν χρησιμοποιούν τεχνικές διασποράς φάσματος. Οι προδιαγραφές που υφίστανται, προέρχονται από την IEEE και το Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τηλεπικοινωνιακών Προδιαγραφών, ETSI.

Η πρώτη προδιαγραφή ευρείας αποδοχής ήταν η IEEE 802.11, η οποία προβλέπει την εφαρμογή δύο εναλλακτικών τεχνολογιών, την Direct Sequence διασπορά φάσματος (DSSS) και την Frequency Hopped διασπορά (FHSS). Για την DSSS τεχνολογία, το εύρος του διαύλου είναι 20MHz και ο ρυθμός μετάδοσης κυμαίνεται από 1-2Mbps. Οι συχνότητες λειτουργίας είναι στην περιοχή των 2.4GHz και η προδιαγραφή είναι προσανατολισμένη σε δίκτυα Ethernet. Το Νοέμβριο του 1999 έγινε δεκτή μια τροποποίηση της προδιαγραφής και προέκυψε η IEEE 802.11b, η οποία υποστηρίζει ρυθμούς μετάδοσης μέχρι 11Mbps και λειτουργεί στην περιοχή των 2.4GHz. Μετεξελίξεις του προτύπου, όπως

802.11a (5.2GHz) και 802.11g (2.4GHz), προβλέπουν μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης, που φτάνουν τα 54Mbps.

Μια άλλη οικογένεια προδιαγραφών είναι αυτή των HIPERLAN, η οποία ξεκίνησε το 1991 στους κόλπους του ETSI και οδήγησε το 1997 στην πρώτη προδιαγραφή με υψηλό ρυθμό μετάδοσης, το HIPERLAN Type 1, που υποστήριζε μέχρι 23.5Mbps. Κατά την ανάπτυξη της προδιαγραφής, δόθηκε μεγάλο βάρος σε εφαρμογές τοπικών δικτύων LANs και για το λόγο αυτό θεωρείται ένα μοντέρνο ασύρματο Ethernet. Λόγο του υπερβολικού φορτίου στην περιοχή των 2.4GHz, το HIPERLAN Type 1 σχεδιάστηκε για την περιοχή των 5.2GHz. Τον Απρίλιο του 1997 το ETSI αποφάσισε ότι οι ανάγκες της αγοράς επέβαλαν την επέκταση της προδιαγραφής, ώστε να περιλάβει εφαρμογές ασύρματου ATM (Wireless ATM). Δημιούργησε λοιπόν το έργο ETSI BRAN (Broadband Radio Access Networks), από το οποίο έχουν προκύψει άλλες τρεις προτάσεις, το HIPERLAN Type 2, το HIPERLAN Type 3 (HiperACCESS) και το HIPERLAN Type 4 (HiperLINK). Στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 1.1) εμφανίζονται οι τέσσερις τύποι HIPERLAN με τα κυριότερα χαρακτηριστικά τους. Ιδιαίτερα το HIPERLAN Type 2 είναι μια προδιαγραφή με έμφαση στην κυβελωτή αρχιτεκτονική και τη διασυνεργασία με άλλα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα [5].

Τύπος	Ζώνη Συχνότητων	Εύρος Κάλυψης	Ρυθμός Μετάδοσης	Περιγραφή
HIPERLAN 1	5.2GHz	50-100m	23.5Mbps	Wireless LAN
HIPERLAN 2	5.2GHz	50-100m	54Mbps	Wireless IP-ATM
HiperACCESS	Υπό εξέταση	5km	25Mbps	Wireless IP-ATM
HiperLINK	17GHz	150m	155Mbps	Wireless Broadband

Πίνακας 1.1: Χαρακτηριστικά HIPERLAN συστημάτων

Κεφάλαιο 2ο

WMANs:

Το πρότυπο IEEE 802.16

Δίκτυα WiMAX

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μια επισκόπηση των προτύπων που έχουν δημοσιευθεί από την ομάδα εργασίας IEEE 802.16, τα οποία αφορούν τα ασύρματα δίκτυα μητροπολιτικής περιοχής (WMAN – Wireless Metropolitan Area Networks). Πέρα από την επισκόπηση αυτή του προτύπου, το οποίο ορίζει τα επίπεδα PHY (PHYsical – φυσικό επίπεδο) και MAC (Medium Access Control – επίπεδο ελέγχου προσπέλασης μέσων) του μοντέλου αναφοράς OSI (Open Systems Interconnection – Διασύνδεση Ανοικτών Συστημάτων) [6], επιχειρείται και μια εισαγωγή στη φιλοσοφία των δικτύων WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), όπως συνήθως αποκαλούνται τα δίκτυα αυτά, με έμφαση στην επιχειρηματική δράση που αναπτύσσεται γύρω τους.

2.1 Το πρότυπο IEEE 802.16

Η ανάγκη για ένα πραγματικά παγκόσμιο πρότυπο ασύρματης πρόσβασης διαπιστώθηκε για πρώτη φορά τον Αύγουστο του 1998. Έτσι, η επιτροπή IEEE 802, υπεύθυνη για τα πρότυπα που αφορούν δίκτυα τοπικής και μητροπολιτικής περιοχής [7], δημιούργησε την ομάδα εργασίας 802.16 [8], η οποία εργάζεται επί της Ευρυζωνικής Ασύρματης Πρόσβασης (BWA – Broadband Wireless Access) από τον Ιούλιο του 1999.

Το αρχικό πρότυπο, που εκδόθηκε τον Απρίλιο του 2001 ως 802.16, προσδιόριζε τα PHY και MAC επίπεδα για τις αδειοδοτούμενες ζώνες στο εύρος συχνοτήτων 10-66GHz. Το εύρος όμως αυτό των συχνοτήτων στις οποίες απευθύνεται το πρότυπο απαιτούν λειτουργία οπτικής επαφής (LOS – Line-Of-Sight), γεγονός που μειώνει την περιοχή κάλυψης τέτοιων συστημάτων. Μειονέκτημα του προτύπου αποτελεί επίσης το γεγονός ότι απευθύνεται σε αδειοδοτούμενες ζώνες, με αποτέλεσμα να αποκλείει ουσιαστικά από την εφαρμογή μικρές επιχειρήσεις, καθώς το κόστος για την απόκτηση φάσματος σε μια αδειοδοτούμενη περιοχή είναι συχνά απαγορευτικό.

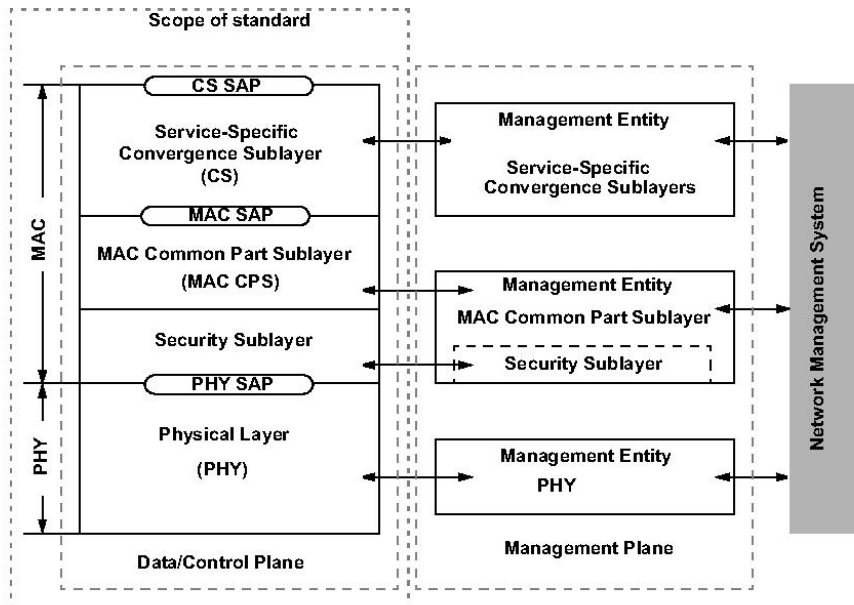
Για τους παραπάνω ακριβώς λόγους, η ομάδα IEEE 802.16 προχώρησε στην ανάπτυξη και δημοσιοποίηση της τροποποίησης 802.16a τον Ιανουάριο του 2003, η οποία διεύρυνε το πρότυπο περιλαμβάνοντας συχνοτήτες κάτω των 11GHz, επιτρέποντας έτσι τη λειτουργία των συστημάτων υπό συνθήκες μη οπτικής επαφής (NLOS – Non Line-Of-Sight), αυξάνοντας έτσι την περιοχή κάλυψης ενός σταθμού βάσης. Επίσης, σε αυτή την περιοχή συχνοτήτων περιλαμβάνονται τόσο αδειοδοτούμενες όσο και μη αδειοδοτούμενες περιοχές (ISM bands). Στην περίπτωση όμως της λειτουργίας υπό συνθήκες NLOS, εντείνεται το φαινόμενο της πολυδιαδρομικής διάδοσης (multipath). Έτσι, το 802.16a περιλαμβάνει μεθόδους αντιμετώπισης του παραπάνω προβλήματος, όπως η χρήση OFDM και OFDMA σχημάτων πολύπλεξης και πολλαπλής πρόσβασης στον ασύρματο δίαυλο. Τα δύο αυτά σχήματα είναι ιδιαίτερα εύρωστα στην πολυδιαδρομική διάδοση και επιπρόσθετα εμφανίζουν χαρακτηριστικά όπως αποδοτική χρήση του φάσματος αλλά και προσαρμοστικότητα στην εκχώρηση πόρων στο πεδίο της συχνότητας.

Επόμενος σταθμός της ομάδας υπήρξε η δημοσίευση του 802.16d (ή 802.16-2004), το οποίο φαίνεται να είναι και το τελικό πρότυπο όσον αφορά τη σταθερή ασύρματη πρόσβαση. Η πλέον πρόσφατη δημοσίευση της ομάδας υπήρξε η τροποποίηση 802.16e, η οποία πραγματεύεται τη διαχείριση κινητικότητας και καθορίζει την κινητή ασύρματη πρόσβαση.¹

Η παρούσα διπλωματική εργασία δεν επεχείρησε να ασχοληθεί με κινητούς χρήστες, αλλά μόνο με τους χρήστες εκείνους που χρησιμοποιούν την ασύρματη διεπαφή ευρισκόμενοι σε μία σταθερή θέση (fixed). Για το λόγο αυτό, αναφορά της παρούσης θα αποτελέσει το πρότυπο 802.16 με την τροποποίηση 802.16-2004, που αφορά την σταθερή ασύρματη πρόσβαση. Το μοντέλο αναφοράς του συ-

¹ Όλα τα πρότυπα της επιτροπής IEEE 802, συμπεριλαμβανομένων και των προτύπων της ομάδας εργασίας 802.16, βρίσκονται ελεύθερα προς καταφόρτωση στο URL: <http://standards.ieee.org/getieee802/index.html>

στήματος, όπως ορίζεται στην τροποποίηση αυτή εικονίζεται στο διάγραμμα που ακολουθεί. Στη συνέχεια της παρουσίασης ενότητας παρουσιάζονται εν συντομία τα PHY και MAC επίπεδα όπως ορίζονται από το πρότυπο, το οποίο θα πρέπει να σημειωθεί ότι προβλέπει τόσο δίκτυα σημείου προς πολλαπλά σημεία (PMP – point-to-multipoint) όσο και δίκτυα πλέγματος (mesh networks).



Εικόνα 2.1: 802.16 Μοντέλο Αναφοράς Συστήματος

2.1.1 Φυσικό Στρώμα (PHY)

Το φυσικό στρώμα είναι το χαμηλότερο στρώμα της ιεραρχίας που απεικονίζεται στην Εικόνα 2.1. Επικοινωνεί με το στρώμα ελέγχου προσπέλασης, το άμεσα ανώτερο στρώμα, μέσω του σημείου πρόσβασης υπηρεσίας φυσικού στρώματος (PHY SAP). Ενώ στο πρότυπο ορίζεται ένα μόνο επίπεδο MAC, για το φυσικό στρώμα έχουμε συνολικά πέντε διαφορετικές εκδοχές, κάθε μία από τις οποίες ανταποκρίνεται σε διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες, ήτοι συνθήκες διάδοσης. Οι διαφορετικές αυτές εκδοχές, που αποκαλούνται ασύρματες διεπαφές (air interfaces), δίδονται στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 2.1). Στη συνέχεια ακολουθεί μια σύντομη ανάλυση για κάθε μία από αυτές.

Ασύρματη Διεπαφή	Συχνοτική Μπάντα	Επιπλέον χαρακτηριστικά του επιπέδου MAC	Αμφιδρόμηση
WirelessMAN-SC	10-66GHz		TDD,FDD
WirelessMAN-SCa	Κάτω από 11GHz	AAS, ARQ, STC	TDD,FDD
WirelessMAN-OFDM	Κάτω από 11GHz	AAS, ARQ, STC, Mesh	TDD,FDD
WirelessMAN-OFDMA	Κάτω από 11GHz	AAS, ARQ, STC	TDD,FDD
WirelessHUMAN	Κάτω από 11GHz	AAS, ARQ, STC, Mesh	TDD

Πίνακας 2.1: Ασύρματες Διεπαφές του προτύπου 802.16²

2.1.1.1 WirelessMAN-SC

Η πρώτη αυτή ασύρματη διεπαφή βασίζεται στη μετάδοση με μία μόνο φέρουσα συχνότητα (single-carrier) και προορίζεται για λειτουργία στο συχνοτικό εύρος 10-66GHz. Κύριο χαρακτηριστικό της είναι ότι απαιτείται ζεύξη οπτικής επαφής μεταξύ του σταθμού του χρήστη (SS – Subscriber station) και του σταθμού βάσης (BS – Base Station) ενώ δεν είναι εύρωστη στην πολυδιαδρομική διάδοση. Η εκπομπή που προβλέπεται μπορεί να προσαρμοστεί στις συνθήκες του ασύρματου καναλιού, προσαρμόζοντας είτε το επίπεδο διαμόρφωσης είτε την κωδικοποίηση ανά μεταδιδόμενο πλαίσιο. Τα επιτρεπτά επίπεδα διαμόρφωσης είναι QPSK (Quadrature Phase Shift Keying), 16-QAM (Quadrature Amplitude Modulation) και 64-QAM (προαιρετικά) τόσο για τη ζεύξη ανόδου (uplink) όσο και για τη ζεύξη καθόδου (downlink). Μετά τη διαμόρφωση, το σήμα βασικής ζώνης μορφοποιείται χρησιμοποιώντας φίλτρα τετραγωνικής ρίζας ανορθωμένου συνημιτόνου (square-root raised cosine). Υποστηρίζεται αμφιδρόμηση τόσο FDD (Frequency Division Duplex) όσο και TDD (Time Division Duplex). Όταν χρησιμοποιείται FDD, το σύστημα μπορεί να υποστηρίξει πλήρως αμφίδρομα ή ημιαμφίδρομα SSs. Η ζεύξη ανόδου βασίζεται σε πολλαπλή πρόσβαση διαμοιρασμού χρόνου (TDMA – Time Division Multiple Access), όταν η ζεύξη καθόδου είναι TDD. Το πρότυπο περιλαμβάνει χαρακτηριστικά όπως bit randomization (τυχαία ανακατάταξη των bits του frame), FEC (Forward Error Correction – Πρόσω διορθωση σφαλμάτων), συγχρονισμό και έλεγχο συχνότητας. Χαρακτηριστικά τα οποία επίσης περιλαμβάνονται αλλά δεν ορίζεται η υλοποίησή τους είναι ο έλεγχος ισχύος της άνω ζεύξης, αντιστάθμιση των απωλειών ισχύος λόγω της διάδοσης ελευθέρου χώρου ή διακυμάνσεων.

2.1.1.2 WirelessMAN-SCa

Η ασύρματη αυτή διεπαφή αποτελεί επέκταση της προηγούμενης WirelessMAN-SC για τη συχνοτική μάντα υπό τα 11GHz και, επομένως, για ζεύξεις μη οπτικής επαφής. Οι επιπτώσεις από την πολυδιαδρομική διάδοση, που είναι παρούσα στις συχνότητες αυτές, περιορίζονται χρησιμοποιώντας εκτίμηση και ισοστάθμιση του ασύρματου καναλιού. Όπως και προηγούμενα, προβλέπονται προσαρ-

2 AAS – Adaptive Antenna System – Σύστημα Προσαρμοστικής Κεραίας
ARQ – Automatic Repeat reQuest – Αυτόματη Αίτηση Επανάληψης
STC – Space-Time Coding – Κωδικοποίηση χώρου-χρόνου

μοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση, με τη διαφορά ότι τώρα οι δυνατές διαμορφώσεις πληθαίνουν, περιλαμβάνοντας εξαπλωμένη BPSK (Binary Phase Shift Keying) (όπου τα bits από τον κωδικοποιητή FEC εξαπλώνονται από μία PN ακολουθία πριν από την απεικόνιση στον BPSK αστερισμό), BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM και 256-QAM (προαιρετικά). Προστίθενται τέλος και κάποιες επιπλέον δυνατότητες όπως είναι η κωδικοποίηση χώρου χρόνου (STC), συστήματα προσαρμοστικών κεραιών (AAS) και συνελκτικοί turbo κώδικες.

2.1.1.3 WirelessMAN-OFDM

Ένα από το κυριότερα μειονεκτήματα που προκαλεί η χρήση φάσματος στη ζώνη υπό τα 11GHz, είναι η πολυδιαδρομική διάδοση. Για να μειωθούν οι επιδράσεις του φαινομένου, προτάθηκε μία ακόμα ασύρματη διεπαφή, η οποία και πάλι αναφέρεται σε NLOS ζεύξεις με τη διαφορά ότι χρησιμοποιείται η ορθογωνική πολύπλεξη συχνότητας (OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplex). Η ασύρματη αυτή διεπαφή καλείται WirelessMAN-OFDM. Το πρότυπο προβλέπει ότι οι εκπεμπόμενες κυματομορφές προκύπτουν χρησιμοποιώντας ένα αντίστροφο ταχύ μετασχηματισμό Fourier (IFFT) 256 σημείων. Έτσι, προκύπτουν συνολικά 256 OFDM φέροντα (subcarriers), εκ των οποίων τα 200 χρησιμοποιούνται είτε σαν κανάλια δεδομένων είτε σαν κανάλια-πλότοι ενώ τα υπόλοιπα παραμένουν ανενεργά χρησιμοποιούμενα για διαστήματα φύλαξης. Και στην περίπτωση αυτής της ασύρματης διεπαφής, προβλέπονται προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση, με σχήματα BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM (προαιρετικά για τις μη αδειοδοτούμενες ζώνες). Το FEC μπορεί να υλοποιηθεί ως συνένωση συνελκτικής Reed-Solomon κωδικοποίησης ή, προαιρετικά, μπλοκ turbo κωδικοποίησης ή συνελκτικής turbo κωδικοποίησης. Στις ελεύθερες ζώνες, η αμφιδρόμηση επιτυγχάνεται με TDD, ενώ στις αδειοδοτούμενες με TDD ή FDD. Στο πρότυπο εισάγεται επίσης η έννοια του χωρισμού σε κανάλια (subchannels), όπου ένα subchannel αποτελείται από ένα σύνολο subcarriers, κάποια subcarriers-πλότους για την εκτίμηση του καναλιού και κάποια subcarriers δεδομένων. Ο συνδυασμός ενός OFDM subchannel στο πεδίο της συχνότητας και ενός OFDM συμβόλου στο πεδίο του χρόνου συγκροτούν ένα μπλοκ δεδομένων, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν μια μονάδα εκχώρησης πόρων. Η υλοποίηση του χωρισμού σε subchannels δεν είναι υποχρεωτική για τον τερματικό σταθμό των χρηστών. Όταν όμως υλοποιείται, η εκπεμπόμενη ισχύς ανά τερματικό σταθμό είναι ανάλογη του πλήθους των εκχωρημένων subchannels. Επίσης, οι πάροχοι μπορούν να εφαρμόσουν κατά το δοκούν αλγορίθμους ελέγχου ισχύος.

Ένα προαιρετικό χαρακτηριστικό που αφορά στη διαφορική εκπομπή είναι η Alamouti κωδικοποίηση χώρου-χρόνου (STC), η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην κάτω ζεύξη. Στην περίπτωση αυτή, ο σταθμός βάσης διαθέτει δύο χωριστούς πομπούς OFDM με δύο κεραιές, οι οποίες εκπέμπουν δύο διαφορετικά OFDM σύμβολα την ίδια χρονική στιγμή αλλά σε δύο διαφορετικά κανάλια. Στον τερματικό σταθμό, ο οποίος διαθέτει μία κεραία, πραγματοποιείται εκτίμηση των δύο καναλιών και η πληροφορία αυτή χρησιμοποιείται για συνδυασμό των σημάτων και κατοπινή ανίχνευση. Επίσης

παρέχονται κλασικές λειτουργίες, όπως τυχαιοποίηση (randomization), διεμπλοκή (interleaving) και συγχρονισμός.

2.1.1.4 WirelessMAN-OFDMA

Η ασύρματη αυτή διεπαφή απευθύνεται επίσης σε NLOS ζεύξεις που λειτουργούν σε συχνότητες κάτω των 11GHz. Το OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access – Πολλαπλή πρόσβαση με ορθογωνική διαίρεση συχνότητας), αφενός μεν μειώνει την επίδραση της πολυδιαδρομικής διάδοσης αφετέρου δε παρέχει τη δυνατότητα διάκρισης των χρηστών που χρησιμοποιούν τον ασύρματο δίαυλο στο πεδίο της συχνότητας. Το συνολικό πλήθος των OFDMA subcarriers, τα οποία επίσης προκύπτουν από IFFT, είναι 2048, εκ των οποίων χρησιμοποιούνται τα 1681 (για δεδομένα και pilot subcarriers) ενώ τα υπόλοιπα είναι ανενεργά και χρησιμοποιούνται για διαστήματα φύλαξης. Στην περίπτωση αυτή, κάθε subchannel συγκροτείται από 48 subcarriers. Τα subcarriers που συγκροτούν ένα subchannel μπορούν να είναι γειτονικά (όποτε έχουμε τη λεγόμενη γειτονική διάταξη subcarriers), πράγμα το οποίο είναι χρήσιμο στις περιπτώσεις που αξιοποιούνται AAS & AMC (Adaptive Modulation & Coding – Προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση), ή μη γειτονικά (κατανεμημένη διάταξη subcarriers), γεγονός που προσθέτει συχνοτική διαφορισιμότητα. Και εδώ, η μονάδα εκχώρησης πόρων αποτελεί συνδυασμό από ένα OFDMA subchannel στο πεδίο της συχνότητας και ένα OFDMA symbol στο πεδίο του χρόνου.

Στη διεπαφή αυτή, η αμφιδρόμηση επιτυγχάνεται με TDD για τις ελεύθερες ζώνες συχνοτήτων ενώ για τις αδειοδοτούμενες ζώνες μπορεί να χρησιμοποιηθεί TDD ή FDD. Προβλέπονται επίσης προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση, με δυνατές διαμορφώσεις QPSK, 16-QAM και 64-QAM. Η επιλεγμένη διαμόρφωση απεικονίζεται εν συνεχεία στα κανάλια δεδομένων που έχουν εκχωρηθεί. Η διαμόρφωση και η κωδικοποίηση μπορούν να προσαρμόζονται ανά εκχώρηση για το downlink ή ανά SS για το uplink. Το FEC μπορεί να υλοποιείται χρησιμοποιώντας συνελκτική κωδικοποίηση ή, προαιρετικά, μπλοκ turbo κωδικοποίηση ή συνελκτική turbo κωδικοποίηση. Επίσης, επιτρέπεται η χρήση τεχνικών πολλαπλών-εισόδων – πολλαπλών-εξόδων (MIMO – multiple-input – multiple output), Alamouti STC και H-ARQ (Hybrid Automatic Repeat reQuest).

2.1.1.5 WirelessHUMAN³

Η διεπαφή αυτή συγκεντρώνει τις διεπαφές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις μη αδειοδοτούμενες ζώνες συχνοτήτων, οι οποίες και είναι WirelessMAN-SCa, WirelessMAN-OFDM & WirelessMAN-OFDMA. Σημαντικό στοιχείο είναι το ότι το εύρος ζώνης του καναλιού ορίζεται να είναι 10MHz ή 20MHz ώστε να είναι συμβατό με το πρότυπο 802.11a για τα ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLANs).

3 HUMAN – High speed Unlicensed Metropolitan Area Network

2.1.2 Στρώμα Ελέγχου Προσπέλασης Μέσου (MAC)

Το στρώμα MAC, κοινό για όλα τα φυσικά στρώματα του προτύπου, αποτελείται από τρία υπο-στρώματα (Εικόνα 2.1)

- Υπόστρωμα ασφάλειας, υπεύθυνο για θέματα ασφάλειας, όπως πιστοποίηση, κρυπτογράφηση ή ανταλλαγή κλειδιών ασφαλείας.
- Κοινό υπόστρωμα MAC, υπεύθυνο για τις βασικές λειτουργίες του MAC στρώματος, όπως έλεγχος αποδοχής (admission control), εκχώρηση πόρων και διαχείριση QoS (Quality of Service – Ποιότητα υπηρεσίας).
- Υπόστρωμα σύγκλισης (CS), εξαρτώμενο από την υπηρεσία, το οποίο μετατρέπει τα SDUs (Service Data Units – Μονάδα Πληροφορίας Υπηρεσίας) εξωτερικών δικτύων σε MAC SDUs [9].

2.1.2.1 Υπόστρωμα Ασφάλειας

Το υπόστρωμα ασφάλειας παρέχει μηχανισμούς για την προστασία της πληροφορίας που στέλνεται μέσω της ασύρματης διεπαφής από υποκλοπή ή μη εξουσιοδοτημένη χρήση της υπηρεσίας. Περιλαμβάνονται έτσι λειτουργίες πιστοποίησης αυθεντικότητας, διαχείρισης κλειδιών ασφαλείας και κρυπτογράφησης δεδομένων.

2.1.2.2 Κοινό Υπόστρωμα MAC

Το κοινό υπόστρωμα MAC είναι κεντρικό στην ιεραρχία του MAC επιπέδου και είναι υπεύθυνο για τις βασικές λειτουργίες αυτού, όπως είναι η κατανομή πόρων (resource allocation), εγκατάσταση μιας νέας σύνδεσης, διατήρηση και τερματισμό αυτής. Το 802.16-2004 ορίζει δύο διαφορετικές τοπολογίες δικτύου, οι οποίες απαιτούν διαφορετική αντιμετώπιση από το MAC επίπεδο, την τοπολογία σημείου προς πολλαπλά σημεία (PMP) και την τοπολογία πλέγματος (mesh).

Η τοπολογία PMP χρησιμοποιείται στο downlink, όπου ένας σταθμός βάσης επικοινωνεί με τους τερματικούς σταθμούς. Στην περίπτωση αυτή, ένα δεδομένο τμήμα κάποιου υποπλαισίου είτε απευθύνεται προς ένα συγκεκριμένο τερματικό σταθμό είτε όλοι οι τερματικοί σταθμοί λαμβάνουν την ίδια πληροφορία, η οποία εν συνεχεία φιλτράρεται και κάθε ένας κρατάει το τμήμα εκείνο που απευθύνεται σε αυτόν. Κάθε τερματικός σταθμός διακρίνεται από μία MAC διεύθυνση 48-bit. Ο σταθμός βάσης δε χρειάζεται να συγχρονίζει την εκπομπή του με τους άλλους σταθμούς βάσης, πέραν του συγχρονισμού που απαιτείται όταν χρησιμοποιείται TDD αμφιδρόμηση. Το MAC πρωτόκολλο είναι συνδεοστραφές (connection-oriented), όπου κάθε τέτοια σύνδεση χαρακτηρίζεται από τις παραμέτρους ποιότητας QoS, που επιτρέπουν την αποδοτική διαχείρισή της, ενώ ταυτοποιείται μέσω ενός 16-bit διακριτικού, της λεγόμενης ταυτότητας σύνδεσης (CID - connection identifier).

Στην περίπτωση των δικτύων πλέγματος, κάποιοι κόμβοι μπορεί να είναι ανώτεροι από άλλους (οι σταθμοί βάσης) ή μπορεί να είναι της ίδιας τάξης (διαβάθμισης). Εκπομπή μπορεί να γίνει όχι μόνο

μεταξύ του σταθμού βάσης και των τερματικών σταθμών αλλά και απευθείας μεταξύ των τερματικών σταθμών ή ακόμα και διαμέσου των αυτών. Αυτό σημαίνει ότι ένα μήνυμα από ένα αποστολέα προς ένα παραλήπτη μπορεί να δρομολογηθεί μέσω πολλαπλών ραδιοζεύξεων. Ο προγραμματισμός της μετάδοσης μεταξύ των κόμβων του δικτύου μπορεί να γίνεται είτε κεντρικά, οπότε καίριο ρόλο παίζει ο BS, είτε καταναμημένα, οπότε οι πληροφορίες του προγραμματισμού αυτού εκπέμπονται προς όλους τους κόμβους. Οι παράμετροι QoS προσδιορίζουν κάθε μήνυμα που ανταλλάσσεται πάνω σε μια ζεύξη.

Η MAC PDU (Protocol Data Unit – Μονάδα Πληροφορίας Πρωτοκόλλου) [9] και για τις δύο διαφορετικές τοπολογίες, αποτελείται από μία επικεφαλίδα, ένα ωφέλιμο φορτίο μεταβλητού μήκους και ένα πεδίο κυκλικού ελέγχου πλεονασμού (CRC – Cyclic Redundancy Check) [6]. Στο υπόστρωμα αυτό πραγματοποιούνται λειτουργίες όπως συνένωσης και τεμαχισμού-επανένωσης MAC PDUs. Επίσης, προβλέπεται προαιρετικά η λειτουργία της αυτόματης αίτησης επανάληψης (ARQ).

Το MAC επίπεδο (scheduling) υποστηρίζει τις κάτωθι κατηγορίες υπηρεσιών

- USG - Unsolicited Grant Service: πακέτα σταθερού μήκους σε σταθερά χρονικά διαστήματα.
- rtPS – real-time Polling Service: πακέτα μεταβλητού μήκους σε σταθερά χρονικά διαστήματα.
- nrtPS – nonreal-time Polling Service: πακέτα μεταβλητού μήκους με απαίτηση για έναν ελάχιστο ρυθμό μετάδοσης.
- BE – Best Effort: καμία απαίτηση ποιότητας, διαχείριση βέλτιστης προσπάθειας.⁴

Το επίπεδο MAC του προτύπου 802.16 μπορεί να υποστηρίξει τόσο FDD όσο και TDD σχήματα αμφιδρόμησης. Στην περίπτωση του FDD, η ζεύξεις ανόδου και καθόδου χρησιμοποιούν διαφορετικές συχνότητες. Ο τερματικός σταθμός μπορεί να είναι είτε πλήρως αμφίδρομος, όταν μπορεί ταυτόχρονα να πραγματοποιεί εκπομπή και λήψη δεδομένων, ή ημιαμφίδρομος, όταν σε μια δεδομένη χρονική στιγμή μπορεί να πραγματοποιεί μόνο εκπομπή ή μόνο λήψη. Στην περίπτωση του TDD, οι ζεύξεις ανόδου και καθόδου χρησιμοποιούν την ίδια συχνότητα αλλά η εκπομπή χωρίζεται χρονικά από τη λήψη. Το πλαίσιο στην περίπτωση αυτή περιλαμβάνει υποπλαίσια τόσο της άνω όσο και της κάτω ζεύξης. Το μήκος των υποπλαίσιων αυτών μπορεί να μεταβάλλεται σύμφωνα με τις ανάγκες, όπου συνήθως η ζεύξη καθόδου απαιτεί περισσότερους πόρους.

Προαιρετικά, όπως φαίνεται στον πίνακα που προηγήθηκε (Πίνακας 2.1), κάποιες από τις ασύρματες διεπαφές που ορίζονται, μπορούν να υποστηρίζουν συστήματα προσαρμοστικών κεραιών (AAS). Τα οφέλη των AAS είναι πολλά αλλά μπορούν να συνοψιστούν στα παρακάτω δύο πλεονεκτήματα

4 Στη βιβλιογραφία έχουμε επίσης τις εξής αντίστοιχες ονομασίες [9]:

- USG → CBR : Constant Bit Rate
- rtPS → VBR : Variable Bit Rate
- nrtPS → ABR : Available Bit Rate
- BE → UBR : Unspecified Bit Rate

[4],

- Η χωρητικότητα αυξάνεται εξαιτίας της αποδοτικότερης (επανα)χρησιμοποίησης του διαθέσιμου φάσματος, αφού δύο διαφορετικές ζεύξεις μπορούν να χρησιμοποιούν την ίδια φέρουσα συχνότητα και να διακρίνονται μεταξύ τους στο πεδίο του χώρου (space diversity). Αυτό εφαρμόζεται τόσο στη διακυψελική επαναχρησιμοποίηση φάσματος όσο και στην ενδοκυψελική επαναχρησιμοποίηση. Επίσης, η χωρητικότητα αυξάνεται εξαιτίας της ικανότητας των κεραιών να μειώνουν την ομοδιαυλική παρεμβολή, στρέφοντας το διάγραμμα ακτινοβολίας τους σε κατεύθυνση αντίθετη αυτής που εντοπίζουν παρεμβολές.
- Το εύρος κάλυψης αυξάνεται εξαιτίας της κατευθυντικότητας των κεραιών και της δυνατότητάς τους να συνδυάζουν σήματα προερχόμενα από πολλαπλές κεραιές.

Ένα ακόμα ενδιαφέρον χαρακτηριστικό, το οποίο ορίζεται ως υποχρεωτικό για τα συστήματα που λειτουργούν σε ελεύθερες ζώνες συχνοτήτων, είναι η δυναμική επιλογή συχνότητας (DFS – Dynamic Frequency Selection). Η δυνατότητα αυτή επιτρέπει την ανίχνευση και αποτροπή συμφόρησης χρηστών. Τα SS και BS θα πρέπει να πραγματοποιούν μετρήσεις του καναλιού που σκοπεύουν να χρησιμοποιήσουν, ώστε να διαπιστώσουν αν το κανάλι αυτό χρησιμοποιείται ήδη από κάποιο άλλο χρήστη (όχι απαραίτητα του οικείου συστήματος). Αν όντως το κανάλι ήδη χρησιμοποιείται, τότε δεν θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί από το σταθμό που αναζητούσε κανάλι, για να αποφευχθεί σύγκρουση, και αυτός θα πρέπει να συνεχίσει την αναζήτησή του έως ότου βρει κάποιο ελεύθερο κανάλι.

Τελειώνοντας, ένα ωφέλιμο χαρακτηριστικό που προβλέπει το πρότυπο είναι η υβριδική αυτόματη αίτηση επανάληψης (H-ARQ). Το χαρακτηριστικό αυτό προβλέπεται μόνον για την ασύρματη διεπαφή WirelessMAN-OFDMA. Ένα H-ARQ πακέτο προκύπτει από συνένωση μίας ή περισσότερων MAC PDUs. Στη συνέχεια το πακέτο αυτό αποστέλλεται ως τέσσερα επιμέρους υποπακέτα. Σε περίπτωση ανεπιτυχούς ανίχνευσης ενός υποπακέτου, τα ακολουθούντα υποπακέτα στέλνονται συνεχώς έως ότου να έχουμε επιτυχή λήψη ολόκληρου του πακέτου. Έτσι αυξάνονται οι πιθανότητες της επιτυχούς λήψεως καθώς αυξάνεται ο αριθμός των επανεκπεμπόμενων υποπακέτων, εφόσον υπάρχει πλεονασμός των υποπακέτων και ο παραλήπτης χρησιμοποιεί όλα τα υποπακέτα για να ανιχνεύσει το σταλθέν μήνυμα.

2.1.2.3 Υπόστρωμα Σύγκλισης, εξαρτώμενο από την υπηρεσία

Το υπόστρωμα σύγκλισης εξαρτώμενο από την υπηρεσία διασυνδέει το κοινό υπόστρωμα του MAC επιπέδου (MAC CPS) με το υψηλότερο ιεραρχικά επίπεδο. Υπάρχουν δύο ορισμένα CS στο πρότυπο, το ATM (asynchronous transfer mode – ασύγχρονος τρόπος μεταφοράς) CS, για διασύνδεση με ATM πρωτόκολλο και το CS πακέτου για διασύνδεση με πρωτόκολλα πακέτου, πχ IP ή Ethernet.

Το ATM CS επιτρέπει τη σύνδεση ενός συστήματος 802.16 με το επίπεδο ATM ενός ATM δικτύου. Το σύστημα υποστηρίζει τόσο μεταγωγή νοητών διαδρομών (Virtual Paths – VP) όσο και νοητών καναλιών (Virtual Channels – VC) [9]. Και στις δύο περιπτώσεις, διατηρούνται οι απαιτήσεις ποιότη-

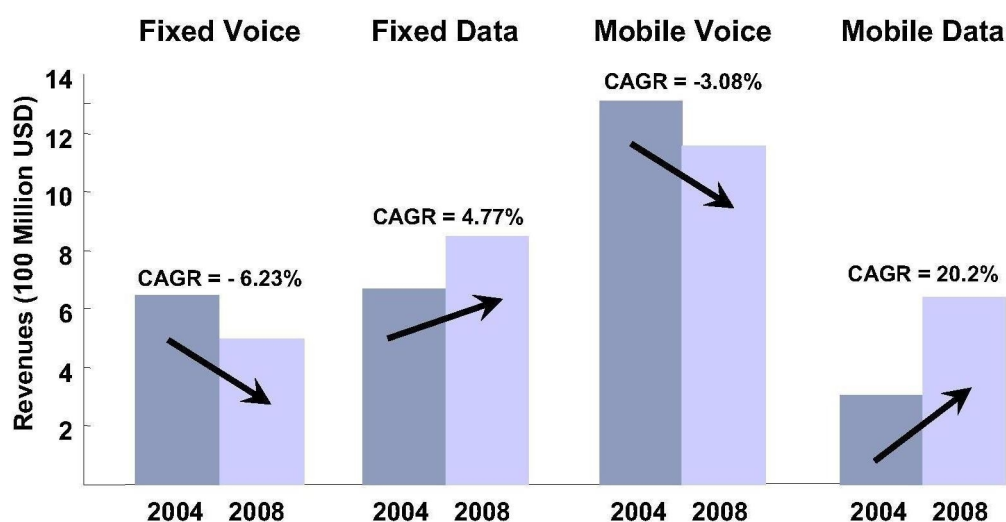
τας (QoS) της ATM σύνδεσης.

Το CS πακέτου επιτρέπει τη διασύνδεση συστημάτων 802.16 με συστήματα βασισμένα σε πακέτο, όπως IP, PPP ή Ethernet. SDUs ανώτερων στρωμάτων. Μονάδες υπηρεσίας (SDUs) ανώτερων στρωμάτων, που προέρχονται από κάποια γέφυρα ή δρομολογητή, απεικονίζονται σε ξεχωριστές συνδέσεις (διαφορετικό CID), σύμφωνα με συγκεκριμένα κριτήρια, όπως η διεύθυνση προορισμού ή η προτεραιότητα.

2.2 Δίκτυα WiMAX – παρελθόν, παρόν & μέλλον

2.2.1 Η αγορά των προσωπικών ευρυζωνικών υπηρεσιών

Το Mobile Internet (Κινητό Διαδίκτυο) έχει ανακύψει ως η πλέον πρόσφατη κινητή υπηρεσία και αποτελεί ένα από τα ταχύτερα αναπτυσσόμενα τμήματα της παγκόσμιας αγοράς τηλεπικοινωνιών. Οι συνδρομητές εκτιμούν την ελευθερία, αμεσότητα, ευκολία χρήσης και την ισχύ των κινητών επικοινωνιών και αυτό θα επιφέρει εκρηκτική ανάπτυξη την επόμενη δεκαετία, αλλά η αγορά βρίσκεται ακόμα στα πρώτα της βήματα. Η διαθεσιμότητα ασύρματων ευρυζωνικών υπηρεσιών είναι περιορισμένη σήμερα, λίγοι συνδρομητές διαθέτουν μία πραγματικά ευρυζωνική πρόσβαση σε ταχύτητες άνω του 1Mbps ενώ το κόστος είναι ακόμα υπερβολικά υψηλό. Πάρα ταύτα, η αυξημένη διείσδυση στην αγορά φορητών υπολογιστών, υπολογιστών χειρός και άλλων φορητών, δεδομοκεντρικών συσκευών δημιουργεί μία ισχυρή τάση για την υιοθέτηση υπηρεσιών κινητού Internet. Τα έσοδα από τη χρήση κινητών υπηρεσιών δεδομένων αυξάνονται τάχιστα και σε πολλές ανεπτυγμένες χώρες αποτελούν ποσοστό 20% έως 30% των εσόδων των παρόχων, ενώ τα έσοδα από τις υπηρεσίες φωνής παραμένουν σταθερά ή μειώνονται (Εικόνα 2.2).



Εικόνα 2.2: Έσοδα από υπηρεσίες φωνής και δεδομένων στην Κορέα (2004)

Η ανάπτυξη στις κινητές υπηρεσίες δεδομένων (mobile data) θα προκύψει κυρίως από την προσωπική ευρυζωνικότητα, η οποία προχωρά πέρα από τις βασικές υπηρεσίες δεδομένων των κυψελωτών συστημάτων και αντιγράφει τη λειτουργικότητα των σταθερών ευρυζωνικών συστημάτων σε ένα περιβάλλον κινητικότητας. Υπηρεσίες και εφαρμογές διαθέσιμες τώρα στο σπίτι και το γραφείο θα είναι διαθέσιμες παντού. Αυτή η χωρική ανεξαρτησία της ευρυζωνικής πρόσβασης θα δώσει ώθηση στην εργασιακή παραγωγικότητα, της προσωπικές επικοινωνίες και τη διασκέδαση καθ' οδόν. Νέες υπηρεσίες και εφαρμογές, δημιουργημένες ειδικά για χρήση σε περιβάλλον κινητικότητας : κινητό γραφείο,

διασκέδαση καθ' οδόν, κινητή αναζήτηση, πρόσκαιρη διαχείριση, επιτήρηση και δημόσια ασφάλεια θα είναι από τις πρώτες που θα προκύψουν και ακόμα περισσότερες θα ακολουθήσουν. Όπως ακριβώς συνέβη με τη μετάβαση από τη σταθερή προς την κινητή τηλεφωνία, η ευρυζωνική σύνδεση θα πάψει να είναι συσχετισμένη με μία θέση και θα γίνει μια προσωπική υπηρεσία.

Η υποδομή των δικτύων δεύτερης και τρίτης γενιάς είναι βελτιστοποιημένη για την εξυπηρέτηση κίνησης φωνής, βασισμένη σε μεταγωγής κυκλώματος, ενώ δεν είναι σχεδιασμένη για να αντεπεξέλθει στην αυξανόμενη κίνηση που παράγεται από εφαρμογές υψηλών ταχυτήτων πραγματικού χρόνου, έως την υλοποίηση της Μακροπρόθεσμης Εξέλιξης (Long Term Evolution – LTE), η οποία και αναμένεται το 2010.

Το Mobile WiMAX, το οποίο αναμένεται να είναι εμπορικά διαθέσιμο εντός του 2007, αποτελεί την τεχνολογία που καλύπτει καλύτερα τη ζήτηση για προσωπικές ευρυζωνικές υπηρεσίες. Βασίζεται σε ένα δίκτυο πυρήνα all-IP, το οποίο προσφέρει χαμηλή καθυστέρηση (low latency), αυξημένη ασφάλεια (advanced security), ποιότητα υπηρεσιών (Quality of Service – QoS) και δυνατότητες παγκόσμιας περιαγωγής (roaming). Οι πάροχοι υπηρεσιών επωφελούνται επίσης από το χαμηλό κόστος που προσφέρει μια τεχνολογία βασισμένη σε ένα ανοικτό πρότυπο, την ανεξαρτησία του εξοπλισμού από το συγκεκριμένο κατασκευαστή και ένα ευνοϊκό κανονιστικό πλαίσιο για τα δικαιώματα πνευματικής ιδιοκτησίας (Intellectual Property Rights – IPR).

Το WiMAX θα συνυπάρξει και θα συνεργαστεί με τις ήδη υπάρχουσες αλλά και νέες τεχνολογίες, τόσο ασύρματες όσο και ενσύρματες. Παρότι μπορεί να υποστηρίξει υπηρεσίες φωνής μέσω IP (Voice over IP – VoIP), το WiMAX δεν πρόκειται να αντικαταστήσει ή ανταγωνιστεί τις 2G ή 3G τεχνολογίες για υπηρεσίες φωνής. Τα κυψελωτά δίκτυα παρέχουν την εκτεταμένη κάλυψη που οι υπηρεσίες φωνής, κλασικά υπηρεσίες μεταγωγής κυκλώματος, απαιτούν ενώ η υποδομή του WiMAX δεν είναι σχεδιασμένη για να τις υποστηρίξει. Τα δίκτυα τρίτης γενιάς καλύπτουν πολλές αστικές και ημιαστικές περιοχές αλλά δεν είναι σε θέση να προσφέρουν επαρκή χωρητικότητα ή διέλευση για εφαρμογές δεδομένων. Όμοια, τα WiMAX και Wi-Fi είναι συμπληρωματικά και αναμένεται να ενσωματωθούν σε dual-mode chipsets στις φορητές συσκευές, καθώς το WiMAX προσφέρει ευρύτερη κάλυψη ενώ το Wi-Fi αποδίδει καλύτερα σε εφαρμογές υψηλής διέλευσης, σε τοπικά δίκτυα εσωτερικού χώρου. Το WiMAX επίσης απευθύνεται στους χρήστες εκείνους που επιθυμούν να χρησιμοποιούν την ευρυζωνική τους σύνδεση ανεξαρτήτως θέσης, επιθυμία που δε μπορεί να ικανοποιηθεί από τις σύγχρονες συνδέσεις DSL ή καλωδιακού modem. Το WiMAX Forum έχει αναλάβει ένα ενεργό ρόλο ώστε να διασφαλιστεί ότι τα δίκτυα WiMAX θα μπορούν να συνεργάζονται με αυτές τις υφιστάμενες τεχνολογίες αλλά και θα μπορούν να υποστηρίζουν νέες αρχιτεκτονικές, όπως το υποσύστημα πολυμέσων IP (IP Multimedia Subsystem – IMS), το οποίο επιτρέπει στους παρόχους να διαθέτουν τις ίδιες εφαρμογές και υπηρεσίες διαμέσου πολλαπλών ασύρματων και ενσύρματων διεπαφών.

2.2.2 Τι έχει να προσφέρει το WiMAX

Οι λόγοι για τους οποίους ένας πάροχος μπορεί να επιλέξει το WiMAX ποικίλουν, αλλά υπάρχουν κάποιοι κρίσιμοι παράγοντες που δίνουν στο WiMAX ένα συγκριτικό πλεονέκτημα έναντι των υπολοίπων ενσύρματων και ασύρματων τεχνολογιών. Οι παράγοντες αυτοί είναι καίριας σημασίας στην εξασφάλιση της μαζικής παραγωγής και αποδοχής συσκευών τελικού χρήστη αλλά και της υποδομής του συστήματος.

2.2.2.1 Υψηλές επιδόσεις

Το WiMAX ανταποκρίνεται σε όλες τις απαιτήσεις που θέτει το κινητό Internet. Υποστηρίζει πολλαπλούς μηχανισμούς μεταπομπών (hard-soft handoffs), μηχανισμούς εξοικονόμησης ισχύος για τα κινητά τερματικά, προχωρημένες τεχνικές εξασφάλισης ποιότητας υπηρεσίας (QoS) και χαμηλής καθυστέρησης για την υποστήριξη εφαρμογών πραγματικού χρόνου καθώς και λειτουργίες Εξουσιοδότησης, Αυθεντικότητας και Χρέωσης (Authorization, Authentication, Accounting – AAA).

Οι υψηλές επιδόσεις του WiMAX είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με τη χρήση του OFDMA σχήματος πολλαπλής πρόσβασης, μια τεχνική πολύπλεξης χρηστών κατάλληλη για περιβάλλοντα πολυδιαδρομικής διάδοσης, που δίνει στους λειτουργούς των δικτύων υψηλότερη χωρητικότητα και διέλευση, ευελιξία στη διαχείριση των πόρων του συστήματος και βελτιωμένη κάλυψη σε εσωτερικούς χώρους.

Οι επιδόσεις του WiMAX αυξάνονται περαιτέρω από τη χρήση της αμφιδρόμησης χρόνου (TDD) αν και μπορεί να υποστηριχθεί και αμφιδρόμηση συχνότητας (FDD). Αν και η FDD κρατάει τις ζεύξεις ανόδου και καθόδου χωρισμένες σε διαφορετικές συχνότητες, η TDD είναι ένας λιγότερο περίπλοκος και πιο αποδοτικός μηχανισμός, που χρησιμοποιεί ένα συχνοτικό κανάλι, με την άνω και κάτω ζεύξη να χωρίζονται στο πεδίο του χρόνου από ένα (χρονικό) διάστημα φύλαξης. Επιπρόσθετα, στις υπηρεσίες IP, η χρήση ενός μόνο καναλιού για τις δύο ζεύξεις, καθιστά λιγότερο περίπλοκη και κοστοβόρα τη χρήση συστημάτων προσαρμοστικών κεραιών σε σχέση με τα CDMA συστήματα. Η χρήση προσαρμοστικών κεραιών αναμένεται να οδηγήσει σε σημαντική αύξηση της διέλευσης στα δίκτυα WiMAX με TDD αμφιδρόμηση.

2.2.2.2 Ευελιξία

Το WiMAX σχεδιάστηκε εξ' αρχής ως ένα all-IP δίκτυο, αποσκοπώντας στην εξυπηρέτηση εφαρμογών υψηλής διέλευσης πραγματικού χρόνου που δε δεσμεύεται από την προϋπάρχουσα υποδομή. Το WiMAX μπορεί να εφαρμοσθεί τόσο σε περιοχές όπου δεν προϋπάρχουν κάποια άλλα ασύρματα δίκτυα (greenfield), όπου οι λειτουργοί θα βασίζονται αποκλειστικά στο WiMAX, όσο και σε περιοχές όπου υπάρχει ήδη η υποδομή κάποιων άλλων δικτύων, όπου οι πάροχοι εμπεδώνουν το WiMAX στο δίκτυό τους με σκοπό να αυξήσουν τη χωρητικότητα και τη διέλευση, ώστε να προσφέρουν πραγματικά ευρυζωνικές ασύρματες υπηρεσίες.

Τα κυβελωτά δίκτυα που βασίζονται στο GSM, CDMA, WCDMA και EV-DO χρησιμοποιούν φασματικούς πόρους που είναι περιορισμένοι και, κατά κανόνα, υπερβολικά ακριβοί για την αποδοτική προσφορά ευρυζωνικών υπηρεσιών. Τα ευρυζωνικά δίκτυα mobile WiMAX θα προσφέρουν στους παρόχους ένα επικερδές μοντέλο για την προσφορά νέων υπηρεσιών προστιθέμενης αξίας, που θα οδηγήσουν σε επιπρόσθετη ροή εσόδων.

Η δυνατότητα παγκόσμιας περιαγωγής μεταξύ των παρόχων υπηρεσιών WiMAX θα επιτρέψει στους συνδρομητές να έχουν πρόσβαση σε διαφορετικά δίκτυα χρησιμοποιώντας την ίδια τερματική συσκευή και μία οικεία διεπαφή. Το WiMAX Forum εργάζεται για τη δημιουργία ενός πλαισίου που θα προωθήσει τη σύναψη συμφωνιών περιαγωγής μεταξύ των παρόχων υπηρεσιών.

Το φάσμα είναι ένας πόρος περιορισμένος. Τα δίκτυα WiMAX μπορούν να αναπτυχθούν σε διάφορες συχνοτικές μπάντες (2.3GHz, 2.5GHz, 3.3GHz, 3.4-3.8GHz), με εύρος ζώνης από 3.5MHz έως 10MHz. Ο πιστοποιημένος από το WiMAX Forum εξοπλισμός θα επεκταθεί σε επιπλέον συχνοτικές μπάντες, ανάλογα με τις ανάγκες των λειτουργιών παγκοσμίως.

2.2.2.3 Προχωρημένη αρχιτεκτονική βασισμένη στο IP

Το WiMAX είναι μια τεχνολογία επόμενης γενιάς που θα διευκολύνει τους λειτουργούς κυβελωτών δικτύων στη μετάβαση προς τα all-IP δίκτυα. Τα κυβελωτά δίκτυα επίσης κινούνται προς ένα IP πυρήνα αλλά αυτή η προσπάθεια βρίσκεται στα πρωταρχικά της στάδια και αναμένεται να ολοκληρωθεί το 2010. Το WiMAX υποστηρίζει πλήρως το IMS, μια νέα αρχιτεκτονική που θα επιτρέψει στους παρόχους να εισάγουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών φωνής και δεδομένων γρήγορα και σε χαμηλό κόστος.

Ο IP πυρήνας στη βάση του WiMAX θα απλουστεύσει τη διασυνεργασία με άλλες IP τεχνολογίες. Για να εξασφαλιστεί η ολοκλήρωση με άλλα δίκτυα, το WiMAX Forum συνεργάζεται με ποικίλους οργανισμούς (IEEE, ETSI κλπ) ώστε να διευκολυνθούν η διασυνεργασία, η περιαγωγή αλλά και η χρήση της αυτής υποδομής με τις υπάρχουσες αλλά και μελλοντικές κυβελωτές και ενσύρματες τεχνολογίες.

2.2.2.4 Ελκυστική οικονομία

Το WiMAX μπορεί να ανταποκριθεί στην αυξανόμενη ζήτηση της μαζικής αγοράς για αποδοτικές από πλευρά κόστους, υψηλής ταχύτητας ασύρματες ευρυζωνικές υπηρεσίες. Το επιχειρηματικό πλαίσιο για το WiMAX είναι ελκυστικό καθώς το κόστος του εξοπλισμού διατηρείται χαμηλό, εξαιτίας της διαλειτουργικότητας του εξοπλισμού που προσφέρει ένα ανοικτό πρότυπο, της μαζικής αποδοχής των συνδρομητικών τερματικών, της ευέλικτης δομής πνευματικών δικαιωμάτων και τέλος της υψηλής χωρητικότητας των σταθμών βάσης.

Ο εξοπλισμός του mobile WiMAX βασίζεται στα πρότυπα IEEE 802.16e-2005 και ETSI HiperMAN 1.3.2 και είναι πιστοποιημένος από το WiMAX Forum ώστε να εξασφαλίζεται η

διαλειτουργικότητα με τον λοιπό εξοπλισμό στην ίδια ζώνη συχνοτήτων. Το κόστος του εξοπλισμού που βασίζεται σε ανοικτά πρότυπα τείνει να μειώνεται γρήγορα με την αύξηση του όγκου της παραγωγής αλλά και την είσοδο στην αγορά κατασκευαστών μεγάλου όγκου και χαμηλού κόστους. Η ολοκλήρωση των Wi-Fi και WiMAX σε ένα μόνο chipset και η δέσμευση των κατασκευαστών συσκευών ότι θα ενσωματώσουν μια διεπαφή WiMAX στα νέα τους προϊόντα αναμένεται να συνεισφέρουν σε μία ακόμα μεγαλύτερη μείωση του κόστους των τερματικών συσκευών. Η ευρεία εφαρμογή των WiMAX και Wi-Fi σε φορητούς υπολογιστές αναμένεται το 2008.

Μια ελκυστική δομή πνευματικών δικαιωμάτων είναι ένα ακόμα πλεονέκτημα του WiMAX σε σύγκριση με τις 3G τεχνολογίες. Ένα λιγότερο απαιτητικό IPR μοντέλου θα οδηγούσε σε μία σημαντική μείωση των τιμών του εξοπλισμού και δίκαιη μεταχείριση μεταξύ των παρόχων, γεγονός που σαν αποτέλεσμα θα έχει την αύξηση του ανταγωνισμού στην αγορά. Το WiMAX Forum αναζητά λύσεις για να παράσχει ένα δίκαιο πλαίσιο που θα ωφελεί τόσο τους κατόχους των πνευματικών δικαιωμάτων όσο και τους κατασκευαστές.

Από την πλευρά του δικτύου, το ανοικτό πρότυπο, η διαλειτουργικότητα και οι χαμηλότερες απαιτήσεις για πνευματικά δικαιώματα ευθύνονται μόνο για ένα μέρος από τον περιορισμό του κόστους. Ενώ το κόστος εγκατάστασης και η πυκνότητα των σταθμών βάσης είναι παραπλήσια για 3G και WiMAX, η χωρητικότητα που προσφέρει ένα σταθμός βάσης WiMAX είναι σαφώς μεγαλύτερη εξαιτίας τόσο της χρήσης της OFDMA σε ευρύτερα κανάλια όσο και της χρήσης συστημάτων προσαρμοστικών κεραιών [10][11].

2.2.3 Who is who στον κόσμο του WiMAX

2.2.3.1 WiMAX Forum™ - Η σκοπιά των επιχειρήσεων

Ξεκινώντας κάποιος την αναζήτηση πληροφοριών που αφορούν την έννοια WiMAX, πρώτος σταθμός του θα είναι αναμφίβολα το WiMAX Forum [12]. Το WiMAX Forum είναι μια προσανατολισμένη προς τη βιομηχανία, μη κερδοσκοπική εταιρία που συστάθηκε για να προωθήσει και να πιστοποιήσει τη συμβατότητα και τη διαλειτουργικότητα των προϊόντων ευρυζωνικής ασύρματης πρόσβασης (BWA) που χρησιμοποιούν τις IEEE 802.16 και ETSI HiperMAN ασύρματες προδιαγραφές μητροπολιτικών δικτύων. Στόχος του Forum είναι να επιταχύνει την εισαγωγή των συστημάτων αυτών στην αγορά. Τα προϊόντα WiMAX Forum Certified™ (Εικόνα 2.3) θα είναι πλήρως διαλειτουργικά και αναμένεται να υποστηρίζουν ευρυζωνικές εφαρμογές τόσο σταθερές όσο και κινητές.



Εικόνα 2.3: Λογότυπο των εγκεκριμένων προϊόντων του WiMAX Forum

Μέσω των προσπαθειών που πραγματοποιούνται από το Forum, προωθείται η ανάπτυξη οικονομικών κλίμακας, η οποία καθίσταται δυνατή εξαιτίας αφενός μεν της διαλειτουργικότητας των προϊόντων που αφορούν το WiMAX αφετέρου δε λόγω του ότι τα προϊόντα αυτά βασίζονται σε ένα ανοικτό πρότυπο. Αναμένεται έτσι ότι οι πάροχοι υπηρεσιών BWA θα είναι σε θέση να προσφέρουν ευρυζωνικές υπηρεσίες δεδομένων, φωνής και πολυμέσων σε ένα λογικό επίπεδο οικονομικής επιβάρυνσης τόσο σε οικιακούς όσο και σε επιχειρησιακούς καταναλωτές.

Τα προϊόντα που πιστοποιούνται από το WiMAX Forum αναμένεται να είναι σε θέση να προσφέρουν σταθερή, νομαδική, φορητή και τελικά κινητή συνδεσιμότητα χωρίς την ανάγκη μια ασύρματης ζεύξης οπτικής επαφής (LOS) με ένα σταθμό βάσης του δικτύου. Σε μια χαρακτηριστική περίπτωση ακτίνας κυψέλης τριών έως δέκα χιλιομέτρων, ένα σύστημα WiMAX αναμένεται να μπορεί να αποδώσει μέχρι 40 Mbps ανά κανάλι, για τις σταθερές και φορητές εφαρμογές πρόσβασης, αρκετό εύρος για να υποστηρίξει ταυτόχρονα εκατοντάδες επιχειρήσεων με συνδέσεις τύπου T1 και χιλιάδες οικιακούς χρήστες με συνδέσεις τύπου DSL.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένα, το WiMAX Forum είναι μια εταιρία προερχόμενη από τη βιομηχανία. Έχει ιδιαίτερη σημασία στο σημείο αυτό να αναφέρουμε ότι αυτή τη στιγμή αριθμεί περισσότερα από 400 μέλη – επιχειρήσεις. Στα μέλη αυτά περιλαμβάνονται κάποιοι από τους κορυφαίους κατασκευαστές εξοπλισμού, είτε του δικτύου είτε του τερματικού εξοπλισμού των χρηστών, (Agilent Technologies, Intel, IBM κλπ), πάροχοι τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών (AT&T, TIM, KDDI κλπ) καθώς και επιχειρήσεις που ασχολούνται με την ολοκλήρωση συστημάτων. Να σημειωθεί ότι στα μέλη του WiMAX Forum συγκαταλέγονται και δύο εταιρίες που δραστηριοποιούνται κύρια στην Ελλάδα, η Intracom και η Cosmotelco.



Εικόνα 2.4: Διεθνείς φορείς που έχουν ανακοινώσει δοκιμές WiMAX

2.2.3.2 IEEE & ETSI – Η σκοπιά των προτύπων

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το WiMAX βασίζεται στα πρότυπα που προέρχονται από δύο διαφορετικούς οργανισμούς, τα πρότυπα που προέκυψαν από την Ομάδα Εργασίας IEEE 802.16 (802.16-2004, 802.16e-2005) και εκείνα που προέκυψαν από την εργασία της Τεχνικής Επιτροπής BRAN (Broadband Radio Access Networks) του ETSI (HiperMAN 1.3.2).

Η IEEE [13] (Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.) είναι ένας μη κερδοσκοπικός οργανισμός, ένας από τους κορυφαίους επαγγελματικούς συνδέσμους για την ανάπτυξη της τεχνολογίας. Η IEEE είναι μία από τις κυριότερες πηγές ανάπτυξης προτύπων που υποστηρίζουν πολλές από τις σημερινές τεχνολογίες. Τα πρότυπα αναπτύσσονται πάνω σε ένα σκεπτικό σύγκλισης σε μια ανοικτή διαδικασία βασισμένη στην κατάθεση απόψεων από όλα τα ενδιαφερόμενα μέρη. Με σχεδόν 1.300 πρότυπα είτε ολοκληρωμένα είτε υπό ανάπτυξη, είναι μια κεντρική πηγή τυποποίησης τόσο σε παραδοσιακούς όσο και σε αναδυόμενους τομείς, ιδιαίτερα στις περιοχές των τηλεπικοινωνιών, της πληροφορικής και της ηλεκτρικής ενέργειας.

Το Ευρωπαϊκό Ίδρυμα Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων [14] (ETSI - European Telecommunications Standards Institute) είναι ανεξάρτητη, μη κερδοσκοπική οργάνωση, αποστολή της οποίας είναι να παραχθούν τα πρότυπα των τηλεπικοινωνιών του σήμερα αλλά και του αύριο. Το ETSI είναι επίσημα αρμόδιο για την τυποποίηση των τεχνολογιών πληροφορικής και επικοινωνιών (ICT) μέσα στην Ευρώπη, διαδραματίζοντας έτσι έναν σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη ενός ευρέος φάσματος προτύπων ως συμβολή της Ευρώπης στην παγκόσμια τυποποίηση ICT. Ο πρωταρχικός στόχος του ETSI είναι να υποστηρίξει την παγκόσμια εναρμόνιση με την παροχή ενός φόρουμ στο οποίο όλοι οι βασικοί φορείς μπορούν να συμβάλουν ενεργά. Τα μέλη του ETSI καθορίζουν το πρόγραμμα εργασίας του

ιδρύματος, διαθέτουν τους πόρους και εγκρίνουν τα προϊόντα του. Κατά συνέπεια, οι δραστηριότητες του ETSI ευθυγραμμίζονται πολύ με τις ανάγκες αγοράς και υπάρχει ευρεία αποδοχή των προϊόντων του.

Κεφάλαιο 3ο

Το Ασύρματο Κανάλι Διάδοσης

OFDM – OFDMA

Το ασύρματο κανάλι επικοινωνίας, εξαιτίας της τυχαιότητας που το χαρακτηρίζει, απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή και πρόνοια κατά τη χρήση του για τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές. Κύρια αιτία της μη ντετερμινιστικής συμπεριφοράς του ασύρματου καναλιού είναι ότι το διαδιδόμενο ηλεκτρομαγνητικό σήμα υφίσταται μια ποικιλία φυσικών φαινομένων, όπως είναι η ανάκλαση, η περίθλαση και η σκέδαση. Τα φαινόμενα αυτά εξαρτώνται από το περιβάλλον το οποίο διέρχεται η ασύρματη ζεύξη, η συμπεριφορά του οποίου είναι εν γένει στοχαστική και μεταβάλλεται κατά τρόπο τυχαίο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το λαμβανόμενο σήμα να διαφέρει σημαντικά από το αρχικό σήμα που εξεπέμφθη [15]. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια εκτενής παρουσίαση του ασύρματου μέσου διάδοσης, με φαινόμενα που αφορούν κύρια τις συχνοτικές ζώνες κάτω των 11GHz, και ακολουθεί μια παρουσίαση της OFDM τεχνικής πολύπλεξης και της αντίστοιχης OFDMA τεχνικής πολλαπλής πρόσβασης, από τις πλέον κατάλληλες και εύρωστες τεχνικές διάδοσης για κανάλια πολύοδης διάδοσης, όπως συμβαίνει στην περιοχή συχνοτήτων που εξετάζουμε.

3.1 Διάδοση στο ασύρματο κανάλι επικοινωνίας

Κατά τη διάδοση στο ασύρματο κανάλι επικοινωνίας, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το σήμα που εκπέμπεται από τον πομπό φτάνει τελικά στο δέκτη, έχοντας υποστεί μεταβολές οι οποίες οφείλονται σε τέσσερα βασικά και ανεξάρτητα μεταξύ τους φυσικά φαινόμενα

- Εξασθένιση – απώλειες διαδρομής (path loss)
- Σκίαση (shadowing)
- Πολύοδη διάδοση (multipath)
- Παρεμβολές (interference)

3.1.1 Απώλειες Διαδρομής (path loss) - Μοντέλα διάδοσης (propagation models)

Πολλά μοντέλα διάδοσης έχουν προταθεί κατά καιρούς αλλά και χρησιμοποιούνται στις τηλεπικοινωνίες. Εδώ παρουσιάζονται δύο από τα συνηθέστερα απαντώμενα, το εκθετικό μοντέλο και το επεκταμένο μοντέλο Okumura – Hata.

3.1.1.1 Εκθετικό Μοντέλο Διάδοσης

Ένα από τα απλούστερα αλλά και ευρύτατα χρησιμοποιούμενα μοντέλα διάδοσης είναι το λεγόμενο εκθετικό μοντέλο. Στο μοντέλο αυτό, θεωρούμε ότι η ισχύς του σήματος μειώνεται ανάλογα του d^n , όπου d η απόσταση από το σταθμό βάσης και n ο συντελεστής απωλειών διαδρομής (path loss exponent) ή συντελεστής εξασθένισης [1]. Έτσι, οι απώλειες διαδρομής (σε dB) δίδονται από τη σχέση

$$PL(d) = PL(d_0) + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right)$$

όπου d_0 μία απόσταση αναφοράς έως την οποία θεωρούμε ότι έχουμε διάδοση ελευθέρου χώρου και ως εκ τούτου οι απώλειες διαδρομής δίδονται από τη σχέση

$$PL(d_0) = 10 \log_{10} \left(\frac{4\pi d_0}{\lambda} \right)^2 = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d_0}{\lambda} \right)$$

όπου λ το μήκος κύματος λειτουργίας της ζεύξης, το οποίο δίδεται από τη σχέση

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

όπου c η ταχύτητα διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος στο μέσο διάδοσης (για την περίπτωση του αέρα $c \approx 3 \cdot 10^8$ m/s) και f η συχνότητα λειτουργίας της ζεύξης.

Θα πρέπει να σημειωθεί στο σημείο αυτό ότι η απόσταση αναφοράς d_0 δε θα πρέπει να βρίσκεται στο κοντινό πεδίο της κεραιάς εκπομπής [5][16] ώστε να ισχύει η σχέση για τις απώλειες διαδρομής ελευθέρου χώρου. Επίσης, ορισμένες χαρακτηριστικές τιμές του εκθέτη απωλειών διαδρομής n είναι $n=2$ όταν έχουμε διάδοση ελευθέρου χώρου, $n=4$ όταν έχουμε διάδοση πάνω από τέλεια αγωγίμο επίπεδο ενώ ανάλογα με το περιβάλλον που έχουμε και τις διαστάσεις των κυβελών κυμαίνεται από 2

έως 4 για τυπικές αστικές περιοχές με μακροκυψέλες και από 1.6 έως 8 για μικροκυψελωτό περιβάλλον. Ο συντελεστής εξασθένισης n προκύπτει εμπειρικά από λαμβανόμενες μετρήσεις στο εξεταζόμενο περιβάλλον (συνήθως ακολουθείται MMSE μέθοδος για προσαρμογή της καμπύλης στον μετρήσεων στο εκθετικό μοντέλο και κατόπιν εξάγονται οι τιμές του συντελεστή εξασθένισης αλλά και της σκίασης [5], στην οποία θα αναφερθούμε παρακάτω) [17].

3.1.1.2 COST-Hata-Model ή Extended Okumura-Hata Model

Η ομάδα εργασίας COST 231 επέκτεινε το μοντέλο Okumura-Hata⁵, το οποίο αναφέρονταν στο συχνοτικό εύρος 150MHz έως 1000MHz, για τη ζώνη συχνοτήτων 1500MHz έως 2000GHz, μελετώντας τις καμπύλες διάδοσης του Okumura στην άνω περιοχή συχνοτήτων. Το αποτέλεσμα καλείται επεκταμένο μοντέλο Okumura-Hata [18][19] και δίδεται από τις σχέσεις που ακολουθούν

$$PL(d) = 46.3 + 33.9 \log_{10}(f) - 13.82 \log_{10}(h_{BS}) - a(h_{SS}) + (44.9 - 6.55 \log_{10}(h_{BS})) \log_{10}(d) + C_m$$

όπου

$$a(h_{MS}) = (1.1 \log_{10}(f) - 0.7) h_{SS} - (1.56 \log_{10}(f) - 0.8)$$

και

$$C_m = \begin{cases} 0 \text{ dB} & \text{για πόλη μεσαίου μεγέθους και ημιαστικά κέντρα με μέτρια πυκνότητα δέντρων} \\ 3 \text{ dB} & \text{για μητροπολιτικά κέντρα} \end{cases}$$

Στην παραπάνω σχέση

f : Η συχνότητα λειτουργίας της ζεύξης σε MHz – 1500 – 2000 MHz

h_{BS} : Το ύψος του σταθμού βάσης σε m – 30 – 200m

h_{SS} : Το ύψος του σταθμού χρήστη σε m – 1 – 10m

d : Η απόσταση κινητού τερματικού – σταθμού βάσης σε km – 1 – 20km

Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκε ως μοντέλο διάδοσης το επεκταμένο μοντέλο Okumura-Hata θεωρώντας ως περιβάλλον διάδοσης μια πόλη μεσαίου μεγέθους ($C_m = 0\text{dB}$).

3.1.2 Σκίαση (shadowing)

Όπως προκύπτει από τα μοντέλα διάδοσης που παρουσιάστηκαν προηγουμένως, οι απώλειες διαδρομής φαίνεται κατ' ουσία να εξαρτώνται κύρια από την απόσταση πομπού και δέκτη. Δε λαμβάνει δηλαδή υπόψη το μοντέλο διάδοσης τη μεταβλητότητα και στοχαστική συμπεριφορά του περιβάλλοντος μέσα από το οποίο διέρχεται η ασύρματη ζεύξη.

Τη στοχαστική αυτή συμπεριφορά έρχεται να περιγράψει μια τυχαία μεταβλητή, η σκίαση. Η σκίαση μπορεί να μοντελοποιηθεί ως μία γκαουσιανή τυχαία μεταβλητή X_{shadow} (dB), μηδενικής μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης σ_{shadow} (dB), η οποία προστίθεται στις απώλειες διαδρομής. Έτσι, τελικά, οι απώλειες διάδοσης $L_p(d)$ προκύπτουν να είναι μια γκαουσιανή τυχαία μεταβλητή, μέσης τιμής ίσης με

5 Το μοντέλο Okumura-Hata αποτελεί ένα αναλυτικό ημιντετερμινιστικό μοντέλο, το οποίο προέκυψε ως εργασία του Hata από μελέτη και προσαρμογή των πειραματικών καμπυλών διάδοσης του Okumura [17].

τις απώλειες διαδρομής $PL(d)$, ανεξαρτήτως του μοντέλου διάδοσης που θα χρησιμοποιηθεί, και τυπικής απόκλισης σ_{shadow} . Κοντολογίς ισχύουν οι σχέσεις (όλα τα μεγέθη είναι σε dB),

$$L_p(d) = PL(d) + X_{shadow}$$

όπου

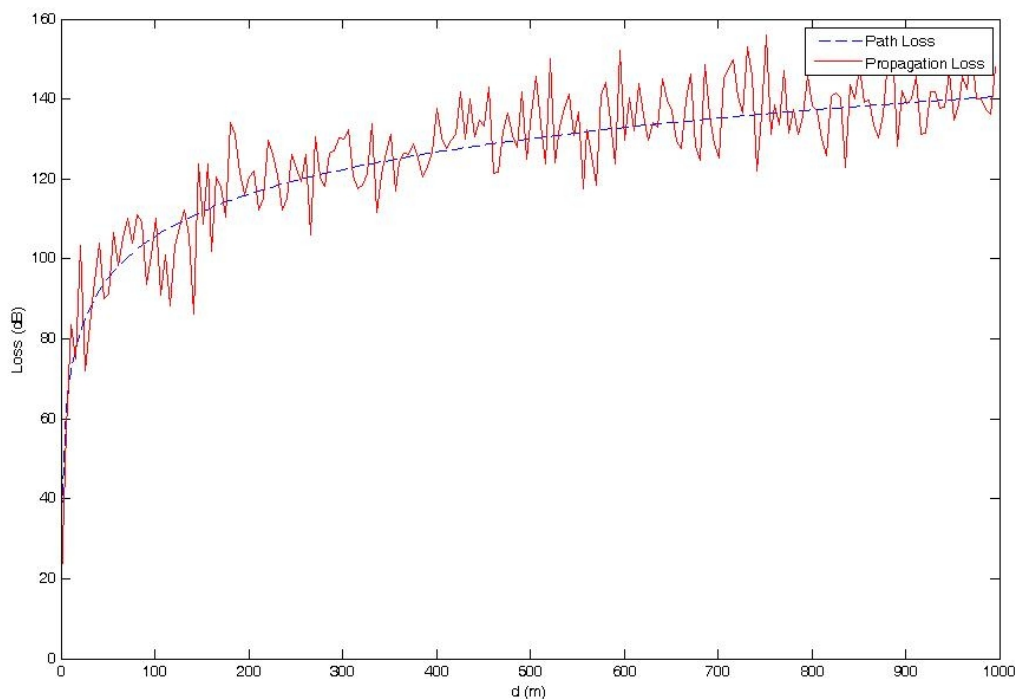
$$PDF(X_{shadow}) = \frac{1}{\sigma_{shadow} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{X_{shadow}^2}{2\sigma_{shadow}^2}}$$

και

$$PDF(L_p(d)) = \frac{1}{\sigma_{shadow} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(L_p(d) - PL(d))^2}{2\sigma_{shadow}^2}}$$

[15].

Στην εικόνα που ακολουθεί (Εικόνα 3.1) δίνεται μια απεικόνιση των απωλειών διάδοσης. Για την εξαγωγή αυτής Χρησιμοποιήθηκε μοντέλο διάδοσης extended Okumura-Hata με παραμέτρους $f=2.5\text{GHz}$, $h_{BS}=32\text{m}$, $h_{SS}=1.5\text{m}$, $d=1-1000\text{m}$ και θεωρήθηκε σκίαση τυπικής απόκλισης $\sigma_{shadow}=8\text{dB}$.



Εικόνα 3.1: Διαγραμματική Απεικόνιση των απωλειών διάδοσης.

3.1.3 Πολύοδη Διάδοση (multipath) – Φαινόμενο Doppler

Το πολυδιαδρομικό κανάλι μπορεί να μοντελοποιηθεί ως ένα χρονικά μεταβαλλόμενο γραμμικό φίλτρο, το οποίο περιγράφεται από την ακόλουθη μιγαδική κρουστική απόκριση βασικής ζώνης

$$h(\tau; t) = \sum_{p=1}^P \beta_p(t) e^{j\Theta_p(t)} \delta(t - \tau_p(t))$$

όπου

t : ο χρόνος παρατήρησης

τ : η καθυστέρηση

P : το πλήθος των πολυδιαδρομικών συνιστωσών

$\beta_p(t)$: Το πλάτος της p -ιστής πολυδιαδρομικής συνιστώσας

$\Theta_p(t)$: Η αντίστοιχη φάση της

$\tau_p(t)$: Η αντίστοιχη καθυστέρηση

Υποθέτοντας ότι η κρουστική απόκριση του διαύλου είναι χρονικά ανεξάρτητη, τότε μπορεί να γραφεί ως

$$h(t) = \sum_{p=1}^P \beta_p e^{j\Theta_p} \delta(t - \tau_p)$$

Το λαμβανόμενο ισοδύναμο βαθυπερατό σήμα είναι ένα άθροισμα των πολλαπλών αντιγράφων του εκπεμπόμενου σήματος και γράφεται ως

$$y(t) = x(t) * h(t) = \sum_{p=1}^P \beta_p(t) e^{-j2\pi f_c \tau_p(t)} x(t - \tau_p(t))$$

όπου

$$x(t) = \Re \{ s(t) e^{j2\pi f_c t} \}$$

είναι το εκπεμπόμενο σήμα με $s(t)$ το βαθυπερατό του ισοδύναμο.

Ένα συχνά χρησιμοποιούμενο μέτρο για τη χρονική διασπορά ενός καναλιού είναι η ενεργός εξάπλωση καθυστέρησης (rms delay spread), τ_{rms} . Το μέγεθος αυτό ορίζεται ως η τετραγωνική ρίζα της δεύτερης κεντρικής ροπής [20] του προφίλ καθυστέρησης ισχύος,

$$\tau_{rms} = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} (t - \tau_m)^2 \frac{PDP(t)}{\bar{G}_c} dt}$$

όπου τ_m η μέση καθυστέρηση χρόνου, η οποία ορίζεται ως

$$\tau_m = \int_{-\infty}^{\infty} t \frac{PDP(t)}{\bar{G}_c} dt$$

\bar{G}_c είναι το μέσο κέρδος ισχύος του καναλιού

$$\bar{G}_c = \int_{-\infty}^{\infty} PDP(t) dt = \sum_{p=1}^P \beta_p^2$$

και τέλος το προφίλ καθυστέρησης ισχύος $PDP(t)$ ορίζεται ως

$$PDP(t) = \sum_{p=1}^P \beta_p^2 \delta(t - \tau_p)$$

Τα κανάλια που εμφανίζουν χρονική διασπορά μπορεί να συχνά να θεωρηθούν επιλεκτικά ως προς τη συχνότητα (frequency-selective). Αυτό συμβαίνει καθώς ένα σήμα, την ίδια χρονική στιγμή, μπορεί να εξασθενεί σε μια συχνότητα, όχι όμως απαραίτητα και σε κάποια άλλη. Για να μοντελοποιηθεί

αυτή η επιλεκτική ως προς τη συχνότητα συμπεριφορά του διαύλου, υπολογίζουμε την απόκριση του καναλιού στο πεδίο της συχνότητας (συνάρτηση μεταφοράς του φίλτρου), $H(f)$, λαμβάνοντας το μετασχηματισμό Fourier της κρουστικής απόκρισης $h(t)$.

$$H(f) = F\{h(t)\} = \sum_{p=1}^P \beta_p e^{-j(2\pi f t_p - \theta_p)}$$

Το μέτρο που χαρακτηρίζει τη συχνοτική εκλεκτικότητα του διαύλου είναι το εύρος ζώνης συνοχής, το οποίο ορίζεται ως

$$B_{coh} = \frac{1}{\xi \tau_{rms}}$$

όπου ξ μια σταθερά ($\xi=2\pi$ για την περίπτωση του εκθετικού προφίλ καθυστέρησης ισχύος). Αν το εύρος ζώνης συνοχής οριστεί ως το εύρος ζώνης συχνοτήτων μέσα στο οποίο η συνάρτηση συσχέτισης των περιβαλλουσών δύο σημάτων με συχνότητες f_1 και f_2 αντίστοιχα είναι πάνω από 0.9, τότε θα πρέπει $\xi=50$. Αν ο ορισμός δεν είναι τόσο αυστηρός και η συνάρτηση συσχέτισης στο πεδίο της συχνότητας θεωρείται ότι έχει τιμή μεγαλύτερη από 0.5, τότε θα πρέπει $\xi=5$ [1].

Το εύρος ζώνης συνοχής είναι το εύρος ζώνης εκείνο εντός του οποίου οι διαφορετικές συχνότητες υφίστανται την ίδια εξασθένιση. Με άλλα λόγια, είναι το εύρος ζώνης εντός του οποίου το κανάλι μπορεί να θεωρηθεί σταθερό. Αν το εύρος ζώνης του μεταδιδόμενου σήματος είναι μεγαλύτερο από το εύρος ζώνης συνοχής, τότε το κανάλι αναφέρεται ως επιλεκτικό ως προς τη συχνότητα (frequency selective). Διαφορετικά το κανάλι καλείται μη επιλεκτικό ως προς τη συχνότητα (frequency non-selective) ή επίπεδο (flat).

Το πλάτος του λαμβανόμενου πολυδιαδρομικού σήματος συχνά περιγράφεται χρησιμοποιώντας τις κατανομές Rice και Rayleigh. Όταν στο λαμβανόμενο σήμα υπάρχει μία ισχυρή συνιστώσα οπτικής επαφής (LOS), τότε το κανάλι μπορεί να μοντελοποιηθεί χρησιμοποιώντας την κατανομή Rice, με τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του πλάτους του λαμβανόμενου σήματος να δίνεται από τη σχέση

$$PDF_{Rice}(y_i) = \frac{y_i}{\sigma_s^2} e^{-\frac{y_i^2 + A^2}{2\sigma_s^2}} I_0\left(\frac{y_i A}{\sigma_s^2}\right)$$

όπου A το πλάτος της κυρίαρχης συνιστώσας οπτικής επαφής, σ_s^2 η μέση σκεδαζόμενη ισχύς στις ανακλώμενες διαδρομές και $I_0()$ η μηδενικής τάξης πρώτου είδους συνάρτηση Bessel και $y_i \geq 0$ [21]. Η παράμετρος που περιγράφει την κυρίαρχη συνιστώσα οπτικής επαφής είναι γνωστή σαν K -συντελεστής Rice και μπορεί να εκφραστεί ως,

$$K_{factor} = \frac{P_{dominant}}{P_{reflected}} = \frac{A^2}{2\sigma_s^2} = \frac{\beta_1^2}{\sum_{p=2}^P \beta_p^2}$$

όπου $P_{dominant}$ η ισχύς της κυρίαρχης συνιστώσας $p=1$ και $P_{reflected}$ η συνολικά σκεδαζόμενη ισχύς.

Όταν στο λαμβανόμενο σήμα δεν υπάρχει κάποια συνιστώσα οπτικής επαφής (NLOS), οπότε $A=0$ και συνεπώς $K_{\text{factor}}=0$, τότε η κατανομή Rice απλοποιείται στην κατανομή Rayleigh. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του πλάτους του λαμβανόμενου σήματος δίδεται από τη σχέση

$$PDF_{\text{Rayleigh}}(y_i) = \frac{y_i}{\sigma_s^2} e^{-\frac{y_i^2}{2\sigma_s^2}}$$

Μία δεύτερη αιτία για την πρόκληση διαλείψεων μικρής κλίμακας είναι η κίνηση δέκτη ή/και πομπού, η οποία προκαλεί διαλείψεις επιλεκτικές ως προς το χρόνο. Αυτό θα μπορούσε να θεωρηθεί ως διασπορά του σήματος στο πεδίο της συχνότητας, γνωστή ως διασπορά Doppler ή μετατόπιση Doppler. Η συχνότητα Doppler είναι η συχνότητα που αντιλαμβάνεται ο δέκτης όταν πομπός και δέκτης βρίσκονται σε σχετική κίνηση μεταξύ τους και ορίζεται ως

$$f_d = \frac{u}{\lambda}$$

όπου u η σχετική ταχύτητα και λ το μήκος κύματος του σήματος. Το μέτρο για την χρονική εκλεκτικότητα του καναλιού είναι ο χρόνος συνοχής ο οποίος δίδεται από τη σχέση

$$T_{\text{coh}} \approx \frac{1}{f_d}$$

Αν ο χρόνος συνοχής θεωρηθεί ως το χρονικό διάστημα κατά τη διάρκεια του οποίου η συνάρτηση χρονικής συσχέτισης έχει τιμή μεγαλύτερη από 0.5, τότε δίνεται προσεγγιστικά από τη σχέση

$$T_{\text{coh}} \approx \frac{9}{16\pi f_d^2}$$

Ένας δημοφιλής εμπειρικός νόμος στις σύγχρονες ψηφιακές επικοινωνίες είναι να ορίζει κάποιος το χρόνο συνοχής ως το γεωμετρικό μέσο των δύο παραπάνω προσεγγίσεων. Δηλαδή,

$$T_{\text{coh}} = \sqrt{\frac{9}{16\pi f_d^2}} = \frac{0.423}{f_d}$$

[1].

Ο χρόνος συνοχής είναι ο χρόνος εκείνος κατά τον οποίο η απόκριση του καναλιού μπορεί να θεωρηθεί αμετάβλητη.

3.1.4 Παρεμβολές (Interference)

3.1.4.1 Θόρυβος

Η ανάλυση θορύβου στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα συνήθως βασίζεται σε μια ιδανική μορφή θορύβου που καλείται προσθετικός λευκός γκαουσιανός (AWGN), η φασματική πυκνότητα ισχύος του οποίου είναι ανεξάρτητη από τη συχνότητα λειτουργίας της τηλεπικοινωνιακής ζεύξης και δίδεται από τη σχέση,

$$S_{AWGN}(f) = N_0, \quad 0 \leq f < \infty$$

όπου

$$N_0 = kT_e$$

όπου

$k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$: Η σταθερά του Boltzman

T_e : Η ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου του δέκτη

Αν ο συντελεστής θορύβου (Noise Figure) του δέκτη είναι F , τότε,

$$T_e = (F - 1) T_0$$

όπου

$$T_0 = 290 \text{ K}$$

Έτσι, αν το εύρος ζώνης του χρησιμοποιούμενου καναλιού είναι B , η ισχύς του θορύβου θα είναι τελικά,

$$N = kT_e B = (F - 1) kT_0 B$$

[21][22].

3.1.4.2 Ομοδιαυλική Παρεμβολή

Κυριότερη στενωπός για τη χωρητικότητα των ασύρματων συστημάτων επικοινωνιών, είναι η ομοδιαυλική παρεμβολή. Στην περιοχή κάλυψης ενός συστήματος κινητών επικοινωνιών, για να επιτευχθεί καλύτερη εκμετάλλευση του (περιορισμένου πάντα) φάσματος που διατίθεται, επαναχρησιμοποιούνται δίαυλοι της ίδιας συχνότητας σε διάφορες μη γειτονικές μεταξύ τους περιοχές. Αυτή η επαναχρησιμοποίηση διαύλων (συχνοτήτων) έχει ως αποτέλεσμα να υπάρχουν πολλές κυψέλες στην περιοχή εξυπηρέτησης του συστήματος, οι οποίες χρησιμοποιούν την ίδια ομάδα συχνοτήτων. Οι κυψέλες αυτές ονομάζονται ομοδιαυλικές κυψέλες. Η παρεμβολή μεταξύ σημάτων που προέρχονται από τέτοιες κυψέλες ονομάζεται ομοδιαυλική παρεμβολή και είναι η αμοιβαία παρεμβολή διαύλων της ίδιας συχνότητας, οι οποίοι λειτουργούν σε διαφορετικές θέσεις στην περιοχή κάλυψης του συστήματος. Σε αντίθεση με το θερμικό θόρυβο, ο οποίος είναι πάντοτε παρών στο ασύρματο κανάλι επικοινωνίας αλλά μπορεί να αντιμετωπισθεί με αύξηση της εκπεμπόμενης ισχύος, η ομοδιαυλική παρεμβολή δεν μπορεί να αντιμετωπισθεί με παρόμοια μέτρα, και αυτό διότι αύξηση της ισχύος σε μία κυψέλη συνεπάγεται αύξηση της παρεμβολής στις ομοδιαυλικές κυψέλες.

Έστω ότι ο εξεταζόμενος δέκτης λαμβάνει σήμα από k παρεμβάλλοντες ομοδιαυλικούς πομπούς ισχύος $I_k, k=1 \dots k$ ενώ το επιθυμητό σήμα το οποίο πρέπει να λάβει έχει ισχύ S . Η ισχύς εν προκειμένω λογίζεται όπως την αντιλαμβάνεται ο εν λόγω δέκτης. Η συνολική ομοδιαυλική παρεμβολή στην οποία υπόκειται ο δέκτης θα είναι

$$I = \sum_{k=1}^k I_k$$

ενώ ο λόγος σήματος προς παρεμβολή και θόρυβο τον οποίο εν τέλει αντιλαμβάνεται ο δέκτης θα είναι

$$SNIR = \frac{S}{N+I}$$

[1][5].

3.1.4.3 Παρεμβολές Γειτονικών Διαύλων

Οι παρεμβολές από γειτονικούς διαύλους προέρχονται από τη μερική επικάλυψη της φασματικής πυκνότητας ισχύος του επιθυμητού από ανεπιθύμητα (συνήθως γειτνιάζοντα στο φάσμα) σήματα. Η επικάλυψη οφείλεται στην ατελή υλοποίηση των φίλτρων του δέκτη, που επιτρέπουν τη διαρροή φασματικής πυκνότητας ισχύος στο εύρος συχνοτήτων του διαύλου. Το πρόβλημα γίνεται εντονότερο όταν ο χρήστης που χρησιμοποιεί γειτονικό δίαυλο βρίσκεται σε μικρή απόσταση από το δέκτη του χρήστη με τον επιθυμητό δίαυλο και η ισχύς της παρεμβολής είναι αυξημένη. Το φαινόμενο αυτό καλείται near-far (κοντινό προς μακρινό άκρο).

Οι παρεμβολές γειτονικών διαύλων περιορίζονται τόσο με τη χρήση ικανοποιητικού φίλτρου στο δέκτη όσο και με την προσεκτική απόδοση των συχνοτήτων στους σταθμούς βάσης. Συγκεκριμένα, όταν έχουμε συντελεστή επαναχρησιμοποίησης μεγαλύτερο της μονάδας, σε ένα BS μπορούν να αποδοθούν συχνότητες μη γειτονικές ώστε να διατηρήσουμε όσο μεγαλύτερη φασματική απόσταση γίνεται μεταξύ των διαύλων του σταθμού βάσης [1][5].

3.1.4.4 Διασυμβολική παρεμβολή

Η διασυμβολική παρεμβολή οφείλεται είτε σε σχετικά μεγάλη εξάπλωση της χρονοκαθυστερήσης σε μέσο που υποφέρει από πολύοδη διάδοση είτε σε σχετικά υψηλό ρυθμό ψηφιακής μετάδοσης. Σε μέσο με χρονική διασπορά, ο ρυθμός ψηφιακής μετάδοσης περιορίζεται από το φαινόμενο της εξάπλωσης καθυστέρησης [1].

Κλείνοντας την παρούσα ενότητα, αναφέρουμε επιγραμματικά ότι η ποιότητα του σήματος επηρεάζεται από φαινόμενα όπως η ενδοδιαμόρφωση, η οποία οφείλεται σε μη γραμμικές διαδικασίες η οποίες λαμβάνουν χώρα στο δέκτη (πχ διέλευση από ενισχυτή ισχύος ή περιοριστή), και η παρεμβολή λόγω ταυτόχρονης εκπομπής, όπου το επιθυμητό σήμα εκπέμπεται ταυτόχρονα από περισσότερους του ενός πομπούς ή αναμεταδότες [1].

3.2 Βασικές αρχές του OFDM

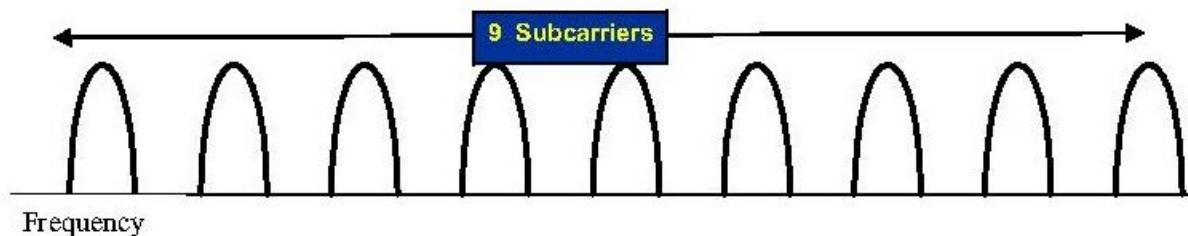
Στόχος της παρούσης παραγράφου είναι να δώσει το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο για την τεχνική μετάδοσης που καλείται OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex – Ορθογωνική πολυπλεξία με διαίρεση συχνότητας).

Η OFDM είναι ένα σχήμα παράλληλης μετάδοσης, όπου μία σειριακή ροή δεδομένων υψηλού ρυθμού χωρίζεται σε ένα σύνολο ροών μικρότερου ρυθμού, κάθε μία εκ των οποίων διαμορφώνεται σε ένα ξεχωριστό φέρον (SC – SubCarrier) χρησιμοποιώντας FDM (Frequency Division Multiplex – Πολυπλεξία με διαίρεση συχνότητας). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το εύρος ζώνης των SCs να είναι μικρό σε σχέση με το εύρος ζώνης συνοχής του διαύλου. Έτσι, κάθε SC υφίσταται επίπεδη εξασθένιση (flat-fading) γεγονός που επιτρέπει την εφαρμογή απλών μεθόδων εξίσωσης (equalization). Στο πεδίο του χρόνου, η χρονική διάρκεια συμβόλου των υπο-ροών στις οποίες χωρίζεται η αρχική ροή δεδομένων επιμηκύνεται σε σχέση με τη διασπορά καθυστέρησης του χρόνο-διασπαρτικού ραδιοδιαύλου [23].

Επιλέγοντας ένα ειδικό σύνολο από ορθογωνικές συχνότητες φερόντων, μπορεί να επιτευχθεί μεγάλη φασματική απόδοση, καθώς το φάσμα των φερόντων μπορεί να αλληλοεπικαλύπτεται ενώ η αμοιβαία επίδραση μεταξύ των φερόντων μπορεί να αποφευχθεί. Το αναλυτικό μοντέλο του συστήματος δείχνει ότι με την εισαγωγή ενός κυκλικού προθέματος (CP ή διάστημα φύλαξης, GI), η ορθογωνιότητα μπορεί να διατηρηθεί κατά τη διάδοση σε ένα διασπαρτικό κανάλι [24].

3.2.1 Ορθογωνιότητα

Η ορθογωνιότητα μεταξύ σημάτων ισχύει όταν αυτά είναι αμοιβαία ανεξάρτητα και εξασφαλίζει τη μετάδοση πολλαπλών σημάτων σε ένα κοινό κανάλι και την ανίχνευσή τους χωρίς παρεμβολές. Τυχόν απώλειά της οδηγεί σε ανεπιθύμητη μίξη των σημάτων και συνεπώς σε υποβιβασμό της ποιότητας του συστήματος, γεγονός που την καθιστά βασική επιδίωξη σε κάθε τεχνική μετάδοσης. Η TDM διατηρεί από τη φύση της την ορθογωνιότητα, αφού επιτρέπει σε κάθε χρονική σχισμή τη μετάδοση από μία μόνο πηγή πληροφορίας. Από την άλλη, οι FDM τεχνικές επιτυγχάνουν την ορθογωνιότητα με το να αφήνουν μεγάλα διαστήματα ασφαλείας μεταξύ των καναλιών (Εικόνα 3.2).

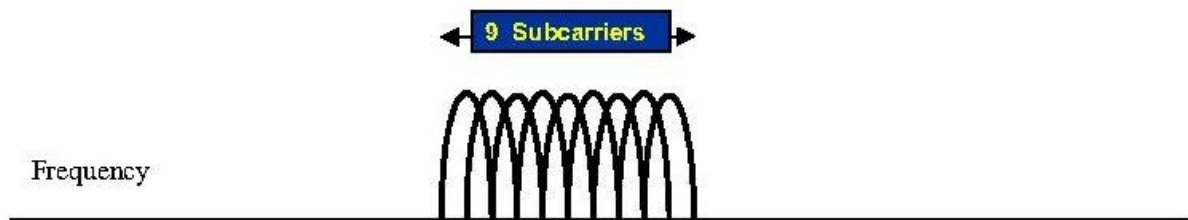


Εικόνα 3.2: FDM εννέα φερόντων

Η διαφοροποίηση του OFDM έγκειται στο ότι τα subcarriers κάθε σήματος τοποθετούνται έχοντας

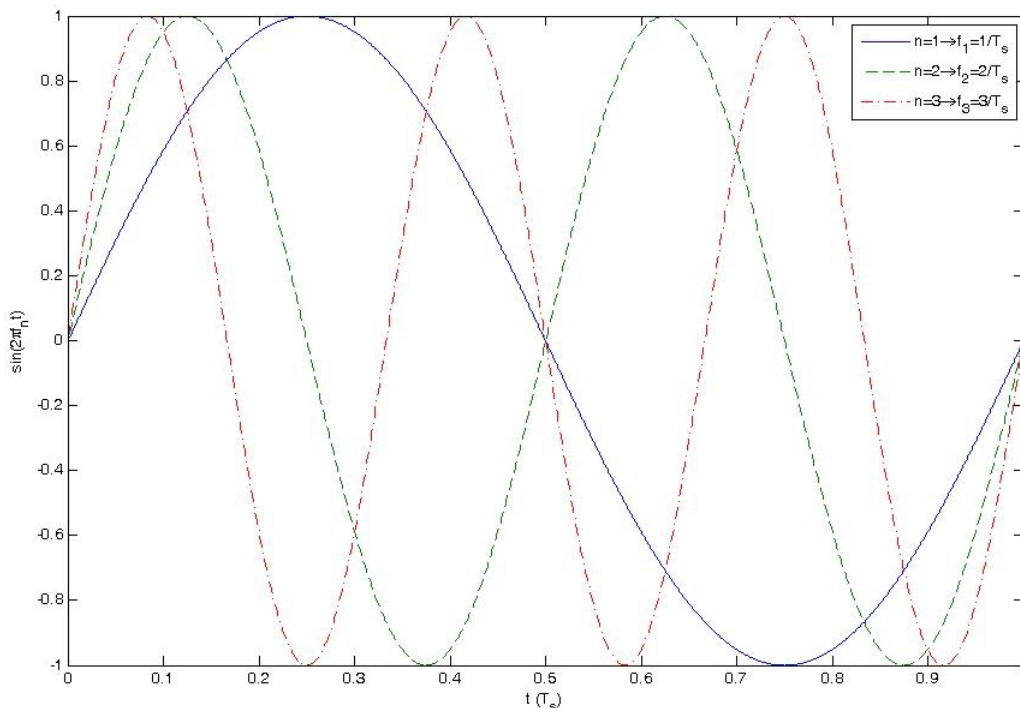
τη μικρότερη θεωρητικά δυνατή απόσταση μεταξύ τους (Εικόνα 3.3) –γεγονός που συντελεί στην αποδοτικότερη αξιοποίηση του φάσματος- ενώ ταυτόχρονα διατηρείται η ορθογωνιότητα. Για να επιτευχθεί αυτό όμως, πρέπει να πληρούνται οι παρακάτω προϋποθέσεις [25]

- Κάθε subcarrier να έχει ακέραιο αριθμό περιόδων (κύκλων) στη διάρκεια συμβόλου T_s και ο αριθμός των κύκλων μεταξύ γειτονικών subcarriers να διαφέρει ακριβώς κατά ένα.
- Το μέγιστο στο φάσμα του κάθε subcarrier να συμπίπτει με τα φασματικά μηδενικά των υπολοίπων.



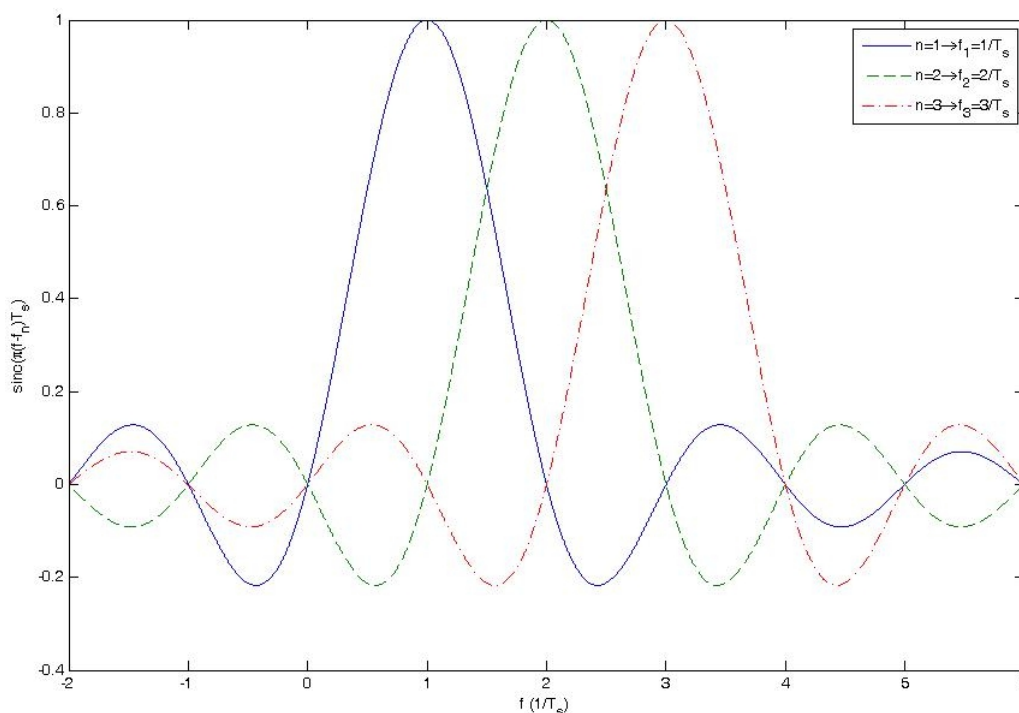
Εικόνα 3.3: OFDM εννέα φερόντων

Πιο αναλυτικά, κάθε OFDM σύμβολο αποτελείται από ένα σύνολο ημίτονων, κάθε ένα από τα οποία αντιστοιχεί σε ένα subcarrier, του οποίου η συχνότητα βασικής ζώνης επιλέγεται έτσι, ώστε να είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του αντιστρόφου της διάρκειας συμβόλου ($f_n = n/T_s$). Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται για κάθε subcarrier ο ακέραιος αριθμός περιόδων στο διάστημα T_s , ο οποίος αυξάνεται σύμφωνα με το n (Εικόνα 3.4).



Εικόνα 3.4: Τρία subcarriers εντός ενός OFDM συμβόλου

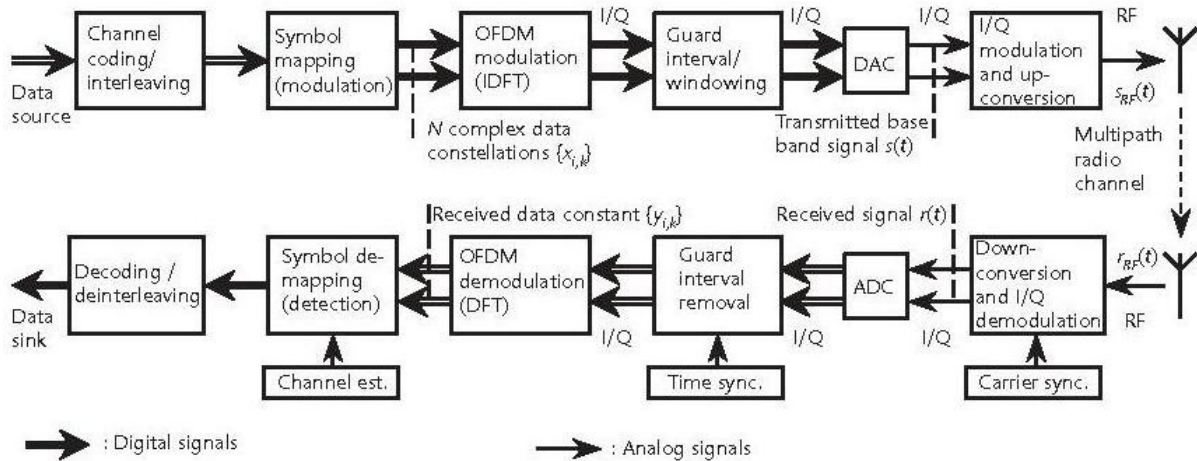
Αντίστοιχα, στο πεδίο της συχνότητας, το φάσμα ενός συμβόλου είναι η συνέλιξη Dirac παλμών τοποθετημένων στις θέσεις f_n με το φάσμα ενός τετραγωνικού παλμού, που είναι ένα στη διάρκεια συμβόλου και μηδέν αλλού. Ως γνωστό το φάσμα τετραγωνικού παλμού είναι η συνάρτηση $\text{sinc}(\pi f T_s)$, που είναι μηδενική στις συχνότητες f_n , γεγονός που εξηγεί την εμφάνιση του μεγίστου κάθε φάσματος στις θέσεις μηδενισμού όλων των υπολοίπων (Εικόνα 3.5). Πρέπει να σημειωθεί ωστόσο, ότι για την ικανοποίηση των δύο προϋποθέσεων της ορθογωνιότητας τόσο το πλάτος όσο και η φάση των subcarriers πρέπει να παραμένουν συνεχή στη διάρκεια συμβόλου. Σε διαφορετική περίπτωση το σχήμα του φάσματος τους δε θα έχει την επιθυμητή μορφή και κατ' επέκτασιν τα μηδενικά δε θα βρίσκονται στις σωστές συχνότητες προκαλώντας ICI (InterCarrier Interference). Όσο διατηρείται η ορθογωνιότητα λοιπόν, ο δέκτης δεν αντιμετωπίζει πρόβλημα στο να αποδιαμορφώσει κάθε ένα από τα subcarriers χωρίς παρεμβολή από τα υπόλοιπα, παρά τη φασματική τους επικάλυψη, εφόσον χρησιμοποιούνται τα σημεία μεγιστοποίησης [26][27][28].



Εικόνα 3.5: Φάσμα των ατομικών subcarriers

3.2.2 Block διάγραμμα πομπού – δέκτη ενός συστήματος OFDM

Τα σήματα OFDM παράγονται ως επί το πλείστον ψηφιακά, εξαιτίας της πολυπλοκότητας που θα εισήγαγε η τοποθέτηση πολλαπλών τοπικών ταλαντωτών στην αναλογική τεχνολογία. Στην εικόνα που ακολουθεί (Εικόνα 3.6) δίνεται το block διάγραμμα ενός μονόδρομου σημείου προς σημείο συστήματος μετάδοσης, το οποίο χρησιμοποιεί OFDM και FEC (Forward Error Correction – Πρόσω Διόρθωση Σφαλμάτων).



Εικόνα 3.6: Block Διάγραμμα μονόδρομου P2P OFDM συστήματος μετάδοσης

Στη συνέχεια γίνεται μια σύντομη ανάλυση καθενός εκ των σταδίων από τα οποία διέρχεται το σήμα από τον πομπό έως ότου φτάσει στον δέκτη.

3.2.3 Κωδικοποίηση & Διεμπλοκή (Coding & Interleaving)

Σε ένα κανάλι που υποφέρει από διαλείψεις εξαιτίας της πολυδιαδρομικής διάδοσης όλα τα subcarriers φθάνουν στο δέκτη με διαφορετικά πλάτη και μάλιστα κάποια από αυτά κινδυνεύουν να “χαθούν” τελείως λόγω βαθέων διαλείψεων. Παρόλο που η ανίχνευση των περισσότερων subcarriers είναι δυνατή χωρίς λάθη, ο συνολικός ρυθμός εσφαλμένων bits (Bit Error Rate – BER) κυριαρχείται από τα λίγα subcarriers με τα μικρότερα πλάτη, για τα οποία η πιθανότητα λάθους εκτιμάται ότι είναι 0.5 [25]. Για να αποφευχθεί το πρόβλημα αυτό εφαρμόζεται στο σύστημα κωδικοποίηση διόρθωσης λαθών έτσι, ώστε τα λάθη των αδύναμων subcarrier να διορθώνονται έως ένα βαθμό, ανάλογα με το είδος κωδικοποίησης και τη φύση του καναλιού. Μία ισχυρή κωδικοποίηση οδηγεί σε ένα σύστημα, όπου η απόδοση καθορίζεται από τη μέση λαμβανόμενη ισχύ και όχι από εκείνη των λίγων αδύναμων subcarrier.

Τα είδη των κωδικών που χρησιμοποιούνται είναι οι κώδικες block, οι συνελκτικοί κώδικες και ο συνδυασμός αυτών. Στην πρώτη κατηγορία, μια ομάδα k συμβόλων κωδικοποιείται, με την προσθήκη επιπλέον συμβόλων, σε n σύμβολα ($n > k$) με στόχο την αύξηση της ελάχιστης απόστασης Hamming, δηλαδή του ελάχιστου αριθμού διαφορετικών συμβόλων ανάμεσα σε οποιοδήποτε ζευγάρι κωδικών λέξεων. Οι πιο διαδεδομένοι κώδικες block είναι οι κώδικες Reed-Solomon, οι οποίοι ενδείκνυνται για κανάλια με ριπές λαθών, όπως μια OFDM ζεύξη, και μπορούν να διορθώσουν ένα συγκεκριμένο αριθμό λανθασμένων bit, όσο όμως αυτά βρίσκονται εντός ορισμένου αριθμού συμβόλων. Οι συνελκτικοί κώδικες αντιστοιχούν μέσω συνέλιξης k ψηφία μιας συνεχόμενης ακολουθίας σε n ψηφία εξόδου και υλοποιούνται με απλούς καταχωρητές ολίσθησης και modulo-2 αθροιστές. Μέτρο της απόδοσής τους αποτελεί το κέρδος κωδικοποίησης, που ορίζεται ως το κέρδος στο λόγο πυκνότητας

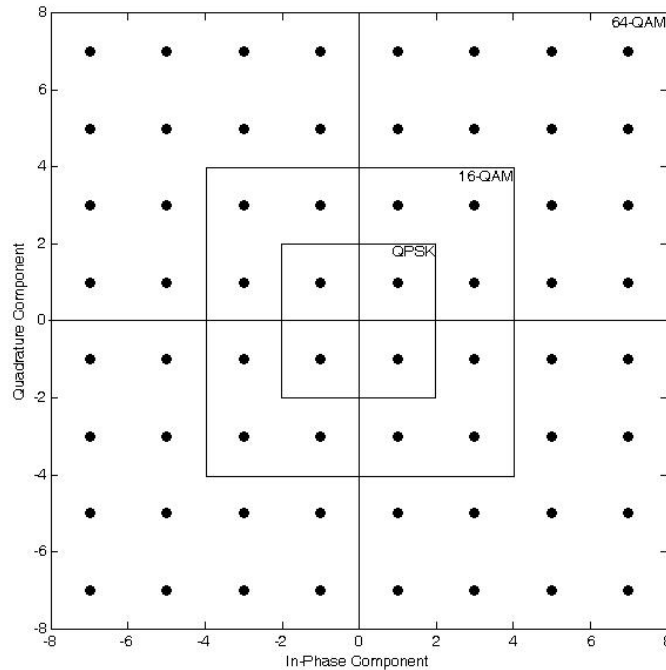
της ενέργειας ψηφίου προς το θόρυβο (E_b/N_0) σε σχέση με ένα μη κωδικοποιημένο σύστημα για συγκεκριμένο BER. Παράλληλα υπάρχει η δυνατότητα συνδυασμού των δύο ειδών κωδικοποίησης, βασικό πλεονέκτημα του οποίου είναι η επίτευξη μεγάλου κέρδους κωδικοποίησης με μικρότερη πολυπλοκότητα υλοποίησης. Συγκριτικά όμως με ένα σύστημα απλού κώδικα παρουσιάζεται μεγαλύτερη καθυστέρηση που επιδρά ιδιαίτερα αρνητικά στις επικοινωνίες πακέτου [29].

Οι περισσότεροι κώδικες διόρθωσης λαθών δεν είναι σχεδιασμένοι ώστε να αντιμετωπίζουν ριπές λαθών, αλλά αποδίδουν καλύτερα όταν τα λάθη είναι ομοιόμορφα καταναμημένα στο σύνολο των φερουσών. Για το λόγο αυτό τα συστήματα υιοθετούν τη μέθοδο του interleaving στη σειριακή ακολουθία των bits με σκοπό την τυχαία εμφάνιση των λανθασμένων bits. Στον πομπό τα κωδικοποιημένα bits συνδυάζονται με τέτοιο τρόπο, που εξασφαλίζει ότι, μετά το interleaving, ανάμεσα σε γειτονικά bits παρεμβάλλονται αρκετά άλλα. Στο δέκτη πραγματοποιείται ο αντίστροφος συνδυασμός πριν την αποκωδικοποίηση για την ανάκτηση της αρχικής ακολουθίας με την ταυτόχρονη όμως διασπορά των λαθών στο χρόνο. Ένα ευρέως διαδεδομένο σχήμα interleaving είναι ο block interleaver [25], στον οποίο τα δεδομένα εισάγονται σε ένα πίνακα κατά στήλες και εξάγονται κατά γραμμές. Εν γένει το interleaving είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί σε επίπεδο συμβόλου ή bit με block ή συνελκτικούς interleavers [5].

3.2.4 Σχήμα Διαμόρφωσης (Symbol Mapping – Modulation)

Μετά την ανάθεση των bits σε κάθε φέρον στον πομπό, αυτά αντιστοιχίζονται με βάση το εκάστοτε σχήμα διαμόρφωσης σε συγκεκριμένο πλάτος και φάση του subcarrier, που απεικονίζονται από ένα μιγαδικό διάνυσμα με In-Phase και Quadrature-Phase συνιστώσες. Κατά τη μετάδοση προστίθενται στο σήμα θόρυβος και παρεμβολή κάθε είδους λόγω του περιβάλλοντος διάδοσης, με αποτέλεσμα τη διαστρέβλωση της εικόνας των ακριβών θέσεων των IQ διανυσμάτων. Έτσι, για να γίνει η αποδιαμόρφωση στο δέκτη, απαιτείται η εκτίμηση του πιο πιθανού αρχικά εκπεμπόμενου διανύσματος, δηλαδή εκείνου που βρίσκεται πιο κοντά στο λαμβανόμενο. Η διαδικασία αυτή παρουσιάζει λάθη όταν ο θόρυβος ξεπερνά το μισό της απόστασης μεταξύ των σημείων του αστερισμού, παραποιώντας το κριτήριο ορθής λήψης της απόφασης για το εκπεμπόμενο σήμα στο δέκτη.

Σε ένα σύστημα OFDM μπορεί να εφαρμοστεί μεγάλος αριθμός σχημάτων διαμόρφωσης, στα οποία συγκαταλέγονται η BPSK, η QPSK, η 16-QAM και η 64-QAM, των οποίων οι αστερισμοί φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα (Εικόνα 3.7).



Εικόνα 3.7: Αστερισμοί διαμορφώσεων QPSK, 16-QAM, 64-QAM

Όπως γίνεται αντιληπτό από το σχήμα, η διαμόρφωση δεν είναι παρά η αντιστοίχιση μιας λέξης δεδομένων σε έναν πραγματικό (In-Phase) και ένα φανταστικό (Quadrature) διάνυσμα στον αστερισμό [3]. Για παράδειγμα ο αστερισμός της διαμόρφωσης 64-QAM αποτελείται από 64 σημεία δομημένα έτσι, ώστε να σχηματίζουν τετράγωνο με οκτώ ισαπέχουσες στήλες στον πραγματικό άξονα και οκτώ ισαπέχουσες γραμμές στο φανταστικό. Ο αριθμός των bits που μπορούν να μεταδοθούν από ένα σύμβολο προκύπτει από τον τύπο $\log_2 M$, όπου M ο αριθμός των σημείων στον αστερισμό, επομένως στην 64-QAM μεταδίδονται έξι bits ανά σύμβολο.

Σε γενικές γραμμές η αύξηση του μεγέθους του αστερισμού δεν προκαλεί την αλλαγή του εύρους ζώνης μετάδοσης, επομένως ένα υψηλό σχήμα διαμόρφωσης επιτρέπει τη βελτιωμένη φασματική απόδοση. Συγκεκριμένα, η 64-QAM έχει φασματική απόδοση 6bps/Hz, ενώ η BPSK έχει μόλις 1bps/Hz. Ωστόσο, ο μεγαλύτερος αριθμός σημείων στον αστερισμό δυσχεραίνει τη διαδικασία ανάκτησής τους στο δέκτη, καθώς συνεπάγεται ότι οι θέσεις των IQ διανυσμάτων βρίσκονται πιο κοντά μεταξύ τους, οπότε ακόμη και ελάχιστος θόρυβος προκαλεί λάθη κατά τη μετάδοση. Στο σύστημα λοιπόν ενυπάρχει η ανάγκη για συμβιβασμό μεταξύ της ανοχής στο θόρυβο και της αξιοποίησης του φάσματος από το σχήμα διαμόρφωσης, γεγονός που συνοψίζεται στη θεωρία πληροφορίας του Shannon. Σύμφωνα με αυτή, η φασματική απόδοση S_E αποτελεί μέτρο των μεταφερόμενων ανά δευτερόλεπτο bits για κάθε Hz του εύρους ζώνης και δίνεται από τη σχέση [22]

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

όπου

C : η μέγιστη χωρητικότητα του καναλιού ,

W : το εύρος ζώνης του καναλιού ,

N : η ισχύς του θορύβου ,

S : η ισχύς του επιθυμητού σήματος

3.2.5 Διαμόρφωση OFDM – Διακριτός Μετασχηματισμός Fourier (DFT)

Ο αντίστροφος και ο ευθύς διακριτός μετασχηματισμός Fourier (IDFT και DFT) χρησιμοποιούνται αντίστοιχα για τη διαμόρφωση και αποδιαμόρφωση των αστερισμών των δεδομένων στα ορθογωνικά φέροντα. Αυτοί οι αλγόριθμοι επεξεργασίας σήματος αντικαθιστούν ένα σύνολο από I/Q διαμορφωτές και αποδιαμορφωτές που θα απαιτούσε σε άλλη περίπτωση η διαμόρφωση OFDM. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι το πλήθος N των σημείων του (I)DFT λαμβάνεται συνήθως να είναι δύναμη του δύο, επιλογή που καθιστά δυνατή την εφαρμογή του (Αντίστροφου) Ταχέως Μετασχηματισμού Fourier ((I)FFT), ενός αλγορίθμου υψηλής απόδοσης, ο οποίος έχει μελετηθεί διεξοδικά και σε βάθος εξαιτίας της χρησιμότητάς του στον ευρύτερο τομέα της επεξεργασίας ψηφιακού σήματος [30]. Ο FFT έχει αλγοριθμική πολυπλοκότητα $O(N \log_2 N)$, το οποίο σημαίνει ότι ο χρόνος επεξεργασίας του σήματος εισόδου εξαρτάται από το μέγεθος της εισόδου σαν συνάρτηση του $N \log_2 N$ [31][32].

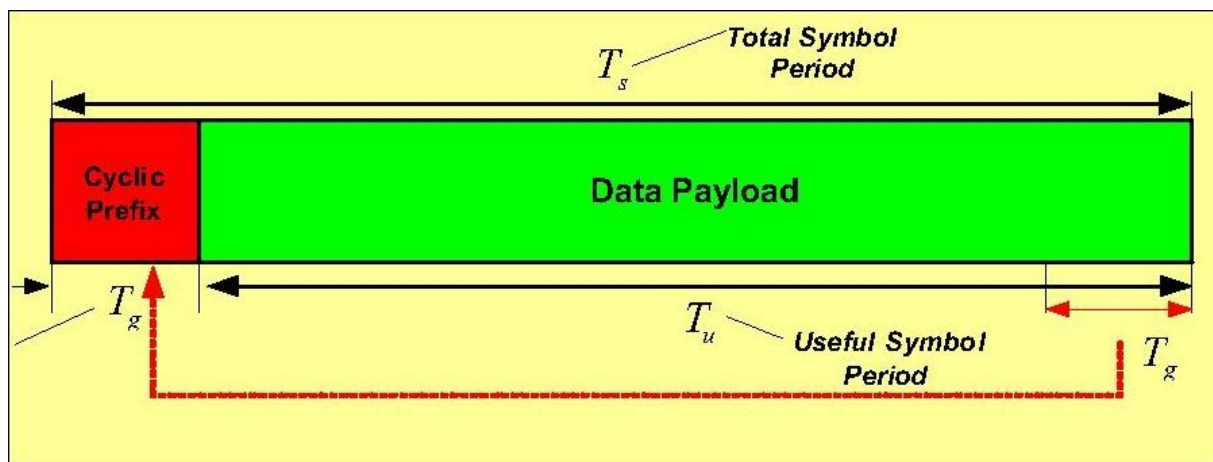
Ως είσοδο του IDFT λαμβάνονται N σημεία (του αστερισμού) δεδομένων $\{x_{i,k}\}$, όπου i δείκτης για το SC και k δείκτης για το OFDM σύμβολο. Τα σημεία αυτά μπορεί να έχουν ληφθεί με οποιοδήποτε από τους τρόπους διαμόρφωσης που προαναφέρθηκαν. Τα N δείγματα εξόδου του IFFT, στο πεδίο του χρόνου πλέον, διαμορφώνουν το σήμα βασικής ζώνης το οποίο φέρει τα σύμβολα δεδομένων σε ένα σύνολο από N ορθογωνικά φέροντα. Σε ένα πραγματικό σύστημα, όμως, δε μπορούν να χρησιμοποιηθούν όλα αυτά τα φέροντα για τη μετάδοση δεδομένων, καθώς κάποια από αυτά θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν ως πιλότοι, για την εκτίμηση του καναλιού, ή ως διαστήματα φύλαξης. Εξαιτίας των βαθυπερατών φίλτρων που απαιτούνται για τις μετατροπές από αναλογικό σε ψηφιακό σήμα και αντίστροφα, το κανάλια που βρίσκονται στα άκρα του διατιθέμενου εύρους ζώνης θα καταπιεστούν ενώ το dc subcarrier υφίσταται εν γένει μεγάλες παραμορφώσεις από το dc offset των ηλεκτρονικών που εμπλέκονται στην παραγωγή του OFDM σήματος και έτσι θα πρέπει να αποφεύγονται προς χρήση για μεταφορά δεδομένων [24].

3.2.6 Διάστημα Φύλαξης (Guard Interval) – Ορισμός παραθύρου (Windowing)

Μία από τις βασικές επινοήσεις της διαμόρφωσης OFDM είναι η εισαγωγή ενός κυκλικού προθέματος (Εικόνα 3.8), γνωστού ως διαστήματος φύλαξης (GI)⁶, το μήκος του οποίου επιλέγεται απλά έτσι ώστε να υπερβαίνει τη μέγιστη χρονική καθυστέρηση του πολυδιαδρομικού καναλιού. Εξαιτίας του κυκλικού αυτού το προθέματος, το μεταδιδόμενο σήμα γίνεται περιοδικό και η επίδραση του χρό-

6 Στη διεθνή βιβλιογραφία απαντάται συχνά και η συντομογραφία CP – Cyclic Prefix – Κυκλικό Πρόθεμα.

νο-διασπαρτικού καναλιού καθίσταται ισοδύναμη με μια κυκλική συνέλιξη, αφού απορριφθεί το GI στο δέκτη. Λόγω των ιδιοτήτων της κυκλικής συνέλιξης, η επίδραση του πολυδιαδρομικού καναλιού περιορίζεται σε ένα σημείο προς σημείο πολλαπλασιασμό των αστερισμών των μεταδιδόμενων δεδομένων με τη συνάρτηση μεταφοράς του καναλιού, ή το μετασχηματισμό Fourier του καναλιού. Αυτό εν τέλει οδηγεί στο να παραμένουν ορθογωνικά μεταξύ τους τα subcarriers. Το μόνο μειονέκτημα από τη χρήση του GI είναι μια μικρή απώλεια της πραγματικής ισχύος εκπομπής (effective transmit power), καθώς θα πρέπει να μεταδοθεί εκτός από τα πραγματικά δεδομένα και το κυκλικό πρόθεμα. Συνήθως, το GI επιλέγεται να έχει μήκος σε ένα εύρος από ένα δέκατο έως ένα τέταρτο της περιόδου του συμβόλου, πράγμα που οδηγεί σε μια απώλεια 0.5dB έως 1dB στο SNR [24][33].



Εικόνα 3.8: Εισαγωγή του κυκλικού προθέματος

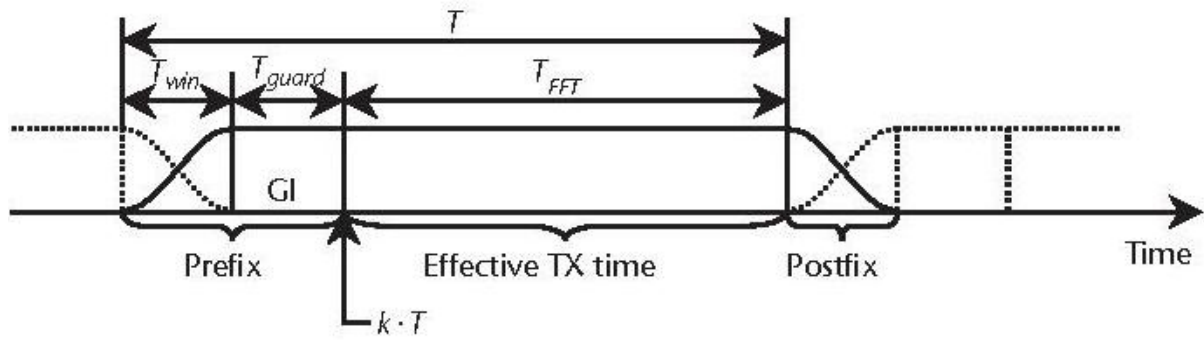
Ένας ορθογωνικός παλμός έχει πολύ μεγάλο εύρος ζώνης, εξαιτίας των πλευρικών λοβών που εμφανίζει ο μετασχηματισμός Fourier αυτού, η συνάρτηση sinc. Ο ορισμός ενός παραθύρου (windowing) είναι μια γνωστή τεχνική που αποσκοπεί στο να μειώσει την ισχύ που διαρρέει στους πλευρικούς λοβούς και έτσι να μειωθεί η ισχύς του σήματος που μεταδίδεται εκτός ζώνης. Έτσι, τα (χρονικά) άκρα του σήματος αποσβένονται ομαλά προς το μηδενισμό τους εντός ενός χρονικού διαστήματος T_{win} (Εικόνα 3.9)⁷. Στο OFDM, το εφαρμοζόμενο παράθυρο δε θα πρέπει να επηρεάζει το σήμα κατά τη διάρκεια της ωφέλιμης περιόδου του. Έτσι, τόσο το τμήμα δεδομένων όσο και το κυκλικό πρόθεμα διαμορφώνονται από ορθογωνικό παλμό.

7 T_{win} : Η χρονική διάρκεια του παραθύρου

$T_{guard} = T_g$: Η χρονική διάρκεια του κυκλικού προθέματος

$T_{FFT} = T_u$: Η ωφέλιμη χρονική διάρκεια του συμβόλου – χρονική διάρκεια των N σημείων του FFT

T : Η συνολική διάρκεια του συμβόλου $T = T_{win} + T_{guard} + T_{FFT}$



Εικόνα 3.9: Σχήμα του εκπεμπόμενου παλμού

Αξίζει να σημειωθεί ότι η περαιτέρω αυτή προσθήκη ενός χρονικού διαστήματος στο OFDM σύμβολο οδηγεί σε κάποια επέκταση της ευρωστίας του συστήματος ως προς τη χρονική διασπορά. Από την άλλη, όμως, μειώνεται περαιτέρω η απόδοση αφού το τμήμα του παραθύρου δεν αποτελεί ωφέλιμο φορτίο του συμβόλου και ως εκ τούτου θα απορριφθεί από το δέκτη. Η ορθογωνιότητα των subcarriers του OFDM σήματος μπορεί να ανακτηθεί από το ορθογωνικό φίλτρο που υλοποιείται από τον DFT, το οποίο απαιτεί ορθή πρόγνωση της έναρξης kT του συμβόλου.

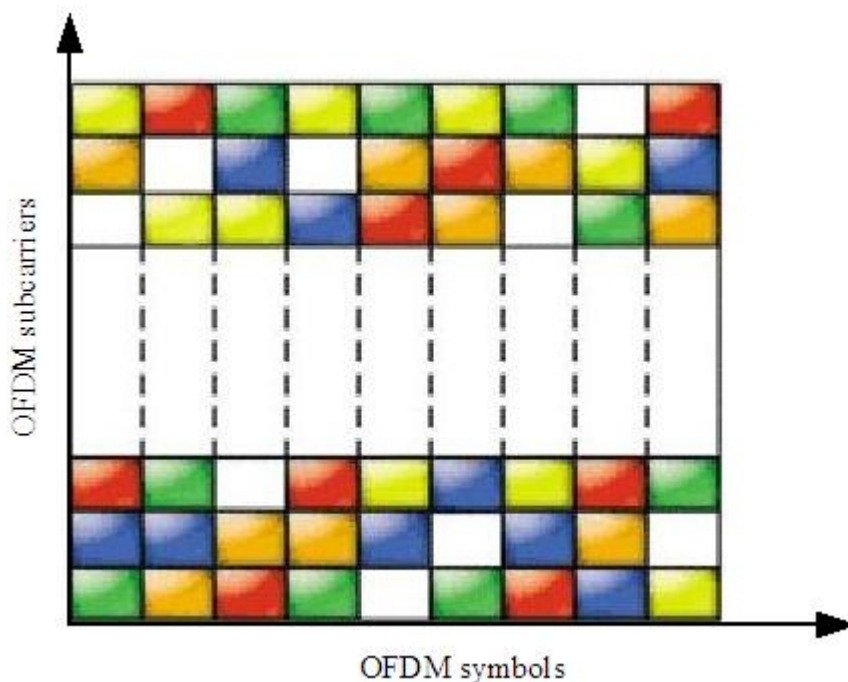
Η διαδικασία του windowing γίνεται συνήθως με μια συνάρτηση ανορθωμένου συνημιτόνου, διαδικασία η οποία στο πεδίο του χρόνου μπορεί να ιδωθεί ως συνέλιξη ενός τετραγωνικού παλμού διάρκειας T με ένα ημίτονο ημίσεος μήκους κύματος, ενώ στο πεδίο της συχνότητας μπορεί να ιδωθεί ως πολλαπλασιασμός του φάσματος του τετραγωνικού παλμού (συνάρτηση sine) με το φάσμα του ημίτονου ημίσεος μήκους κύματος. Έτσι, μπορούμε να παρατηρήσουμε στο πεδίο της συχνότητας ότι μειώνεται το ύψος των πλευρικών λοβών, που είναι και το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Στο [24] υπάρχει μια εξαιρετική μαθηματική ανάλυση του OFDM. Χάρη οικονομίας χώρου, δε θα επεκταθούμε περαιτέρω στην παρούσα. Πάρα ταύτα, ο συγγραφέας με τα εργαλεία της μαθηματικής ανάλυσης δείχνει την ανοχή του OFDM στα προβλήματα που προκαλεί η πολύοδη διάδοση αλλά και το πόσο σημαντικός είναι για το OFDM ο συγχρονισμός και τις ολέθριες επιπτώσεις της απώλειάς του.

3.3 OFDMA

Επιπρόσθετα της υψηλής φασματικής απόδοσης και της ευρωστίας στη διασυμβολική παρεμβολή κατά την πολυδιαδρομική διάδοση, το OFDM εμφανίζει σημαντικά πλεονεκτήματα, τα οποία είναι εμφανή όταν θεωρηθεί η διαχείριση πόρων για τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές πολλών χρηστών (multi-user communications). Και αυτό διότι επιτρέπει το διαχωρισμό των χρονικών και φασματικών πόρων σε

- OFDM σύμβολα
- OFDM φέροντα (subcarriers)



Εικόνα 3.10: Πόροι του OFDM

Καθένα ένα από από τα OFDM σύμβολα ή φέροντα μπορούν να αποδοθούν σε διαφορετικούς χρήστες. Διαφορετικοί χρήστες μπορούν ακόμα να λαμβάνουν διαφορετικό πλήθος συμβόλων και φερόντων και, προχωρώντας παραπέρα, διαφορετικά επίπεδα διαμόρφωσης (αριθμός bits ανά σύμβολο διαμόρφωσης) μπορούν να εφαρμοσθούν σε κάθε φέρον. Κατ' αυτό τον τρόπο μπορούν να εξυπηρετηθούν διαφορετικά επίπεδα QoS. Σε κάθε χρήστη του συστήματος εκχωρείται συγκεκριμένος αριθμός φερόντων, ανάλογα με τις ανάγκες του σε ρυθμό μετάδοσης. Το ποιο subcarrier θα αποδοθεί σε κάθε χρήστη είναι θέμα που αφορά τη διαχείριση των ασυρμάτων πόρων του συστήματος, η οποία και εξετάζεται στα επόμενα [15][26].

Κεφάλαιο 4ο

Διαχείριση Ασύρματων Πόρων

Radio Resource Management (RRM)

Η ασύρματη ζεύξη συχνά θεωρείται ως ο πιο αδύναμος κρίκος της τηλεπικοινωνιακής αλυσίδας. Και μάλλον όχι άδικα, αν αναλογιστεί κανείς τη μεταβαλλόμενη και ως εκ τούτου απρόβλεπτη συμπεριφορά του ασύρματου καναλιού αλλά και το γεγονός ότι οι διατιθέμενοι ασύρματοι πόροι είναι πολύ πιο περιορισμένοι σε σχέση με τα ενσύρματα μέσα μετάδοσης. Το πρόβλημα είναι ότι ενώ η ζήτηση για εξυπηρέτηση τηλεπικοινωνιακής κίνησης αυξάνει με πολύ ταχύ ρυθμό, η διαθεσιμότητα του φάσματος παραμένει περιορισμένη. Έτσι, ως μόνη λύση πλέον, η προσφερόμενη κίνηση πρέπει αλλά και μπορεί να εξυπηρετηθεί από το σύστημα χωρίς τη δέσμευση νέων πόρων αλλά με καλύτερη αξιοποίηση των ήδη υπαρχόντων.

4.1 Βασικές αρχές διαχείρισης ασυρμάτων πόρων

Τρεις είναι οι κύριοι παράγοντες που καθορίζουν τη χρήση και αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων ενός ασύρματου συστήματος. Πρώτον, το σχήμα πολλαπλής πρόσβασης που θα χρησιμοποιηθεί ώστε να εξυπηρετηθούν κατά το δυνατό περισσότεροι χρήστες που αιτούνται των υπηρεσιών του συστήματος. Δεύτερον, η εξασφάλιση της ποιότητας υπηρεσίας (QoS) που προσφέρεται, ή ίσως δεν προσφέρεται, από το σύστημα και τέλος ο τρόπος με τον οποίο θα κατανεμηθούν οι διαθέσιμοι πόροι στους χρήστες του συστήματος, ανάλογα με το ρυθμό και την ποιότητα υπηρεσίας που ζητούν. Το τελευταίο αυτό κομμάτι αποτελεί το μεγάλο κεφάλαιο της διαχείρισης των ασυρμάτων πόρων (RRM – Radio Resource Management) στα ασύρματα τηλεπικοινωνιακά συστήματα.

4.1.1 Πολλαπλή πρόσβαση

Το κύριο έργο των τεχνικών πολλαπλής πρόσβασης είναι να επιτρέπουν σε πολλαπλούς χρήστες να επικοινωνούν, διαμοιραζόμενοι τους πεπερασμένους φυσικούς πόρους του συστήματος, όπως ο χρόνος, το εύρος ζώνης και η εκπεμπόμενη ισχύς. Ο διαμοιρασμός περιλαμβάνει όχι μόνον τη δημιουργία διαφορετικών ζεύξεων για τις διάφορες επικοινωνίες αλλά και επαναχρησιμοποίηση των διαθέσιμων πόρων με σκοπό να αυξηθεί η χρησιμοποίησή τους (utilization). Επαναχρησιμοποίηση σημαίνει ότι την ίδια χρονική στιγμή περισσότεροι του ενός χρήστες χρησιμοποιούν τον ίδιο πόρο (πχ ένα συχνοτικό κανάλι ή μια χρονοθυρίδα). Επομένως, οι διαφορετικοί χρήστες αλληλοεπηρεάζονται, κάποιες φορές δημιουργώντας προβλήματα (πχ ομοδιαυλική παρεμβολή) και κάποιες άλλες βελτιώνοντας την απόδοση του συστήματος (πχ όταν τα δεδομένα δύο διαφορετικών χρηστών συνδυάζονται σε έναν αστερισμό για μετάδοση). Σε κάθε περίπτωση, είναι ιδιαίτερα σημαντικό αυτή η αμοιβαία επιρροή, συχνά αναφερόμενη και ως παρεμβολή, να είναι γνωστή και ελεγχόμενη [15].

4.1.2 Η ανάγκη για υποστήριξη QoS

Η ανάγκη για υποστήριξη ποικίλων απαιτήσεων (τηλεπικοινωνιακής) κίνησης απορρέει από την προβλεπόμενη ποικιλία των μελλοντικών εφαρμογών πολυμέσων. Έτσι, το τηλεπικοινωνιακό σύστημα θα πρέπει να είναι κατά το δυνατόν έτοιμο να ανταποκριθεί σχεδόν σε κάθε είδος εφαρμογής. Έχοντας ένα τέτοιο αναδομήσιμο σύστημα, το οποίο θα είναι σε θέση να υποστηρίξει διάφορους τύπους προσαρμόσιμων υπηρεσιών, είναι ωφέλιμο και από τη σκοπιά τις αγοράς των τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών, όπου ένας πάροχος μπορεί γρήγορα να αντιδράσει στις ανάγκες της αγοράς, προσφέροντας μια νέα υπηρεσία, χωρίς την ανάγκη για μια χρονοβόρα ανάπτυξη του συστήματός του. Περαιτέρω, η διαφοροποίηση μεταξύ των απαιτήσεων των χρηστών επιτρέπει την εκχώρηση ακριβώς όσων πόρων χρειάζεται ο κάθε χρήστης, χωρίς να αναλίσκονται σε μια προσέγγιση χειρότερης περίπτωσης (worst-case). Επομένως, η υποστήριξη διαφορετικών προφίλ κίνησης, γνωστή και υποστήριξη ποιότητας υπηρεσίας (QoS) είναι πρώτιστης σημασίας για το σχεδιασμό των μελλοντικών σχημάτων πολλα-

πλής πρόσβασης.

Η ποιότητα υπηρεσίας θα πρέπει να παρέχεται συνολικά, απ' άκρο σ' άκρο (end-to-end) από το σύστημα. Αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να υποστηρίζεται από όλα τα στοιχεία του συστήματος που συνιστούν το μονοπάτι ανάμεσα στα επικοινωνούντα μέρη. Συχνά, η ασύρματη ζεύξη είναι το πιο αδύναμο κομμάτι στο τηλεπικοινωνιακό μονοπάτι εξαιτίας της μεταβλητής και απρόβλεπτης συμπεριφοράς της. Μία από τις πιθανές λύσεις για την παροχή end-to-end QoS υπηρεσιών είναι με τη διαπραγμάτευση των παραμέτρων της ποιότητας υπηρεσίας, τη συμφωνία σε συγκεκριμένες παραμέτρους και τη σύναψη συμφωνιών σε επίπεδο υπηρεσίας (service level agreements – SLAs) μεταξύ των διαφορετικών στοιχείων του συστήματος.

Ένα σύστημα που παρέχει ποιότητα υπηρεσιών θα πρέπει να είναι δίκαιο. Αυτό σημαίνει ότι η εξασφάλιση ποιότητας για ένα χρήστη δε θα πρέπει να γίνεται σε βάρος της ποιότητας ενός άλλου χρήστη, αν υποθέσουμε ότι όλοι οι χρήστες έχουν την ίδια προτεραιότητα, αλλά ούτε και με έξοδα άλλων χρηστών [15].

4.1.3 Η ανάγκη για διαχείριση πόρων

Στις ασύρματες επικοινωνίες, όταν πεπερασμένοι πόροι διαμοιράζονται για να ικανοποιηθούν ατομικές ανάγκες, είναι αναγκαία διαχείριση αυτών των πόρων ώστε ο διαμοιρασμός να γίνεται κατά τρόπο δίκαιο αλλά και αποδοτικό. Μπορούμε να διακρίνουμε τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις για τη διαχείριση ασυρμάτων πόρων [1][5].

4.1.3.1 Σταθερή εκχώρηση πόρων

Η σταθερή εκχώρηση πόρων είναι η ιστορικά παλιότερη προσέγγιση στο πρόβλημα της διαχείρισης πόρων. Εδώ, συγκεκριμένοι πόροι (όπως συχνοτικά κανάλια ή χρονοθυρίδες) αποδίδονται μόνιμα σε κάποιους χρήστες. Η προσέγγιση αυτή είναι ακόμα παρούσα στα σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά συστήματα, όπως για παράδειγμα στο GSM, όπου μία επιλογή για τον προγραμματισμό συχνοτήτων είναι η απόδοση μιας συχνότητας μόνιμα σε πομπούς συγκεκριμένων σταθμών βάσης. Αυτή είναι η περίπτωση σχεδιασμού χειρίστης περίπτωσης (worst-case), η οποία στοχεύει να παράσχει ένα ελάχιστο λόγο σήματος προς παρεμβολή στο μεγαλύτερο μέρος του συστήματος. Προφανώς, η σταθερή εκχώρηση πόρων, αν και απλή και δεν απαιτεί γνώση των περιβαλλοντικών συνθηκών, οδηγεί σε σπατάλη πόρων το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, όταν η υπόθεση για το σενάριο χειρότερης περίπτωσης είναι ιδιαίτερα αυστηρή.

4.1.3.2 Τυχαία εκχώρηση πόρων

Στην τυχαία εκχώρηση πόρων, οι πόροι του συστήματος είτε εκχωρούνται τυχαία, είτε προσπελάζονται τυχαία. Παραδείγματα τυχαίας προσπέλασης χρονικών πόρων είναι όλα τα σχήματα πολλαπλής πρόσβασης που βασίζονται στο ALOHA και τα παράγωγά του (CSMA, CSMA/CD) [6][34]. Παρα-

δείγματα τυχαίας εκχώρησης πόρων είναι οι τεχνικές διασποράς φάσματος (spread spectrum - SS), όπως η SS με μεταπήδηση συχνότητας (frequency hopping - FH) ή η SS ευθείας ακολουθίας (direct sequence - DS). Οι τεχνικές αυτές χαρακτηρίζονται ως interference averaging techniques και συνήθως οδηγούν σε καλύτερη επίδοση σε σχέση με τη σταθερή κατανομή πόρων. Το πλεονέκτημα τους απορρέει από το γεγονός ότι χωρίς να έχουν λεπτομερή γνώση του περιβάλλοντος, κατά μέσο όρο, είναι καλύτερο οι πόροι να εκχωρούνται τυχαία, καθώς η αρνητική επίδραση του περιβάλλοντος (θόρυβος, παρεμβολή, απόσβεση) θα κατανομηθεί σε όλους τους χρήστες χωρίς να διακινδυνεύεται ότι κάποιος από αυτούς θα επηρεαστούν υπερβολικά, όπως συμβαίνει με τη σταθερή κατανομή πόρων.

4.1.3.3 Δυναμική εκχώρηση πόρων

Στη δυναμική εκχώρηση πόρων, ο διαχειριστής πόρων του συστήματος, βασισμένος στην λεπτομερή γνώση του περιβάλλοντος αλλά και των απαιτήσεων των χρηστών, λαμβάνει αποφάσεις σχετικά με τους πόρους που θα πρέπει να εκχωρηθούν σε κάθε χρήστη. Καθ' αυτόν τον τρόπο, οι πόροι εκχωρούνται σύμφωνα με την ποιότητά τους και τις ανάγκες των χρηστών. Ένα παράδειγμα δυναμικής εκχώρησης πόρων είναι η δυναμική εκχώρηση καναλιού (dynamic channel allocation - DCA), όπου ένα κανάλι από ένα κοινό σύνολο καναλιών εκχωρείται σε ένα χρήστη σύμφωνα με το μετρούμενο SNIR. Η δυναμική εκχώρηση πόρων που λειτουργεί σε περιβάλλοντα που περιορίζονται από τις παρεμβολές (interference limited) είναι μια τεχνική αποφυγής της παρεμβολής (interference avoidance). Οι τεχνικές αυτές παρέχουν ακόμα καλύτερη απόδοση σε σχέση με τις interference averaging τεχνικές. Εδώ, η προσαρμοστικότητα θεωρείται καίριος παράγοντας για την επιτυχή λειτουργία του συστήματος. Μειονέκτημα των μεθόδων αυτών είναι η ανάγκη για απόκτηση λεπτομερούς πληροφορίας σχετικά με τις περιβαλλοντικές συνθήκες.

Στην παρούσα πραγματεία, η μελέτη επικεντρώνεται στις τεχνικές δυναμικής εκχώρησης πόρων, αξιοποιώντας τη γνώση του περιβάλλοντος λειτουργίας του συστήματος.

4.2 OFDMA RRM

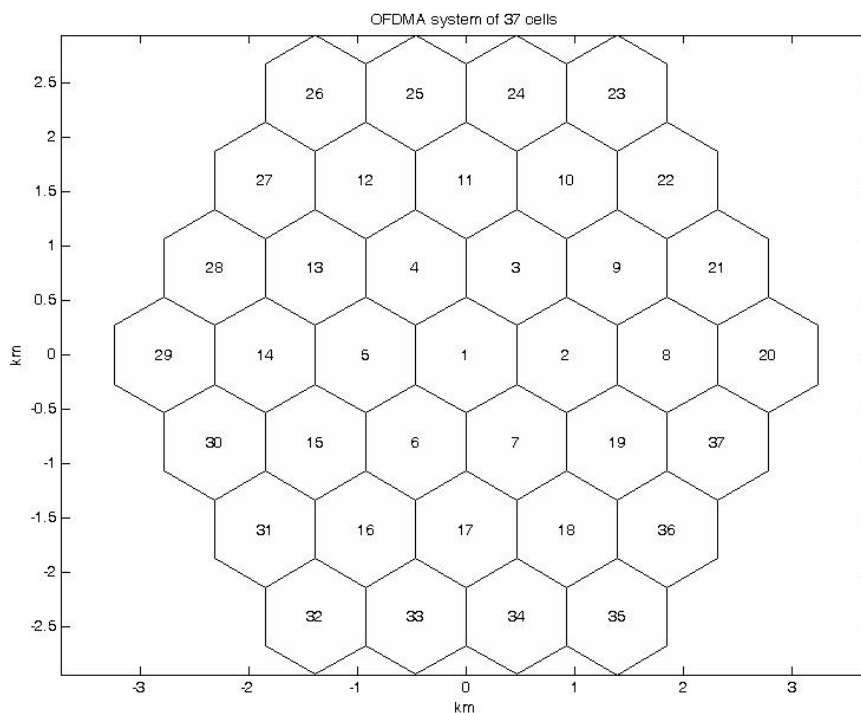
Στην παράγραφο αυτό μελετάται το πρόβλημα της διαχείρισης ασυρμάτων πόρων για ένα πολυκυψελωτό OFDMA σύστημα, όπου επιτρέπεται η επαναχρησιμοποίηση φερόντων μεταξύ των διαφορετικών κυψελών του συστήματος, όχι όμως εντός της ίδιας κυψέλης.

4.2.1 Μοντέλο κυψελωτού συστήματος OFDMA

Το κυψελωτό OFDMA σύστημα αποτελείται από K κυψέλες, εξαγωνικού σχήματος. Οι κυψέλες του συστήματος αναπτύσσονται σε T στρώσεις (tiers) κυψελών γύρω από το κέντρο του συστήματος, το οποίο συμβατικά θεωρείται το σημείο $(0,0)$. Επομένως για το πλήθος των κυψελών ισχύει ο περιορισμός,

$$K = 1 + 3(T - 1)T, \quad T \in \mathbf{N} - \{0\}$$

Στην εικόνα που ακολουθεί (Εικόνα 4.1) δίδεται μία απεικόνιση του συστήματος για $T=4$ tiers κυψελών. Στο κέντρο κάθε κυψέλης υπάρχει ένας σταθμός βάσης (BS) που εξυπηρετεί την περιοχή της κυψέλης, ο οποίος διαθέτει ομοιοκατευθυντική κεραία και μπορεί να εκπέμψει μέγιστη ισχύ P_{\max} .



Εικόνα 4.1: Παράδειγμα απεικόνισης κυψελωτού OFDMA συστήματος

Από το σύστημα αυτό μπορούν να εξυπηρετηθούν (δυναμικά) συνολικά U χρήστες ομοιόμορφα κατανομημένοι στην περιοχή κάλυψης του συστήματος. Ο τερματικός εξοπλισμός των χρηστών διαθέτει κατευθυντική κεραία που “στοχεύει” προς το σταθμό βάσης από τον οποίο εξυπηρετείται.

Στην ανάλυση που θα ακολουθήσει ασχολούμεθα μόνο με τη ζεύξη καθόδου (downlink), όπου οι

σταθμοί βάσης επικοινωνούν με τα τερματικά των χρηστών μέσω N OFDM φερόντων, τα οποία συνιστούν το συνολικό εύρος ζώνης του συστήματος BW^8 . Υποτίθεται ότι τα φέροντα μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν σε διαφορετικές κυψέλες, το οποίο σημαίνει ότι το ίδιο φέρον μπορεί να εκχωρηθεί σε δύο διαφορετικούς χρήστες με την προϋπόθεση ότι οι τελευταίοι εξυπηρετούνται από διαφορετικές κυψέλες. Τα φέροντα δε μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν εντός της ίδιας κυψέλης, όπου πρέπει να εκχωρούνται στους χρήστες κατ' αποκλειστικότητα. Τέλος, ένας χρήστης δε μπορεί να εξυπηρετείται από περισσότερους του ενός σταθμούς βάσης, μέσω του ίδιου ή διαφορετικών φερόντων [35].

Η επαναχρησιμοποίηση φερόντων μεταξύ διαφορετικών κυψελών σημαίνει ότι, επί της αρχής, κάθε κυψέλη μπορεί να επωφεληθεί από τη διαθεσιμότητα του συνολικού φάσματος BW . Αυτό σημαίνει ότι το κυψελωτό σύστημα έχει συντελεστή επαναχρησιμοποίησης ένα ή, όπως καλείται διαφορετικά, είναι δίκτυο μιας συχνότητας (single frequency network), χαρακτηριστικό των συστημάτων WCDMA όπως το UMTS. Παράγοντας επαναχρησιμοποίησης ένα συνεπάγεται ότι ο προγραμματισμός συχνοτήτων (frequency planning) δεν είναι απαραίτητος, πράγμα το οποίο απλοποιεί τη διαδικασία ανάπτυξης του δικτύου. Στην πράξη όμως, η διαθεσιμότητα συγκεκριμένων φερόντων από το συνολικό εύρος ζώνης εξαρτάται από την προσφερόμενη κίνηση, την παρεμβολή και τις συνθήκες του καναλιού[15].

Το κέρδος του καναλιού ανάμεσα στο σταθμό βάσης k και το χρήστη u , οι οποίοι επικοινωνούν χρησιμοποιώντας το φέρον n , περιγράφεται από τη μήτρα $\mathbf{G}=[G_{u,n,k}]$ και περιλαμβάνει τις απώλειες διαδρομής και την επίδραση της σκίασης. Εξαιτίας του ότι τα φέροντα μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν, υπεισέρχεται στην ανάλυσή μας και η ομοδιαυλική παρεμβολή. Η τελευταία περιγράφεται από την ισχύ της ομοδιαυλικής παρεμβολής μέσω της μήτρας $\mathbf{I}=[I_{u,n,k}]$, η οποία δίνει τη συνολική ισχύ παρεμβολής που λαμβάνεται από το χρήστη u , ο οποίος εξυπηρετείται από το BS k χρησιμοποιώντας το φέρον n . Η ισχύς ομοδιαυλική παρεμβολής ορίζεται σύμφωνα με τη σχέση

$$I_{u,n,k} = \sum_{i \neq k, v \neq u} G_{u,n,i} P_{v,n,i}, \quad u=1, \dots, U$$

όπου $G_{u,n,i}$ το κέρδος ανάμεσα στον i -οστό παρεμβάλλοντα BS και το χρήστη u και $P_{v,n,i}$ η εκπεμπόμενη ισχύς του σταθμού βάσης i στο φέρον n που εξυπηρετεί το χρήστη $v \neq u$. Εκτός από την ομοδιαυλική παρεμβολή, το σήμα των χρηστών υποφέρει από AWGN θόρυβο, ο οποίος θεωρείται μηδενικής μέσης τιμής με διασπορά σ^2 . Τα $\mathbf{G}=[G_{u,n,k}]$, $\mathbf{I}=[I_{u,n,k}]$ και σ^2 αποτελούν τις πληροφορίες της κατάστασης του καναλιού (Channel State Information – CSI). Υποτίθεται ότι το σύστημα (διαχειριστής πόρων) έχει πλήρη γνώση των CSI.

Τα φέροντα αποδίδονται στους χρήστες σύμφωνα με μια τρισδιάστατη μήτρα $\mathbf{C}=[C_{u,n,k}]$. Στη μήτρα αυτή, $C_{u,n,k}=1$ σημαίνει ότι το φέρον n έχει εκχωρηθεί ή $C_{u,n,k}=0$ ότι δεν έχει εκχωρηθεί στο χρήστη u ο οποίος εξυπηρετείται από το BS k . Η εκχώρηση των χρηστών σε BSs δίδεται από τη μήτρα

8 Παρά τις επιταγές του προτύπου, θεωρήθηκε ότι το σύνολο των N φερόντων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μεταφορά δεδομένων. Δεν υπάρχουν επομένως μη χρησιμοποιούμενα κανάλια ή κανάλια - πιλότοι.

$\mathbf{A}=[A_{u,k}]$, όπου $A_{u,k}=1$ σημαίνει ότι ο χρήστης u εξυπηρετείται από την κυψέλη k ενώ $A_{u,k}=0$ σημαίνει ότι δεν εξυπηρετείται. Για τον ορισμό του τύπου διαμόρφωσης (bit allocation) χρησιμοποιείται η μήτρα $\mathbf{B}=[b_{u,n,k}]$. Στη μήτρα αυτή, $b_{u,n,k}$ παριστάνει τον αριθμό των bits ανά σύμβολο τα οποία θα “φορτωθούν” στο φέρον n , το οποίο έχει εκχωρηθεί στο χρήστη u και εξυπηρετείται από το BS k . Το bit loading είναι ισοδύναμο με τον ορισμό του επιπέδου διαμόρφωσης M ($b=\log_2 M$). Στην παρούσα ανάλυση, τα δυνατά σχήματα διαμόρφωσης είναι BPSK, QPSK, 16-QAM και 64QAM. Έτσι, το $b_{u,n,k}$ μπορεί να πάρει τιμές από το σύνολο $\{1,2,4,6\}$ (αντίστοιχα), ενώ επιπρόσθετα ορίζουμε τον ελάχιστο αριθμό bits ανά σύμβολο ως $b_{\min}=1$ και την αντίστοιχη μέγιστη τιμή $b_{\max}=6$. Τελευταίος πόρος του συστήματος ο οποίος πρέπει να παρασταθεί είναι η εκπεμπόμενη ισχύς. Αυτή παρίσταται από τη μήτρα $\mathbf{P}=[P_{u,n,k}]$, όπου το στοιχείο $P_{u,n,k}$ παριστάνει το επίπεδο της εκπεμπόμενης ισχύος η οποία εκπέμπεται από το σταθμό βάσης k στο φέρον n ώστε να εξυπηρετηθεί ο χρήστης u . Όταν για ένα συγκεκριμένο σταθμό βάσης \bar{k} και ένα συγκεκριμένο φέρον \bar{n} , ισχύει $P_{u,\bar{n},\bar{k}}=0$, $u=1,\dots,U$, συνεπάγεται ότι ο BS \bar{k} είναι ανενεργός στο φέρον \bar{n} . Αντίθετα, όταν ισχύει $P_{u,\bar{n},\bar{k}}>0$, $u=1,\dots,U$, αυτό συνεπάγεται ότι ο BS \bar{k} είναι ενεργός στο φέρον \bar{n} .

Το μελετούμενο σύστημα υποτίθεται σταθερό ευρυζωνικό ασύρματο σύστημα πρόσβασης (fixed BWA system), χωρίς (ή με χαμηλή) κινητικότητα. Σε μία τέτοια περίπτωση, η διασπορά Doppler μπορεί να αγνοηθεί. Επιπρόσθετα, το σύστημα θεωρείται τέλεια συγχρονισμένο, τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και στο πεδίο της συχνότητας.

4.2.2 Σχέσεις ελέγχου ισχύος

Για την επίτευξη επικοινωνίας με ένα προκαθορισμένο ρυθμό εσφαλμένων bit, για κάθε χρήστη u του συστήματος, ο οποίος επικοινωνεί με το σταθμό βάσης k χρησιμοποιώντας το φέρον n θα πρέπει να ισχύει η παρακάτω σχέση

$$SNIR_{u,n,k} = \frac{G_{u,n,k} P_{u,n,k}}{I_{u,n,k} + \sigma^2} \geq \gamma_{u,n,k}$$

Στην παραπάνω σχέση ως $\gamma_{u,n,k}$ δηλώνεται ο ελάχιστος απαιτούμενος λόγος σήματος προς παρεμβολή και θόρυβο (SNIR), ο οποίος είναι συνάρτηση του εφαρμοζόμενου τύπου διαμόρφωσης και του απαιτούμενου ρυθμού εσφαλμένων bit.

Αναδιατάσσοντας την παραπάνω σχέση, λαμβάνοντας υπόψη ότι

$I_{u,n,k} = \sum_{i \neq k, v \neq u} G_{u,n,i} P_{v,n,i}$, $u=1,\dots,U$, λαμβάνουμε ένα σύνολο από γραμμικές ανισότητες, οι οποίες θα πρέπει να πληρούνται για κάθε ενεργή κυψέλη k στο φέρον n , το οποίο έχει εκχωρηθεί στο χρήστη u ,

$$G_{u,n,k} P_{u,n,k} - \gamma_{u,n,k} \sum_{i \neq k, v \neq u} G_{u,n,i} P_{v,n,i} \geq \sigma^2 \gamma_{u,n,k}$$

Η σχέση αυτή μπορεί να γραφεί σε μητρική μορφή ως εξής

$$\mathbf{H}(n) \mathbf{p}(n) \geq \sigma^2 \boldsymbol{\gamma}(n), \quad n=1, \dots, N$$

όπου

$$\mathbf{H}(n) = \begin{bmatrix} G_{u_1, n, k_1} & -\gamma_{u_1, n, k_1} G_{u_1, n, k_2} & \cdots & -\gamma_{u_1, n, k_1} G_{u_1, n, k_\kappa} \\ -\gamma_{u_2, n, k_2} G_{u_2, n, k_1} & G_{u_2, n, k_2} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ -\gamma_{u_\kappa, n, k_\kappa} G_{u_\kappa, n, k_1} & \cdots & \cdots & G_{u_\kappa, n, k_\kappa} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{p}(n) = [p_{k_1}(n) \quad p_{k_2}(n) \quad \cdots \quad p_{k_\kappa}(n)]^T = [P_{u_1, n, k_1} \quad P_{u_2, n, k_2} \quad \cdots \quad P_{u_\kappa, n, k_\kappa}]^T$$

$$\boldsymbol{\gamma}(n) = [\gamma_{u_1, n, k_1} \quad \gamma_{u_2, n, k_2} \quad \cdots \quad \gamma_{u_\kappa, n, k_\kappa}]^T$$

Για την εξαγωγή της παραπάνω σχέσης έγινε η υπόθεση ότι έχουμε κ το πλήθος ομοδιαυλικές κυψέλες οι οποίες χρησιμοποιούν το αυτό φέρον n εξυπηρετώντας ισάριθμους χρήστες κ. Επίσης, όσον αφορά το συμβολισμό της παραπάνω σχέσης, ο χρήστης u_m εξυπηρετείται από την κυψέλη k_m χρησιμοποιώντας το φέρον n, όπου $m=1, \dots, \kappa$. Η μήτρα \mathbf{H} μπορεί να γραφεί σε πιο συμπαγή μορφή ως εξής

$$H_{ml}(n) = \begin{cases} G_{u_m, n, k_l} & \text{όταν } m=l \\ -\gamma_{u_m, n, k_m} G_{u_m, n, k_l} & \text{όταν } m \neq l \end{cases}, \quad m=1, \dots, \kappa, \quad l=1, \dots, \kappa$$

Επειδή ενδιαφερόμαστε μόνον για πλήρως θετικά (all-positive) διανύσματα \mathbf{p} της εκπεμπόμενης ισχύος, μία τέτοια all-positive λύση χαρακτηρίζεται ως εφικτή (feasible). Για να βρούμε μια εφικτή λύση του ως άνω συνόλου γραμμικών ανισοτήτων, είναι αρκετό να επιλύσουμε το αντίστοιχο γραμμικό σύστημα εξισώσεων, χρησιμοποιώντας κάποια μέθοδο επίλυσης γραμμικών συστημάτων (πχ απαλοιφή Gauss) [36].

$$\mathbf{H}\mathbf{p} = \sigma^2 \boldsymbol{\gamma}$$

Αν η λύση του γραμμικού αυτού συστήματος είναι all-positive, τότε ικανοποιεί το σύνολο των γραμμικών ανισοτήτων. Διαφορετικά, δεν υπάρχει feasible λύση του συστήματος, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι οι εν λόγω ομοδιαυλικοί χρήστες δε μπορούν να χρησιμοποιήσουν το αυτό φέρον n, επειδή η ομοδιαυλική παρεμβολή θα είναι υπερβολικά μεγάλη και το SNIR τους κάτω από το επιθυμητό επίπεδο [37].

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να οριστεί το κατώφλι του λόγου σήματος προς θόρυβο και παρεμβολή (SNIR) $\gamma_{u,n,k}$

$$\gamma_{u,n,k} = \Gamma_{u,n,k} (2^{b_{u,n,k}} - 1)$$

όπου, υποθέτοντας μη κωδικοποιημένο σύστημα, το περιθώριο SNIR (SNIR gap) $\Gamma_{u,n,k}$ ορίζεται χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση Marcum-Q ως ([38])

$$\Gamma_{u,n,k} = \frac{1}{3} \left[Q^{-1} \left(\frac{Pe_u}{4} \right) \right]^2$$

όπου Pe_u είναι η πιθανότητα εσφαλμένου bit που απαιτεί ο χρήστης u και $b_{u,n,k}$ είναι το πλήθος των bit

ανά σύμβολο που “φορτώνονται” στο φέρον n , το οποίο έχει εκχωρηθεί στο χρήστη u , που εξυπηρετείται από την κυψέλη k [39].

4.2.3 Ορισμός του προβλήματος διαχείρισης πόρων

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται δύο προβλήματα εκχώρησης πόρων, τα οποία αντιστοιχούν στις δύο θεωρήσεις της κάτω ζεύξης ενός κυψελωτού OFDMA συστήματος, αφενός μεν στην περίπτωση σταθερού ρυθμού (constant bit rate – CBR) αφετέρου δε στην περίπτωση μεταβλητού ρυθμού (variable bit rate – VBR). Επιπρόσθετα, δίνονται οι τροποποιήσεις που θα πρέπει να γίνουν όταν επιχειρείται μελέτη της άνω ζεύξης του συστήματος.

4.2.3.1 Σενάριο CBR

Σκοπός του αλγορίθμου εκχώρησης πόρων για τη CBR ζεύξη καθόδου ενός κυψελωτού OFDMA συστήματος είναι να καθοριστούν η εκχώρηση καναλιών (μήτρα \mathbf{C}), το εκχωρούμενο σχήμα διαμόρφωσης (μήτρα \mathbf{B}) και η εκχωρούμενη εκπεμπόμενη ισχύς (μήτρα \mathbf{P}), υπό την προϋπόθεση ότι καλύπτονται οι απαιτήσεις των χρηστών σε ρυθμό (ταχύτητα της ζεύξης) με κόστος την ελάχιστη συνολικά εκπεμπόμενη ισχύ. Το CBR πρόβλημα μπορεί να γραφεί ως εξής

$$\min \sum_{u=1}^U \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K C_{u,n,k} P_{u,n,k}$$

υπό τις συνθήκες

$$R_u \leq oR_u = \frac{1}{T_e} \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K C_{u,n,k} b_{u,n,k}, \quad u=1, \dots, U$$

$$P_{max} \geq oP_k^{total} = \sum_{u=1}^U \sum_{n=1}^N C_{u,n,k} P_{u,n,k}, \quad k=1, \dots, K$$

$$\sum_{u=1}^U C_{u,n,k} \leq 1, \quad n=1, \dots, N, \quad k=1, \dots, K$$

$$C_{u,n,k} \in \{0,1\}, \quad u=1, \dots, U, \quad n=1, \dots, N, \quad k=1, \dots, K$$

όπου T_e η αξιοποιήσιμη χρονική διάρκεια του OFDM συμβόλου ($T_e = \frac{1}{\Delta f} = \frac{1}{BW/N} = \frac{N}{BW}$). Η πρώτη συνθήκη δηλώνει ότι ο προσφερόμενος ρυθμός δεδομένων oR_u δε θα πρέπει να είναι μικρότερος από τον αιτούμενο R_u . Η δεύτερη συνθήκη επιβάλλει η συνολική εκπεμπόμενη ισχύς κάθε κυψέλης oP_k^{total} να είναι μικρότερη από τη μέγιστη εκπεμπόμενη ισχύ της P_{max} . Η τρίτη συνθήκη, σύμφωνα με τη σύμβαση που εκφράζει η τέταρτη, αποτελεί μαθηματική έκφραση του περιορισμού ότι κάθε κανάλι μπορεί να εκχωρηθεί μόνον σε ένα χρήστη μέσα στην ίδια κυψέλη [40][35].

Το παραπάνω πρόβλημα βελτιστοποίησης αποτελεί ένα τρισδιάστατο μη γραμμικό και συνδυαστικό πρόβλημα εκχώρησης. Το πρόβλημα αυτό δεν είναι δυνατόν να λυθεί ως κλασικό πρόβλημα ανάθεσης (assignment) ή συνδυασμού (matching) επειδή οι είσοδοι στη μήτρα κόστους $\mathbf{P}=[P_{u,n,k}]$ είναι αμοιβαία εξαρτώμενοι. Κάθε στοιχείο $P_{u,n,k}$ για μια συγκεκριμένη κυψέλη k εξαρτάται από τις εκχωρή-

σεις που έχουν γίνει για όλες τις ομοδιαυλικές κυψέλες $i \neq k$, $i=1, \dots, K$ εξαιτίας της ομοδιαυλικής παρεμβολής [15][41].

4.2.3.2 Σενάριο VBR

Στην περίπτωση που θεωρηθεί VBR κάτω ζεύξη, σκοπός του αλγορίθμου εκχώρησης πόρων είναι να καθοριστούν οι μήτρες εκχώρησης $C=[C_{u,n,k}]$, $B=[b_{u,n,k}]$ και $P=[P_{u,n,k}]$ έτσι ώστε ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων που θα επιτευχθεί σε ολόκληρο το σύστημα να είναι ο μέγιστος δυνατός υπό την προϋπόθεση κάθε χρήστης να αποκτά τον απαιτούμενο ελάχιστο ρυθμό μετάδοσης και ότι κανένας σταθμός βάσης δεν καλείται να εκπέμψει με ισχύ μεγαλύτερη της διαθέσιμης. Το VBR πρόβλημα εκχώρησης μπορεί να γραφεί ως εξής

$$\max \sum_{u=1}^U \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K C_{u,n,k} b_{u,n,k}$$

υπό τις συνθήκες

$$R_u \leq \rho R_u = \frac{1}{T_e} \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K C_{u,n,k} b_{u,n,k}, \quad u=1, \dots, U$$

$$P_{max} \geq \rho P_k^{total} = \sum_{u=1}^U \sum_{n=1}^N C_{u,n,k} P_{u,n,k}, \quad k=1, \dots, K$$

$$\sum_{u=1}^U C_{u,n,k} \leq 1, \quad n=1, \dots, N, \quad k=1, \dots, K$$

$$C_{u,n,k} \in \{0,1\}, \quad u=1, \dots, U, \quad n=1, \dots, N, \quad k=1, \dots, K$$

Η σημασία των παραπάνω περιορισμών είναι ίδια όπως και στο CBR πρόβλημα

4.2.3.3 Τροποποίηση για τη ζεύξη ανόδου

Για την εφαρμογή των παραπάνω προβλημάτων στην περίπτωση της άνω ζεύξης, οι περιορισμοί ισχύος που ετέθησαν για τους σταθμούς βάσης θα πρέπει να αντικατασταθούν από τη σχέση

$$P_u^{max} \geq \rho P_u^{total} = \sum_{n=1}^N C_{u,n,k} P_{u,n,k}, \quad u=1, \dots, U, \quad k=1, \dots, K$$

η οποία εκφράζει τον περιορισμό ισχύος του τερματικού εξοπλισμού των χρηστών [15].

Στη συνέχεια της παρουσίασης εξετάζεται το CBR πρόβλημα της ζεύξης καθόδου (εφεξής θα αναφέρεται ως RRM πρόβλημα), του οποίου επιχειρείται επίλυση με χρήση υποβέλτιστων ευριστικών αλγορίθμων. Με κάποιες μικρές τροποποιήσεις, η προσέγγιση που παρουσιάζεται μπορεί να εφαρμοστεί και στο VBR πρόβλημα αλλά και στη ζεύξη ανόδου του συστήματος.

Κεφάλαιο 5ο

Αλγόριθμοι RRM

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται ένα σύνολο αλγορίθμων που επιλύουν το πρόβλημα της διαχείρισης ασυρμάτων πόρων για ένα πολυκυψελωτό OFDMA σύστημα, όπως αυτό παρουσιάστηκε και αναπτύχθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Συνολικά παρουσιάζονται πέντε διαφορετικές προσεγγίσεις στο πρόβλημα, όπου και αναλύεται ο αλγόριθμος καθώς και τα πλεονεκτήματα ή και μειονεκτήματα που αυτός εμφανίζει.

5.1 Προσαρμοστικός Αλγόριθμος RRM

5.1.1 Σχεδιαστικές υποθέσεις

Εξετάζοντας το RRM πρόβλημα, όπως αυτό ετέθη παραπάνω, παρατηρούμε ότι απώτερος σκοπός είναι η ελαχιστοποίηση της συνολικής εκπεμπόμενης ισχύος του συστήματος. Ο στόχος αυτός είναι γενικός αλλά και δίκαιος αφού απευθύνεται στη συνολική απόδοση του συστήματος. Πάρα ταύτα, ένας αλγόριθμος που θα επιχειρούσε να βρει μια βέλτιστη λύση για το πρόβλημα θα ήταν δύσκολο να υλοποιηθεί κι αυτό γιατί ένα κυψελωτό σύστημα συνήθως αποτελείται από έναν αριθμό ανεξάρτητων κυψελών, κάθε μία από τις οποίες εξυπηρετεί ένα πλήθος χρηστών, με διαφορετικά χαρακτηριστικά κίνησης και διαφορετικές συνθήκες καναλιών. Οι χρήστες αυτοί μπορούν να εισέρχονται και να εξέρχονται του συστήματος και επιπρόσθετα οι συνθήκες καναλιών και κίνησης μπορούν να αλλάζουν με την πάροδο του χρόνου.

Τίθεται έτσι το ερώτημα του τι μπορεί να προκαλεί την επίλυση του RRM προβλήματος αλλά και πόσο συχνά θα πρέπει να εκτελείται ο RRM αλγόριθμος του συστήματος. Προφανώς θα θέλαμε να έχουμε ένα σύστημα το οποίο να προσαρμόζεται στις μεταβαλλόμενες συνθήκες του περιβάλλοντος. Είναι εύλογο να υποθέσουμε ότι σε ένα κυψελωτό σύστημα όλες οι μεταβολές σχετίζονται με ή προκαλούνται από τους χρήστες. Μετά την προσθήκη του πρώτου χρήστη, το σύστημα θα πρέπει να διαχειρίζεται τις αλλαγές που σχετίζονται με τους ήδη υπάρχοντες χρήστες αλλά και τους νέους εκείνους χρήστες που προσπαθούν να εισέλθουν στο σύστημα.

Ένα ακόμα ενδιαφέρον ερώτημα που τίθεται είναι εάν κάθε φορά που προκαλείται η επίλυση του RRM αλγορίθμου του συστήματος θα πρέπει να γίνεται μια συνολική αναδιανομή των πόρων του συστήματος. Ένα σύστημα εκχώρησης πόρων που θα έπρεπε να προσαρμόζεται σε κάθε αλλαγή των συνθηκών καναλιού/κίνησης με την ανακατανομή όλων των πόρων του συστήματος θα ήταν υπερβολικά περίπλοκο από την πλευρά της υλοποίησης και ως εκ τούτου μη πρακτικό για την αντιμετώπιση των πραγματικών συνθηκών. Στον αντίποδα, θα μπορούσαμε να υποθέσουμε ένα σύστημα όπου η (ανα)κατανομή πόρων εμπλέκει μόνο τους πόρους του χρήστη εκείνου που προσπαθεί να αποκτήσει πρόσβαση στο σύστημα. Στην περίπτωση αυτή, όμως, η εκχώρηση πόρων στον νέο αυτό χρήστη θα μπορούσε να προκαλέσει υποβάθμιση της προσφερόμενης υπηρεσίας για τους ήδη υπάρχοντες χρήστες του συστήματος, εξαιτίας της ομοδιαυλικής παρεμβολής. Αυτό οδηγεί στην ανάγκη ύπαρξης ενός προσαρμοστικού μηχανισμού εκχώρησης πόρων, που θα λαμβάνει υπόψη τόσο τις απαιτήσεις των νέων χρηστών όσο και αυτές των ήδη υπαρχόντων.

Λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω παρατηρήσεις στο σχεδιασμό του RRM αλγορίθμου που παρουσιάζεται στη συνέχεια, ακολουθούνται οι παρακάτω γενικές κατευθυντήριες γραμμές, ώστε να αποκομίσουμε μια λύση που θα ακολουθεί τη μέση οδό μεταξύ των δύο παραπάνω ακραίων σεναρίων, της συνολικής ανακατανομής πόρων και της μοναδικής κατανομής,

- Η (επαν)εκχώρηση συγκεκριμένων πόρων του συστήματος (αλλά όχι στο σύνολό τους) εκκινείται από την αλλαγή των συνθηκών καναλιού/κίνησης ενός χρήστη. Η μεταβολή αυτή μπορεί να προκληθεί από την άφιξη ενός νέου χρήστη (ή την αποχώρηση ενός υπάρχοντος).
- Ένας χρήστης που πυροδοτεί τον RRM αλγόριθμο, προκαλεί επανεκχώρηση των πόρων της κυψέλης από την οποία θα εξυπηρετηθεί.
- Οι πόροι όλων των υπολοίπων κυψελών εκτός της προαναφερθείσας κυψέλης που θα εξυπηρετήσει το νέο χρήστη, δε μεταβάλλονται εκτός από την εκπεμπόμενη ισχύ. Η εκπεμπόμενη ισχύς διορθώνεται έτσι ώστε να διατηρηθεί η ποιότητα των ομοδιαυλικών ζεύξεων (τόσο των υφιστάμενων όσο και των νέων). Επειδή κύριο μέλημα του RRM αλγορίθμου είναι η προστασία του QoS των ήδη εισαχθέντων στο σύστημα χρηστών, σε περίπτωση που δε μπορεί να βρεθεί μια λύση για την ισχύ των ομοδιαυλικών κυψελών, ο νέος χρήστης θα πρέπει να απορριφθεί.

Στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου παρουσιάζεται ένας υποβέλτιστος RRM αλγόριθμος για ένα κυψελωτό OFDMA σύστημα, με επαναχρησιμοποίηση φερόντων μεταξύ των διαφορετικών κυψελών. Ο αλγόριθμος αυτός ακολουθεί τις παραπάνω γενικές κατευθυντήριες και δίνει λύση στο πρόβλημα της αμοιβαίας εξάρτησης της ισχύος των ομοδιαυλικών κυψελών, βασική δυσκολία του προβλήματος RRM που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο [15].

5.1.2 Κύριος αλγόριθμος RRM

Ο κύριος αλγόριθμος διαχείρισης ασυρμάτων πόρων για ένα κυψελωτό OFDMA σύστημα αποτελείται από τρία βήματα σε καθένα από τα οποία εκχωρείται διαφορετικό είδος πόρων του συστήματος. Τα τρία αυτά βήματα του αλγορίθμου είναι τα εξής,

- Βήμα 1^ο: Ο αλγόριθμος εκχώρησης του χρήστη σε σταθμό βάσης βρίσκει μια υποψήφια κυψέλη για το νέο αυτό χρήστη. Αυτό γίνεται καθορίζοντας μια λίστα προτιμητέων κυψελών, όπου η πρώτη κυψέλη στη λίστα είναι η καλύτερη υποψήφια ενώ η τελευταία η χειρότερη. Επίσης, στο βήμα αυτό ελέγχεται η αναγκαία συνθήκη για την αποδοχή του χρήστη στην εξεταζόμενη κυψέλη. Η αναγκαία αυτή συνθήκη είναι απλά η εξακρίβωση για τον εάν ο συνολικός αιτούμενος ρυθμός δεδομένων, ο οποίος εξαρτάται αφενός από τον νεοεισερχόμενο χρήστη αφετέρου από τους ήδη υπάρχοντες χρήστες στην κυψέλη, δεν υπερβαίνει το συνολικό ρυθμό που μπορεί να προσφερθεί, χρησιμοποιώντας τα N φέροντα που έχει στη διάθεσή της η εν λόγω κυψέλη. Αν η αναγκαία αυτή συνθήκη δεν πληρείται, ο αλγόριθμος προχωρά στην επόμενη κυψέλη της λίστας έως ότου ελεγχθούν συνολικά $K_{checked}^{max}$ κυψέλες, μια ποσότητα που ορίζει ο διαχειριστής του συστήματος. Εάν δε βρεθεί καμία κυψέλη από τις εξετασθείσες που να πληροί την αναγκαία συνθήκη, τότε ο χρήστης απορρίπτεται. Η προσέγγιση αυτή αναφέρεται ως προσαρμοστική επιλογή κυψέλης (Adaptive Cell Selection – ACS). Εξαιτίας της

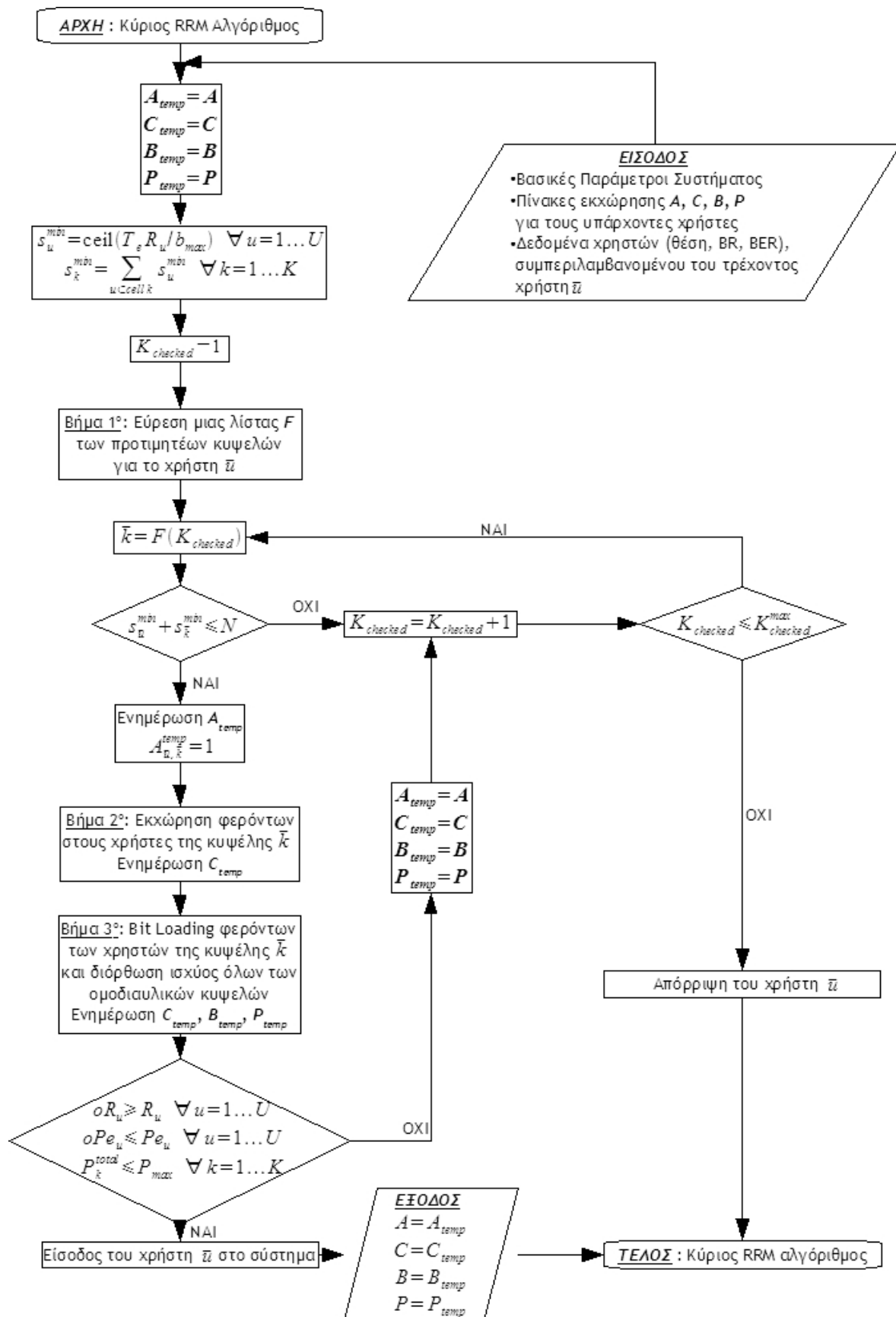
ACS, εάν μια υποψήφια κυψέλη δεν είναι σε θέση να εξυπηρετήσει ένα χρήστη, τότε γίνεται προσπάθεια να εξυπηρετηθεί από κάποια άλλη κυψέλη της λίστας των προτιμώμενων κυψελών. Κατ' αυτό τον τρόπο αυξάνονται οι πιθανότητες αποδοχής του νέου αυτού χρήστη.

- Βήμα 2^ο: Ο αλγόριθμος εκχώρησης φερόντων στο χρήστη εκχωρεί φέροντα στο χρήστη εντός μιας υποψήφιας κυψέλης για την οποία η αναγκαία συνθήκη έχει ικανοποιηθεί από το προηγούμενο βήμα. Εδώ, τα φέροντα εκχωρούνται στο νέο μας χρήστη με ταυτόχρονη επανεκχώρηση των φερόντων όλων των ήδη ενεργών χρηστών της κυψέλης. Αυτό γίνεται για να εκμεταλλευτούμε το διαφορετικό κανονικοποιημένο κέρδος ενός φέροντος για τους διάφορους χρήστες της κυψέλης. Η διαφορετική αυτή αντίληψη των χρηστών ως προς την ποιότητα του καναλιού οφείλεται στα φαινόμενα διάδοσης που αναφέρθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο.

- Βήμα 3^ο: Ο αλγόριθμος εκχώρησης bit ανά φέρον και ελέγχου της εκπεμπόμενης ισχύος καθορίζει για κάθε χρήστη στην υποψήφια κυψέλη και για κάθε φέρον που έχει εκχωρηθεί στον καθένα από αυτούς στο προηγούμενο βήμα τον τύπο διαμόρφωσης. Επίσης, για κάθε χρήστη της υποψήφιας αυτής κυψέλης αλλά και για κάθε ομοδιαυλική κυψέλη καθορίζεται η εκπεμπόμενη ισχύς, επιλύοντας το γραμμικό σύστημα, όπως αναλύθηκε προηγούμενα, για κάθε φέρον.

Έπειτα από τα παραπάνω, ο αλγόριθμος ελέγχει αν πληρούνται οι προϋποθέσεις του QoS που έχουν θέσει οι χρήστες του συστήματος. Αυτή αποτελεί την ικανή συνθήκη αποδοχής του χρήστη στο σύστημα. Αν η ικανή συνθήκη πληρείται, τότε ο χρήστης εισάγεται στο σύστημα και πραγματοποιείται η ανακατανομή των πόρων. Διαφορετικά, ο κύριος αλγόριθμος δίνει την ευκαιρία σε κάποια άλλη κυψέλη από τη λίστα των υποψηφίων κυψελών να προσπαθήσει να εξυπηρετήσει το νέο αυτό χρήστη, εκτελώντας εκ νέου τα τρία παραπάνω βήματα. Αν η ικανή συνθήκη δεν μπορέσει να ικανοποιηθεί, τότε ο χρήστης απορρίπτεται και δεν πραγματοποιείται ανακατανομή πόρων στο σύστημα, δηλαδή διατηρείται η εκχώρηση των πόρων που προϋπήρχε της προσπάθειας εισαγωγής του χρήστη[35].

Παρακάτω δίνεται μια διαγραμματική απεικόνιση του αλγορίθμου που περιγράφηκε (Εικόνα 5.1).



Εικόνα 5.1: Κύρια ρουτίνα του Προσαρμοστικού RRM αλγορίθμου

5.1.2.1 Βήμα 1^ο: Εκχώρηση χρήστη σε σταθμό βάσης

Στόχος του πρώτου βήματος του RRM αλγορίθμου είναι να προτείνει την καλύτερη κυψέλη (σταθμό βάσης) που θα πρέπει να εξυπηρετήσει το νέο χρήστη. Αυτό επιτυγχάνεται δημιουργώντας μια λίστα F των προτιμητέων κυψελών, όπου οι κυψέλες στη λίστα αυτή ταξινομούνται σε φθίνουσα σειρά σύμφωνα με τη μέση ποιότητα του καναλιού όπως την αντιλαμβάνεται ο χρήστης u . Η λίστα των προτιμώμενων κυψελών μπορεί να δοθεί ως

$$F_j = \arg \operatorname{sort}_k \bar{T}_{u,k}$$

όπου $\bar{T}_{u,k}$ είναι το μέσο (ως προς τα φέροντα) κανονικοποιημένο κέρδος καναλιού για το χρήστη u στην κυψέλη k και ορίζεται ως

$$\bar{T}_{u,k} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N T_{u,n,k}$$

όπου $T_{u,n,k}$ είναι το κανονικοποιημένο κέρδος καναλιού, το οποίο ορίζεται ως

$$T_{u,n,k} = \frac{G_{u,n,k}}{(I_{u,n,k} + \sigma^2) \Gamma_{u,n,k}}$$

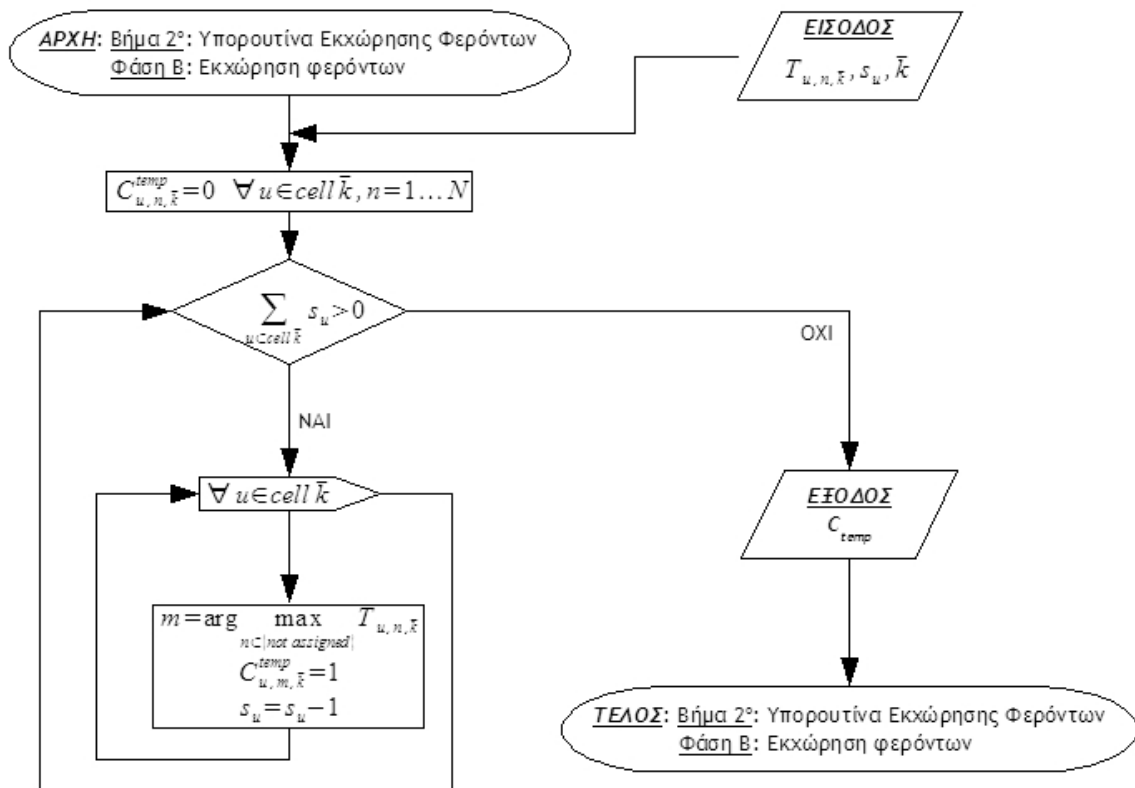
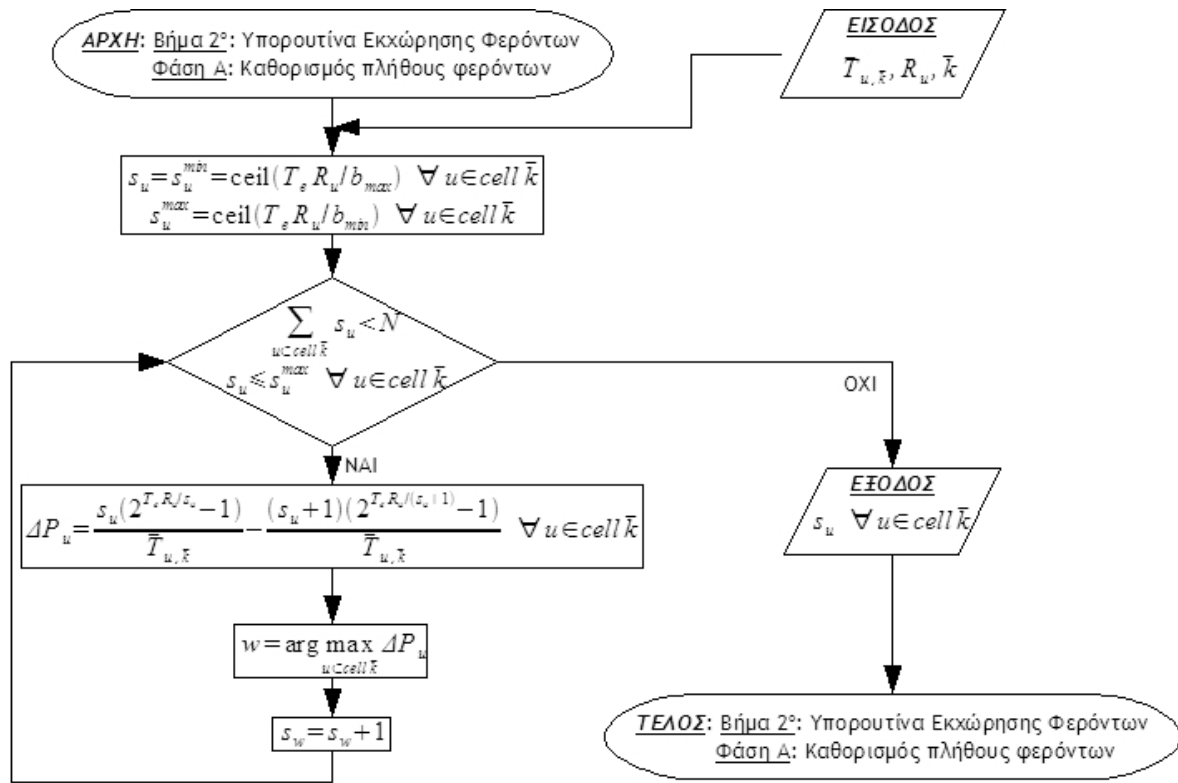
Από την τελευταία σχέση γίνεται κατανοητό ότι το κανονικοποιημένο κέρδος καναλιού λαμβάνει υπόψη όχι μόνο το κέρδος του καναλιού αλλά και την παρεμβολή και έτσι είναι κατάλληλο για χρήση σε κυψελωτά συστήματα, παρουσία ομοδιαυλικής παρεμβολής [15].

5.1.2.2 Βήμα 2^ο: Εκχώρηση φερόντων σε χρήστες

Έχοντας βρει την καλύτερη κυψέλη \bar{k} για το χρήστη \bar{u} , μπορούμε να περάσουμε στο δεύτερο βήμα, όπου τα φέροντα εκχωρούνται στο χρήστη \bar{u} . Όπως έχει ήδη ειπωθεί, η εκχώρηση φερόντων στο χρήστη πραγματοποιείται με ταυτόχρονη ανακατανομή των φερόντων σε όλους τους ήδη υπάρχοντες χρήστες της κυψέλης. Αυτή η ανακατανομή του συνόλου των φερόντων (δεδομένου ότι έχουμε συντελεστή επαναχρησιμοποίησης ένα) στο σύνολο των χρηστών μιας κυψέλης επιτρέπει στον αλγόριθμο να αξιοποιήσει τη διαφορετική ποιότητα των φερόντων, όπως την αντιλαμβάνονται οι διάφοροι χρήστες της κυψέλης (multiuser diversity) μέσω του κανονικοποιημένου κέρδους καναλιού, γεγονός που οδηγεί σε αποδοτικότερη διανομή των πόρων του συστήματος. Η έξοδος αυτού του δεύτερου βήματος του RRM αλγορίθμου είναι η μήτρα εκχώρησης καναλιών $[C_{u,n,k}^{temp}]$, η οποία χαρακτηρίζεται ως προσωρινή (temp) αφού θα λάβει την τελική μορφή μετά το bit loading των καναλιών που θα λάβει χώρα στο τρίτο βήμα και επίσης αντικαταστήσει την υφιστάμενη μήτρα εκχώρησης καναλιών, υπό την προϋπόθεση ότι ο νέος αυτός χρήστης θα εισαχθεί τελικώς συστήματος, αφού εκπληρωθεί η ικανή συνθήκη, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Το βήμα 2 αποτελείται από τις ακόλουθες δύο φάσεις,

- Φάση Α, (Εικόνα 5.2) όπου σε κάθε χρήστη εκχωρείται κατ' αρχήν ο ελάχιστος αριθμός φερόντων για να καλυφθούν οι ανάγκες του σε bit rate και κατόπιν, τα εναπομείναντα φέροντα διανέμονται στους χρήστες με κριτήριο την ελάχιστη εκπεμπόμενη ισχύ.

- Φάση Β, (Εικόνα 5.2) όπου γίνεται η εκχώρηση των καναλιών σύμφωνα με ένα greedy αλγόριθμο με κριτήριο το κανονικοποιημένο κέρδος των καναλιών [41][35].
Στη συνέχεια αναλύονται περαιτέρω οι δύο φάσεις αυτού του βήματος.



Εικόνα 5.2: Υπορουτίνα Εκχώρησης Φερόντων του Προσαρμοστικού RRM Αλγορίθμου

Κατά τη Φάση A του αλγορίθμου εκχώρησης φερόντων, καθορίζεται το πλήθος των φερόντων που θα εκχωρηθούν στους χρήστες της εξεταζόμενης κυψέλης. Συγκεκριμένα, σε κάθε χρήστη εκχωρείται αριθμός καναλιών ο οποίος θα μπορούσε να καλύψει τις ανάγκες του σε ρυθμό δεδομένων χρησιμοποιώντας το υψηλότερο επίπεδο διαμόρφωσης $s_u^{min} = \text{ceil}(T_e R_u / b_{max})$ αλλά υπάρχει ταυτόχρονα πρόνοια ώστε το πλήθος των φερόντων να είναι μικρότερο από το μέγιστο πλήθος φερόντων που θα απαιτούνταν, στην περίπτωση που χρησιμοποιούνταν το ελάχιστο επίπεδο διαμόρφωσης $s_u^{max} = \text{ceil}(T_e R_u / b_{min})$. Έτσι, αν s_u το πλήθος των καναλιών που τελικώς αποδίδεται στο χρήστη θα ισχύει ότι $s_u^{min} \leq s_u \leq s_u^{max}$. Στην περίπτωση αυτή θα μπορούσε να εφαρμοστεί ένας αλγόριθμος που θα διένειμε όλα τα φέροντα τις κυψέλης στους χρήστες, χωρίς να τίθεται ένα άνω όριο στο πλήθος των καναλιών που θα μπορούσε να χρησιμοποιήσει κάθε χρήστης. Μια τέτοια προσέγγιση όμως δεν είναι αποδοτική στην περίπτωση ενός πολυκυψελωτού συστήματος, αφού κάποια φέροντα θα χρησιμοποιούνταν χωρίς αυτό να είναι απαραίτητο, προκαλώντας έτσι αύξηση της ομοδιαυλικής παρεμβολής στις υπόλοιπες κυψέλες του συστήματος. Το σκεπτικό μας είναι πάντα να εξυπηρετήσουμε το νέο χρήστη αλλά όχι εις βάρος της απόδοσης του υπόλοιπου συστήματος.

Έχοντας ως δεδομένο ότι ο χρήστης πρέπει να πάρει τουλάχιστον τον ελάχιστο αριθμό καναλιών που απαιτεί το bit rate του, στη συνέχεια, αν υπάρχουν διαθέσιμα φέροντα στην κυψέλη και εφόσον ο χρήστης δεν έχει ξεπεράσει το μέγιστο πλήθος των φερόντων του, τότε ο αλγόριθμος αποδίδει ένα ακόμα φέρον σ' εκείνο το χρήστη για τον οποίο η εκχώρηση ενός ακόμα καναλιού οδηγεί στη μέγιστη μείωση της ισχύος. Η μείωση αυτή της ισχύος από την εκχώρηση ενός ακόμα καναλιού στο χρήστη u ορίζεται ως εξής

$$\Delta P_u = \frac{s_u (2^{T_e R_u / s_u} - 1)}{\bar{T}_{u, \bar{k}}} - \frac{(s_u + 1) (2^{T_e R_u / (s_u + 1)} - 1)}{\bar{T}_{u, \bar{k}}}$$

Αφού έχουμε ορίσει το πλήθος των φερόντων για κάθε χρήστη της κυψέλης, ο αλγόριθμος περνάει στη Φάση B, όπου επιλέγονται συγκεκριμένα φέροντα για να αποδοθούν στους χρήστες. Η επιλογή γίνεται σύμφωνα με το κανονικοποιημένο κέρδος του καναλιού, όπου κάθε χρήστης επιλέγει να πάρει το βέλτιστο ως προς το κανονικοποιημένο κέρδος φέρον. Το σκεπτικό αυτό βασίζεται στο ότι οι χρήστες που αντιμετωπίζουν καλύτερες συνθήκες καναλιού απαιτούν χαμηλότερη ισχύ εκπομπής και επίσης προκαλούν χαμηλότερη ομοδιαυλική παρεμβολή. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι η ανάθεση των φερόντων μπορεί να πραγματοποιηθεί βέλτιστα με τον Hungarian αλγόριθμο [42], αλλά στην περιπτώσή μας, επιλέγεται ένας υποβέλτιστος αλγόριθμος, ο οποίος μειώνει το χρόνο επίλυσης του προβλήματος.

Μετά την εφαρμογή του δεύτερου αυτού βήματος, είναι γνωστοί οι πίνακες C_{temp} και A_{temp} . Όπως έχει ήδη ειπωθεί, χαρακτηρίζονται ως προσωρινοί (temp) έως ότου ληφθεί η απόφαση για την εφαρμογή (ή μη) τους μετά την εκτέλεση του τρίτου βήματος και την εκπλήρωση της ικανής συνθήκης για

αποδοχή [15].

5.1.2.3 Βήμα 3^ο: Ανά φέρον bit loading και έλεγχος ισχύος

Στο σημείο αυτό, όπου πλέον οι χρήστες έχουν προσωρινά εκχωρηθεί σε κυψέλες (A_{temp}) και τα κανάλια έχουν, επίσης προσωρινά, εκχωρηθεί στους χρήστες (C_{temp}), ο αλγόριθμος μπορεί να εκτελέσει την τελευταία λειτουργία εκχώρησης πόρων για ένα δεδομένο χρήστη u , η οποία συνίσταται στην επιλογή του επιπέδου διαμόρφωσης και την προσαρμογή της εκπεμπόμενης ισχύος για κάθε ένα από τα φέροντα που έχουν εκχωρηθεί στον εν λόγω χρήστη. Η τελευταία αυτή λειτουργία πραγματοποιείται με ταυτόχρονη διόρθωση της εκπεμπόμενης ισχύος όλων των ομοδιαυλικών χρηστών, οι οποίοι ήδη έχουν εισαχθεί στο σύστημα, με σκοπό να διατηρηθεί η ποιότητα υπηρεσίας των υφιστάμενων ζεύξεων. Το τελευταίο αυτό βήμα του RRM αλγορίθμου στην πραγματικότητα εκτελείται για κάθε χρήστη της εξεταζόμενης κυψέλης ξεχωριστά, αποδίδοντας ένα συγκεκριμένο επίπεδο διαμόρφωσης σε κάθε φέρον που του έχει ήδη εκχωρηθεί, παρουσία των ομοδιαυλικών παρεμβολών που προκύπτουν από την εκπομπή των υπολοίπων κυψελών του συστήματος.

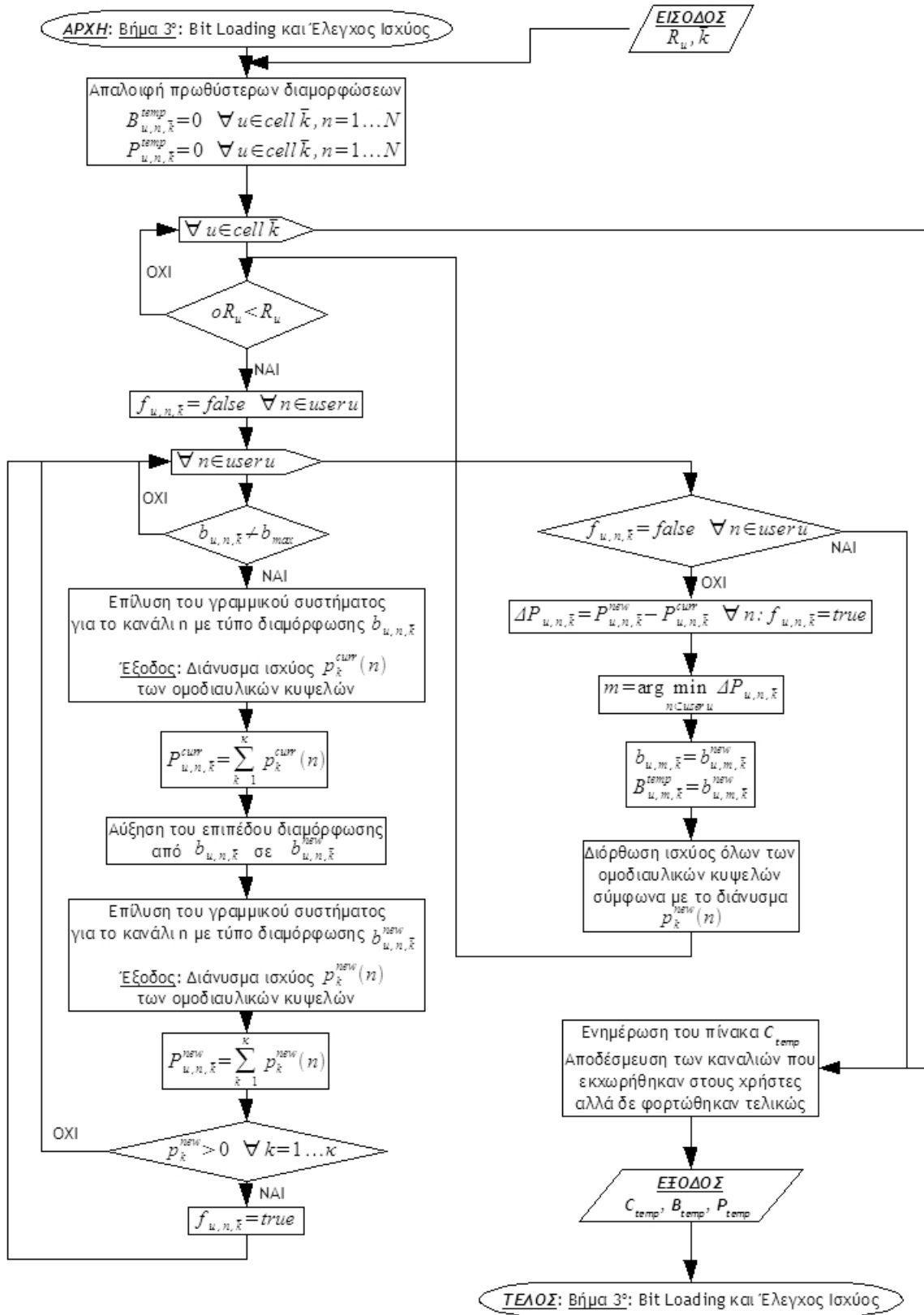
Για κάθε χρήστη u της εξεταζόμενης κυψέλης \bar{k} , ο αλγόριθμος αναζητά το πλέον οικονομικό (από τη σκοπιά της εκπεμπόμενης ισχύος) φέρον m , το οποίο επιλέγεται από το σύνολο των φερόντων που έχουν εκχωρηθεί στον εν λόγω χρήστη, για να αυξήσει το επίπεδο διαμόρφωσης κατά μία τάξη. Αύξηση του επιπέδου διαμόρφωσης ισοδυναμεί με αύξηση του αριθμού των bits από $b_{u,n,\bar{k}}$ σε $b_{u,n,\bar{k}}^{new}$. Όταν βρεθεί ένα τέτοιο ελαχίστου κόστους φέρον, το οποίο υποδεικνύεται με $n=m$, ο αριθμός των bits αυξάνεται σε $b_{u,m,\bar{k}}^{new}$ και η κατάλληλη εκπεμπόμενη ισχύς αποδίδεται σε αυτό το φέρον σύμφωνα με την τιμή του $P_{u,m,\bar{k}}^{new}$ αλλά και σε όλες τις ομοδιαυλικές κυψέλες, οι οποίες χρησιμοποιούν το φέρον m ώστε να προστατευθεί το QoS των ζεύξεων. Όταν δεν είναι πλέον δυνατό να αυξηθεί ο αριθμός των bits που φορτώνονται σε ένα φέρον n , λόγω του ότι, για παράδειγμα, έχουμε φτάσει στο μέγιστο επίπεδο διαμόρφωσης b_{max} , είτε διότι δεν υπάρχει εφικτό (feasible) διάνυσμα εκπεμπόμενης ισχύος $\mathbf{p}(n)$ που να ικανοποιεί το QoS όλων των ομοδιαυλικών στο φέρον n ζεύξεων, τότε η συγκεκριμένη τριάδα (u, n, \bar{k}) χαρακτηρίζεται ως μη εφικτή (non feasible) και δε λογίζεται ως υποψήφια για την τελική απόδοση των διαμορφώσεων. Αν όλες οι τριάδες (u, n, \bar{k}) (δηλαδή όλα τα φέροντα n που έχουν αποδοθεί στο χρήστη u στην κυψέλη \bar{k}) δεν είναι εφικτές, τότε το σύστημα χαρακτηρίζεται ως κορεσμένο, το οποίο οδηγεί σε τερματισμό του αλγορίθμου του bit loading και υποδεικνύει ότι είτε οι QoS απαιτήσεις του νέου χρήστη δε μπορούν να ικανοποιηθούν είτε ότι το QoS των υπαρχόντων χρηστών θα πρέπει να υποβαθμιστεί για να εξυπηρετηθεί ο νέος χρήστης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα ο νέος αυτός χρήστης να αποκλείεται από το σύστημα. Σε περίπτωση που το σύστημα δεν είναι κορεσμένο, ο βρόχος απόδοσης επιπέδων διαμόρφωσης και ελέγχου ισχύος επαναλαμβάνεται έως ότου εκπληρωθούν οι απαιτήσεις σε bit rate όλων των χρηστών της κυψέλης \bar{k} χωρίς να παραβιάζεται το QoS των

χρηστών που εξυπηρετούνται από ομοδιαυλικές κυψέλες.

Αν για κάποιο συγκεκριμένο χρήστη δε φορτωθούν όλα τα φέροντα που του έχουν αποδοθεί από το βήμα 2, τότε αυτά χαρακτηρίζονται ως μη χρησιμοποιούμενα και ενημερώνεται ο πίνακας C_{temp} . Με την ολοκλήρωση του βήματος 3, οι πίνακες B_{temp} , P_{temp} και C_{temp} έχουν λάβει την τελική τους μορφή.

Μετά την εισαγωγή του νέου χρήστη και αφού πλέον έχει εκπληρωθεί και η ικανή συνθήκη αποδοχής, ενημερώνονται οι πίνακες εκχώρησης του συστήματος, οι οποίοι τώρα καταδεικνύουν τη συνολική εικόνα του συστήματος που περιλαμβάνει πλέον έναν ακόμα νέο χρήστη. Σε περίπτωση που ο νέος χρήστης δεν εισαχθεί τελικά, οι πίνακες εκχώρησης παραμένουν ανέπαφοι, αφού καμία μεταβολή δε θα επέλθει στο σύστημα [15][35].

Στην εικόνα που ακολουθεί δίδεται το διάγραμμα ροής της υπορουτίνας που συγκροτεί το τρίτο αυτό βήμα του RRM αλγορίθμου (Εικόνα 5.3).



Εικόνα 5.3: Υπορουτίνα Bit Loading και Ελέγχου Ισχύος του Προσαρμοστικού RRM Αλγορίθμου

5.2 Προσαρμοστικός Αλγόριθμος RRM με χωρισμό σε Τομείς – Sectors

Έχοντας ολοκληρώσει την παρουσίαση του προσαρμοστικού αλγορίθμου, στην παράγραφο αυτή θα περιγραφούν οι τροποποιήσεις που απαιτούνται ώστε να εφαρμοστεί η γνωστή από τα κυψελωτά συστήματα τεχνική του χωρισμού των κυψελών σε τομείς (sectors), γνωστή στη βιβλιογραφία ως τομεοποίηση κυψελών (cell sectoring). Το σκεπτικό με το οποίο οδηγούμαστε σε τομεοποίηση των κυψελών είναι η ανάγκη για μείωση της ομοδιαυλικής παρεμβολής. Για να επιτευχθεί αυτό, η ομοιοκατευθυντική κεραία των σταθμών βάσης αντικαθίσταται από ένα σύνολο κατευθυντικών κεραιών, κάθε μία από τις οποίες ακτινοβολεί σε ένα διαφορετικό τομέα της κυψέλης. Συνήθως μια κυψέλη χωρίζεται σε τρεις τομείς των 120° ή σε έξι τομείς των 60°, οπότε και χρησιμοποιούνται ισάριθμες κατευθυντικές κεραιές[1][5].

5.2.1 Διάγραμμα ακτινοβολίας κεραιών τομέων

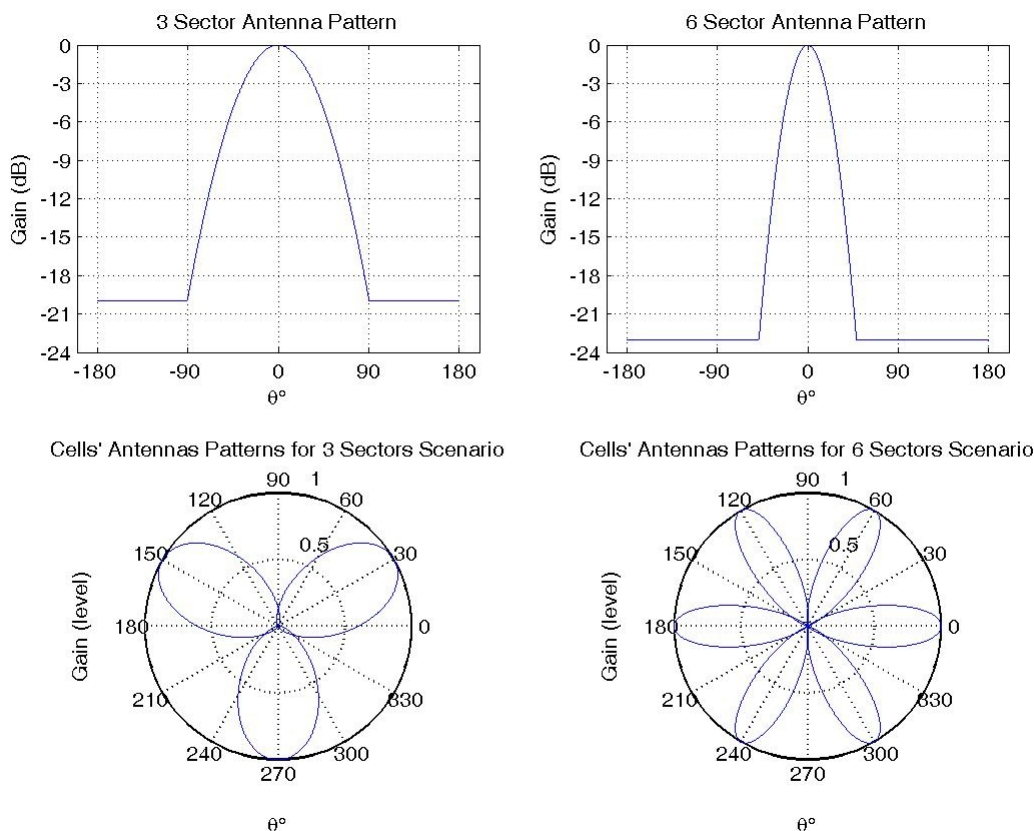
Το διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας κάθε sector έχει την παρακάτω μορφή,

$$A(\theta) = -\min \left[12 \left(\frac{\theta}{\theta_{3dB}} \right)^2, A_m \right] \text{ όπου } -180^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$$

Στην παραπάνω σχέση ως θ συμβολίζεται η γωνία μεταξύ της κατεύθυνσης ενδιαφέροντος και του μεγίστου του διαγράμματος ακτινοβολίας (boresight) της κεραίας, θ_{3dB} είναι η γωνία ημισείας ισχύος του λοβού ακτινοβολίας της κεραίας και A_m η μέγιστη απόσβεση.

Για την περίπτωση των τριών τομέων, $\theta_{3dB}=70^\circ$ και $A_m=20dB$ ενώ αντίστοιχα για την περίπτωση των έξι τομέων έχουμε $\theta_{3dB}=35^\circ$ και $A_m=23dB$. Τα διαγράμματα ακτινοβολίας των κεραιών για τα δύο σενάρια καθώς και το συνολικό διάγραμμα ακτινοβολίας των 3 ή 6 κεραιών αντίστοιχα της κυψέλης δίνονται στην εικόνα που ακολουθεί (Εικόνα 5.4)[18].

Αν G_T^{omni} το κέρδος της ομοιοκατευθυντικής κεραίας του BS που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση του προαναφερθέντος προσαρμοστικού αλγορίθμου, τότε το μέγιστο κέρδος κεραίας ενός sector στην περίπτωση που εφαρμόζεται τομεοποίηση S sectors ($S=3$ ή $S=6$) ορίζεται να είναι $G_T^{sector} = S \cdot G_T^{omni}$, όπου το κέρδος θεωρείται σε φυσικές μονάδες και όχι σε dBi, και αυτό διότι καθώς μειώνεται το εύρος μισής ισχύος του διαγράμματος ακτινοβολίας θα πρέπει αντίστοιχα να αυξάνεται το μέγιστο κέρδος αυτού. Αντίστοιχα, αν P_{max}^{omni} η μέγιστη ισχύς εκπομπής του σταθμού βάσης στην περίπτωση χρήσης ομοιοκατευθυντικής κεραίας, επειδή η συνολικά μέγιστη εκπεμπόμενη ισχύς παραμένει σταθερή, η μέγιστη εκπεμπόμενη ισχύς ανά sector θα είναι $P_{max}^{sector} = P_{max}^{omni} / S$, όπου και πάλι η ισχύς σε φυσικές μονάδες.



Εικόνα 5.4: Διαγράμματα ακτινοβολίας κεραιών

5.2.2 Μοντελοποίηση της πολυδιαδρομικής διάδοσης

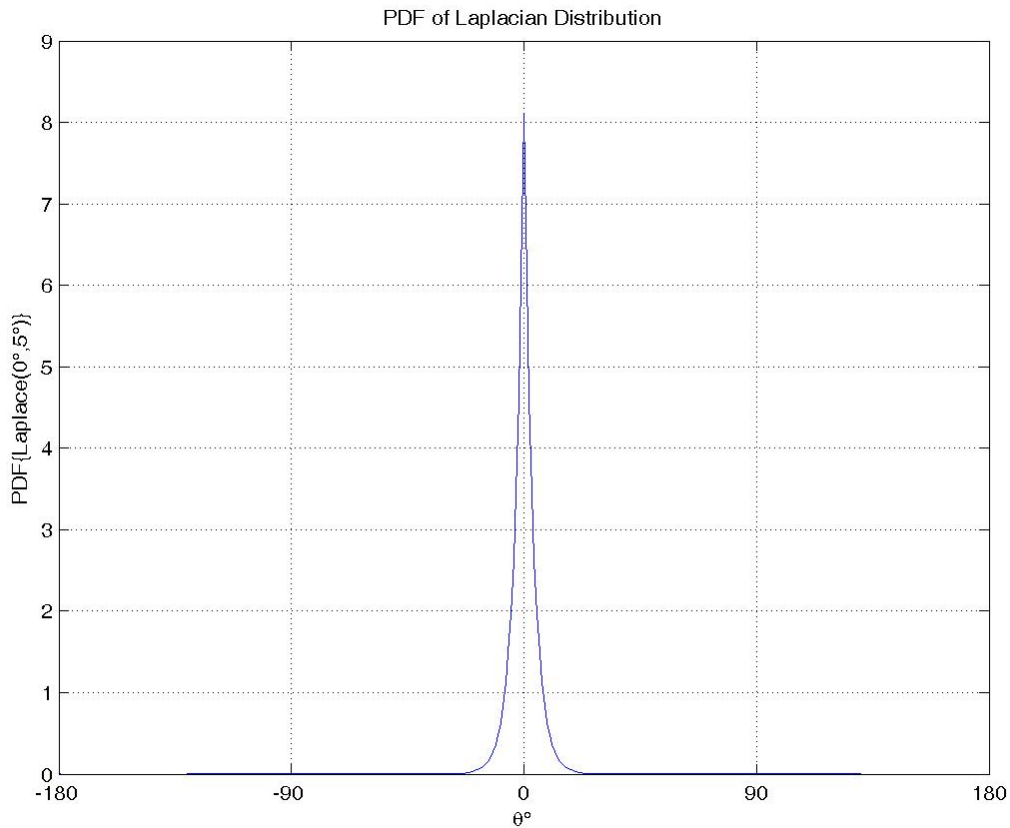
Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, ένα από τα φαινόμενα που επηρεάζουν την ποιότητα του λαμβανόμενου σήματος και παρενοχλούν το ασύρματο κανάλι επικοινωνίας είναι η πολυδιαδρομική διάδοση. Λόγω της χρήσης κατευθυντικών κεραιών, το κέρδος κάθε μίας από τις συνιστώσες του σήματος που τελικά φτάνουν στο δέκτη, εξαρτάται από τη γωνία άφιξης της εν λόγω συνιστώσας.

Για τη μοντελοποίηση του φαινομένου, υποθέτουμε ότι οι γωνίες άφιξης των διαφόρων αντιγράφων του σήματος που φτάνουν τελικά στο δέκτη, ακολουθούν τη λαπλασιανή κατανομή $Laplace(\bar{\theta}, \sigma)$ [18][43], με συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας

$$PDF\{Laplace(\bar{\theta}, \sigma)\} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2}} e^{-\frac{\sqrt{2}|\theta-\bar{\theta}|}{\sigma}}$$

όπου ως θ συμβολίζεται η γωνία άφιξης της πολυδιαδρομικής συνιστώσας του σήματος σε σχέση με την κατεύθυνση μεγίστου της κεραιάς, ως $\bar{\theta}$ συμβολίζεται η γωνία που σχηματίζεται από τη θέση του χρήστη που εξετάζεται και την κατεύθυνση μεγίστου του διαγράμματος ακτινοβολίας της κεραιάς του sector ενώ ως σ συμβολίζεται η RMS τιμή της γωνιακής διασποράς, αποτελεί δηλαδή την τυπική απόκλιση της κατανομής των γωνιών άφιξης των πολυδιαδρομικών συνιστωσών. Στην εικόνα που

ακολουθεί (Εικόνα 5.5) δίδεται το διάγραμμα της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας (pdf) της λαπλασιανής κατανομής.

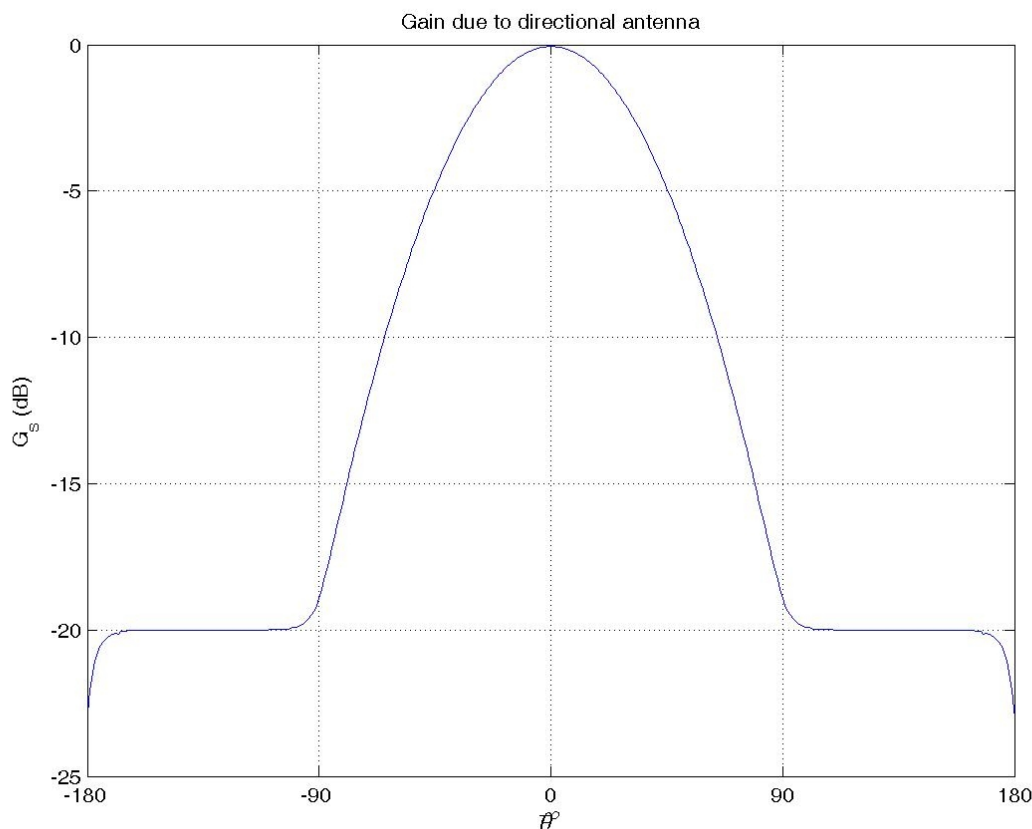


Εικόνα 5.5: Λαπλασιανή Κατανομή

Στη συνέχεια, για τον υπολογισμό του κέρδους που προκύπτει λόγω της χρήσης της κατευθυντικής κεραιάς του τομέα, η ως άνω λαπλασιανή κατανομή των πολυδιαδρομικών συνιστωσών του λαμβανόμενου σήματος πολλαπλασιάζεται με το κατευθυντικό κέρδος της κεραιάς $G(\theta) = 10^{\frac{A(\theta)}{10}}$ και ολοκληρώνεται σε έναν κύκλο γύρω από τη γωνία μεγίστου του διαγράμματος ακτινοβολίας της κεραιάς του sector, ήτοι

$$G_s = \int_{-180^\circ}^{180^\circ} \frac{1}{\sigma\sqrt{2}} e^{-\frac{\sqrt{2}|\theta-\bar{\theta}|}{\sigma}} G(\theta) d\theta$$

Στην εικόνα που ακολουθεί (Εικόνα 5.6) δίνεται το διάγραμμα του κέρδους που προκύπτει τελικά λόγω της χρήσης κατευθυντικών κεραιών για τους τομείς της κυψέλης.



Εικόνα 5.6: Κέρδος κατευθυντικής κεραίας συμπεριλαμβάνοντας την πολύοδη διάδοση

5.2.3 Τροποποιήσεις προσαρμοστικού αλγορίθμου για την εφαρμογή τομεοποίησης

Στο σημείο αυτό έχουμε πλέον ορίσει τη μορφή του διαγράμματος ακτινοβολίας των κεραιών των τομέων της κυψέλης αλλά δεν έχουμε ακόμα ασχοληθεί με τον τρόπο με τον οποίο επηρεάζεται ο αλγόριθμος από τη χρήση κατευθυντικών κεραιών. Στην παράγραφο αυτή περιγράφονται οι τροποποιήσεις εκείνες που απαιτούνται ώστε ο παραπάνω αλγόριθμος να μπορεί να εφαρμοστεί και στις περιπτώσεις όπου έχουμε κατευθυντικές κεραιές. Αν και η ανάλυση που θα ακολουθήσει βασίζεται και εστιάζει στην περίπτωση της τομεοποίησης, θα μπορούσε να αποτελέσει τη βάση για τη χρήση διαφορετικών συστημάτων κεραιών, όπως παραδείγματος χάριν έξυπνες κεραιές (smart antennas).

5.2.3.1 Κέρδος λαμβανόμενης ισχύος

Όταν ο αλγόριθμος καλείται σε κάποια σημεία του να υπολογίσει το κέρδος του καναλιού $\mathbf{G}=[G_{u,n,k}]$, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και το γεγονός ότι η κεραία του σταθμού βάσης δεν είναι πλέον ομοιοκατευθυντική, οπότε το συνολικό κέρδος θα προκύψει από το κέρδος της κεραίας πολλαπλασιασμένο επί τον παράγοντα G_s όπως αυτός περιγράφηκε παραπάνω. Στο σημείο αυτό θεωρούμε τη μήτρα $\mathbf{D}=[D_{u,k,s}]$. Το στοιχείο $D_{u,k,s}$, ανεξάρτητο του φέροντος n που χρησιμοποιείται, περιλαμβάνει το συντελεστή κατευθυντικού κέρδους του χρήστη u όταν αυτός εξυπηρετείται από τον τομέα s της κυψέλης k . Επειδή επιθυμούμε ο χρήστης να έχει κατά το δυνατόν υψηλότερο κέρδος ώστε να απαιτεί

κατά το δυνατόν χαμηλότερη ισχύ, προκύπτει ότι θα εξυπηρετηθεί τελικά από τον τομέα εκείνο που του εξασφαλίζει το μέγιστο δυνατό κέρδος, ήτοι από τον τομέα για τον οποίο ισχύει

$$\bar{s} = \arg \max_s D_{u,k,s}$$

με τον αντίστοιχο συντελεστή κατευθυντικού κέρδους να είναι $D_{u,k,\bar{s}}$

Έτσι, προκύπτει τελικά ότι το ολικό κέρδος του χρήστη u που εξυπηρετείται από την κυψέλη k στον τομέα \bar{s} , για τον οποίο ισχύει η ως άνω σχέση, χρησιμοποιώντας το φέρον n θα είναι

$$G_{u,n,k}^r = D_{u,k,\bar{s}} G_{u,n,k}$$

ή

$$G_{u,n,k}^r = \max_s D_{u,k,s} G_{u,n,k}$$

Στην παραπάνω σχέση ο εκθέτης r χρησιμοποιείται για να υποδηλώσει το κέρδος της λαμβανόμενης ισχύος, σε αντίθεση με το κέρδος της ισχύος παρεμβολής όπως εξηγείται στη συνέχεια.

5.2.3.2 Κέρδος ισχύος παρεμβολής

Έστω ότι εξετάζεται ο χρήστης u , οποίος εξυπηρετείται από την κυψέλη k χρησιμοποιώντας το φέρον n . Έστω επίσης ένας ακόμα χρήστης v , ο οποίος εξυπηρετείται από την κυψέλη i , χρησιμοποιώντας επίσης το φέρον n . Ο χρήστης v είναι ομοδιαυλικός του χρήστη u . Η ισχύς που η κυψέλη i εκπέμπει στο χρήστη v μέσω του φέροντος n είναι $P_{v,n,i}$. Αν αγνοήσουμε προς το παρόν την κατευθυντικότητα της κεραίας του sector, η παρεμβάλλουσα ισχύς που λαμβάνει ο χρήστης u θα είναι $G_{u,n,i} P_{v,n,i}$, όπου $G_{u,n,i}$ το κέρδος του καναλιού n ανάμεσα στο χρήστη u και τον ομοδιαυλικό σταθμό βάσης i . Αν ο χρήστης v εξυπηρετείται από το sector p της κυψέλης i , τότε και θα ισχύει ότι

$$p = \arg \max_s D_{v,i,s}$$

τότε η συνολική ισχύς παρεμβολής που λαμβάνει ο χρήστης u θα είναι $D_{u,i,p} G_{u,n,i} P_{v,n,i}$ και κατ' αυτό τον τρόπο προκύπτει ότι το συνολικό κέρδος καναλιού στην περίπτωση της παρεμβάλλουσας ισχύος θα είναι

$$G_{u,n,i}^i = D_{u,i,p} G_{u,n,i}$$

όπου

$$p = \arg \max_s D_{v,i,s}$$

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω τροποποιήσεις που αφορούν στο κέρδος καναλιού όπως το αντιλαμβάνεται ο χρήστης μπορούμε να τροποποιήσουμε τη μήτρα \mathbf{H} του RRM προβλήματος, όπως αυτή παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, ως κάτωθι

$$H_{ml}(n) = \begin{cases} D_{u_m, k_l, s_l} G_{u_m, n, k_l} & \text{όταν } m=l \\ -\gamma_{u_m, n, k_m} D_{u_m, k_l, s_l} G_{u_m, n, k_l} & \text{όταν } m \neq l \end{cases}, \quad m=1, \dots, \kappa, \quad l=1, \dots, \kappa$$

όπου

$$s_l = \arg \max_s D_{u_l, k_l, s}$$

και χρησιμοποιώντας την τροποποιημένη αυτή μήτρα να προχωρήσουμε στην επίλυση του γραμμικού συστήματος.

5.2.3.3 Εκχώρηση διαύλων

Κλείνοντας την περιγραφή της τροποποίησης του προσαρμοστικού αλγορίθμου για την εφαρμογή τομεοποίησης, θα πρέπει να σημειωθεί ότι στη διαχείριση των φερόντων από το BS υπετέθη μια συγκεντρωτική δυναμική εκχώρηση διαύλων. Αυτό δηλαδή που υπετέθη είναι ότι τα διαθέσιμα φέροντα του BS δεν κατανέμονται *a priori* στους sectors της κυψέλης αλλά κάθε sector μπορεί να χρησιμοποιήσει οποιοδήποτε φέρον, υπό την προϋπόθεση ότι αυτό δε χρησιμοποιείται από κάποιο άλλο sector. Για την υλοποίηση αυτού του μηχανισμού απαιτείται ένας έλεγχος σε επίπεδο BS ο οποίος θα αναθέτει φέροντα στους διαφορετικούς τομείς, φροντίζοντας να μην παραβιάζεται η σχεδιαστική υπόθεση ότι δεν επιτρέπεται επαναχρησιμοποίηση φερόντων εντός της ίδιας κυψέλης.

Κατ' αυτόν τον τρόπο ο προσαρμοστικός αλγόριθμος που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο μπορεί αυτούσιος να χρησιμοποιηθεί για την εφαρμογή τομεοποίησης, αλλάζοντας μόνον τον τρόπο υπολογισμού του κέρδους καναλιού, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, και υπολογίζοντας τη μέγιστη εκπεμπόμενη ισχύ ανά sector κυψέλης και όχι ανά κυψέλη.

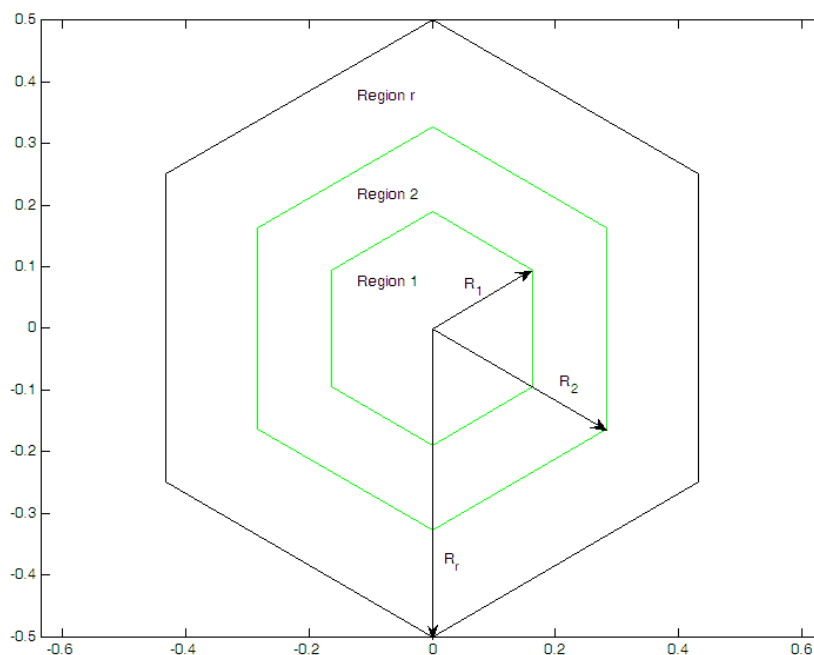
5.3 Προσαρμοστικός αλγόριθμος RRM με διάσπαση κυψελών (Reuse Partitioning)

Οι πρώτες εκτελέσεις του προσαρμοστικού αλγορίθμου κατέστησαν σαφές ότι ένα πολυκυψελωτό OFDMA σύστημα, όπως αυτό που εξετάζεται στην παρούσα, είναι μάλλον interference limited παρά subcarrier limited, περιορίζεται δηλαδή από το επίπεδο παρεμβολής που λαμβάνει ο δέκτης με αποτέλεσμα να μην μπορεί να επιτευχθεί το επιθυμητό επίπεδο SNIR παρά από την έλλειψη διαθέσιμων φερόντων. Βλέποντάς το από την πλευρά των αποτελεσμάτων, όταν ο αλγόριθμος ολοκληρώνεται υπάρχουν ελεύθερα κανάλια προς διάθεση αλλά αυτά δε μπορούν να χρησιμοποιηθούν λόγω της ομοδιαυλικής παρεμβολής που θα προκαλούσαν στους ήδη εισηγμένους χρήστες του συστήματος.

Παρά την παραπάνω διαπίστωση, αποφασίστηκε η υλοποίηση μιας τροποποίησης του προσαρμοστικού αλγορίθμου RRM που περιγράφηκε στην πρώτη παράγραφο του παρόντος κεφαλαίου ώστε να υποστηρίζει διάσπαση κυψελών (cell splitting[5] ή reuse partitioning[44]), τεχνική η οποία, μαζί με την τομεοποίηση που περιγράφηκε προηγουμένα, αποτελούν τις πλέον κοινές τεχνικές για την αύξηση της χωρητικότητας στο κυψελωτά συστήματα[1].

Το σκεπτικό στο οποίο βασίζεται η τεχνική της διάσπασης κυψελών είναι ότι, για δεδομένο λόγο σήματος προς παρεμβολή, οι χρήστες εκείνοι που βρίσκονται πλησιέστερα στο σταθμό βάσης από τον οποίο εξυπηρετούνται απαιτούν μικρότερη εκπεμπόμενη ισχύ σε σχέση με χρήστες που βρίσκονται στα όρια της κυψέλης. Μικρότερη εκπεμπόμενη ισχύς όμως σημαίνει ταυτόχρονα ότι προκαλούν χαμηλότερο επίπεδο ομοδιαυλικής παρεμβολής στους χρήστες εκείνους του συστήματος που θα χρησιμοποιήσουν το ίδιο φέρον, σε διαφορετικές βέβαια κυψέλες. Η διάσπαση κυψελών υλοποιείται χωρίζοντας κάθε κυψέλη του συστήματος σε ένα αριθμό, r , ομόκεντρων κυψελών, όπως φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί(Εικόνα 5.7). Κάθε μία από τις περιοχές αυτές που ορίζονται από τις ομόκεντρες κυψέλες αντιστοιχίζεται σε ένα διαφορετικό συντελεστή επαναχρησιμοποίησης.

Σε αντίθεση με τα συμβατικά κυψελωτά συστήματα των κινητών επικοινωνιών, από όπου δανειζόμαστε την τεχνική της διάσπασης κυψελών, στην περίπτωση ενός πολυκυψελωτού συστήματος OFDMA, για το οποίο εξ' αρχής υποθέσαμε συντελεστής επαναχρησιμοποίησης ένα, επιχειρούμε τη μετάβαση σε μεγαλύτερους συντελεστές επαναχρησιμοποίησης για τις εξώτερες περιοχές επαναχρησιμοποίησης, ώστε να μειωθεί το επίπεδο παρεμβολών που προκαλείται στους ομοδιαυλικούς χρήστες άλλων κυψελών. Έτσι, η κατανομή του συντελεστή επαναχρησιμοποίησης γίνεται από το εσωτερικό της κυψέλης προς το εξωτερικό. Αυτό που επιχειρείται είναι εν πολλοίς, οι χρήστες που βρίσκονται κοντά στα όρια της κυψέλης να χρησιμοποιούν φέροντα με μεγαλύτερη απόσταση επαναχρησιμοποίησης ώστε να μειώνεται το επίπεδο της ομοδιαυλικής παρεμβολής.



Εικόνα 5.7: Διάσπαση κυψέλης σε περιοχές επαναχρησιμοποίησης

5.3.1 Μοντέλο Συστήματος

Η περιοχή κάλυψης του συστήματος χωρίζεται σε εξαγωνικές κυψέλες ακτίνας R_r . Με τη διάσπαση κυψελών, έστω ότι ο συντελεστής επαναχρησιμοποίησης για την περιοχή i , $1 \leq i \leq r$, είναι N_i και η ακτίνα του ομόκεντρου εξαγώνου i είναι R_i (Εικόνα 5.7). Σε ένα κυψελωτό σύστημα με εξαγωνικές κυψέλες και συντελεστή επαναχρησιμοποίησης N_i ισχύει ότι

$$\frac{D}{R_r} = \sqrt{3N_i}, \quad i = 1, \dots, r$$

όπου D η απόσταση επαναχρησιμοποίησης. Με σκοπό να εξισορροπηθεί ο λόγος σήματος προς παρεμβολή (*ceteris paribus*) για τους χρήστες που βρίσκονται στα άκρα της κυψέλης, θα πρέπει

$$\frac{D}{R_i} = \sqrt{3N_r}, \quad i = 1, \dots, r$$

Από τις παραπάνω δύο σχέσεις προκύπτει ότι

$$R_i = \sqrt{\frac{N_i}{N_r}} R_r$$

οπότε κατ' αυτόν τον τρόπο ορίζουμε την ακτίνα των περιοχών επαναχρησιμοποίησης.

5.3.2 Ομάδες Επαναχρησιμοποίησης

Επειδή πλέον το σύστημα μας δεν είναι επαναχρησιμοποίησης ένα, ο προγραμματισμός συχνότητων είναι απαραίτητος. Η περιγραφή που ακολουθεί εφαρμόζεται σε κάθε μία από τις διαφορετικές

περιοχές επαναχρησιμοποίησης που ορίζει το σχήμα της διάσπασης κυψελών. Έστω μια περιοχή επαναχρησιμοποίησης με συντελεστή επαναχρησιμοποίησης N_i . Στην περίπτωση αυτή η ομάδα επαναχρησιμοποίησης που συγκροτείται αποτελείται από N_i κυψέλες και έτσι μπορούμε να έχουμε μια αντιστοίχιση – απαρίθμηση των κυψελών $m=1,2,\dots,N_i$ που ανήκουν στην ομάδα επαναχρησιμοποίησης. Η m -οστή κυψέλη της ομάδας επαναχρησιμοποίησης μπορεί να χρησιμοποιήσει μόνον τα φέροντα n για τα οποία ισχύει $\text{mod}(n-m, N_i)=0$, όπου mod το πηλίκο της ακέραιας διαίρεσης, οπότε $n_m = m + v \cdot N_i \quad v \in \mathbf{N}$. Κατ' αυτό τον τρόπο τα διαθέσιμα φέροντα μοιράζονται κυκλικά στις κυψέλες της ομάδας επαναχρησιμοποίησης, επιτυγχάνοντας έτσι τη μέγιστη φασματική απόσταση μεταξύ των φερόντων που εκχωρούνται στην ίδια κυψέλη⁹ αλλά και τη δίκαιη αντιμετώπιση όλων των κυψελών¹⁰. Έτσι, για παράδειγμα, αν ο συντελεστής επαναχρησιμοποίησης για κάποια περιοχή επαναχρησιμοποίησης είναι $N_i=3$, τότε η ομάδα επαναχρησιμοποίησης συγκροτείται από 3 κυψέλες, με αναγνωριστικά $m, m=1, m=2, m=3$. Στην κυψέλη $m=1$ θα διατεθούν τα φέροντα $\text{mod}(n-1,3)=0$, δηλαδή τα φέροντα $n_1=1,4,7,\dots,1+3v \quad v \in \mathbf{N}$, στην κυψέλη $m=2$ τα φέροντα $n_2=2,5,8,\dots,2+3v \quad v \in \mathbf{N}$ και στην κυψέλη $m=3$ τα φέροντα $n_3=3,6,9,\dots,3+3v \quad v \in \mathbf{N}$.

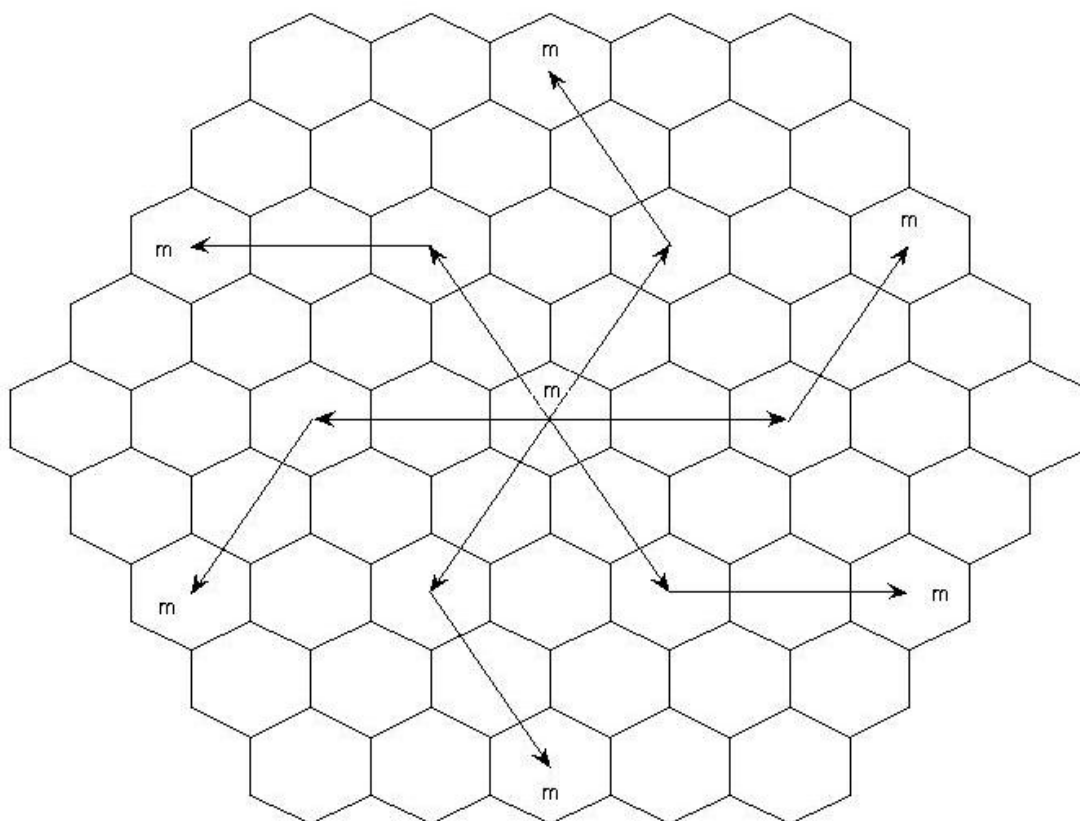
Ένα τελευταίο ζήτημα με το οποίο πρέπει να ασχοληθούμε είναι η κατανομή των αναγνωριστικών m στις κυψέλες μεταξύ δύο διαφορετικών ομάδων επαναχρησιμοποίησης. Επειδή οι κυψέλες αυτές έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιούν τα αυτά φέροντα, εν συνεχεία καλούνται ομοδιαυλικές. Ως γνωστόν [1][5], στην περίπτωση της θεώρησης ανάπτυξης του συστήματος σε εξαγωνικές κυψέλες, ο συντελεστής επαναχρησιμοποίησης N_i θα πρέπει να πληροί τη σχέση

$$N_i = p^2 + pq + q^2$$

όπου p, q ακέραιοι αριθμοί, οι οποίοι καλούνται παράμετροι ολίσθησης. Από την κυψελωτή δομή που παρουσιάζεται στην εικόνα που ακολουθεί (Εικόνα 5.8), παρατηρούμε ότι κάθε εξάγωνο συνορεύει με έξι όμοια εξάγωνα, που το καθένα είναι η αρχή μιας αλυσίδας εξάγωνων.

9 Λόγω του ότι τα φίλτρα εκπομπής και λήψης δεν είναι ιδανικά, θα πρέπει να υπάρχει η μέγιστη δυνατή φασματική απόσταση μεταξύ των φερόντων ώστε να μην έχουμε προβλήματα παρεμβολής γειτονικού διαύλου όπως έχει ήδη εξηγηθεί.

10 Φέροντα με μεγαλύτερο αύξοντα αριθμό n συνεπάγεται ότι αντιστοιχούν σε υψηλότερες συχνότητες εκπομπής και ως εκ τούτου σε χαμηλότερο κέρδος καναλιού.



Εικόνα 5.8: Σχεδίαση Κυψελωτού Συστήματος

Ξεκινώντας από οποιαδήποτε κυψέλη σαν αναφορά βρίσκουμε τις πλησιέστερες ομοδιαυλικές κυψέλες ως εξής:

- Μετακινούμαστε p κυψέλες κατά μήκος οποιασδήποτε αλυσίδας εξάγωνων.
- Στρέφουμε ανθρωπολογικά κατά 60° .
- Μετακινούμαστε q κυψέλες κατά μήκος της αλυσίδας εξάγωνων προς την οποία στραφήκαμε.

Η q -οστή κυψέλη και η κυψέλη αναφοράς είναι ομοδιαυλικές και ως εκ τούτου χαρακτηρίζονται από το ίδιο αναγνωριστικό m . Αν επιστρέψουμε στην κυψέλη αναφοράς και κινηθούμε κατά μήκος μιας διαφορετικής αλυσίδας εξάγωνων, θα προκύψει μια νέα ομοδιαυλική κυψέλη, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5.8 για $p=q=2$. Επαναλαμβάνοντας την ίδια διαδικασία για τις υπόλοιπες κυψέλες αναφοράς, θα προκύψει η πλήρης κυψελωτή δομή του συστήματος.

5.3.3 Τροποποιήσεις προσαρμοστικού αλγορίθμου για την εφαρμογή διάσπασης κυψελών

Έχοντας ορίσει τα παραπάνω μεγέθη που αφορούν στις ομάδες επαναχρησιμοποίησης και στο χωρισμό των κυψελών σε περιοχές επαναχρησιμοποίησης, η μόνη αλλαγή που επιβάλλεται στον κώδικα του προσαρμοστικού αλγορίθμου όπως αυτός περιγράφηκε στην πρώτη παράγραφο του παρόντος κεφαλαίου, αφορά στην εκχώρηση φερόντων (β' φάση του δεύτερου βήματος του αλγορίθμου). Εκεί,

αφού βρούμε σε ποια περιοχή επαναχρησιμοποίησης i της κυψέλης ανήκει ο χρήστης που εξετάζεται και λάβουμε το χαρακτηριστικό m της περιοχής αυτής, επιτρέπουμε στο χρήστη να χρησιμοποιήσει μόνον εκείνα τα φέροντα τα οποία αφενός μεν είναι ελεύθερα, δηλαδή δε χρησιμοποιούνται ήδη από κάποιο άλλο χρήστη της κυψέλης, και πληρούν τη συνθήκη $\text{mod}(n-m, N_i)=0$.

Επειδή δε λαμβάνεται μέριμνα ώστε να προαποφασιστεί εάν η εν λόγω περιοχή διαθέτει ελεύθερα φέροντα για να εξυπηρετήσει τις ανάγκες του χρήστη, στη φάση αυτή ο αλγόριθμος, σε περίπτωση έλλειψης ελεύθερων φερόντων, μπορεί να εξέλθει, ενημερώνοντας τον κύριο αλγόριθμο για την έλλειψη καναλιών ώστε να απορρίψει το χρήστη. Επίσης, ακολουθείται μια συντηρητική πολιτική ως προς την απόρριψη χρηστών. Στην περίπτωση, δηλαδή, που στο χρήστη δε μπορεί να εκχωρηθεί πλήθος καναλιών ίσο με αυτό που αποφασίστηκε από την πρώτη φάση του αλγορίθμου εκχώρησης αλλά μπορεί να εκχωρηθεί τουλάχιστον ο ελάχιστος αριθμός καναλιών που απαιτεί ο χρήστης για την κάλυψη των αναγκών του σε ρυθμό, ο εν λόγω χρήστης δεν απορρίπτεται και η εκτέλεση του κύριου αλγορίθμου προχωρά στην “φόρτωση” των διατιθέμενων καναλιών.

5.4 Σειριακός αλγόριθμος RRM

Στην περίπτωση του σειριακού αλγορίθμου RRM, ο οποίος υλοποιήθηκε ακολουθώντας τις βασικές αρχές που περιγράφονται στο [45], εστιάζουμε στην απλότητα και ως εκ τούτου ταχύτητα στη λήψη αποφάσεων διαχείρισης. Για την επίτευξη του στόχου αυτού, οδηγούμαστε στην αφαίρεση πολλών εκ των στοιχείων εκείνων που καθιστούν προσαρμοστικό τον παραπάνω περιγραφέντα αλγόριθμο RRM. Ένα από τα κύρια αυτά στοιχεία είναι ότι κατά την προσπάθεια εισαγωγής ενός νέου χρήστη στο σύστημα γίνεται συνολική ανακατανομή των πόρων (αναφερόμαστε εν προκειμένω μόνο στα φέροντα και το επίπεδο διαμόρφωσης των φερόντων) της κυψέλης εκείνης που θα τον εξυπηρετήσει. Στην περίπτωση που σειριακού αλγορίθμου, δε γίνεται ανακατανομή πόρων αλλά μόνον εκχώρηση των απαραίτητων πόρων στον νεοεισερχόμενο στο σύστημα χρήστη.

5.4.1 Κύριος αλγόριθμος RRM

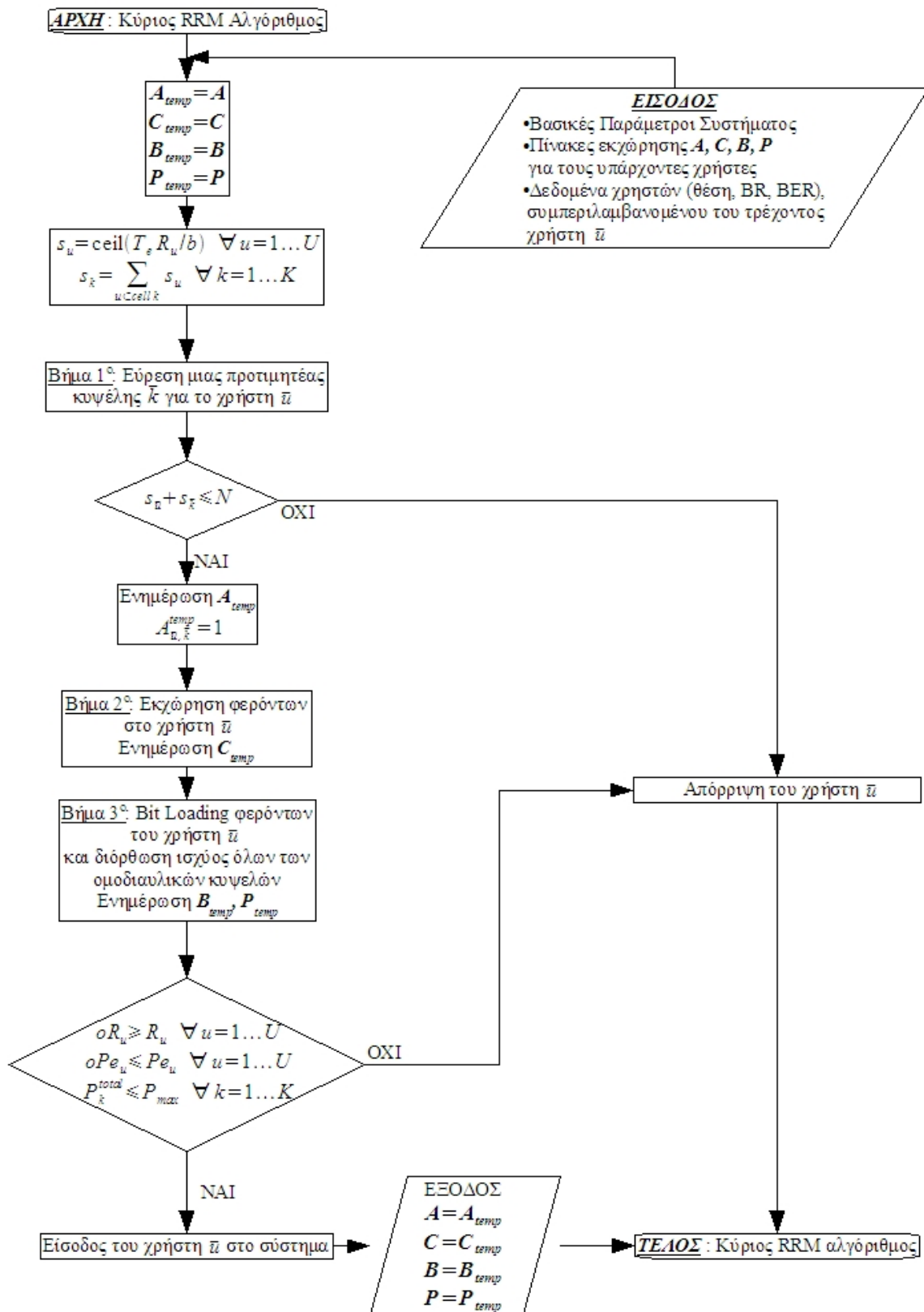
Όπως και προηγούμενα, ο αλγόριθμος μπορεί να χωριστεί σε τρία διακριτά μεταξύ τους βήματα, τα οποία ασχολούνται με την εκχώρηση διαφορετικού είδους πόρων του συστήματος.

- Βήμα 1^ο: Στο βήμα αυτό γίνεται η επιλογή της κυψέλης – σταθμού βάσης που θα εξυπηρετήσει το χρήστη. Η επιλογή της κυψέλης γίνεται καθορίζοντας ποια είναι η καλύτερη κυψέλη (το κριτήριο της επιλογής αναλύεται παρακάτω) για να εξυπηρετήσει το χρήστη. Κατόπιν ελέγχεται αν η κυψέλη η οποία επιλέχθηκε διαθέτει το απαιτούμενο πλήθος ελεύθερων φερόντων, ώστε, με την υφιστάμενη διαμόρφωση, να καλυφθούν οι ανάγκες του χρήστη σε ρυθμό δεδομένων. Ο έλεγχος αυτός της αναγκαίας συνθήκης, όπως αυτή χαρακτηρίστηκε κατά τον ορισμό του προβλήματος, γίνεται αθροίζοντας το πλήθος των φερόντων που απαιτεί ο αιτούμενος ρυθμός δεδομένων του χρήστη με τα ήδη χρησιμοποιούμενα φέροντα της εν λόγω κυψέλης. Αν το συνολικό πλήθος των φερόντων είναι μεγαλύτερο από τον αριθμό φερόντων N που η κυψέλη έχει στη διάθεσή της, τότε ο χρήστης απορρίπτεται, χωρίς να υπάρξει περαιτέρω ενασχόληση του συστήματος με αυτόν.
- Βήμα 2^ο: Στο βήμα αυτό, το οποίο συγκροτεί την υπορουτίνα εκχώρησης φερόντων, εκχωρούνται στο χρήστη σειριακά όσα φέροντα απαιτούνται για την κάλυψη των απαιτήσεών του, χωρίς να γίνεται ανακατανομή φερόντων στην κυψέλη που πρόκειται να τον εξυπηρετήσει.
- Βήμα 3^ο: Στο τελευταίο αυτό βήμα του σειριακού RRM αλγορίθμου, ουσιαστικά ελέγχεται αν όλα τα φέροντα που αποδόθηκαν στο χρήστη στο προηγούμενο βήμα μπορούν να “φορτωθούν” με τον προεπιλεγμένο τύπο διαμόρφωσης. Αν υπάρχει feasible λύση του συστήματος, τότε πληρείται αυτόματα και η ικανή συνθήκη αποδοχής. Ταυτόχρονα με τη “φόρτωση” των φερόντων γίνεται και ο ορισμός της εκπεμπόμενης ισχύος για τον εν λόγω χρήστη αλλά και η διόρθωση της ισχύος για τους ομοδιαυλικούς χρήστες αυτού.

Ο χρήστης γίνεται τελικά αποδεκτός από το σύστημα και ενημερώνονται οι πίνακες εκχώρησης, εφόσον η εκπεμπόμενη ισχύς όλων των κυψελών του συστήματος δεν υπερβαίνει τη μέγιστη εκπεμπόμενη ισχύ του σταθμού βάσης. Σε κάθε άλλη περίπτωση ο χρήστης απορρίπτεται.

Ένα σημείο στο οποίο θα πρέπει να σταθούμε ιδιαίτερα είναι το γεγονός ότι για τη διαχείριση των πόρων του συστήματος, ο αλγόριθμος δεν απαιτεί την εκ των προτέρων γνώση των συνθηκών που επικρατούν στο ασύρματο κανάλι επικοινωνίας (παράμετροι CSI – Channel State Information). Αυτό τελικώς έχει σαν αποτέλεσμα την εξοικονόμηση εύρους ζώνης, αφού, σε μια πραγματική εφαρμογή του αλγορίθμου, δεν απαιτείται η χρήση καναλιών-πλότων για την εκτίμηση των CSI.

Παρακάτω δίδεται μια διαγραμματική απεικόνιση (Εικόνα 5.9) του σειριακού RRM αλγορίθμου που περιγράφηκε.



Εικόνα 5.9: Κύρια ρουτίνα του Σειριακού RRM Αλγορίθμου

5.4.1.1 Βήμα 1°: Εκχώρηση του χρήστη σε σταθμό βάσης

Μέριμνα του πρώτου αυτού βήματος του RRM αλγορίθμου είναι η εύρεση της καλύτερης κυψέλης (σταθμός βάσης) που θα εξυπηρετήσει το νεοεισερχόμενο στο σύστημα χρήστη. Ως βέλτιστη κυψέλη θεωρείται η κυψέλη εκείνη που εμφανίζει για τον εν λόγω χρήστη το μέγιστο μέσο (ως προς τα φέροντα) κέρδος καναλιού. Ισχύει δηλαδή ότι

$$\bar{k} = \arg \max_k \bar{G}_{u,k}$$

όπου $\bar{G}_{u,k}$ είναι το μέσο ως προς τα φέροντα κέρδος καναλιού για το χρήστη u στην κυψέλη k , οριζόμενο ως,

$$\bar{G}_{u,k} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N G_{u,n,k}$$

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι ως κριτήριο για την επιλογή της κυψέλης θεωρήθηκε το

κέρδος καναλιού $G_{u,n,k}$ και όχι το κανονικοποιημένο κέρδος καναλιού $T_{u,n,k} = \frac{G_{u,n,k}}{(I_{u,n,k} + \sigma^2) \Gamma_{u,n,k}}$

, όπως είχε θεωρηθεί στην περίπτωση του προσαρμοστικού αλγορίθμου. Η επιλογή αυτή έγινε με γνώμονα την αποφυγή του υπολογισμού της ισχύος παρεμβολών $I_{u,n,k}$ που δέχεται ο χρήστης που εξετάζεται σε οποιοδήποτε κανάλι και σε οποιοδήποτε κυψέλη.

5.4.1.2 Βήμα 2°: Εκχώρηση φερόντων στο χρήστη

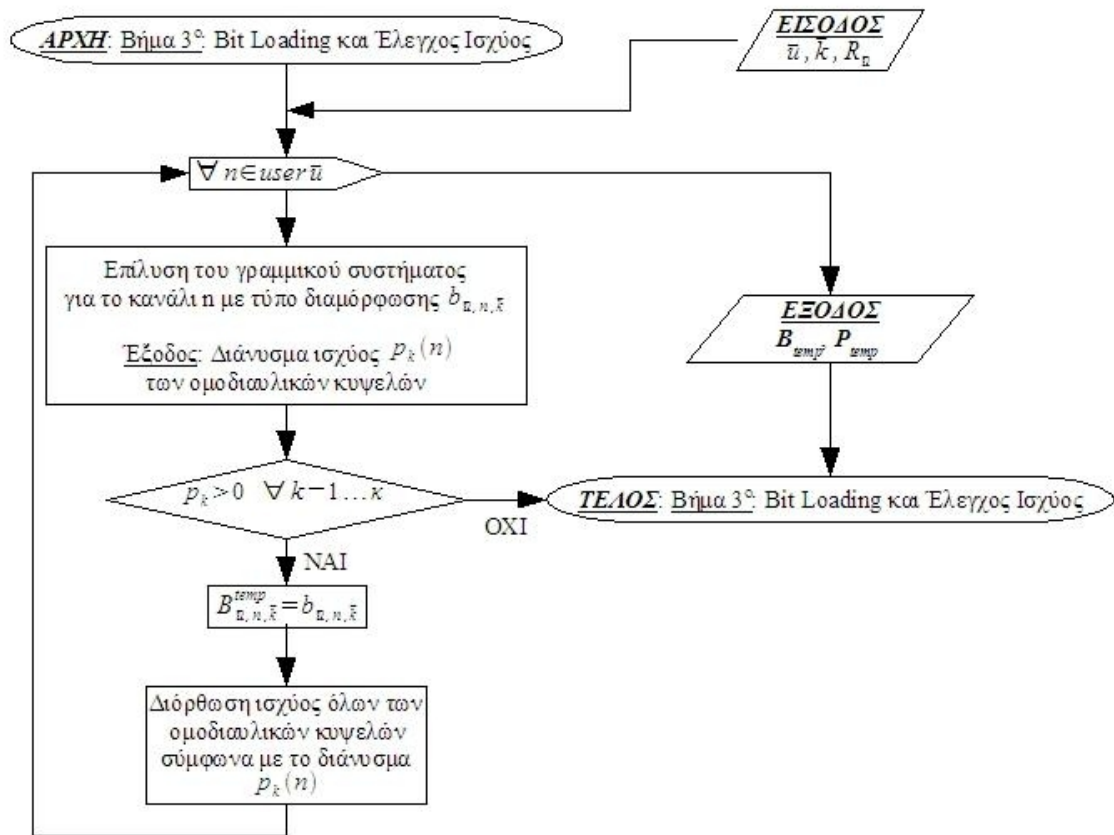
Έχοντας πλέον ορίσει την κυψέλη \bar{k} που θα εξυπηρετήσει το νεοεισερχόμενο χρήστη \bar{u} και όντας βέβαιοι ότι η κυψέλη αυτή διαθέτει s το πλήθος κανάλια, τα οποία μπορούν να καλύψουν τις ανάγκες του χρήστη σε ρυθμό δεδομένων, αφού η αναγκαία συνθήκη έχει ήδη εξεταστεί στην κύρια ρουτίνα του αλγορίθμου, στο χρήστη \bar{u} εκχωρούνται τα πρώτα s ελεύθερα κανάλια της κυψέλης \bar{k} . Από το γεγονός της σειριακής εκχώρησης φερόντων στο χρήστη λαμβάνει και την ονομασία του ο περιγραφόμενος αλγόριθμος.

5.4.1.3 Βήμα 3°: Ανά φέρον bit loading και έλεγχος ισχύος

Στο τρίτο αυτό βήμα του σειριακού RRM αλγορίθμου, τα φέροντα που έχουν εκχωρηθεί στο χρήστη \bar{u} “φορτώνονται” με το επιθυμητό επίπεδο διαμόρφωσης b . Αν, για όλα τα φέροντα s , η επίλυση του γραμμικού συστήματος που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο δίνει ως λύση ένα διάνυσμα p , τα στοιχεία του οποίου είναι γνήσια θετικά, τότε, αφού γίνει διόρθωση της ισχύος όλων των ομοδιαυλικών κυψελών σύμφωνα με το διάνυσμα p , ο χρήστης γίνεται αποδεκτός από το σύστημα. Στην περίπτωση που έστω και ένα φέρον δε μπορεί να “φορτωθεί” λόγω του ότι το σύστημα δε μπορεί να επιλυθεί ή η λύση του δεν είναι all-positive, τότε ο χρήστης αυτός θα απορριφθεί.

Στο σχήμα που ακολουθεί (Εικόνα 5.10) δίδεται το διάγραμμα της υπορουτίνας που συγκροτεί το

τρίτο βήμα του αλγορίθμου.



Εικόνα 5.10: Υπορουτίνα Bit Loading και Ελέγχου Ισχύος του Σειριακού RRM Αλγορίθμου

5.5 Συντεταγμένος αλγόριθμος RRM

Ο συντεταγμένος (coordinated) αλγόριθμος αποτελεί μια τροποποίηση του σειριακού αλγορίθμου, όπως αυτός περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Η τροποποίηση αυτή συνίσταται στην υπορουτίνα εκχώρησης φερόντων, όπου τα φέροντα δεν εκχωρούνται με τον απλό σειριακό τρόπο του σειριακού αλγορίθμου αλλά συντεταγμένα, όπως περιγράφεται παρακάτω.

5.5.1 Συντεταγμένη εκχώρηση φερόντων

Με σκοπό τη μείωση του πλήθους των κοινών φερόντων που χρησιμοποιούνται από γειτονικές κυψέλες, το ήμισυ των κυψελών του συστήματος εκχωρούν τα διαθέσιμα σε αυτές φέροντα σειριακά ενώ οι λοιπές κυψέλες, δηλαδή το άλλο ήμισυ, εκχωρούν τα φέροντά τους σειριακά μεν αλλά με αντίστροφη σειρά. Κατ' αυτό τον τρόπο, μειώνεται η πιθανότητα δύο γειτονικές κυψέλες να χρησιμοποιούν το αυτό φέρον ενώ ταυτόχρονα δεν αποκλείεται κανένα φέρον από την εκχώρηση [46]. Στην περίπτωση της διάσπασης κυψελών, όπου κατά το χωρισμό των κυψελών σε περιοχές επαναχρησιμοποίησης με συγκεκριμένο συντελεστή επαναχρησιμοποίησης N_i , τα φέροντα που δεν πληρούν τη συνθήκη $\text{mod}(n-m, N_i)=0$, όπως αναλύθηκε προηγουμένα, αποκλείονται από την εκχώρηση, με αποτέλεσμα να οδηγούμαστε στον περιορισμό του πλήθους των δυνητικά εκχωρούμενων φερόντων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι περιοχές με μεγάλο συντελεστή επαναχρησιμοποίησης να διαθέτουν πολύ γρήγορα τα φέροντά τους και έτσι να αυξάνεται η πιθανότητα αποκλεισμού νέων χρηστών, λόγω της έλλειψης ελεύθερων φερόντων, ακόμα και αν οι συνθήκες CSI είναι ευνοϊκές για ένα χρήστη. Σε αντίθεση με τα παραπάνω, στην περίπτωση της συντεταγμένης εκχώρησης φερόντων, το σύστημα εξακολουθεί να έχει συντελεστή επαναχρησιμοποίησης 1, αφού κάθε κυψέλη έχει στη διάθεσή της N φέροντα, τα οποία όμως εκχωρεί με τον προαναφερθέντα τρόπο στους χρήστες που τα αιτούνται.

5.5.2 Μετατροπή του Σειριακού αλγορίθμου RRM σε Συντεταγμένο αλγόριθμο RRM

Για την υλοποίηση του coordinated RRM αλγορίθμου, τροποποιήθηκε μονάχα το δεύτερο βήμα του σειριακού RRM αλγορίθμου. Η τροποποίηση συνίσταται στο ότι οι μισές κυψέλες ($\text{mod}(k,2)=1$) εκχωρούν τα διαθέσιμα φέροντα από 1 έως N , ενώ οι υπόλοιπες ($\text{mod}(k,2)=0$) από N έως 1.

Όπως και στο Σειριακό αλγόριθμο, αξίζει να σημειωθεί ότι η διαχείριση πόρων δεν απαιτεί τη γνώση των συνθηκών καναλιού.

5.6 Σύνοψη

Ολοκληρώνοντας το παρόν κεφάλαιο με την παρουσίαση των OFDMA RRM αλγορίθμων που υλοποιήθηκαν και προσομοιώθηκαν, με βάση το μοντέλο

- Εκχώρηση χρήστη σε BS
- Εκχώρηση φερόντων σε χρήστη
- Bit Loading και έλεγχος ισχύος

όπως αυτό έχει προταθεί από τη θεμελιώδη εργασία του Zander στο [45], θα λέγαμε ότι οι προτάσεις που παρουσιάζονται στην παρούσα συνοψίζονται παρακάτω,

- Εκχώρηση χρήστη σε BS
 - Προσαρμοστική επιλογή κυψέλης – Adaptive Cell Selection (ACS)
 - Μη προσαρμοστική επιλογή κυψέλης
- Εκχώρηση φερόντων στον χρήστη
 - Προσαρμοστική εκχώρηση φερόντων (Reuse-1)
 - Προσαρμοστική εκχώρηση φερόντων με διάσπαση κυψελών (r regions – Reuse- N_r)
 - Σειριακή εκχώρηση φερόντων
 - Συντεταγμένη (coordinated) εκχώρηση φερόντων
- Bit Loading και έλεγχος ισχύος
 - Προσαρμοστικός καθορισμός του επιπέδου διαμόρφωσης
 - Μοναδικό επίπεδο διαμόρφωσης

Όλα τα παραπάνω θα μπορούσαν να συνδυάζονται μεταξύ τους δίνοντας ένα πλήθος διαφορετικών RRM αλγορίθμων, με διαφορετικά αποτελέσματα κάθε φορά. Επίσης, θα μπορούσαμε να βελτιώσουμε ακόμα περαιτέρω την απόδοση και επίδοση του συστήματος εφαρμόζοντας ιδέες όπως είναι η τομεοποίηση (sectorization), η οποία, όπως παρουσιάστηκε προηγουμένα καταπιέζει τις ομοδιαυλικές παρεμβολές. Περαιτέρω αναζήτηση θα μας οδηγούσε σε ακόμα ευφύτερα συστήματα κεραιών, όπως είναι οι switch-beam κεραιές ή συστήματα MIMO κεραιών.

Κεφάλαιο 6ο

Προσομοίωση Αλγορίθμων RRM

Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν και αναλύθηκαν αλγόριθμοι διαχείρισης ασυρμάτων πόρων για ένα πολυκυψελωτό σύστημα OFDMA. Στον παρόν κεφάλαιο, αφού προηγηθεί μια σύντομη εισαγωγή στις παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση των αλγορίθμων αυτών, ακολουθούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν με μια ταυτόχρονη ανάλυση και έναν σχολιασμό των όσων προέκυψαν από τις προσομοιώσεις αυτές. Το καταληκτικό αυτό κεφάλαιο της παρούσης, ολοκληρώνεται με την παρουσίαση των βασικών συμπερασμάτων που προέκυψαν από τη μελέτη και προσομοίωση των αλγορίθμων διαχείρισης ασυρμάτων πόρων για πολυκυψελωτά OFDMA συστήματα.

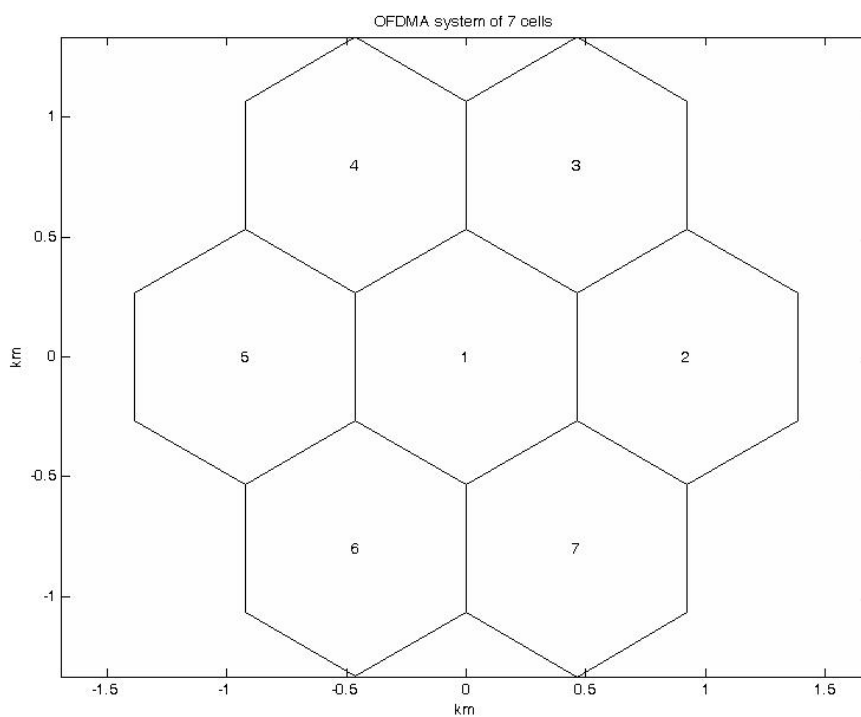
6.1 Παράμετροι του πολυκυβελωτού OFDMA συστήματος

6.1.1 Χωρική τοποθέτηση

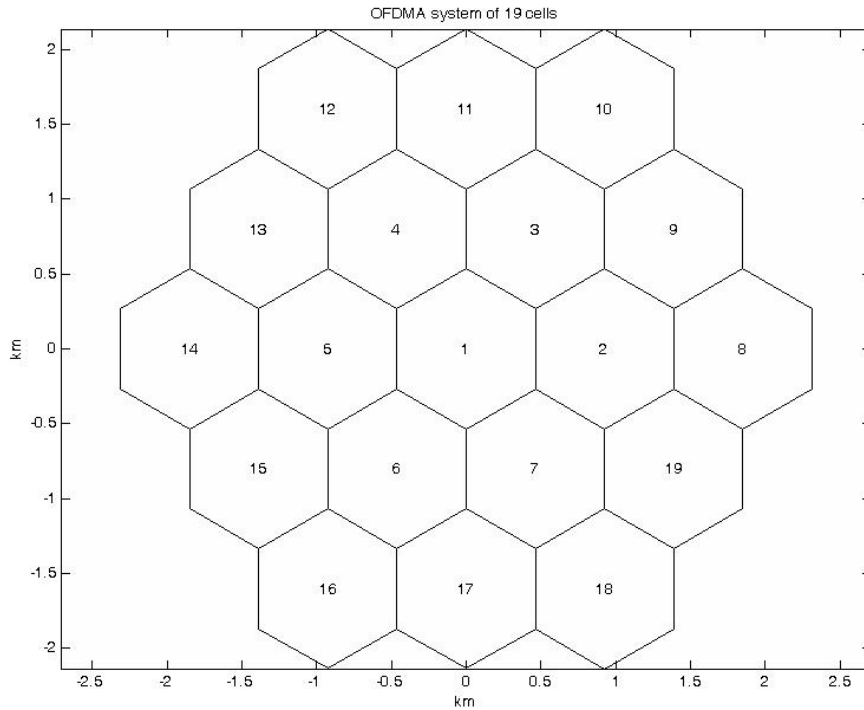
Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το πολυκυβελωτό OFDMA σύστημα που εξετάζεται αποτελείται από T σειρές (tiers) κυβελών, με αποτέλεσμα το πλήθος K των κυβελών να καθορίζεται ως

$$K = 1 + 3(T - 1)T, \quad T = 1, 2, \dots$$

Στα αποτελέσματα που ακολουθούν, εξετάστηκαν συστήματα 2 (Εικόνα 6.1) και 3 (Εικόνα 6.2) tiers, ήτοι 7 και 19 κυβελών, αντιστοίχως.



Εικόνα 6.1: OFDMA σύστημα 7 κυβελών



Εικόνα 6.2: OFDMA σύστημα 19 κυψελών

Το κέντρο της κυψέλης $k=1$ τοποθετείται κατά σύμβαση στο σημείο $(x=0,y=0)$, το κέντρο της πρώτης κυψέλης κάθε tier βρίσκεται επί του θετικού οριζόντιου ημιάξονα, ενώ η αρίθμηση των κυψελών γίνεται ανθωρολογιακά.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειώσουμε ότι στα αποτελέσματα που ακολουθούν δεν ενεργοποιήθηκε η δυνατότητα της προσαρμοστικής επιλογής ACS, στις περιπτώσεις που υπήρχε η δυνατότητα αυτή, θέτοντας $K_{checked}^{max}=1$.

6.1.2 Φασματικοί πόροι

Η κεντρική φέρουσα συχνότητα λειτουργίας του συστήματος είναι $f_c=2.5\text{GHz}$ περί την οποία διατίθεται συνολικό φάσμα $W_t=10\text{MHz}$. Αυτό σημαίνει ότι το διαθέσιμο φάσμα εκτείνεται από τη συ-

χνότητα $f_{c,min}=f_c-\frac{W_t}{2}=2.495\text{GHz}$ έως τη συχνότητα $f_{c,max}=f_c+\frac{W_t}{2}=2.505\text{GHz}$. Το διαθέσιμο αυτό φάσμα των 10MHz διαιρείται σε $N=128$ OFDMA φέροντα, όπου $N=128=2^7$ το μέγεθος του FFT αλγορίθμου που θα χρησιμοποιηθεί από τους πολυπλέκτες και αποπολυπλέκτες του συστήματος.

Το φασματικό εύρος ενός εκάστου OFDMA φέροντος είναι $W_n=\frac{W_t}{N}=78.125\text{kHz}$ και ο

αξιοποιήσιμος χρόνος συμβόλου είναι $T_e = \frac{1}{W_n} = 12.8 \mu\text{sec}$. Όπως έχει ήδη ειπωθεί, θεωρούμε ότι όλα τα φέροντα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξυπηρέτηση των αναγκών των χρηστών σε ρυθμό δεδομένων, ούτως ειπείν δεν υπάρχουν διαστήματα φύλαξης (μη χρησιμοποιούμενα φέροντα) ούτε κανάλια-πilot. Κάθε φέρον n , αντιστοιχίζεται στην κεντρική φέρουσα συχνότητά του, η οποία

$$\text{και είναι } f_n = f_{c, \min} + \left(n - \frac{1}{2}\right) W_n, \quad n=1, \dots, N$$

Οι επιτρεπτές διαμορφώσεις φέροντος που επελέγησαν είναι BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM, με αντίστοιχο επίπεδο διαμόρφωσης $b=[1,2,4,6]$ bps/Hz. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 6.1) δίνεται ο ρυθμός δεδομένων που μπορεί να προσφέρει ένα κανάλι, το οποίο διαμορφώνεται με κάποια από τις παραπάνω επιτρεπτές διαμορφώσεις.

Διαμόρφωση	Επίπεδο Διαμόρφωσης b	Ρυθμός Δεδομένων ανά φέρον $R_n = b \cdot W_n$
BPSK	1 bps/Hz	78.125 kbps
QPSK	2 bps/Hz	156.25 kbps
16-QAM	4 bps/Hz	312.5 kbps
64-QAM	6 bps/Hz	468.75 kbps

Πίνακας 6.1: Ρυθμός Δεδομένων ανά φέρον

Παρατηρούμε στο σημείο αυτό ότι ο μέγιστος ρυθμός δεδομένων που μπορεί να αποδώσει ένα κανάλι (προφανώς πρόκειται για κανάλι διαμορφωμένο με 64-QAM) είναι $R_n^{max} = 468.75 \text{ kbps}$.

6.1.3 Χρήστες του συστήματος

Κάθε χρήστης που εμφανίζεται σε κάποια τυχαία θέση στο σύστημα, είτε εξυπηρετηθεί τελικώς από αυτό είτε όχι, επιλέγει τυχαία το ρυθμό δεδομένων που θα απαιτήσει από το σύστημα μεταξύ των διακριτών τιμών 128kbps, 256kbps, 512kbps. Για τα δεδομένα των σύγχρονων “σταθερών” επικοινωνιών, οι ρυθμοί αυτοί φαντάζουν ίσως εξαιρετικά χαμηλοί. Σε αντίθεση όμως με την κατάσταση που επικρατεί στα δίκτυα κινητών επικοινωνιών 2ης και 3ης γενιάς, οι ρυθμοί αυτοί είναι αρκετά ψηλοί. Η ποιότητα υπηρεσίας που ζητά ο χρήστης συμπληρώνεται από την απαίτηση ο ρυθμός εσφαλμένων bit (Bit Error Rate – BER) να μην ξεπερνά το 10^{-5} , ήτοι $Pe_u = 10^{-5}$.

Στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 6.2) δίδεται το πλήθος των φερόντων που απαιτεί ένας χρήστης για να καλύψει τις ανάγκες του σε ρυθμό δεδομένων, ανάλογα με το είδος της διαμόρφωσης που χρησιμοποιεί.

Διαμόρφωση Φέροντος	Αιτούμενος Ρυθμός Δεδομένων		
	128kbps	256kbps	512kbps
BPSK	2 SCs	4 SCs	7 SCs
QPSK	1 SCs	2 SCs	4 SCs
16-QAM	1 SCs	1 SCs	2 SCs
64-QAM	1 SCs	1 SCs	2 SCs

Πίνακας 6.2: Ελάχιστος αριθμός φερόντων για την κάλυψη του αιτούμενου ρυθμού δεδομένων

Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε κατ' αρχήν ότι όταν ένας χρήστη εξυπηρετείται από το σύστημα, χρησιμοποιεί από 1 έως και 7 OFDMA φέροντα για την κάλυψη των αναγκών του σε ρυθμό δεδομένων.

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι ο ρυθμός δεδομένων που το σύστημα προσφέρει στο χρήστη, δεδομένου ότι το εύρος ζώνης των καναλιών είναι κβαντισμένο, θα είναι ίσο ή μεγαλύτερο από το ρυθμό δεδομένων που ο χρήστης αιτείται. Έτσι, ως παράδειγμα, στην περίπτωση που χρήστης απαιτεί 128kbps από το σύστημα, αν η απαίτηση του αυτή καλυφθεί με την εκχώρηση ενός QPSK OFDMA φέροντος, τότε ο προσφερόμενος ρυθμός δεδομένων για το χρήστη αυτό θα είναι 156.25kbps, το οποίο υπερβαίνει τον αιτούμενο ρυθμό δεδομένων. Αυτό το πλεόνασμα που προκύπτει και ουσιαστικά παραμένει αναξιοποίητο οδηγεί στις πραγματικές υλοποιήσεις OFDMA συστημάτων να προτείνεται η χρήση $N=2^{10}=1024$ OFDMA φερόντων ή ακόμα και $N=2^{11}=2048$, και αντίστοιχου μεγέθους βέβαια (IFFT) αλγορίθμου.

Ένα ερώτημα που προέκυψε κατά των υλοποίηση των RRM αλγορίθμων, αφορά το πλήθος των χρηστών που μπορούν δυνητικά να εξυπηρετηθούν από το διαθέσιμο εύρος ζώνης του συστήματος. Έστω R_u^{min} ο ελάχιστος αιτούμενος ρυθμός δεδομένων και b_{max} το μέγιστο επιτρεπόμενο επίπεδο διαμόρφωσης. Ο μέγιστος ρυθμός δεδομένων που μπορεί να αποδώσει ένα κανάλι εύρους ζώνης W_n θα είναι,

$$R_n^{max} = b_{max} \cdot W_n$$

Αυτό συνεπάγεται ότι ο χρήστης εκείνος που αιτείται τον ελάχιστο δυνατό ρυθμό δεδομένων BR_{min} θα χρειαστεί για την εξυπηρέτησή του

$$ChannelsPerUser_{min} = \text{ceil} \left(\frac{R_u^{min}}{R_n^{max}} \right)$$

κατ' ελάχιστον OFDMA φέροντα.

Επειδή το δίκτυο που εξετάζεται έχει συντελεστή επαναχρησιμοποίησης 1^{11} , κάθε μία από τις K κυψέλες του συστήματος έχει στη διάθεσή της το σύνολο των N φερόντων. Επομένως, μπορεί να εξυ-

11 Επειδή αυτό που εν προκειμένω αναζητούμε είναι ένα άνω όριο για το πλήθος των χρηστών που πρόκειται να εισαχθούν στο σύστημα, στην περίπτωση που έχουμε συντελεστή επαναχρησιμοποίησης μεγαλύτερο της μονάδας, το μέγιστο πλήθος χρηστών που θα προκύψει θα είναι μικρότερο αυτού που προκύπτει από την παραπάνω ανάλυση.

πηρετήσει κατά μέγιστο

$$UsersPerCell_{max} = \text{floor} \left(\frac{N}{ChannelsPerUser_{min}} \right)$$

χρήστες.

Καταλήγοντας, το μέγιστο πλήθος χρηστών που μπορεί δυνητικά να εξυπηρετήσει το σύστημα των K κυψελών είναι

$$U = K \cdot UsersPerCell_{max}$$

6.1.4 Σταθμός βάσης – BS κυψελών

Κάθε κυψέλη διαθέτει ένα σταθμό βάσης, ο οποίος θεωρείται τοποθετημένος στο κέντρο της κυψέλης. Το ύψος του ιστού της κεραίας του σταθμού βάσης είναι $h_{BS}=32\text{m}$. Η μέγιστη ισχύς που μπορεί να εκπέμψει συνολικά η κεραία του σταθμού βάσης είναι $P_{max}=43\text{dBm}$ ενώ το κέρδος της κεραίας, όταν αυτή υποτίθεται ομοιοκατευθυντική είναι $G_{BS}=15\text{dBi}$ [33]. Στην περίπτωση της τομεοποίησης, όπου ο σταθμός βάσης διαθέτει S κεραίες τοποθετημένες στον ίδιο ιστό, οι παράμετροι των κεραίων δίδονται στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 6.3),

Πλήθος sectors S	Μέγιστη Εκπεμπόμενη Ισχύς ανά sector $P_s^{max} = \frac{P_{max}}{S}$	Μέγιστο κέρδος κεραίας sector $G_{BS,s} = S \cdot G_{BS}$	Γωνία ημίσειας ισχύος $\theta_{3dB,s}$	Μέγιστη απόσβεση κεραίας sector A_s
1	43dBm	15dBi	-	0dB
3	38.23dBm	19.77dBi	70°	20dB
6	35.22dBm	22.78dBi	35°	23dB

Πίνακας 6.3: Παράμετροι κεραίας BS στην περίπτωση της τομεοποίησης

Επίσης, στην περίπτωση της τομεοποίησης, η διασπορά της γωνίας άφιξης των πολυδιαδρομικών συνιστωσών ορίζεται να είναι $\sigma_{AS}^2 = 5^\circ$ [18].

6.1.5 Τερματικός εξοπλισμός χρηστών

Κάθε χρήστης που απασχολεί το σύστημα, είτε προσπαθώντας να εισαχθεί σε αυτό είτε εξυπηρετούμενος από αυτό, διαθέτει ένα τερματικό που μπορεί να λειτουργεί ως OFDMA δέκτης. Θεωρούμε ότι η κεραία του τερματικού αυτού είναι κατευθυντική με κέρδος $G_{SS}=-1\text{dBi}$ και “στοχεύει” προς το σταθμό βάσης που εξυπηρετεί τον εν λόγω χρήστη. Το τερματικό αυτό βρίσκεται σε ύψος $h_{SS}=1.5\text{m}$ ενώ ο δέκτης του έχει συντελεστή θορύβου $F_{SS}=7\text{dB}$ [33].

6.1.6 Ασύρματος διάυλος επικοινωνίας

Θεωρούμε ότι ο ασύρματος διάυλος επικοινωνίας χαρακτηρίζεται από ένα συντελεστή σκίασης $\sigma_{shadowing}=8\text{dB}$. Η επίδραση της σκίασης λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό του κέρδους καναλιού ως μια κανονικά κατανεμημένη διακύμανση της λαμβανόμενης ισχύος.

Ο θόρυβος του ασύρματου διαύλου μοντελοποιείται ως λευκός προσθετικός γκαουσιανός θόρυβος (AWGN) μηδικής μέσης τιμής. Η φασματική πυκνότητα ισχύος του θορύβου, όπως την αντιλαμβάνεται ο δέκτης, κατά τα προαναφερθέντα προκύπτει ίση με,

$$N_0 = (F_{SS} - 1) kT_0 = -137.94 \text{dBm/kHz}$$

οπότε η ισχύς του θορύβου στο εύρος ζώνης ενός OFDMA φέροντος θα είναι

$$\sigma_{N,n}^2 = N_0 W_n = -119.02 \text{dBm}$$

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθούμε και στον τρόπο υπολογισμού του κέρδους καναλιού, το οποίο είναι άμεσα εξαρτώμενο από το μοντέλο διάδοσης που επελέγη. Έστω ότι επιθυμούμε να υπολογίσουμε το κέρδος καναλιού $G_{u,n,k}$ του χρήστη u ο οποίος εξυπηρετείται από την κυψέλη k μέσω του φέροντος n . Η απόσταση μεταξύ του χρήστη και του BS είναι $d_{u,k}$ ενώ η φέρουσα συχνότητα του φέροντος είναι f_n . Επιπλέον αυτών, θεωρούμε το συντελεστή X_{shadow}^{12} (dB), ο οποίος μοντελοποιεί το φαινόμενο της σκίασης, ο οποίος ορίζεται ως,

$$X_{u,k}^{shadow} = \sigma_{shadow} \cdot randn$$

όπου $randn$ γεννήτρια τυχαίων αριθμών κανονικά καταναμημένων. Συνεπάγεται ότι η τυχαία μεταβλητή X_{shadow} έχει μηδενική μέση τιμή και τυπική απόκλιση ίση με τη σκίαση του καναλιού. Το μοντέλο διάδοσης που χρησιμοποιείται είναι το extended Okumura-Hata για ημιαστικό περιβάλλον διάδοσης, το οποίο μας δίνει τις απώλειες διαδρομής (dB) ως

$$PL_{u,n,k} = 46.3 + 33.9 \log_{10}(f_n) - 13.82 \log_{10}(h_{BS}) - a_n(h_{SS}) + (44.9 - 6.55 \log_{10}(h_{BS})) \log_{10}(d_{u,k})$$

όπου

$$a_n(h_{SS}) = (1.1 \log_{10}(f_n) - 0.7) h_{SS} - (1.56 \log_{10}(f_n) - 0.8)$$

Το συνολικό κέρδος καναλιού (dB), όπως το αντιλαμβάνεται ο OFDMA δέκτης θα προκύψει ως

$$G_{u,n,k} = G_{BS} + G_{SS} - PL_{u,n,k} + X_{u,k}^{shadow}$$

6.1.7 Διαστασιολόγηση του συστήματος – Προϋπολογισμός ζεύξης (Link Budget)

6.1.7.1 Ευαισθησία Δέκτη

Ως ευαισθησία του δέκτη του τερματικού εξοπλισμού των χρηστών ορίζουμε την ελάχιστη ισχύ που πρέπει να λαμβάνει ο δέκτης ώστε να μπορεί να αναπαράγει το ψηφιακό σήμα με το δεδομένο ρυθμό εσφαλμένων bit. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το περιθώριο Γ του λόγου σήματος προς παρεμβολή και θόρυβο με δεδομένη την απαίτηση για ρυθμό εσφαλμένων bit $Pe=10^{-5}$ δίδεται από τη σχέση,

$$\Gamma = \frac{1}{3} \left[Q^{-1} \left(\frac{Pe}{4} \right) \right]^2 = 8.42 \text{dB}$$

Επακόλουθα, ο ελάχιστος λόγος σήματος προς παρεμβολή και θόρυβο με δεδομένο επίπεδο διαμόρφωσης b , δίνεται από τη σχέση

12 Σε μια ζεύξη μεταξύ του χρήστη u και του BS k , θεωρούμε ότι όλα τα N φέροντα αντιμετωπίζουν την ίδια σκίαση $X_{u,k}^{shadow}$

$$\gamma = \Gamma (2^b - 1)$$

Στον πίνακα που ακολουθεί δίνονται οι τιμές του ελάχιστου SNIR για τις διαφορετικές επιτρεπόμενες διαμορφώσεις (Πίνακας 6.4).

Διαμόρφωση	Επίπεδο Διαμόρφωσης \mathbf{b}	Ελάχιστο SNIR $\gamma = \Gamma (2^b - 1)$	Ελάχιστη λαμβανόμενη ισχύς $P_{SS}^{min} = \gamma \cdot \sigma_{N,t}^2$	Ακτίνα Ραδιοκάλυψης R_c
BPSK	1	8.42dB	-89.53dBm	854.2m
QPSK	2	13.19dB	-84.76dBm	624.3m
16-QAM	4	20.18dB	-77.77dBm	394.4m
64-QAM	6	26.41dB	-71.53dBm	261.9m

Πίνακας 6.4: SNIR_{min} για τις επιτρεπόμενες διαμορφώσεις

Στο συνολικό διαθέσιμο εύρος ζώνης W_t , όπου θα πρέπει να μπορεί να λειτουργήσει ο δέκτης, η ισχύς του θορύβου προκύπτει ίση με

$$\sigma_{N,t}^2 = N_0 W_t = -97.94\text{dBm}$$

Υποθέτοντας τώρα μηδενικό επίπεδο παρεμβολής, προκύπτει ότι η ελάχιστη λαμβανόμενη ισχύς του δέκτη θα πρέπει να είναι

$$P_{SS}^{min} = \gamma \cdot \sigma_{N,t}^2$$

Τα αποτελέσματα για την ελάχιστη λαμβανόμενη ισχύ του δέκτη δίνονται επίσης στον παραπάνω πίνακα (Πίνακας 6.4).

6.1.7.2 Μέγιστη απόσταση χρήστη-BS – Ακτίνα κυψελών

Λόγω του φαινομένου της σκίασης, η λαμβανόμενη ισχύς στα όρια των κυψελών δεν είναι ένα ντετερμινιστικό μέγεθος αλλά, όπως έχει ήδη αναφερθεί, ακολουθεί λογαριθμοκανονική κατανομή με τη μέση τιμή να καθορίζεται από τις απώλειες διαδρομής και τη διασπορά από το συντελεστή σκίασης. Έστω ότι στα όρια των κυψελών R_c απαιτούμε πιθανότητα ραδιοκάλυψης $p=85\%$, δηλαδή κατά το 85% των περιπτώσεων, η λαμβανόμενη ισχύς να ξεπερνά την ελάχιστη απαιτούμενη λαμβανόμενη ισχύ. Θα ισχύει τότε ότι

$$\begin{aligned} Pr [P_{SS}^r(R_c) \geq P_{SS}^{min}] = p &\Rightarrow Pr [P_{SS}^r(R_c) \leq P_{SS}^{min}] = 1 - p \Rightarrow \\ Q \left(\frac{\overline{P_{SS}^r}(R_c) - P_{SS}^{min}}{\sigma_{shadow}} \right) = 1 - p &\Rightarrow \overline{P_{SS}^r}(R_c) = P_{SS}^{min} + \sigma_{shadow} Q^{-1}(1 - p) \end{aligned}$$

όπου $\overline{P_{SS}^r}$ η μέση λαμβανόμενη ισχύς. Για την τελευταία, ισχύει ότι,

$$\begin{aligned} \overline{P_{SS}^r}(R_c) &= P_{BS}^{max} + G_{BS} + G_{SS} - PL(R_c) \Rightarrow \\ PL(R_c) &= P_{BS}^{max} - \overline{P_{SS}^r}(R_c) + G_{BS} + G_{SS} \Rightarrow \\ PL(R_c) &= P_{BS}^{max} - P_{SS}^{min} - \sigma_{shadow} Q^{-1}(1 - p) + G_{BS} + G_{SS} \end{aligned}$$

Από το μοντέλο διάδοσης που χρησιμοποιείται, προκύπτει ότι

$$PL(R_c) = 46.3 + 33.9 \log_{10}(f_c) - 13.82 \log_{10}(h_{BS}) - a(h_{SS}) + (44.9 - 6.55 \log_{10}(h_{BS})) \log_{10}(R_c)$$

όπου

$$a(h_{SS}) = (1.1 \log_{10}(f_c) - 0.7) h_{SS} - (1.56 \log_{10}(f_c) - 0.8)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει η ακτίνα ραδιοκάλυψης για τις διαφορετικές επιτρεπόμενες διαμορφώσεις, όπως αυτή δίδεται στην τελευταία στήλη του παραπάνω πίνακα (Πίνακας 6.4). Για την τελική επιλογή της ακτίνας των κυψελών, επελέγη τελικώς η μέση τιμή των ακτίνων ραδιοκάλυψης για κάθε μία από τις διαφορετικές διαμορφώσεις και έτσι τελικώς έχουμε

$$R_c = 533.7 \text{m}$$

Η ακτίνα αυτή χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν, είτε εφαρμόζονταν όλες οι επιτρεπόμενες διαμορφώσεις είτε όχι, ακόμα και στην περίπτωση που είχαμε χωρισμό των κυψελών σε τομείς.

6.1.8 Εισαγωγή νέων χρηστών στο σύστημα – Ζητήματα σύγκλισης των αλγορίθμων

Όταν ένας νέος χρήστης εισάγεται στο σύστημα, τοποθετείται σε τυχαία θέση, εντός όμως της “γεωμετρικής” περιοχής του συστήματος. Με άλλα λόγια, ένας χρήστης δε μπορεί να βρίσκεται έξω από τα γεωγραφικά όρια του συστήματος, τα οποία ορίζονται από τις ακμές των κυψελών. Κατόπιν ο χρήστης αυτός επιλέγει, τυχαία επίσης, τον ρυθμό δεδομένων που θα απαιτήσει από το σύστημα, από ένα σύνολο διαφορετικών υπηρεσιών, όπως έχει ήδη αναφερθεί, με το δεδομένο ρυθμό εσφαλμένων bit. Κατόπιν εκτελείται ο RRM αλγόριθμος, όποιος και αν είναι αυτός, και αποφασίζεται έτσι η εισαγωγή ή όχι του νέου αυτού χρήστη.

Ένα μείζον ζήτημα το οποίο ανακύπτει στο σημείο αυτό είναι το πότε θα πρέπει να σταματά η προσπάθεια εισαγωγής νέων χρηστών, πότε δηλαδή το σύστημα φτάνει σε κορεσμό. Επελέγη τελικώς η προσπάθεια εισαγωγής νέων χρηστών να σταματά όταν το πλήθος των χρηστών που έχουν απορριφθεί από τον RRM αλγόριθμο υπερβαίνει το πλήθος των χρηστών που έχουν ήδη εισαχθεί στο σύστημα κατά ένα σταθερό κατώφλι 100 χρηστών. Επειδή η συμπεριφορά του συστήματος είναι ομαλή, δηλαδή όσο μικρότερο αριθμό χρηστών εξυπηρετεί ήδη το σύστημα τόσο μικρότερη είναι η πιθανότητα να απορρίψει ένα χρήστη που αιτείται εξυπηρέτησης, η συνθήκη αυτή μας εξασφαλίζει ότι ο αλγόριθμος θα τερματίσει αφού το σύστημα προσπαθήσει να εισαγάγει συνολικά $2U_a + 100$ χρήστες, όπου U_a το πλήθος των χρηστών που εισάγονται. Η πράξη έδειξε ότι περαιτέρω προσπάθεια εισαγωγής χρηστών είναι μάταιη αφού πρακτικά από το σημείο αυτό και πέρα εισάγονται ελάχιστοι χρήστες (1 ή 2 εν γένει) και μάλιστα υπό την προϋπόθεση ότι θα βρεθούν σε “πλεονεκτικές” θέσεις.

Όλα τα προσομοιωτικά αποτελέσματα που ακολουθούν, προέκυψαν από επαναλαμβανόμενες προσομοιώσεις Monte Carlo [47][48] ενός εκάστου του αλγορίθμου για κάθε ένα από τα σενάρια που αναφέρεται. Αυτό έγινε ώστε να επιτευχθεί απόσβεση των αποτελεσμάτων από την τυχαιότητα που ενέχει ο προσομοιωτικός κώδικας, καταλήγοντας έτσι σε εργοδικές μέσες τιμές για τα μελετούμενα μεγέθη. Η συνθήκη σύγκλισης για την Monte Carlo προσομοίωση είναι η κάτωθι

$$\frac{\left| \text{mean}_{i=1:N} U_a^i - \text{mean}_{i=1:N-1} U_a^i \right|}{\text{mean}_{i=1:N} U_a^i} \leq 10^{-4} \wedge N \geq 50$$

όπου

U_a^i : Πλήθος χρηστών που εισήχθησαν στην i -οστή επανάληψη

N : Πλήθος επαναλήψεων

Η σύνθετη αυτή συνθήκη εξασφαλίζει ότι το σχετικό σφάλμα σύγκλισης θα είναι μικρότερο από 0.01% και συνάμα ότι θα γίνουν τουλάχιστον 50 επαναλήψεις του προσομοιωτικού κώδικα. Η εν λόγω συνθήκη μας δίνει ένα συνολικό πλήθος επαναλήψεων που κυμαίνονται από 50 έως 100 συνολικά.

6.1.9 Χωρισμός σε τομείς - Διάσπαση κυψελών

Για το χωρισμό σε τομείς, στην ανάλυση που ακολουθεί, επιλέχθηκε ο χωρισμός της κυψέλης σε τρεις τομείς, οπότε και έχουμε τρεις τομείς των 120° ενώ οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται έχουν ήδη αναλυθεί προηγούμενα.

Στις περιπτώσεις όπου εξετάζεται ο προσαρμοστικός αλγόριθμος με διάσπαση κυψελών, κάθε κυψέλη του συστήματος χωρίζεται σε δύο περιοχές επαναχρησιμοποίησης, σύμφωνα με τα προαναφερθέντα, εκ των οποίων η εσωτερική διατηρεί το συντελεστή επαναχρησιμοποίησης 1 ενώ η εξωτερική διαθέτει συντελεστή επαναχρησιμοποίησης ίσο με 3.

6.2 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων

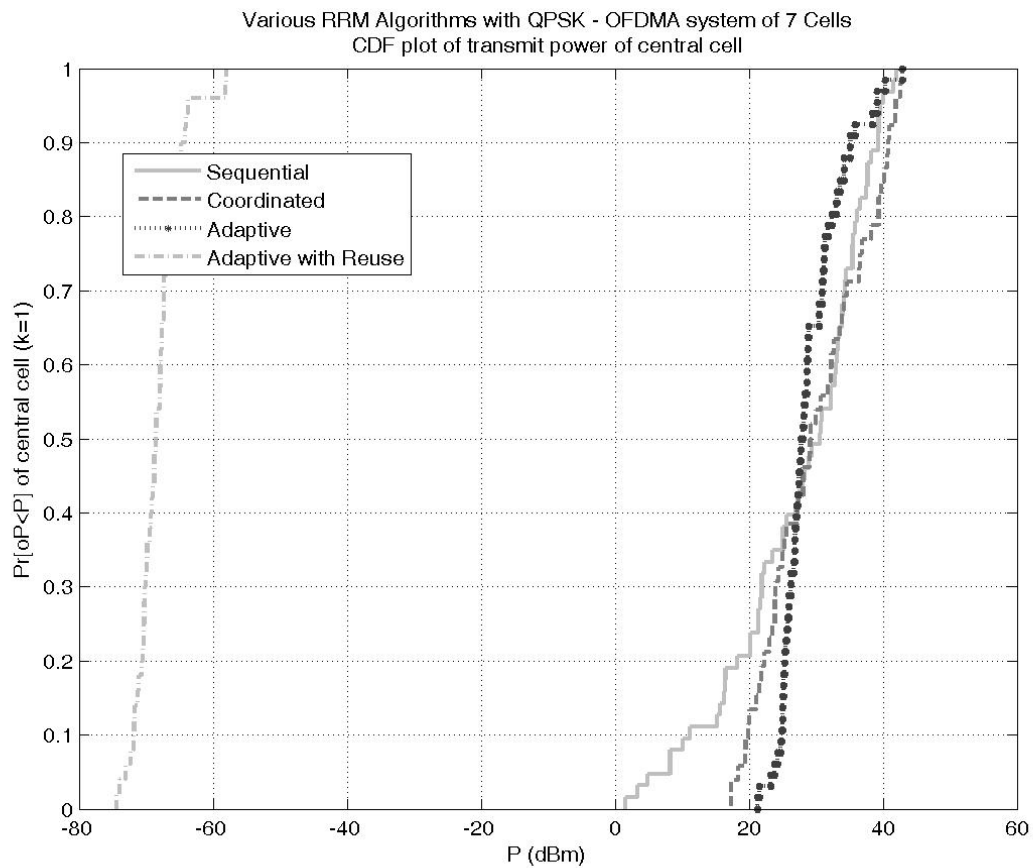
Για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, επιλέγουμε να παρουσιάσουμε εν γένει τα αποτελέσματα εκείνα που αφορούν στην κεντρική κυψέλη του συστήματος (κυψέλη $k=1$). Η επιλογή αυτή είναι βάσιμη δεδομένου ότι η κεντρική κυψέλη, καθώς περιβάλλεται από ένα σύνολο άλλων κυψελών, καλείται να λειτουργήσει σε ένα περιβάλλον παρεμβολών, το οποίο μπορούμε να πούμε ότι προσεγγίζει ένα πραγματικό σύστημα OFDMA.

6.2.1 Σενάριο 1° – Μοναδικό Επίπεδο Διαμόρφωσης

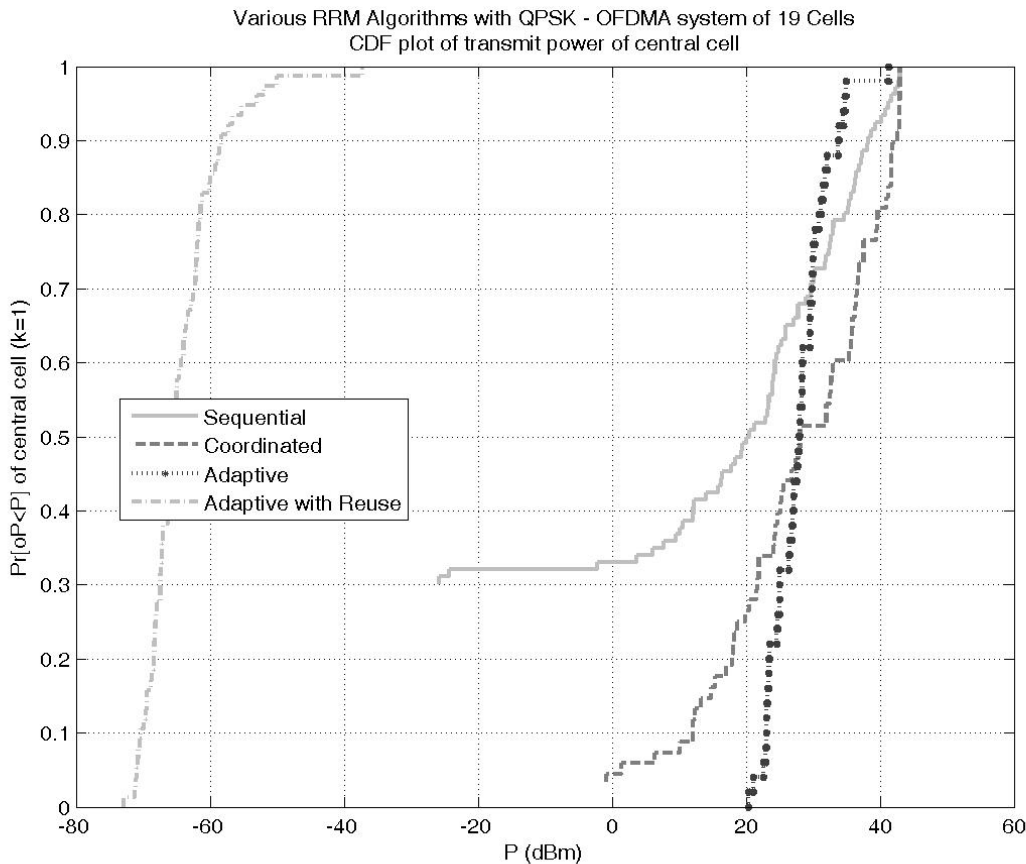
Για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων που ακολουθούν, επιβλήθηκε ως μοναδική επιτρεπόμενη διαμόρφωση η QPSK. Το σενάριο αποσκοπεί στη μελέτη του προσαρμοστικού αλγορίθμου με ή χωρίς διάσπαση κυψελών, του σειριακού αλγορίθμου καθώς επίσης και του συντεταγμένου αλγορίθμου, οπότε ουσιαστικά στοχεύουμε στη μελέτη των διαφορετικών τρόπων εκχώρησης φερόντων στους χρήστες που εισάγονται στο σύστημα.

6.2.1.1 Εκπεμπόμενη Ισχύς

Στα δύο διαγράμματα που ακολουθούν δίδεται η γραφική απεικόνιση της εμπειρικής συνάρτησης κατανομής πιθανότητας (Cumulative Distribution Function – CDF) [49] για τη συνολική εκπεμπόμενη ισχύ της κεντρικής κυψέλης για ένα OFDMA σύστημα 7 κυψελών (Εικόνα 6.3) και 19 (Εικόνα 6.4) κυψελών αντίστοιχα.



Εικόνα 6.3: Σενάριο 1^ο – Διάγραμμα CDF εκπεμπόμενης ισχύος κεντρικής κυψέλης – OFDMA σύστημα 7 κυψελών



Εικόνα 6.4: Σενάριο 1° – Διάγραμμα CDF εκπεμπόμενης ισχύος κεντρικής κυψέλης – OFDMA σύστημα 19 κυψελών

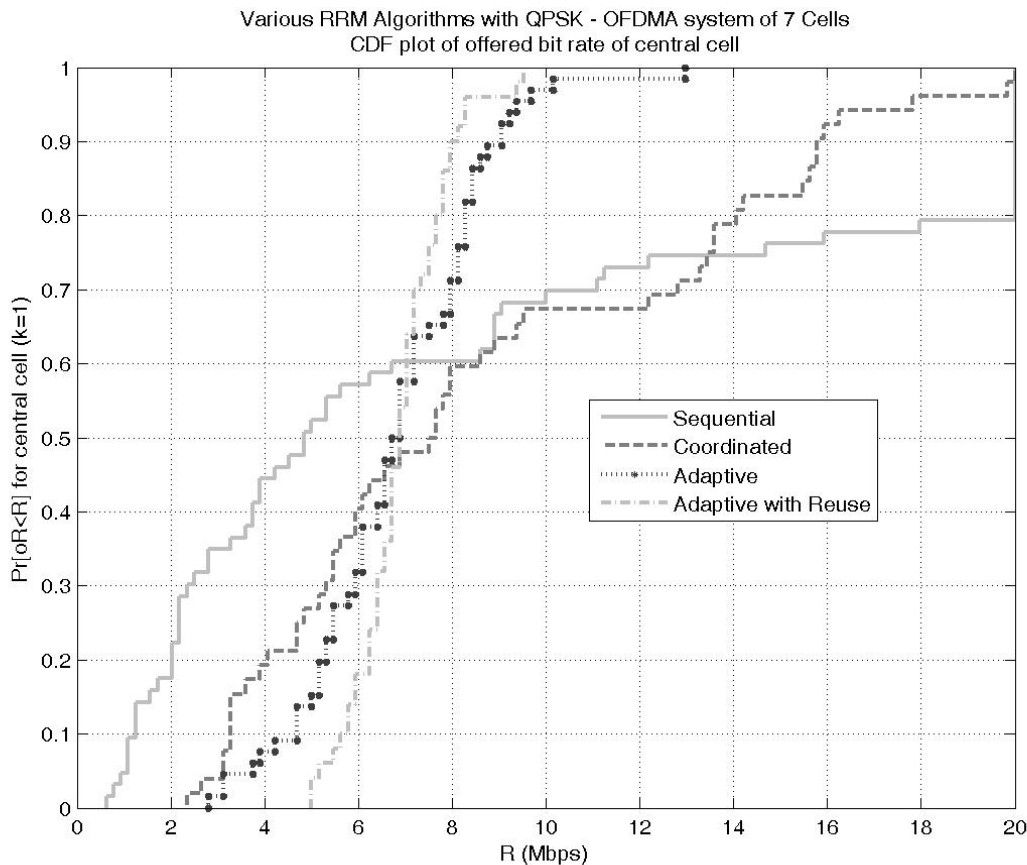
Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε κατ' αρχήν ότι πληρείται πάντοτε η συνθήκη της μέγιστης εκπεμπόμενης ισχύος, δηλαδή σε καμία περίπτωση η κεντρική κυψέλη δεν εκπέμπει ισχύ μεγαλύτερη των 43dBm, που είναι η ως μέγιστη ορισθείσα εκπεμπόμενη ισχύς. Μια δεύτερη παρατήρηση είναι ότι ο προσαρμοστικός αλγόριθμος χωρίς (Adaptive) ή με διάσπαση κυψελών (Adaptive with Reuse) εμφανίζει μικρότερη διασπορά τιμών της συνολικά εκπεμπόμενης ισχύος της κεντρικής κυψέλης, σε σχέση με τον σειριακό (Sequential) και συντεταγμένο (Coordinated) αλγόριθμο. Η μικρότερη αυτή διασπορά τιμών θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως ένα από τα πλεονεκτήματα του προσαρμοστικού αλγορίθμου, δεδομένου ότι καθιστά τη συμπεριφορά του συστήματος ευκολότερα προβλέψιμη.

Το τελευταίο και σημαντικότερο συμπέρασμα που προκύπτει από τα παραπάνω διαγράμματα, είναι ότι ο προσαρμοστικός αλγόριθμος με διάσπαση κυψελών εμφανίζει πολύ χαμηλότερη εκπεμπόμενη ισχύ σε σχέση με τους υπόλοιπους RRM αλγορίθμους. Συγκεκριμένα, ενώ οι υπόλοιποι αλγόριθμοι εξαντλούν τις ενεργειακές δυνατότητες της κυψέλης, ο συγκεκριμένος αλγόριθμος δίνει μέγιστη εκπεμπόμενη ισχύ λίγο μεγαλύτερη των -40dBm. Το αποτέλεσμα αυτό είναι αναμενόμενο καθότι ο σκοπός της διάσπασης κυψελών είναι να αποδίδει τα OFDMA φέροντα κατά τέτοιο τρόπο ώστε να

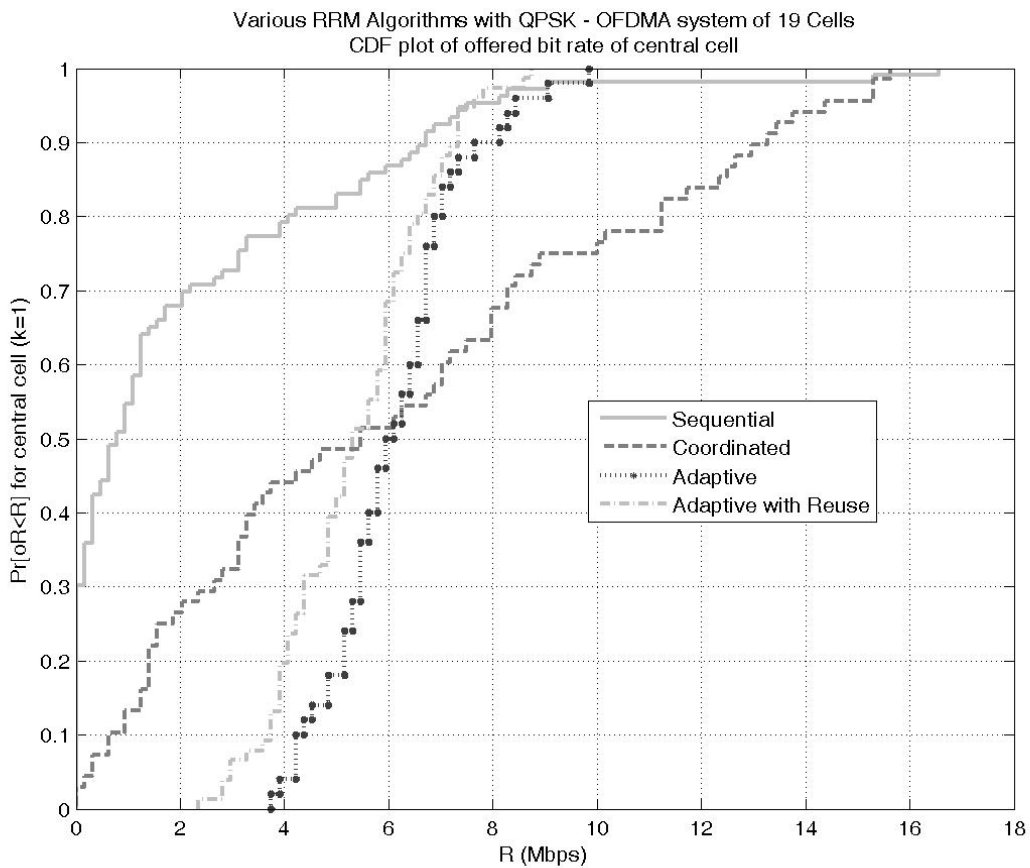
μειώνεται η εκπεμπόμενη ισχύς με απώτερο σκοπό τη μείωση των ομοδιαυλικών παρεμβολών. Έτσι, στην περίπτωση ενός OFDMA συστήματος, ο προσαρμοστικός αλγόριθμος με διάσπαση κυψελών είναι ιδιαίτερα κατάλληλος για τις περιπτώσεις εκείνες που το σύστημα καλείται να λειτουργήσει με χαμηλή εκπεμπόμενη ισχύ, είτε λόγω ενεργειακών περιορισμών, όπου δεν υπάρχει η δυνατότητα ο σταθμός βάσης να εκπέμψει μεγάλη ισχύ, είτε λόγω του ισχύοντος κανονιστικού πλαισίου, το οποίο ορίζει ότι η μέγιστη εκπεμπόμενη ισχύς θα πρέπει να διατηρείται κάτω από ένα συγκεκριμένο όριο.

6.2.1.2 Προσφερόμενος Ρυθμός Δεδομένων

Το επόμενο ζήτημα που εξετάζεται είναι ο ρυθμός δεδομένων που προσφέρουν οι εν λόγω αλγόριθμοι. Για το λόγο αυτό, στα δύο διαγράμματα που ακολουθούν εικονίζεται η συνάρτηση κατανομής πιθανότητας του προσφερόμενου από το σύστημα ρυθμού δεδομένων στους χρήστες που εξυπηρετούνται από την κεντρική κυψέλη για ένα σύστημα 7 κυψελών (Εικόνα 6.5) και 19 κυψελών (Εικόνα 6.6) αντιστοίχως.



Εικόνα 6.5: Σενάριο 1^ο – Διάγραμμα CDF του προσφερόμενου ρυθμού δεδομένων προς τους χρήστες της κεντρική κυψέλης – OFDMA σύστημα 7 κυψελών



Εικόνα 6.6: Σενάριο 1° – Διάγραμμα CDF του προσφερόμενου ρυθμού δεδομένων προς τους χρήστες της κεντρική κυψέλης – OFDMA σύστημα 19 κυψελών

Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει κατ' αρχήν το συμπέρασμα ότι ένα OFDMA σύστημα χωρίς κωδικοποίηση μπορεί να προσφέρει ρυθμό δεδομένων που φτάνει τα 17Mbps ανά κυψέλη, εφαρμόζοντας έναν όχι ιδιαίτερα πολύπλοκο-χρονοβόρο αλγόριθμο, όπως είναι ο συντεταγμένος RRM αλγόριθμος. Το αποτέλεσμα αυτό είναι ιδιαίτερα αισιόδοξο, δεδομένου ο ρυθμός δεδομένων που μπορούν να προσφέρουν τα υφιστάμενα συστήματα κινητών επικοινωνιών είναι κατά πολύ χαμηλότερος αυτού που προβλέπει η παραπάνω προσομοίωση, όπως έχει ήδη αναλυθεί στο πρώτο κεφάλαιο της παρούσης.

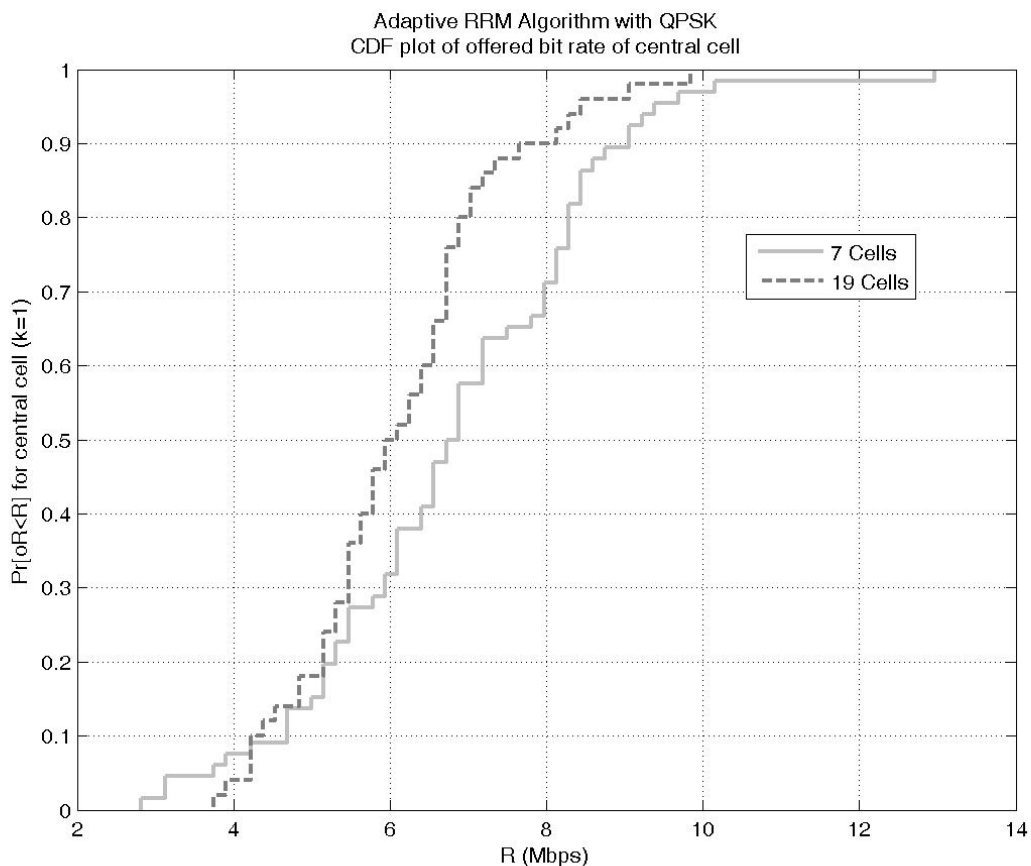
Προχωρώντας παραπέρα την ανάλυση, παρατηρούμε και εδώ το γεγονός της μεγάλης διασποράς που εμφανίζουν τα αποτελέσματα που αφορούν στον σειριακό και συντεταγμένο RRM αλγόριθμο. Αν και οι δύο αυτοί αλγόριθμο προκύπτει ότι μπορούν να προσφέρουν μεγαλύτερο μέγιστο ρυθμό δεδομένων, εν τέλει θα μπορούσαμε να πούμε ότι η συμπεριφορά τους είναι χειρότερη του προσαρμοστικού αλγορίθμου, με ή χωρίς τη διάσπαση κυψελών.

Κατά τη σχεδίαση ενός τέτοιου OFDMA συστήματος, ο σχεδιαστής θα θέσει μια πιθανότητα για τον προσφερόμενο ρυθμό δεδομένων, που προσδοκά να λαμβάνει από την κυψέλη του συστήματος. Αυτό εξάλλου καταδεικνύει και η επιστράτευση πιθανοτικής ανάλυσης, το μη ντετερμινιστικό χαρακτηριστήρα που λαμβάνει τελικά το σύστημα. Σε μια συντηρητική σχεδίαση, θα πρέπει να εστιάσουμε στην

περιοχή πιθανοτήτων $\Pr\{0R < R\}$ που προσεγγίζουν προς το 0, ώστε να μπορούμε να είμαστε σχετικά βέβαιοι ότι το σύστημα θα μπορέσει να ανταποκριθεί στις τιθέμενες απαιτήσεις. Στην περιοχή αυτή, η συμπεριφορά των RRM αλγορίθμων παρατηρούμε ότι ουσιαστικά αντιστρέφεται. Έτσι ο προσαρμοστικός αλγόριθμος εμφανίζει καλύτερη συμπεριφορά, ήτοι προσφέρει μεγαλύτερο ρυθμό δεδομένων.

Περαιτέρω, μελετώντας την RRM τεχνική της διάσπασης των κυψελών στην περιοχή αυτή, παρατηρούμε ότι στη μεν περίπτωση των 7 κυψελών εμφανίζεται κατά τι καλύτερη σε σχέση με τον προσαρμοστικό αλγόριθμο χωρίς διάσπαση ενώ στην περίπτωση του συστήματος των 19 κυψελών, ο αλγόριθμος εμφανίζεται κατά τι χειρότερος. Το φαινόμενο οφείλεται στο γεγονός ότι η διάσπαση κυψελών καθιστά το σύστημα subcarrier limited, το οποίο αναλύεται παρακάτω.

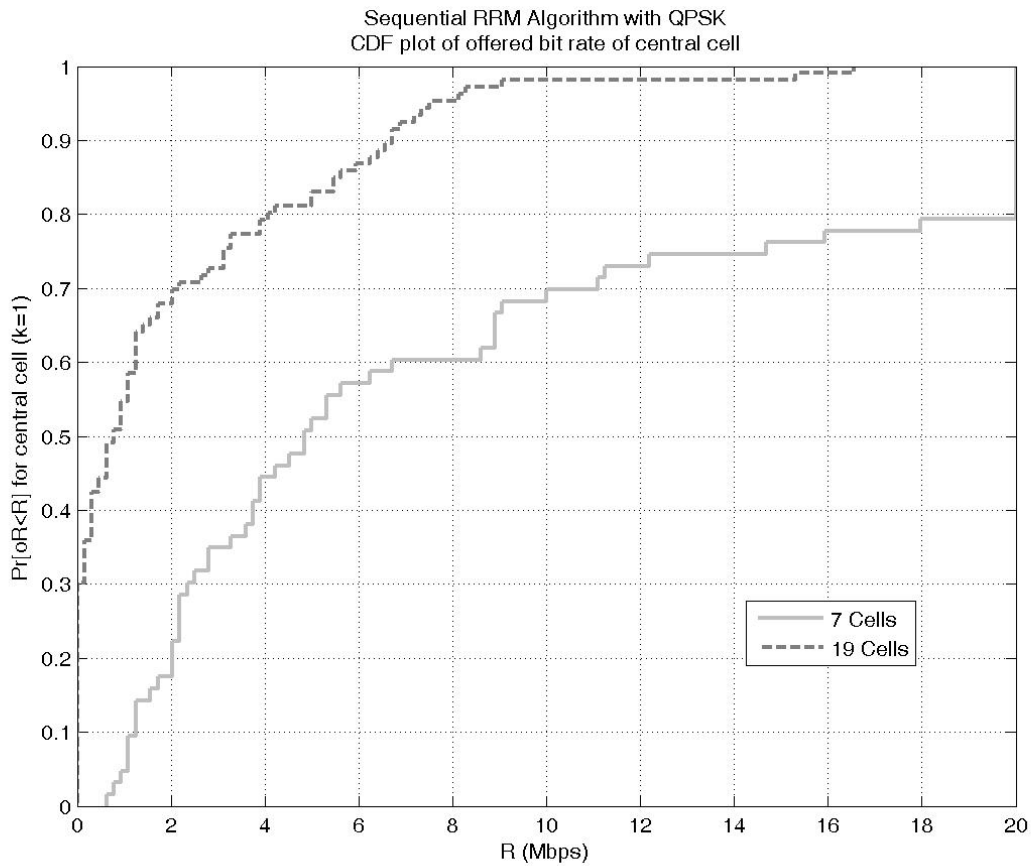
Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται ο Προσαρμοστικός (Εικόνα 6.7), ο Σειριακός (Εικόνα 6.8), ο Συντεταγμένος (Εικόνα 6.9) και ο Προσαρμοστικός με διάσπαση κυψελών (Εικόνα 6.10) RRM αλγόριθμος, όπου δίδεται η CDF καμπύλη του προσφερόμενου ρυθμού δεδομένων της κεντρικής κυψέλης ενός OFDMA συστήματος 7 κυψελών και ενός αντίστοιχου 19 κυψελών.



Εικόνα 6.7: Σενάριο 1^ο – Διάγραμμα CDF του προσφερόμενου ρυθμού δεδομένων προς τους χρήστες της κεντρική κυψέλης – Προσαρμοστικός Αλγόριθμος RRM

Από το παραπάνω διάγραμμα εύκολα προκύπτει το συμπέρασμα ότι καθώς αυξάνεται η περιοχή που καλείται να εξυπηρετήσει το μελετούμενο OFDMA σύστημα από 7 κυψέλες σε 19 κυψέλες, η με-

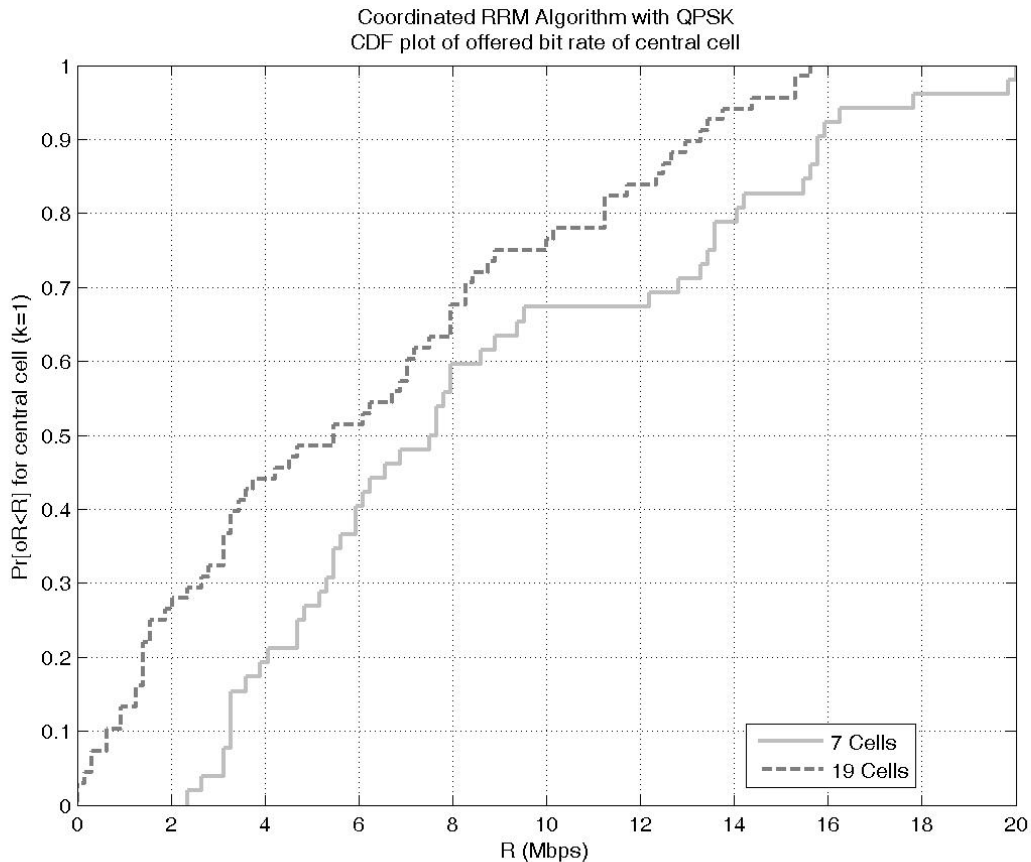
τάβαση αυτή είναι σχετικά ανώδυνη για τον Προσαρμοστικό RRM αλγόριθμο. Η προσαρμοστική εκχώρηση φερόντων που εφαρμόζεται στον προσαρμοστικό αλγόριθμο, ως τεχνική αποφυγής παρεμβολών (interference avoidance) φαίνεται να λειτουργεί αποδοτικά. Παρατηρώντας ότι οι CDF καμπύλες του προσφερόμενου ρυθμού δεδομένων είναι αρκετά κοντά μεταξύ τους στις δύο περιπτώσεις, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι ο προσαρμοστικός αλγόριθμος έχει τη δυνατότητα να διαχειρίζεται αποτελεσματικά την αύξηση του επιπέδου των παρεμβολών που συνεπάγεται η κλιμάκωση του συστήματος από τις 7 κυψέλες στις 19 κυψέλες, από την προσθήκη δηλαδή μιας ακόμα στρώσης κυψελών.



Εικόνα 6.8: Σενάριο 1° – Διάγραμμα CDF του προσφερόμενου ρυθμού δεδομένων προς τους χρήστες της κεντρική κυψέλης – Σειριακός Αλγόριθμος RRM

Το παραπάνω διάγραμμα για το σειριακό αλγόριθμο μας οδηγούν σε εντελώς αντίθετα συμπεράσματα. Η CDF καμπύλη του προσφερόμενου ρυθμού δεδομένων είναι εμφανώς μετατοπισμένη προς τα αριστερά για το σύστημα των 19 κυψελών σε σχέση με το σύστημα των 7 κυψελών. Αυτό σημαίνει ότι ο σειριακός αλγόριθμος είναι ίσως κατάλληλος μόνο στις περιπτώσεις που η έκταση κάλυψης του συστήματος είναι μικρή, ώστε, συνακόλουθα, το επίπεδο παρεμβολών των εσώτερων κυψελών του συστήματος να παραμένει μικρό. Εξάλλου, από τη δομή του, ο σειριακός αλγόριθμος δε μπορεί να αντιμετωπίσει τις ομοδιαυλικές παρεμβολές, αφού ουσιαστικά καμία πρόνοια δε λαμβάνεται για το

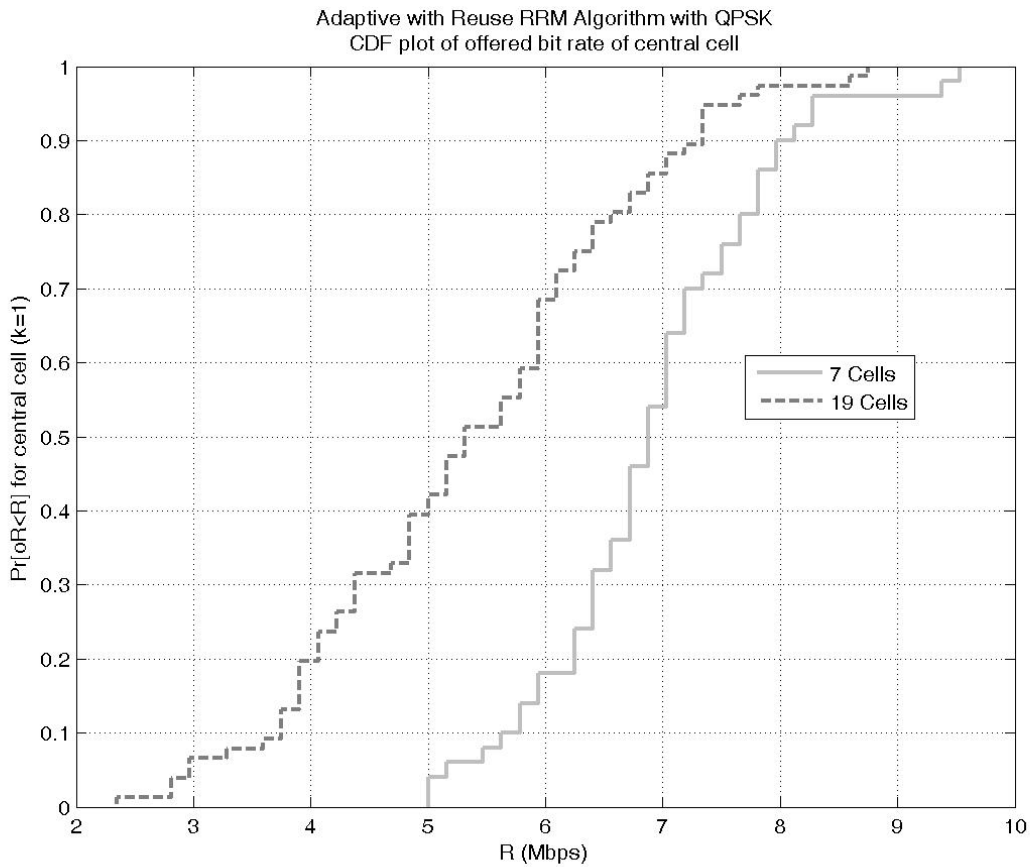
σκοπό αυτό.



Εικόνα 6.9: Σενάριο 1^ο – Διάγραμμα CDF του προσφερόμενου ρυθμού δεδομένων προς τους χρήστες της κεντρική κυψέλης – Συντεταγμένος Αλγόριθμος RRM

Ο συντεταγμένος αλγόριθμος είναι σχεδιασμένος ως ένας αλγόριθμος που αποσκοπεί στη μετρίαση της ομοδιαυλικής παρεμβολής (interference averaging). Με τη συντεταγμένη εκχώρηση των φερόντων, αυτό που ουσιαστικά επιτυγχάνεται είναι να μετριάζεται η ομοδιαυλική παρεμβολή που προκαλείται στις γειτονικές κυψέλες. Καθώς προκύπτει από το παραπάνω διάγραμμα, η τεχνική αυτή φαίνεται να εφαρμόζεται αποτελεσματικά καθώς η καμπύλη μετατοπίζεται μεν προς τα αριστερά αλλά “συγκρατείται” σε σχέση με το σειριακό αλγόριθμο.

Στο σειριακό αλγόριθμο δεν υπάρχει καμία πρόβλεψη για την ομοδιαυλική παρεμβολή. Στον προσαρμοστικό αλγόριθμο επιτυγχάνεται αποφυγή της ομοδιαυλικής παρεμβολής με αντίστοιχο κόστος τη δαπάνη εύρους ζώνης για την απόκτηση των CSI. Στον προσαρμοστικό αλγόριθμο με διάσπαση κυψελών, επιτυγχάνεται μείωση του επιπέδου της ομοδιαυλικής παρεμβολής με κόστος όμως τον αποκλεισμό χρήσης κάποιων φερόντων από κάποια τμήματα της κυψέλης. Η εκχώρηση φερόντων που προτείνεται από το συντεταγμένο αλγόριθμο είναι ουσιαστικά η μέση λύση για το σύνολο των αλγορίθμων που παρουσιάζονται στην παρούσα.



Εικόνα 6.10: Σενάριο 1° – Διάγραμμα CDF του προσφερόμενου ρυθμού δεδομένων προς τους χρήστες της κεντρική κυψέλης – Προσαρμοστικός Αλγόριθμος RRM με διάσπαση κυψελών

Από το τελευταίο αυτό διάγραμμα παρατηρούμε επίσης μια μετατόπιση προς τα αριστερά της CDF καμπύλης, η οποία και πάλι οφείλεται στην αύξηση του επιπέδου παρεμβολής. Στην περίπτωση του προσαρμοστικού αλγορίθμου με διάσπαση κυψελών, όμως, το σύστημα μετατρέπεται από interference limited σε subcarrier limited με αποτέλεσμα να έχουμε μείωση του προσφερόμενου ρυθμού δεδομένων λόγω της έλλειψης φερόντων στην εξωτερική περιοχή της κυψέλης, πράγμα το οποίο περιορίζει το συνολικό αριθμό χρηστών που μπορούν να εξυπηρετηθούν από την κυψέλη και συνακόλουθα τον προσφερόμενο ρυθμό δεδομένων.

Η σημασία των παραπάνω διαγραμμάτων είναι ιδιαίτερη καθώς απεικονίζουν τον τρόπο με τον οποίο το σύστημα κλιμακώνεται, καθώς αυξάνει η περιοχή κάλυψής του.

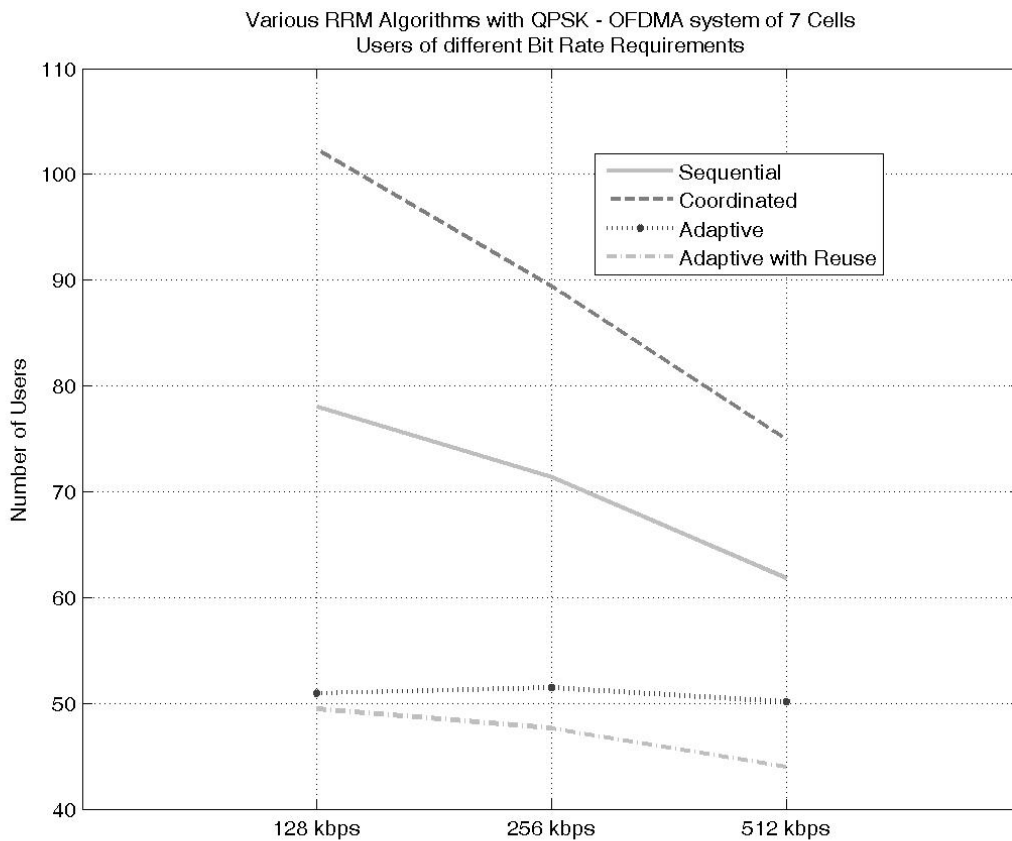
Στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 6.5), δίνεται ο συνολικός ρυθμός που εξασφαλίζει κάθε αλγόριθμος για το σύστημα, σαν σύνολο χρηστών, ως η εργοδική μέση τιμή των Monte Carlo επαναλήψεων του προσομοιωτικού κώδικα.

	Σειριακός Αλγόριθμος	Συντεταγμένος Αλγόριθμος	Προσαρμοστικός Αλγόριθμος	Προσαρμοστικός Αλγόριθμος με Διάσπαση Κυψελών
OFDMA σύστημα 7 κυψελών	73.11Mbps	90.75Mbps	55.39Mbps	50.13Mbps
OFDMA σύστημα 19 κυψελών	58.71Mbps	167.35Mbps	132.34Mbps	123.10Mbps

Πίνακας 6.5: Σενάριο 1^ο – Συνολικός Προσφερόμενος Ρυθμός Συστήματος

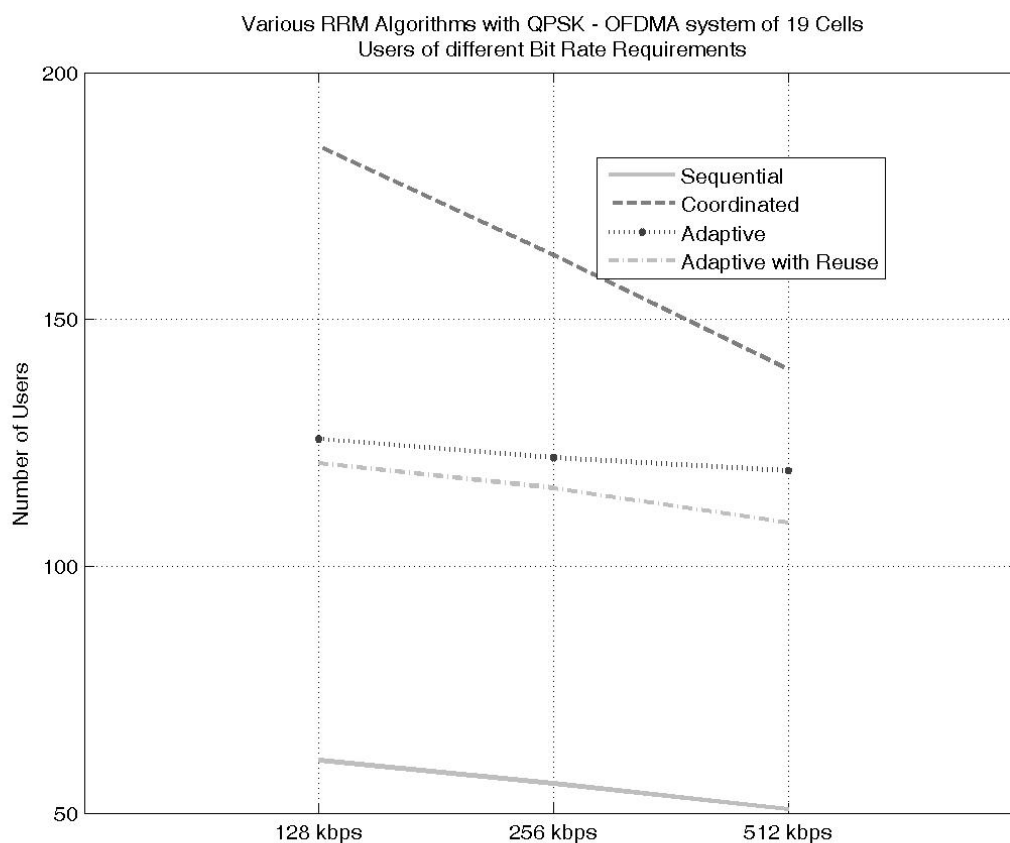
Από τον παραπάνω πίνακα φαίνεται να επιβεβαιώνονται εν πολλοίς τα συμπεράσματα που αναφέρθηκαν προηγούμενα. Κατ' αρχήν ο συνολικός προσφερόμενος ρυθμός δεδομένων του σειριακού αλγορίθμου μειώνεται αντί να αυξάνεται, δεδομένου ότι έχουμε ένα μεγαλύτερο σε έκταση σύστημα. Κατόπιν, παρατηρούμε ότι ο προσαρμοστικός αλγόριθμος είναι καλύτερος από τη σκοπιά του προσφερόμενου ρυθμού δεδομένων σε σχέση με τον προσαρμοστικό αλγόριθμο με διάσπαση κυψελών, πράγμα το οποίο επιβεβαιώνει ότι το OFDMA σύστημα είναι interference limited και όχι subcarrier limited, όπως είχε αναφερθεί προηγούμενα. Τέλος, παρατηρούμε την υπεροχή του συντεταγμένου αλγορίθμου σε σχέση με τους υπόλοιπους. Έχοντας κατά νου ότι στην παραπάνω μελέτη του προσφερόμενου ρυθμού της κεντρικής κυψέλης του συστήματος οι αποκλίσεις μεταξύ των αλγορίθμων δεν ήταν τόσο μεγάλες, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι ο συντεταγμένος αλγόριθμος αποδίδει καλύτερα στις περιπτώσεις συστημάτων όπου το επίπεδο παρεμβολής παραμένει χαμηλό. Έτσι, καθώς απομακρυνόμαστε από την κεντρική κυψέλη προς τα όρια του συστήματος, οι ομοδιαυλικές παρεμβολές που καλούνται να αντιμετωπίσουν οι εκεί σταθμοί βάσης βαίνουν μειούμενες με αποτέλεσμα να βελτιώνεται η απόδοση του συντεταγμένου RRM αλγορίθμου για το συνολικό προσφερόμενο ρυθμό δεδομένων.

Στα διαγράμματα που ακολουθούν, δίδεται η κατανομή (ως εργοδικές μέσες τιμές) των εισηγμένων στο σύστημα χρηστών σύμφωνα με τον αιτούμενο ρυθμό δεδομένων, για ένα σύστημα 7 κυψελών (Εικόνα 6.11) και 19 κυψελών (Εικόνα 6.12).



Εικόνα 6.11: Σενάριο 1° - Κατανομή χρηστών με βάση τον αιτούμενο ρυθμό δεδομένων – OFDMA σύστημα 7 κυψελών

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει κατ' αρχήν το συμπέρασμα ότι τόσο ο προσαρμοστικός όσο και ο σειριακός αλγόριθμος RRM δε συμπεριφέρονται με τον ίδιο τρόπο στους χρήστες που εισάγονται στο σύστημα, αλλά φαίνεται να μεροληπτούν προς τους χρήστες χαμηλού ρυθμού δεδομένων. Είναι προφανές ότι οι χρήστες που τελικά εισάγονται στο σύστημα ζητώντας τον υψηλότερο δυνατό ρυθμό δεδομένων, που ορίστηκε να είναι τα 512kbps, είναι κατά πολύ λιγότεροι αριθμητικά σε σχέση με τους χρήστες που απαίτησαν το χαμηλότερο ρυθμό δεδομένων των 128kbps. Το αποτέλεσμα αυτό είναι μάλλον αναμενόμενο, καθώς, όπως προκύπτει και από τη δεύτερη γραμμή του Πίνακας 6.2, ένας χρήστης υψηλότερου ρυθμού ουσιαστικά απαιτεί από τον εξυπηρετούμενο σταθμό βάσης την εκχώρηση μεγαλύτερου πλήθους OFDMA φερόντων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η εισαγωγή του νέου χρήστη να απαιτεί την εκπλήρωση της ικανής συνθήκης, όπως αυτή περιγράφηκε κατά την μελέτη του RRM προβλήματος, για όλα τα φέροντα που θα εκχωρηθούν στο χρήστη. Δηλαδή όλα τα φέροντα που η διαδικασία εκχώρησης φερόντων επιλέγει να εκχωρήσει στο χρήστη θα πρέπει να φορτωθούν με το καθορισμένο επίπεδο διαμόρφωσης, εν προκειμένω QPSK, με τέτοια ισχύ ώστε να μην υποβιβάζεται η ποιότητα των ομοδιαυλικών χρηστών. Περαιτέρω, για την επιλογή των φερόντων αυτών δεν υπάρχει η πρόνοια της ποιότητας.



Εικόνα 6.12: Σενάριο 1^ο - Κατανομή χρηστών με βάση τον αιτούμενο ρυθμό δεδομένων – OFDMA σύστημα 19 κυψελών

Εν αντιθέση, στην περίπτωση του προσαρμοστικού αλγορίθμου, ο οποίος εμφανίζεται περισσότερο “δίκαιος” ως προς τον αιτούμενο ρυθμό των εισηγμένων χρηστών, το πλήθος των φερόντων που θα επιχειρηθεί να φορτωθούν για ένα συγκεκριμένο χρήστη επιλέγεται να είναι τουλάχιστον ίσο με τον ελάχιστο αριθμό φερόντων ή ακόμα και μεγαλύτερο, εφόσον ο σταθμός βάσης έχει πλεόνασμα φερόντων. Επίσης, η επιλογή των φερόντων αυτών γίνεται με βάση την ποιότητα τους (κανονικοποιημένο κέρδος). Καθώς είναι προφανές, ο προσαρμοστικός αλγόριθμος εμφανίζει μεγαλύτερη ευελιξία ως προς τα φέροντα που μπορεί να εκχωρήσει σε ένα χρήστη, με αποτέλεσμα να καθίσταται ευκολότερη η ικανοποίηση των αναγκών του σε ρυθμό δεδομένων.

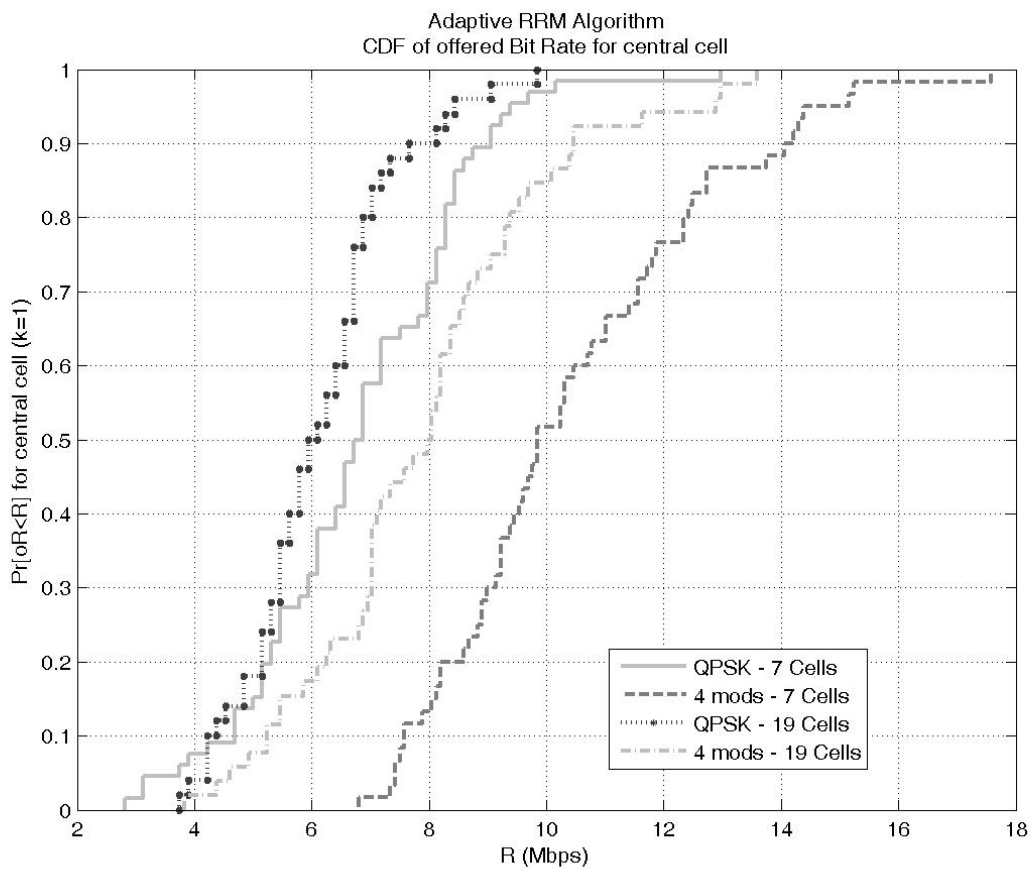
Προχωρώντας στον προσαρμοστικό αλγόριθμο με διάσπαση κυψελών, παρατηρούμε και εδώ μια μείωση του πλήθους των χρηστών καθώς αυξάνεται ο αιτούμενος ρυθμός δεδομένων. Στην περίπτωση αυτή τα αίτια ανάγονται και πάλι στο πλήθος των καναλιών, αλλά αυτή τη φορά η αναγκαία συνθήκη είναι αυτή που δεν πληρείται, Δηλαδή το πλήθος των χρηστών υψηλού ρυθμού μειώνεται καθώς δεν υπάρχει ο διαθέσιμος αριθμός φερόντων για να καλυφθούν οι ανάγκες του χρήστη. Το πρόβλημα, επομένως, ανάγεται και πάλι στον subcarrier limited χαρακτήρα που επιβάλλει στο σύστημα η διάσπαση των κυψελών.

6.2.2 Σενάριο 2^ο – Χρήση όλων των Διαθέσιμων Διαμορφώσεων

Στη δεύτερη αυτή σειρά προσομοιώσεων, μελετάται το προσαρμοστικό Bit Loading, επιτρέποντας στον προσαρμοστικό αλγόριθμο να εφαρμόσει οποιαδήποτε από τις επιτρεπόμενες διαμορφώσεις, οι οποίες είναι BPSK, QPSK, 16-QAM και 64-QAM.

6.2.2.1 Προσφερόμενος Ρυθμός Δεδομένων

Στο διάγραμμα που ακολουθεί (Εικόνα 6.13) δίδεται η συνάρτηση κατανομής πιθανότητας του προσφερόμενου ρυθμού δεδομένων από την κεντρική κυψέλη του συστήματος, όταν ο εφαρμοζόμενος προσαρμοστικός αλγόριθμος χρησιμοποιεί μόνη διαμόρφωση την QPSK και όταν χρησιμοποιεί όλες τις δυνατές διαμορφώσεις, για ένα OFDMA σύστημα 7 κυψελών και 19 κυψελών.



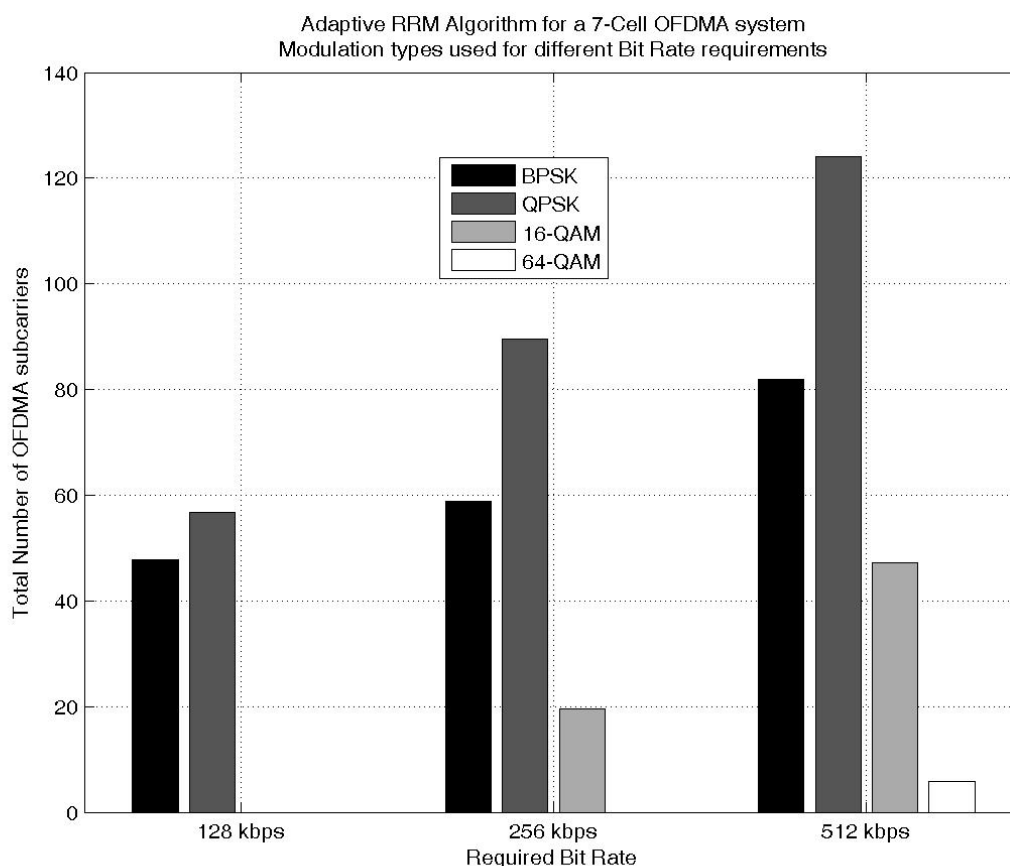
Εικόνα 6.13: Σενάριο 2^ο – Διάγραμμα CDF προσφερόμενου ρυθμού δεδομένων της κεντρικής κυψέλης ενός OFDMA συστήματος

Από το παραπάνω διάγραμμα καθίσταται σαφές ότι η δυνατότητα χρήσης όλων των επιτρεπόμενων διαμορφώσεων (4 mods) οδηγεί σε κάθε περίπτωση σε υψηλότερο προσφερόμενο ρυθμό δεδομένων σε σχέση με τη χρήση μιας μόνο διαμόρφωσης (QPSK). Παρατηρούμε και σε αυτό το διάγραμμα ότι καθώς αυξάνεται η περιοχή κάλυψη του συστήματος, με την αύξηση των κυψελών που περιβάλλουν την κεντρική κυψέλη, ο προσφερόμενος ρυθμός της κυψέλης μειώνεται, καθώς αυξάνεται το επίπεδο των παρεμβολών που αυτή δέχεται. Η μείωση αυτή εικονίζεται ως μετατόπιση των ομότιμων

(ίδιος τύπος διαμόρφωσης) καμπυλών προς τα αριστερά.

6.2.2.2 Κατανομή OFDMA φερόντων

Στο διάγραμμα που ακολουθεί δίνεται η κατανομή της διαμόρφωσης των OFDMA φερόντων ενός OFDMA συστήματος 7 κυψελών ως προς τον αιτούμενο ρυθμό δεδομένων των χρηστών στους οποίους έχουν εκχωρηθεί.

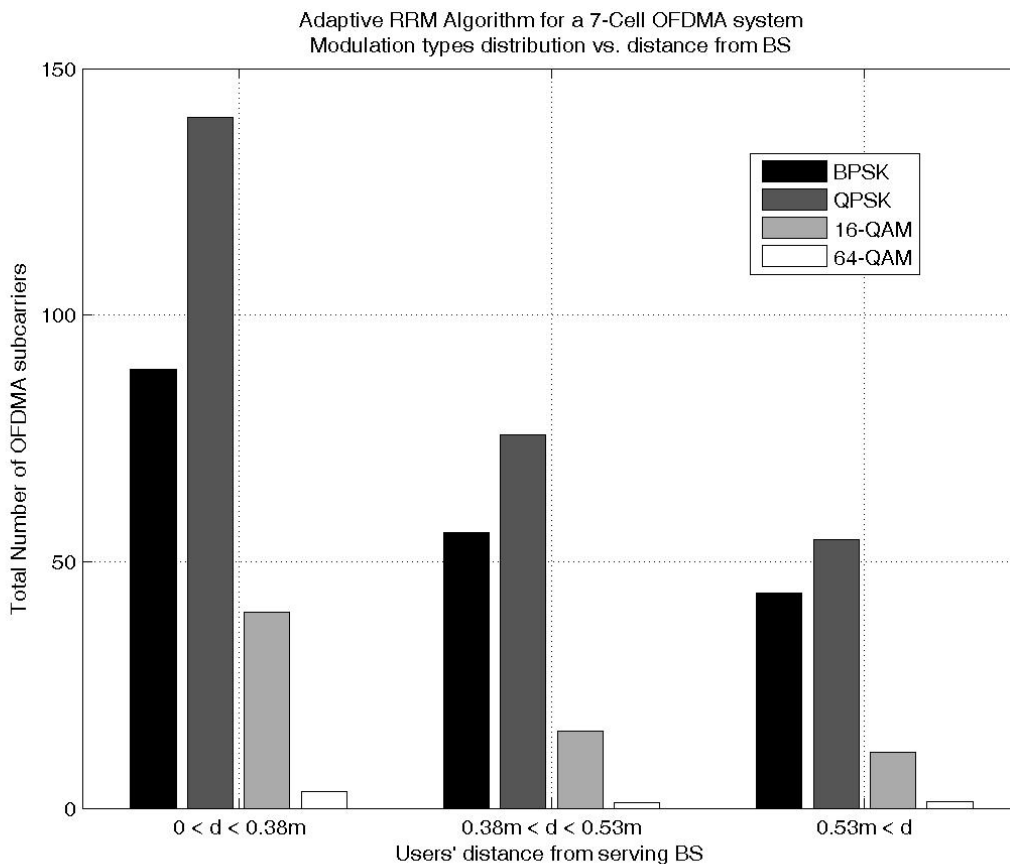


Εικόνα 6.14: Σενάριο 2^ο – Κατανομή διαμόρφωσης OFDMA φερόντων με βάση των αιτούμενο ρυθμό δεδομένων των χρηστών στους οποίους εκχωρούνται για ένα OFDMA σύστημα 7 κυψελών

Το διάγραμμα αυτό μας οδηγεί σε αξιόλογα συμπεράσματα ως προς τη συμπεριφορά του προσαρμοστικού bit loading, που εφαρμόζεται στον προσαρμοστικό RRM αλγόριθμο. Παρατηρούμε κατ' αρχήν ότι ο προσαρμοστικός αλγόριθμος είναι συντηρητικός ως προς την χρησιμοποίηση διαμορφώσεων υψηλής τάξης, ιδιαίτερα όταν αυτό δεν είναι απαραίτητο. Έτσι παρατηρούμε ότι για την κάλυψη των αναγκών των χρηστών με αιτούμενο ρυθμό 128kbps χρησιμοποιούνται μόνον φέροντα BPSK και QPSK ενώ αντίστοιχα στην περίπτωση των 256kbps δε χρησιμοποιούνται φέροντα των 64-QAM. Όπως προκύπτει από τον Πίνακα 6.2, για την κάλυψη του αιτούμενου ρυθμού δεδομένων των 128kbps, απαιτούνται είτε δύο BPSK φέροντα είτε ένα QPSK φέρον. Οι ανάγκες αυτές θα μπορούσαν να καλυφθούν επίσης με τη χρήση ενός 16-QAM φέροντος ή ενός 64-QAM φέροντος. Επειδή όμως οι

υψηλότερης τάξης διαμορφώσεις είναι περισσότερο ενεργοβόρες σε σχέση με τις χαμηλότερης τάξης, καθίσταται σαφές ότι ο αλγόριθμος θα επιλέξει ένα QPSK φέρον σε σχέση με ένα 16-QAM ή 64-QAM. Επίσης, κατά την επιλογή μεταξύ των 2 BPSK φερόντων σε σχέση με το 1 QPSK φέρον, παρατηρούμε ότι και οι δύο αυτές περιπτώσεις απαντώνται. Έτσι, ο αλγόριθμος επιλέγει μεταξύ των δύο αυτών δυνατοτήτων σύμφωνα με τη βελτίωση της συνολικής απόδοσης του συστήματος, όπως αυτή προκύπτει από την ελαχιστοποίηση της εκπεμπόμενης ισχύς από τις ομοδιαυλικές κυψέλες. Παρόμοια συμπεράσματα μπορούν να προκύψουν και για του άλλους αιτούμενους ρυθμούς δεδομένων. Εν πολλοίς, θα λέγαμε ότι η απόφαση για το επίπεδο διαμόρφωσης που θα φορτωθεί ένα φέρον συναρτάται τόσο από τη διαθεσιμότητα των φερόντων (πλήθος φερόντων) όσο και από τις ομοδιαυλικές παρεμβολές που υφίσταται αλλά και προκαλεί το εν λόγω φέρον, ώστε να μπορεί να εκπέμψει την απαιτούμενη ισχύ, που επιβάλλει ένα συγκεκριμένο επίπεδο διαμόρφωσης. Επειδή οι δύο αυτοί περιορισμοί που τίθενται είναι αλληλοσυγκρουόμενοι, ο προσαρμοστικός αλγόριθμος δίνει στο σύστημα τη δυνατότητα να βρει μια λύση ισορροπίας μεταξύ των δύο.

Ακολουθεί ένα διάγραμμα (Εικόνα 6.15) όπου απεικονίζεται η κατανομή των επιτρεπόμενων διαμορφώσεων ως προς την απόσταση των χρηστών από τον εξυπηρετούμενο σταθμό βάσης.



Εικόνα 6.15: Σενάριο 2° – Κατανομή διαμόρφωσης OFDMA φερόντων ως προς την απόσταση των χρηστών που εκχωρούνται από τον εξυπηρετούμενο σταθμό βάσης για ένα OFDMA σύστημα 7 κυψελών

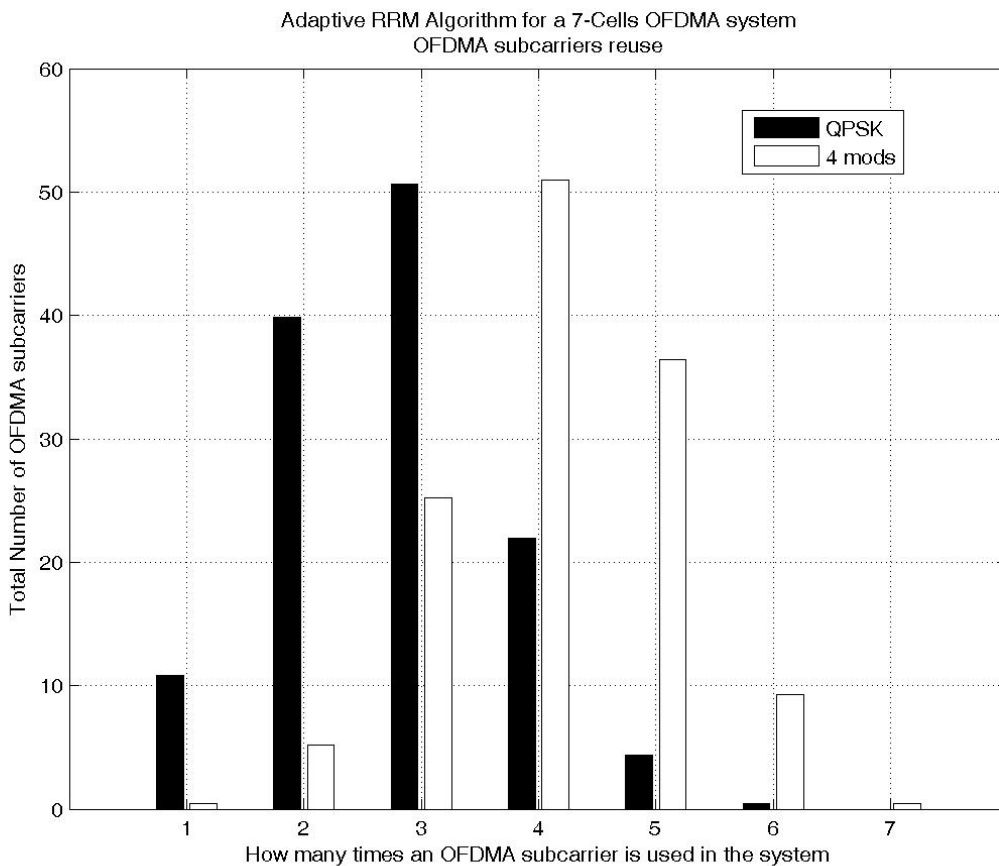
Το πρώτο συμπέρασμα στο οποίο μας οδηγεί το παραπάνω διάγραμμα είναι ότι μεγαλύτερο πλήθος φερόντων και, συνακόλουθα, χρηστών, εκχωρούνται πλησίον του σταθμού βάσης. Το αποτέλεσμα αυτό είναι καθόλα αναμενόμενο και κοινό για κάθε ασύρματο σύστημα επικοινωνιών, αφού, καθώς ένας χρήστης απομακρύνεται από το σταθμό βάσης, αυξάνονται οι απώλειες διαδρομής (path loss) με αποτέλεσμα να μειώνεται το κέρδος καναλιού. Έτσι καθίσταται δυσχερέστερη η εξυπηρέτησή του από το σταθμό βάσης. Για τον ίδιο ακριβώς λόγο παρατηρούμε ότι τα κανάλια με διαμόρφωση υψηλότερης τάξης μειώνονται με μεγαλύτερο ρυθμό καθώς απομακρυνόμαστε από το σταθμό βάσης σε σχέση με τα κανάλια χαμηλότερης διαμόρφωσης. Πάρα ταύτα, καμία διαμόρφωση δεν αποκλείεται λόγω της απόστασης, δηλαδή ακόμα και σε περιοχές απομακρυσμένες από το σταθμό βάσης απαντάται η εκχώρηση καναλιών 64-QAM. Το φαινόμενο αυτό εξηγείται εν μέρει και από το γεγονός ότι ο ασύρματος διάυλος επικοινωνίας υποφέρει από σκίαση, η οποία εν προκειμένω έχει οριστεί στα 8dB.

Στον πίνακα (Πίνακας 6.6) που ακολουθεί δίνεται το πλήθος των φερόντων που χρησιμοποιούνται ανά κυψέλη στο σύνολο του συστήματος ενώ στο διάγραμμα (Εικόνα 6.16) που έπεται δίνεται το πόσες φορές χρησιμοποιείται ένα OFDMA φέρον εντός ενός OFDMA συστήματος 7 κυβελών.

	k=1		k=2		k=3		k=4		k=5		k=6		k=7	
QPSK	43.5	34.0%	50.8	39.7%	50.2	39.2%	52.8	41.2%	51.9	40.5%	51.3	40.1%	53.9	42.1%
4 mods	70.5	55.1%	77.7	60.7%	76.0	59.3%	77.8	60.8%	75.1	58.7%	76.2	59.5%	78.3	61.2%

Πίνακας 6.6: Σενάριο 2^ο - Πλήθος OFDMA φερόντων που χρησιμοποιούνται ανά κυψέλη

Από τον παραπάνω πίνακα είναι σαφές ότι στην περίπτωση χρήσης όλων των διαθέσιμων διαμορφώσεων, το ποσοστό χρήσης των διαθέσιμων καναλιών ανά κυψέλη είναι κατά πολύ μεγαλύτερο σε σχέση με τη χρήση μοναδικής διαμόρφωσης QPSK. Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι με το προσαρμοστικό bit loading γίνεται καλύτερη χρήση των διαθέσιμων πόρων του συστήματος, αφού λιγότερα φέροντα ανά κυψέλη παραμένουν ανενεργά, μη αξιοποιώντας έτσι το διαθέσιμο εύρος ζώνης του συστήματος.



Εικόνα 6.16: Σενάριο 2° – Επαναχρησιμοποίηση OFDMA φερόντων εντός ενός OFDMA συστήματος 7 κυψελών

Κατ' αρχήν, το παραπάνω διάγραμμα επιβεβαιώνει το συμπέρασμα που προέκυψε παραπάνω, καθώς μεγαλύτερος αριθμός φερόντων επαναχρησιμοποιούνται στην περιοχή κάλυψης του συστήματος. Έτσι, στην περίπτωση της μοναδικής διαμόρφωσης QPSK, ο μεγαλύτερος αριθμός φερόντων επαναχρησιμοποιείται 2 ή 3 φορές εντός του συστήματος των 7 κυψελών ενώ στην περίπτωση όλων των επιτρεπόμενων διαμορφώσεων (4 mods) 4 ή 5 φορές. Είναι χαρακτηριστικό ότι μόνο στη δεύτερη περίπτωση υπάρχουν φέροντα τα οποία χρησιμοποιούνται ακόμα και 7 φορές εντός του συστήματος. Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει επίσης ότι στην περίπτωση μοναδικής διαμόρφωσης QPSK ο μέσος συντελεστής επαναχρησιμοποίησης ενός φέροντος είναι 2.96 ενώ στην περίπτωση χρήσης όλων των επιτρεπόμενων διαμορφώσεων ο μέσος συντελεστής επαναχρησιμοποίησης μειώνεται σε 1.81. Παρατηρούμε επομένως ότι χρησιμοποιώντας τις δυνατότητες του προσαρμοστικού bit loading προσεγγίζουμε περισσότερο το στόχο του συντελεστή επαναχρησιμοποίησης 1, που θα επιτυγχάνονταν στην ιδανική περίπτωση της μη ύπαρξης ομοδιαυλικών παρεμβολών.

6.2.3 Σενάριο 3° – Χωρισμός σε τομείς χρήση μοναδικής διαμόρφωσης

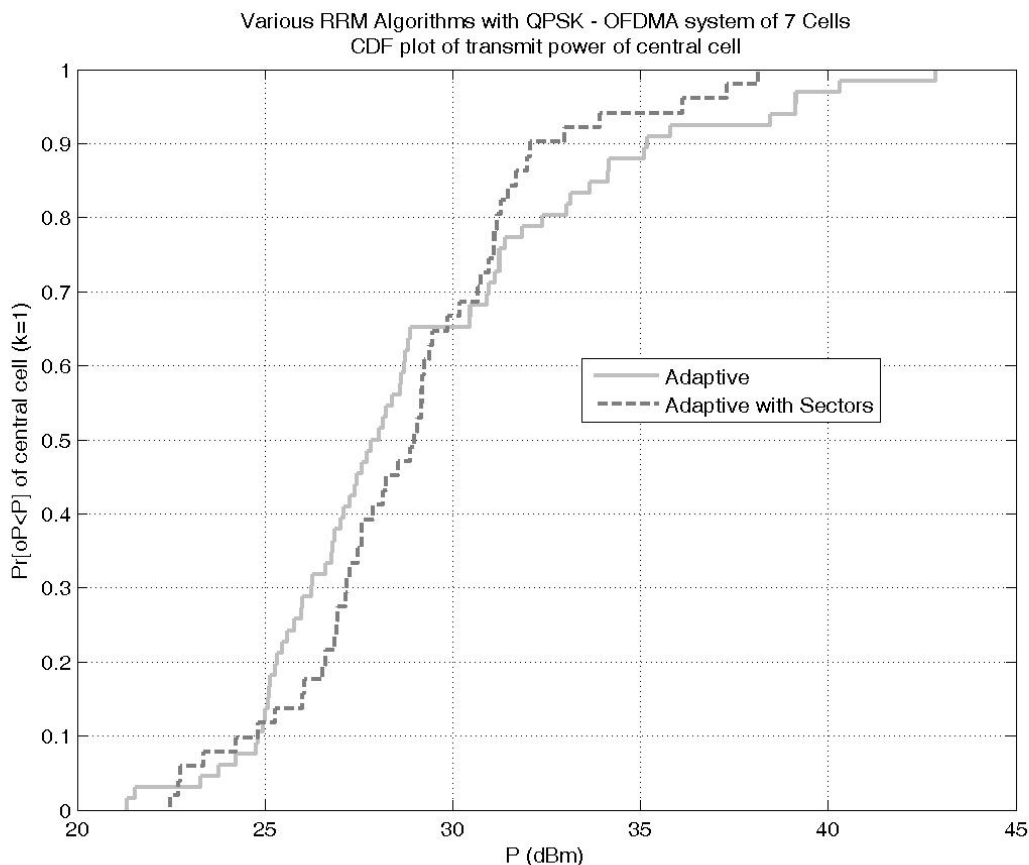
Η τρίτη αλλά και η τέταρτη σειρά προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν, αφορούν στη μελέτη της επίδρασης της τομεοποίησης στη συνολική χωρητικότητα του OFDMA συστήματος που μελετά-

ται. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονιστεί ότι ο χωρισμός σε τομείς των κυψελών του συστήματος δε συγκροτεί ένα νέο αλγόριθμο διαχείρισης ασυρμάτων πόρων για το σύστημα. Αντιθέτως, αυτό που επιδιώκεται είναι με τον υφιστάμενο RRM αλγόριθμο, ο οποίος εν προκειμένω είναι ο προσαρμοστικός αλγόριθμος, χρησιμοποιώντας “ευφρέστερα” συστήματα κεραιών σε σχέση με την απλή ομοιοκατευθυντική κεραία, τα οποία θα μειώσουν την λαμβανόμενη ισχύ ομοδιαυλικής παρεμβολής, να βελτιωθεί η απόδοση του συστήματος.

Στο συγκεκριμένο σενάριο γίνεται μια συγκριτική μελέτη μεταξύ του προσαρμοστικού αλγορίθμου χωρίς και με τομεοποίηση, όπου μοναδικό επίπεδο διαμόρφωσης ορίζεται, όπως και πριν, η διαμόρφωση QPSK.

6.2.3.1 Εκπεμπόμενη Ισχύς

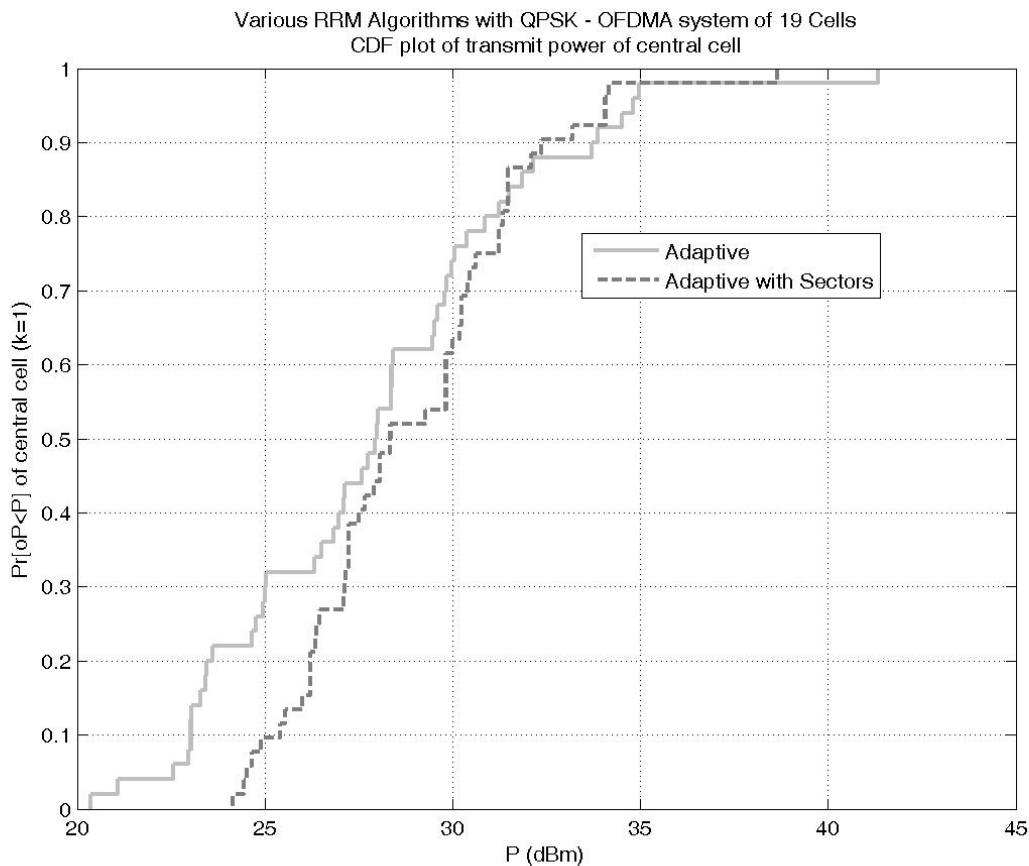
Στα διαγράμματα που ακολουθούν δίδεται η απεικόνιση της συνάρτησης κατανομής πιθανότητας της εκπεμπόμενης ισχύος για την κεντρική κυψέλη ενός OFDMA συστήματος 7 (Εικόνα 6.17) και 19 (Εικόνα 6.18) κυψελών.



Εικόνα 6.17: Σενάριο 3^ο – Διάγραμμα CDF εκπεμπόμενης ισχύος κεντρικής κυψέλης – OFDMA σύστημα 7 κυψελών

Από το παραπάνω διάγραμμα αλλά και από το διάγραμμα που ακολουθεί, παρατηρούμε κατ' αρχήν ότι η εκπεμπόμενη ισχύς της κυψέλης είναι εν πολλοίς ίδια στην περίπτωση του χωρισμού σε το-

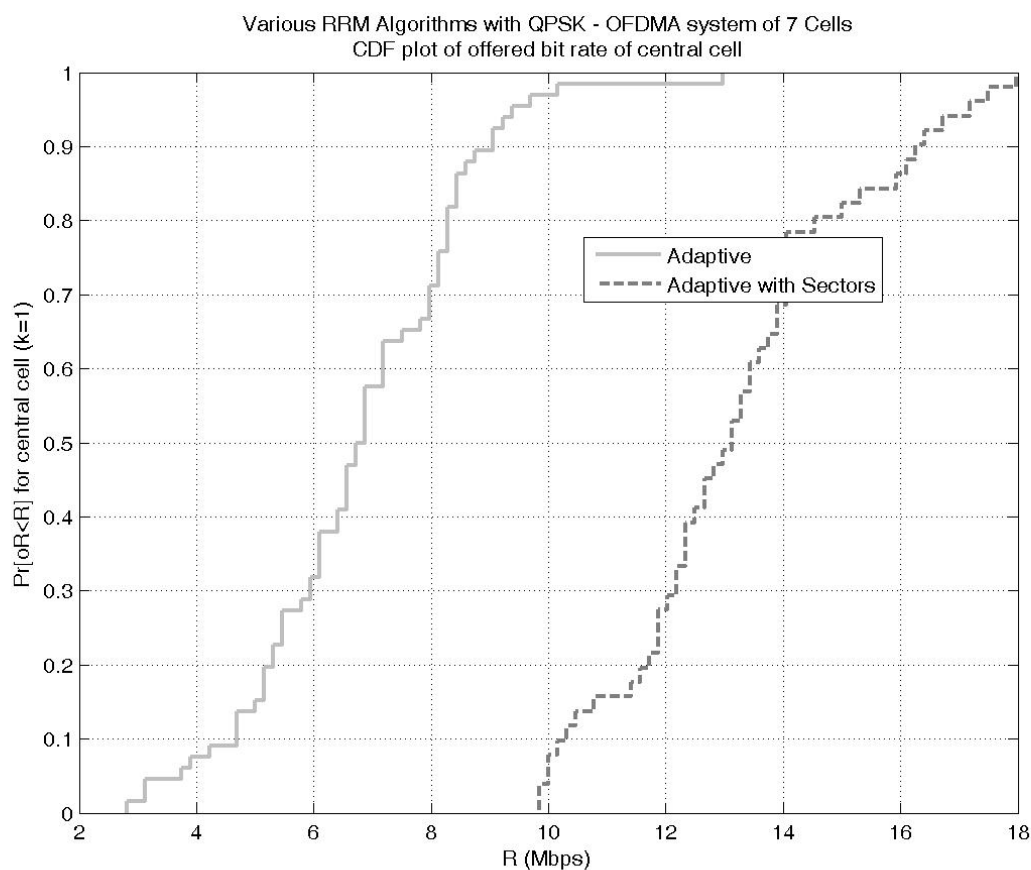
μείς σε σχέση με τη χρήση ομοιοκατευθυντικής κεραίας. Σε μια πιο ενδελεχή εξέταση θα παρατηρούσαμε μάλιστα ότι στην περίπτωση της τομεοποίησης, η εκπεμπόμενη ισχύς είναι κατά τι χαμηλότερη. Το συμπέρασμα αυτό έχει ιδιαίτερη βαρύτητα καθώς αποδεικνύεται ότι η χρήση τομέων δεν επιβαρύνει ενεργειακά το σύστημά μας αν και, όπως φαίνεται από την ανάλυση που θα ακολουθήσει για τον προσφερόμενο ρυθμό δεδομένων, η απόδοση του συστήματος βελτιώνεται κατά πολύ.



Εικόνα 6.18: Σενάριο 3° – Διάγραμμα CDF εκπεμπόμενης ισχύος κεντρικής κυψέλης – OFDMA σύστημα 19 κυψελών

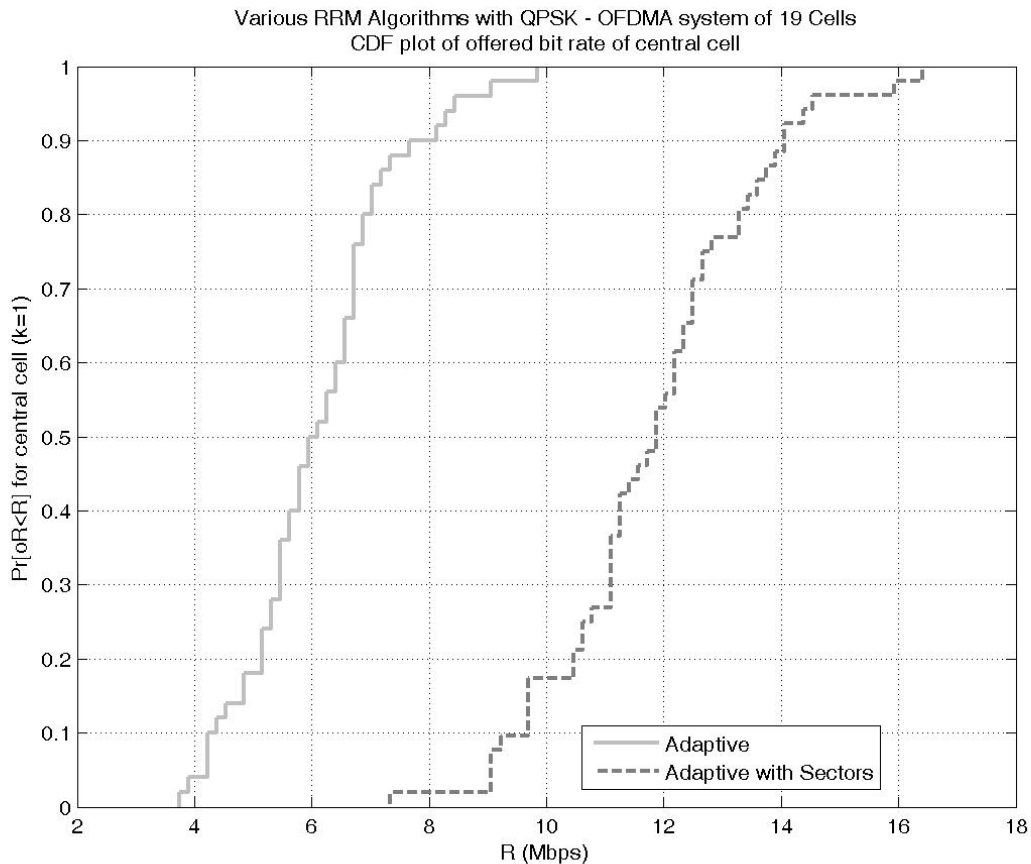
6.2.3.2 Προσφερόμενος ρυθμός δεδομένων

Στα διαγράμματα που ακολουθούν, απεικονίζεται η CDF του προσφερόμενου ρυθμού δεδομένων για ένα OFDMA σύστημα 7 (Εικόνα 6.19) & 19 (Εικόνα 6.20) κυψελών.



Εικόνα 6.19: Σενάριο 3^ο – Διάγραμμα CDF προσφερόμενου ρυθμού δεδομένων κεντρικής κυψέλης – OFDMA σύστημα 7 κυψελών

Τα αποτελέσματα των δύο αυτών διαγραμμάτων είναι σαφή και δε χωρούν καμίας αμφισβήτησης. Ο χωρισμός της κυψέλης σε τομείς οδηγεί σε διπλασιασμό του προσφερόμενου ρυθμού δεδομένων από την κεντρική κυψέλη του συστήματος σε σχέση με την περίπτωση χρήσης ομοιοκατευθυντικής κεραίας. Το αποτέλεσμα αυτό είναι καθ' όλα αναμενόμενο αν αναλογιστούμε ότι το OFDMA σύστημα που εξετάζεται, όπως έχει πολλάκις επισημανθεί, είναι ένα interference limited σύστημα και επομένως η απόδοσή του είναι άμεσα εξαρτώμενη από το πόσο αποτελεσματικά μπορούμε να χειριστούμε την ομοδιαυλική παρεμβολή. Η χρήση κατευθυντικών κεραιών στους τομείς των κυψελών αυτό που επιτυγχάνει είναι να μειώσει την ομοδιαυλική παρεμβολή όπως την αντιλαμβάνεται ένας χρήστης χωρίς όμως να μειώνει την εκπεμπόμενη ισχύ στους χρήστες. Έτσι, καθώς είναι αναμενόμενο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μεγαλύτερο πλήθος φερόντων, εξυπηρετώντας μεγαλύτερο αριθμό χρηστών, πράγμα το οποίο καταλήγει σε αύξηση του προσφερόμενου ρυθμού δεδομένων.



Εικόνα 6.20: Σενάριο 3° – Διάγραμμα CDF προσφερόμενου ρυθμού δεδομένων κεντρικής κυψέλης – OFDMA σύστημα 19 κυψελών

6.2.3.3 Κατανομή Χρηστών

Στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 6.7) δίδεται ο αριθμός των χρηστών που εξυπηρετούνται ανά σταθμό βάσης καθώς επίσης και ο συνολικός αριθμός χρηστών που εξυπηρετεί ένα OFDMA σύστημα 7 κυψελών.

	k=1	k=2	k=3	k=4	k=5	k=6	k=7	Σύνολο
Προσαρμοστικός RRM Αλγόριθμος	19.14	21.73	21.45	22.67	22.29	22.05	23.26	152.58
Προσαρμοστικός RRM Αλγόριθμος με τομείς	36.76	36.27	38.80	38.65	38.51	37.73	37.33	264.06

Πίνακας 6.7: Σενάριο 3ο – Κατανομή χρηστών στις κυψέλες του συστήματος – OFDMA σύστημα 7 κυψελών

Από τον παραπάνω πίνακα βλέπουμε κατ' αρχήν την αύξηση του πλήθους των χρηστών στην περίπτωση της τομεοποίησης και ταυτόχρονα διαπιστώνουμε και εδώ ότι η κεντρική κυψέλη προσεγγίζει κατά το δυνατόν μια κυψέλη ενός πραγματικού συστήματος, καθώς φαίνεται να εισάγονται τελικά λιγότεροι χρήστες σε σχέση με τις ακραίες κυψέλες, λόγω του υψηλού επιπέδου ομοδιαυλικών παρεμβολών.

Ακολουθεί ένας πίνακας (Πίνακας 6.8) με την κατανομή των χρηστών του συστήματος με βάση

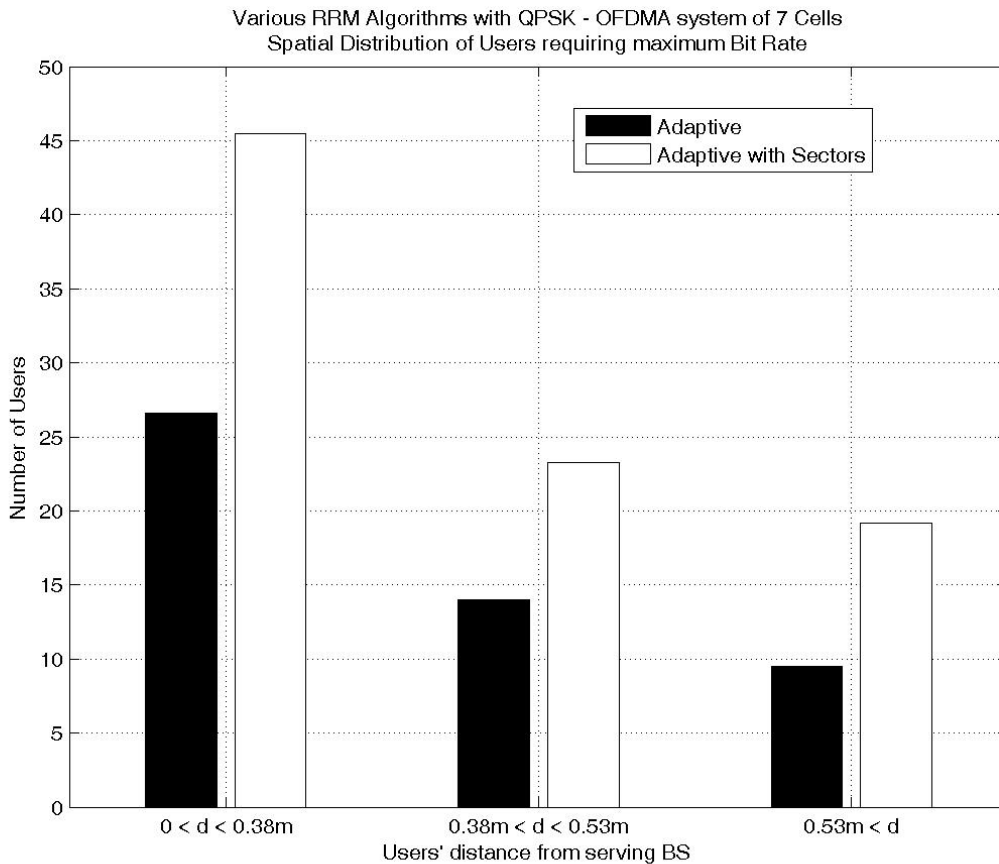
τον αιτούμενο ρυθμό δεδομένων.

	128kbps	256kbps	512kbps
	7 κυψέλες		
Προσαρμοστικός RRM Αλγόριθμος	50.95	51.48	50.14
Προσαρμοστικός RRM Αλγόριθμος με τομείς	89.63	86.51	87.92
	19 κυψέλες		
Προσαρμοστικός RRM Αλγόριθμος	125.74	121.94	119.34
Προσαρμοστικός RRM Αλγόριθμος με τομείς	231.35	223.48	220.35

Πίνακας 6.8: Σενάριο 3^ο – Κατανομή χρηστών συστήματος με βάση τον αιτούμενο ρυθμό δεδομένων

Το συμπέρασμα το οποίο προκύπτει από τον παραπάνω πίνακα είναι ότι στην περίπτωση της τομεοποίησης ο προσαρμοστικός αλγόριθμος διατηρεί ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά του, το οποίο είναι η δικαιοσύνη απέναντι στους χρήστες σε σχέση με τον αιτούμενο ρυθμό δεδομένων. Έτσι, αφενός μεν εισάγονται περισσότεροι χρήστες στο σύστημα, αφετέρου δε οι χρήστες αυτοί εξακολουθούν να είναι ομοιόμορφα κατανεμημένοι μεταξύ των διαφορετικών αιτούμενων ρυθμών δεδομένων.

Στο σημείο αυτό θα εστιάσουμε στους χρήστες υψηλού ρυθμού των 512kbps για να εξετάσουμε τη χωρική κατανομή τους. Στο διάγραμμα που ακολουθεί (Εικόνα 6.21) δίνεται η χωρική κατανομή των χρηστών αιτούμενου ρυθμού δεδομένων 512kbps για ένα σύστημα 7 κυψελών.



Εικόνα 6.21: Χωρική κατανομή χρηστών αιτούμενου ρυθμού δεδομένων 512kbps – OFDMA σύστημα 7 κυψελών

Από το παραπάνω διάγραμμα βλέπουμε κατ' αρχήν ότι οι χρήστες υψηλού ρυθμού βαίνουν μειούμενοι καθώς απομακρυνόμαστε από το σταθμό βάσης. Αυτό συμβαίνει καθώς για ένα χρήστη με αιτούμενο ρυθμό 512kbps, ο σταθμός βάσης που θα τον εξυπηρετήσει θα πρέπει να του εξασφαλίσει 4 OFDMA φέροντα (Πίνακας 6.2), τα οποία θα έχουν τον αποδεκτό λόγο σήματος προς παρεμβολή και θόρυβο για την κάλυψη των αναγκών του. Όπως είναι αναμενόμενο, καθώς απομακρυνόμαστε από το σταθμό βάσης, η εξασφάλιση αυτού του απαιτούμενου SNIR γίνεται όλο και δυσχερέστερη. Μία λιγότερο προφανής παρατήρηση είναι, όμως, ότι ο προσαρμοστικός αλγόριθμος με τομεοποίηση κατορθώνει να συγκρατήσει αποτελεσματικότερα τη μείωση αυτή σε σχέση με τον προσαρμοστικό αλγόριθμο χωρίς τομεοποίηση, πράγμα το οποίο φαίνεται από γεγονός ότι η μείωση των χρηστών είναι μικρότερη καθώς οδηγούμαστε από το εσωτερικό της κυψέλης προς το εξωτερικό αυτής. Η εξήγηση του φαινομένου αυτού εύλογα ανάγεται στην αποτελεσματικότερη διαχείριση της ομοδιαυλικής παρεμβολής στην περίπτωση της τομεοποίησης.

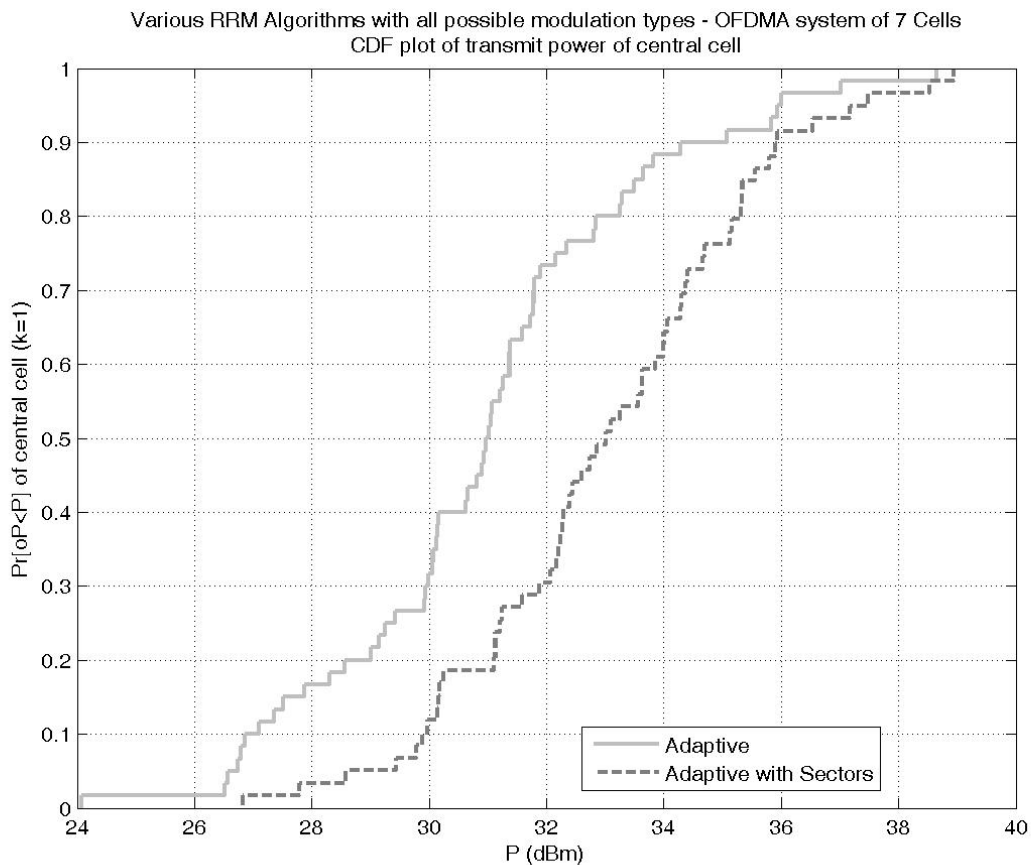
6.2.4 Σενάριο 4^ο - Χωρισμός σε τομείς χρήση όλων των διαθέσιμων διαμορφώσεων

Η τελευταία σειρά προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκε αφορά τη μελέτη του προσαρμοστικού αλγορίθμου με εφαρμογή της τεχνικής τομεοποίησης με ταυτόχρονη χρήση του προσαρμοστικού bit

loading, δίνοντας τη δυνατότητα χρήσης όλων των διαθέσιμων διαμορφώσεων, ονομαστικά BPSK, QPSK, 16-QAM & 64-QAM.

6.2.4.1 Εκπεμπόμενη Ισχύς

Στο διάγραμμα που ακολουθεί (Εικόνα 6.22) δίνεται η συνάρτηση κατανομής πιθανότητας της εκπεμπόμενης ισχύος της κεντρικής κυψέλης για ένα OFDMA σύστημα 7 κυψελών, που εφαρμόζει τον προσαρμοστικό αλγόριθμο με όλες τις επιτρεπόμενες διαμορφώσεις, χωρίς ή με τη εφαρμογή τομεοποίησης.



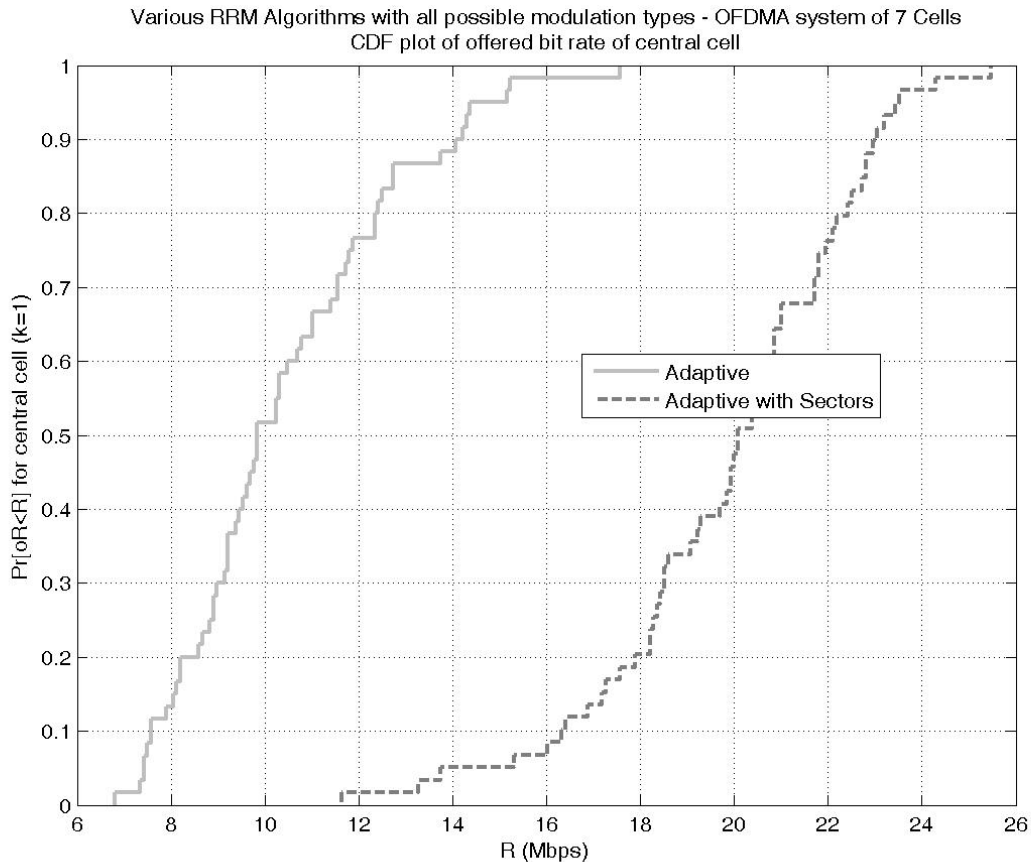
Εικόνα 6.22: Σενάριο 4^ο – Διάγραμμα CDF εκπεμπόμενης ισχύος κεντρικής κυψέλης – OFDMA σύστημα 7 κυψελών

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε μια σχετική αύξηση της εκπεμπόμενης ισχύος στην περίπτωση της τομεοποίησης. Η αύξηση αυτή είναι σχετικά μικρή και οφείλεται εν πολλοίς στο ότι στην περίπτωση της τομεοποίησης εξυπηρετείται ένας αρκετά μεγαλύτερος αριθμός χρηστών, με αποτέλεσμα να απαιτείται συνολικά μεγαλύτερη εκπεμπόμενη ισχύς από την κυψέλη για την ραδιοκάλυψη αυτών.

6.2.4.2 Προσφερόμενος ρυθμός δεδομένων

Στο διάγραμμα που ακολουθεί (Εικόνα 6.23) δίνεται το διάγραμμα CDF του προσφερόμενου ρυθ-

μού δεδομένων από την κεντρική κυψέλη ενός OFDMA συστήματος 7 κυψελών.



Εικόνα 6.23: Σενάριο 4° – Διάγραμμα CDF του προσφερόμενου ρυθμού δεδομένων από την κεντρική κυψέλη – OFDMA σύστημα 7 κυψελών

Το προφανές συμπέρασμα που προκύπτει από το παραπάνω διάγραμμα είναι ότι στην περίπτωση της τομεοποίησης ο προσφερόμενος ρυθμός δεδομένων από την κεντρική κυψέλη είναι κατά πολύ μεγαλύτερος σε σχέση με την περίπτωση της χρήσης ομοιοκατευθυντικών κεραιών. Παρατηρούμε ότι ο προσφερόμενος ρυθμός δεδομένων από την κεντρική κυψέλη κυμαίνεται σε τιμές από 11.64Mbps έως 25.47Mbps, με την εργοδική μέση τιμή του να είναι 19.88Mbps. Η τιμή αυτή είναι ιδιαίτερα υψηλή εν σχέση με το ρυθμό δεδομένων που είναι σε θέση να προσφέρουν τα υφιστάμενα κυψελωτά συστήματα κινητών επικοινωνιών.

6.2.4.3 Κατανομή χρηστών

Στους πίνακες που ακολουθούν δίνεται η κατανομή των χρηστών με βάση τον αιτούμενο ρυθμό δεδομένων (Πίνακας 6.9) καθώς και η κατανομή τους στις κυψέλες του συστήματος (Πίνακας 6.10), για ένα OFDMA σύστημα 7 κυψελών.

	128kbps	256kbps	512kbps
Προσαρμοστικός RRM Αλγόριθμος	80.57	77.48	75.73
Προσαρμοστικός RRM Αλγόριθμος με τομείς	135.08	134.07	134.49

Πίνακας 6.9: Σενάριο 4^ο – Κατανομή χρηστών με βάση τον αιτούμενο ρυθμό δεδομένων – OFDMA σύστημα 7 κυψελών

Από τα αποτελέσματα του παραπάνω πίνακα, παρατηρούμε κατ' αρχήν ότι το πλήθος των χρηστών αυξάνεται και μάλιστα κατά περίπου 230 χρήστες επί συνόλω. Επίσης, αυτό που έχει ιδιαίτερη σημασία είναι ότι ο προσαρμοστικός αλγόριθμος με τη χρήση τομεοποίησης εισάγει ισάριθμους (περίπου) χρήστες από τις τρεις κατηγορίες χρηστών αιτούμενου ρυθμού δεδομένων. Έτσι, εμφανίζεται δίκαιος στους χρήστες υψηλών απαιτήσεων, πράγμα το οποίο δεν απαντάται σε άλλες περιπτώσεις RRM αλγορίθμων, όπως εξετάστηκε προηγούμενα.

	k=1	k=2	k=3	k=4	k=5	k=6	k=7	Σύνολο
Προσαρμοστικός RRM Αλγόριθμος	30.32	34.73	33.23	34.80	32.72	33.17	34.82	233.78
Προσαρμοστικός RRM Αλγόριθμος με τομείς	57.07	58.97	56.56	58.93	59.17	57.37	55.58	403.64

Πίνακας 6.10: Σενάριο 4^ο – Κατανομή χρηστών σε κυψέλες – OFDMA σύστημα 7 κυψελών

Από τον πίνακα αυτό, πέραν του ότι παρατηρούμε επίσης τη συνολική αύξηση των χρηστών, βλέπουμε ότι στην περίπτωση της τομεοποίησης, η κεντρική κυψέλη του συστήματος εξυπηρετεί ίσο (περίπου) αριθμό χρηστών σε σχέση με τις υπόλοιπες κυψέλες του συστήματος. Η παρατήρηση αυτή έχει αξία δεδομένου ότι η κεντρική κυψέλη υφίσταται μεγαλύτερες ομοδιαυλικές παρεμβολές σε σχέση με τις υπόλοιπες κυψέλες του συστήματος και δείχνει πόσο αποδοτικά μπορεί να διαχειριστεί τις ομοδιαυλικές παρεμβολές ο προσαρμοστικός RRM αλγόριθμος με χωρισμό σε τομείς.

6.2.4.4 Κατανομή OFDMA φερόντων

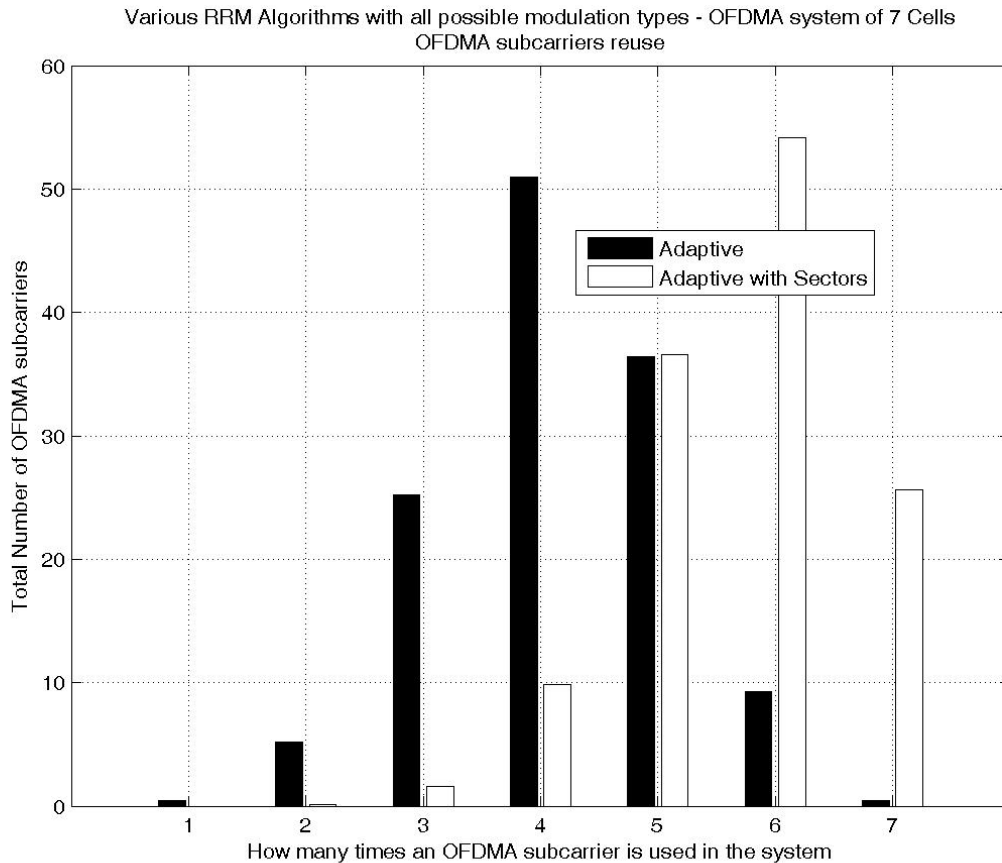
Στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 6.11) δίδεται το πλήθος των OFDMA φερόντων που χρησιμοποιούνται σε κάθε κυψέλη του συστήματος ενώ στο επόμενο διάγραμμα (Εικόνα 6.24) δίνεται το πόσες φορές χρησιμοποιείται ένα OFDMA φέρον εντός ενός OFDMA συστήματος 7 κυψελών.

k=1	k=2	k=3	k=4	k=5	k=6	k=7							
Προσαρμοστικός RRM Αλγόριθμος													
70.5	55.1%	77.7	60.7%	76.0	59.3%	77.8	60.8%	75.1	58.7%	76.2	59.5%	78.3	61.2%
Προσαρμοστικός RRM Αλγόριθμος με τομείς													
101.6	79.4%	106.8	83.4%	103.9	81.2%	106.1	82.9%	105.4	82.3%	105.0	82.0%	103.2	80.6%

Πίνακας 6.11: Σενάριο 4^ο – Πλήθος OFDMA φερόντων ανά κυψέλη – OFDMA σύστημα 7 κυψελών

Από τον παραπάνω πίνακα βλέπουμε ότι στην περίπτωση της τομεοποίησης αυξάνει κατά πολύ το ποσοστό των OFDMA φερόντων που χρησιμοποιούνται σε κάθε κυψέλη του συστήματος, πράγμα το

οποίο οφείλεται στην αποτελεσματικότερη αντιμετώπιση των ομοδιαυλικών παρεμβολών. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αποδοτικότερη χρήση του διαθέσιμου εύρους ζώνης, αφού περισσότεροι πόροι (OFDMA φέροντα) εκχωρούνται και χρησιμοποιούνται για την κάλυψη των αναγκών των χρηστών, ο οποίος και είναι ο σκοπός κάθε συστήματος.



Εικόνα 6.24: Σενάριο 4° – Επαναχρησιμοποίηση OFDMA φερόντων εντός ενός OFDMA συστήματος 7 κυψελών

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι όλο και περισσότερα φέροντα επαναχρησιμοποιούνται περισσότερες φορές εντός του συστήματος. Είναι χαρακτηριστικό ότι η κορυφή της κατανομής για την περίπτωση της τομεοποίησης είναι στο 6, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι η πλειονότητα των φερόντων επαναχρησιμοποιούνται 6 φορές μέσα σε ένα OFDMA σύστημα 7 κυψελών. Ο μέσος συντελεστής επαναχρησιμοποίησης για την περίπτωση της μη τομεοποίησης, όπως έχει αναφερθεί και προηγούμενα, είναι περίπου 1.81, στην περίπτωση της εφαρμογής τομεοποίησης, ο μέσος συντελεστής επαναχρησιμοποίησης μειώνεται σε 1.26, τιμή η οποία αποδεικνύει το πόσο καλά το σύστημα μπορεί να χειριστεί και να αντιμετωπίσει την ομοδιαυλική παρεμβολή. Έτσι, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι το σύστημα προσεγγίζει το συντελεστή επαναχρησιμοποίησης 1, το οποίο είναι πάντα ο ιδανικός στόχος.

6.3 Συμπεράσματα

Η τελευταία αυτή παράγραφος είναι αφιερωμένη στα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα διπλωματική εργασία. Συνολικά παρουσιάστηκαν τέσσερις διαφορετικοί RRM αλγόριθμοι καθώς επίσης και η τροποποίηση του προσαρμοστικού αλγορίθμου με την εφαρμογή τομεοποίησης. Κάθε μία από αυτές τις περιπτώσεις, όπως προέκυψε τόσο από τη θεωρητική ανάλυση όσο και από τα προσομοιωτικά αποτελέσματα, εμφανίζει τόσο πλεονεκτήματα όσο και μειονεκτήματα τα οποία απαριθμούνται παρακάτω.

6.3.1 Προσαρμοστικός RRM Αλγόριθμος

6.3.1.1 Πλεονεκτήματα

Ο προσαρμοστικός αλγόριθμος εμφανίζει το ακαταμάχητο πλεονέκτημα ότι μπορεί να προσαρμόζεται στις υφιστάμενες συνθήκες καναλιού αλλά και στον αιτούμενο ρυθμό δεδομένων των χρηστών. Η προσαρμοστικότητα αυτή είναι εμφανής κύρια από τη μικρή διασπορά τιμών που εμφανίζει στα CDF διαγράμματα που προηγήθηκαν. Η μικρή αυτή διασπορά τιμών καθιστά σχετικά εύκολα προβλέψιμη τη συμπεριφορά του αλγορίθμου σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Στην προσαρμοστικότητα αυτή του αλγορίθμου συνηγορεί και το γεγονός ότι ο συνολικός προσφερόμενος ρυθμός για την κεντρική κυψέλη του συστήματος δεν εμφανίζει μεγάλη μείωση όταν μεταβαίνουμε από ένα σύστημα 7 κυψελών σε ένα σύστημα 19 κυψελών. Αυτό αποδεικνύει ότι ο αλγόριθμος είναι σε θέση να διαχειριστεί αποτελεσματικά την αύξηση του επιπέδου των υφιστάμενων παρεμβολών.

Η προσαρμοστική εκχώρηση φερόντων στους χρήστες δίνει στον αλγόριθμο τη δυνατότητα να συμπεριφέρεται δίκαια απέναντι στις διαφορετικές απαιτήσεις των χρηστών. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να εξυπηρετούνται ισάριθμοι χρήστες των διαφορετικών αιτούμενων ρυθμών. Η προσαρμοστική φόρτωση φερόντων, εν συνεχεία, δίνει στον αλγόριθμο τη δυνατότητα να είναι φειδωλός ως προς το πλήθος των φερόντων, ως προς την εκχώρηση του φάσματος κατ' επέκταση. Έτσι, χρήστες που βρίσκονται κοντά στο σταθμό βάσης που τους εξυπηρετεί, οι οποίοι εκ των πραγμάτων χαίρουν υψηλού SNIR, μπορούν να αυξήσουν το επίπεδο διαμόρφωσης κάποιων φερόντων τους ώστε να παραμείνουν διαθέσιμα φέροντα για τους μελλοντικούς χρήστες της κυψέλης.

6.3.1.2 Μειονεκτήματα

Στα μειονεκτήματα του προσαρμοστικού αλγορίθμου θα πρέπει να ενταχθεί το γεγονός ότι ο αλγόριθμος απαιτεί πλήρη γνώση των συνθηκών καναλιού για τη λήψη αποφάσεων. Αυτό ακριβώς είναι το τίμημα της προσαρμοστικότητας του. Η γνώση όμως του CSI, όπως μάλιστα προβλέπεται και από το πρότυπο IEEE 802.16-2004 απαιτεί τη δέσμευση εύρους ζώνης για χρήση σε φέροντα-πιλότους τα οποία θα αποκτήσουν τη γνώση αυτή.

6.3.2 Προσαρμοστικός RRM Αλγόριθμος με Τομεοποίηση

Η τροποποίηση του προσαρμοστικού αλγορίθμου με τη χρήση κατευθυντικών κεραιών και την εφαρμογή της τεχνικής της τομεοποίησης, εξακολουθεί να εμφανίζει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που ο προσαρμοστικός αλγόριθμος διαθέτει. Η τομεοποίηση αποτελεί μια περαιτέρω βελτίωση στον τρόπο με τον οποίο ο προσαρμοστικός αλγόριθμος αντιμετωπίζει την ομοδιαυλική παρεμβολή, πράγμα το οποίο και οδηγεί σε ακόμα υψηλότερους προσφερόμενους ρυθμούς δεδομένων, σε ακόμα υψηλότερη χωρητικότητα για το μελετούμενο OFDMA σύστημα.

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο προσαρμοστικός αλγόριθμος με τομεοποίηση εμφανίζει μέσο συντελεστή επαναχρησιμοποίησης 1.26, ο οποίος είναι πολύ κοντά στην ιδανική τιμή του συντελεστή επαναχρησιμοποίησης 1, που σημαίνει πλήρη φόρτιση του συστήματος.

6.3.3 Προσαρμοστικός RRM Αλγόριθμος με Διάσπαση Κυψελών

6.3.3.1 Πλεονεκτήματα

Η εισαγωγή της τεχνικής του Reuse Partitioning στον προσαρμοστικό αλγόριθμο εμφανίζει ως πλεονέκτημα την αξιοσημείωτη μείωση της εκπεμπόμενης ισχύος. Η ιδιαίτερη χαμηλή εκπεμπόμενη ισχύς ανά κυψέλη που έχει να προσφέρει ο αλγόριθμος αυτός θα μπορούσε να είναι ιδιαίτερα σημαντική στις περιπτώσεις όπου το σύστημα καλείται (ή επιβάλλεται) να λειτουργήσει υπό χαμηλή εκπεμπόμενη ισχύ.

6.3.3.2 Μειονεκτήματα

Η διάσπαση κυψελών αποδεικνύει ότι το OFDMA σύστημα που μελετάται είναι ένα interference limited σύστημα και η απόδοσή του περιορίζεται από τις ομοδιαυλικές παρεμβολές και όχι από την έλλειψη διαθέσιμου φάσματος. Η διάσπαση κυψελών, ως τεχνική, είναι σχεδιασμένη για subcarrier limited συστήματα και έτσι η εφαρμογή της αποτυγχάνει στην περίπτωση του OFDMA. Η αποτυχία αυτή συνίσταται στο ότι μειώνεται ο συνολικός αριθμός των χρηστών που το σύστημα εξυπηρετεί με συνακόλουθη μείωση του προσφερόμενου ρυθμού δεδομένων.

6.3.4 Σειριακός RRM Αλγόριθμος

6.3.4.1 Πλεονεκτήματα

Ο σειριακός αλγόριθμος εμφανίζει ένα πάντα ενδιαφέρον πλεονέκτημα, την απλότητα. Η απλότητα αυτή συνίσταται στο γεγονός ότι το σύστημα δεν απασχολείται ιδιαίτερα με την εισαγωγή ή όχι ενός νέου χρήστη. Τα φέροντα που θα εκχωρηθούν στο χρήστη είναι εξ' αρχής γνωστά, το ίδιο συμβαίνει και με το επίπεδο διαμόρφωσης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη γρήγορη λήψη αποφάσεων και την περιορισμένη φόρτωση των σταθμών βάσης με υπολογιστικό κόστος.

Επίσης, η λειτουργία του αλγορίθμου δεν απαιτεί την εκ των προτέρων γνώση των συνθηκών κα-

ναλιού. Έτσι, δεν απαιτείται η χρήση φερόντων-πλότων για την εκτίμηση του CSI. Αυτό εξασφαλίζει περισσότερο εύρος ζώνης, διατιθέμενο για τη μεταφορά του φορτίου του χρήστη.

6.3.4.2 Μειονεκτήματα

Το αντίτιμο της απλότητας στην περίπτωση αυτή είναι μεγάλο. Η χωρητικότητα του συστήματος μειώνεται αισθητά ενώ το εύρος των τιμών που κυμαίνεται ο προσφερόμενος ρυθμός δεδομένων είναι υπερβολικά μεγάλο. Το ρίσκο που συνεπάγεται η μεγάλη αυτή διασπορά τιμών, ουσιαστικά καθιστά τον αλγόριθμο ακατάλληλο σε πρακτικές εφαρμογές. Ένα ακόμα μη επιθυμητό χαρακτηριστικό του αλγορίθμου είναι η διάκριση των χρηστών ως προς τον αιτούμενο ρυθμό δεδομένων. Έτσι, οι χρήστες υψηλού ρυθμού είναι αισθητά λιγότεροι σε σχέση με τους χρήστες χαμηλού ρυθμού, γεγονός που καθιστά τον αλγόριθμο ακατάλληλο για παροχή διαφοροποιημένων ευρυζωνικών υπηρεσιών.

6.3.5 Συντεταγμένος RRM Αλγόριθμος

Ο συντεταγμένος RRM αλγόριθμος, όντας τροποποίηση του σειριακού αλγορίθμου, εξακολουθεί να εμφανίζει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του τελευταίου. Είναι όμως αξιοσημείωτο ότι σε συνθήκες χαμηλής ομοδιαυλικής παρεμβολής, όπως είναι η περίπτωση της κεντρικής κυψέλης ενός OFDMA συστήματος 7 κυβελών, εμφανίζει ιδιαίτερα υψηλό προσφερόμενο ρυθμό δεδομένων. Επίσης, το πρόβλημα της κλιμάκωσης του αλγορίθμου, καθώς επεκτείνεται η περιοχή κάλυψης του συστήματος, εμφανίζεται αρκετά ηπιότερο σε σχέση με το σειριακό αλγόριθμο. Έτσι, θα λέγαμε ότι ο συντεταγμένος αλγόριθμος θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε σχετικά μικρής έκτασης συστήματα, όπου κύριος γνώμονας είναι η απλότητα και η ταχεία λήψη των αποφάσεων, έχοντας όμως κατά νου πάντοτε τις παραπάνω παρατηρήσεις, που αφορούν στις διακρίσεις των χρηστών ως προς τον αιτούμενο ρυθμό δεδομένων αλλά και τη δύσκολα προβλέψιμη συμπεριφορά του αλγορίθμου.

Βιβλιογραφία

- [1] Θεολόγου, Μ.Ε., *Δίκτυα Κινητών και Προσωπικών Επικοινωνιών*, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2006
- [2] Ουζούνογλου, Ν.Κ., *Τηλεπικοινωνίες Οπτικών Ινών*, Εκδόσεις Συμεών, 1999
- [3] Proakis, J.G. and Salehi, M., *Συστήματα Τηλεπικοινωνιών*, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, 2002
- [4] Ζαρμπούτη, Δ., *Θεωρία και ανάλυση συστημάτων MIMO (multiple input multiple output) - πολλαπλών κεραιών στο σταθμό βάσης και στο κινητό, σε διαφορετικά περιβάλλοντα ασύρματης επικοινωνίας*, Διπλωματική Εργασία, Τομέας Συστημάτων Μετάδοσης Πληροφορίας και Τεχνολογίας Υλικών, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2004
- [5] Κανάτας, Α. και Κωνσταντίνου, Φ., *Συστήματα Κινητών Ραδιοεπικοινωνιών*, Εργαστήριο Κινητών Ραδιοεπικοινωνιών, 2001
- [6] Tanenbaum, A.S., *Δίκτυα Υπολογιστών*, Εκδόσεις "Κλειδάριθμος", 2003
- [7] IEEE, *IEEE 802 LAN/MAN Standards Committee*, IEEE, <http://iee802.org/>, 2007
- [8] IEEE, *The IEEE 802.16 Working Group on Broadband Wireless Access Standards*, IEEE, <http://wirelessman.org/>, 2007
- [9] Βενιέρης, Ι.Στ., *Δίκτυα Ευρείας Ζώνης*, Εκδόσεις Τζιόλα, 2003
- [10] WiMAX Forum, *Mobile WiMAX : The Best Personal Broadband Experience!*, WiMAX Forum, http://www.wimaxforum.org/technology/downloads/MobileWiMAX_PersonalBroadband.pdf, 2006
- [11] Telephony, *The Complete Guide to WiMAX*, Telephony, http://www.wimaxforum.org/technology/downloads/Telephony_WiMAX.pdf, 2004
- [12] WiMAX Forum, *WiMAX Forum*, WiMAX Forum, <http://www.wimaxforum.org/home/>, 2007
- [13] IEEE, *Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.*, IEEE, <http://www.ieee.org>, 2007
- [14] ETSI, *European Telecommunications Standards Institute*, ETSI, <http://www.etsi.org>, 2007
- [15] Pietrzyk, S., *OFDMA for Broadband Wireless Access*, Artech House, 2006
- [16] Καψάλης, Χ. και Κωττής, Π., *Κεραίες Ασύρματες Ζεύξεις*, Εκδόσεις Τζιόλα, 2005
- [17] Κωνσταντίνου, Φ., *Μοντέλα Ραδιοκάλυψης*, Εργαστήριο Κινητών Ραδιοεπικοινωνιών, 2002
- [18] Technical Specification Group Radio Access Network, *3GPP TR 25.996 V6.1.0 : Spatial channel model for Multiple Input Multiple Output (MIMO) simulations*, 3rd Generation Partnership Project, http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/25_series/25.996/25996-610.zip, 2003
- [19] COST Action 231, *Digital Mobile Radio towards Future Generation Systems*, COST, <http://www.lx.it.pt/cost231/>, 1999
- [20] Κοκολάκης, Γ. και Σπηλιώτης Ι., *Εισαγωγή στη Θεωρία Πιθανοτήτων και Στατιστική*, Εκδόσεις Συμεών, 1999

- [21] Κωπτής, Π.Γ., *Διαμόρφωση και Μετάδοση Σημάτων*, Εκδόσεις Τζιόλα, 2005
- [22] Haykin, S., *Συστήματα Επικοινωνίας*, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 1995
- [23] Intel, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*, Intel, <http://www.intel.com/netcomms/technologies/wimax/303787.pdf>, 2004
- [24] Prasad, R., *OFDM for Wireless Communication Systems*, Artech House, 2004
- [25] Van Nee, R.D.J. and Prasad, R., *OFDM for Wireless Multimedia Communications*, Artech House, 2000
- [26] IEC, *OFDM for Mobile Data Communications*, IEC, <http://www.iec.org/online/tutorials/ofdm/>, 2007
- [27] Litwin, L. and Pugel, M., *The principles of OFDM*, RFDesign, vol. 1, pp. , January 2001
- [28] Φάσσα, Ε.Α. και Χουσέα, Β.Ν., *Μελέτη & Προσομοίωση Συστήματος OFDM*, Διπλωματική Εργασία, Τομέας Συστημάτων Μετάδοσης Πληροφορίας και Τεχνολογίας Υλικών, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2006
- [29] Καψάλης, Χ. και Κωπτής, Π., *Δορυφορικές Επικοινωνίες*, Εκδόσεις Τζιόλα, 2003
- [30] Καραγιάννης, Γ. και Τζιτζιράχου Κ., *Εισαγωγή στα Σήματα & Συστήματα*, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2003
- [31] Ζάχος, Ε., *Προγραμματισμός Ηλεκτρονικών Υπολογιστών*, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2002
- [32] Wikipedia, *Fast Fourier Transform*, Wikipedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/FFT>, 2007
- [33] WiMAX Forum, *Mobile WiMAX - Part I : A Technical Overview and Performance Evaluation*, WiMAX Forum, http://www.wimaxforum.org/technology/downloads/Mobile_WiMAX_Part1_Overview_and_Performance.pdf, 2006
- [34] Kurose, J.F. and Ross, K.W., *Δικτύωση Υπολογιστών - Προσέγγιση από Πάνω προς τα Κάτω με Έμφαση στο Διαδίκτυο*, Εκδόσεις Μ. Γκιούρδας, 2003
- [35] Pietrzyk, S. and Janssen, G.J.M., *Radio resource allocation for cellular networks based on OFDMA with QoS guarantees*, Proc. IEEE Global Telecommunications Conference, vol. 4, pp. 2694 - 2699, November-December 2004
- [36] Κακλαμάνη, Δ.Ι., *Υπολογιστικές Τεχνικές για Συστήματα Μετάδοσης Πληροφορίας*, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2005
- [37] Pietrzyk, S. and Janssen, G.J.M., *Subcarrier allocation and power control for QoS provision in the presence of CCI for the downlink of cellular OFDMA systems*, Proc. IEEE Vehicular Technology Conference, Spring, vol. 4, pp. 2221 - 2225, April 2003
- [38] Cioffi, J.M., *A Multicarrier Primer*, Amati Communications Corporation and Stanford University, <http://www.stanford.edu/group/cioffi/documents/multicarrier.pdf>, 1991
- [39] Pietrzyk, S. and Janssen, G.J.M., *Subcarrier and power allocation for QoS-aware OFDMA systems using embedded modulation*, Proc. IEEE International Conference on Communications, vol. 6, pp. 3202 - 3206, June 2004

- [40] Kulkarni, G., Adlakha, S. and Srivastava, M., *Subcarrier allocation and bit loading algorithms for OFDMA-based wireless networks*, IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 4(6), pp. 652 - 662, November-December 2005
- [41] Kivanc, D. and Liu, H., *Subcarrier allocation and power control for OFDMA*, Proc. 34th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, vol. 1, pp. 147 - 151, November 2000
- [42] Wikipedia, *Hungarian algorithm*, Wikipedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Hungarian_algorithm, 2007
- [43] Wikipedia, *Laplace distribution*, Wikipedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Laplacian_distribution, 2007
- [44] Chong, P.H.J. and Leung, C., *Performance Analysis of Reuse Partitioning in Cellular Systems*, Proc. IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing, vol. 1, pp. 213 - 216, August 1999
- [45] Zander, J., *Radio Resource Management in Future Wireless Networks: Requirements and Limitations*, IEEE Communications Magazine, vol. 35(8), pp. 30 - 36, August 1997
- [46] Fodor, G., *Performance Analysis of a Reuse Partitioning Technique for OFDM Based Evolved UTRA*, Proc. IEEE International Workshop on Quality of Service, vol. 1, pp. 112 - 120, June 2006
- [47] Amar, J.G., *The Monte Carlo Method in Science and Engineering*, Computing in Science & Engineering, vol. 8(2), pp. 9 - 19, March-April 2006
- [48] Hammersley, J.M. and Handscomb, D.C., *Monte Carlo Methods*, Halsted Press, 1964
- [49] Wikipedia, *Kaplan-Meier estimator*, Wikipedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Kaplan-Meier>, 2007