



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

Προσαρμοστικές τεχνικές ανάθεσης καναλιών σε συστήματα OFDMA

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νικόλαος Γ. Πεππές

Επιβλέπουσα :Κακλαμάνη Δήμητρα-Θεοδώρα
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιούλιος, 2014



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

Προσαρμοστικές τεχνικές ανάθεσης καναλιών σε συστήματα OFDMA

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νικόλαος Γ. Πεππές

Επιβλέπουσα :Κακλαμάνη Δήμητρα-Θεοδώρα
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 24^η Ιουλίου 2014.

.....
Δήμητρα Κακλαμάνη
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π

.....
Νικόλαος Ουζούνγλου
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Ιάκωβος Βενιέρης
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιούλιος, 2014

.....
Νικόλαος Γ. Πεππές

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

Copyright © Νικόλαος Γ. Πεππές, 2014.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

*«Η ζωή δεν είναι πρόβα. Η κάθε μέρα είναι πρεμιέρα»
Π. Ντάνιελς*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το WiMAX είναι μια μητροπολιτική περιοχή (MAN), ασύρματης τεχνολογίας δικτύωσης, που παρέχει υψηλής ποιότητας ευρυζωνικές υπηρεσίες σε κινητούς χρήστες.

Η χρήση ασύρματων δικτύων επόμενης γενιάς, που υπόσχεται παροχή ποιοτικών υπηρεσιών, αναμένεται να προκαλέσει μεγάλη αύξηση στην κίνηση του δικτύου. Για μέγιστη χρήση του διαθέσιμου φάσματος, κάθε κυψέλη μπορεί να λειτουργεί σε όλο το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Ωστόσο, κάτι τέτοιο οδηγεί σε ανεπιθύμητες παρεμβολές για τους ακραίους χρήστες της κυψέλης κι ελαττώνει τη κάλυψη. Η κλασματική επαναχρησιμοποίηση συχνότητας (Fraction Frequency Reuse ή FFR) είναι μια υποσχόμενη προσέγγιση, για τη μείωση της παρεμβολής στα άκρα της κυψέλης. Η κλασματική επαναχρησιμοποίηση συχνότητας (FFR) έχει τη δυνατότητα παροχής σημαντικού κέρδους κάλυψης μειώνοντας την παρεμβολή στα άκρα της κυψέλης, ενώ διατηρείται υψηλή χρήση του φάσματος. Η κλασματική επαναχρησιμοποίηση συχνότητας μπορεί επομένως, να θεωρείται ως μια στοιχειώδης τεχνική για τη διαχείριση των παρεμβολών στα δίκτυα WiMAX.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη προσαρμοστικών τεχνικών επαναχρησιμοποίησης συχνότητας σε κυψελωτά δίκτυα επόμενης γενιάς.

Στο **1^ο Κεφάλαιο** παρουσιάζεται συνοπτικά μια εποπτική ματιά της εξέλιξης των ασύρματων κυψελωτών συστημάτων. Στο **2^ο Κεφάλαιο** γίνεται μια εκτενής αναφορά στο ασύρματο κανάλι διάδοσης και στα χαρακτηριστικά του. Στο **3^ο Κεφάλαιο** πραγματοποιείται εκτενής παρουσίαση του φυσικού στρώματος της τεχνικής πολυπλεξίας OFDM, από την οποία προκύπτει το OFDMA, και η κλασματική επαναχρησιμοποίηση συχνότητας. Στο **4^ο Κεφάλαιο** γίνεται αναλυτική παρουσίαση του προσομοιωτή OFDMA, της μοντελοποίησης του προβλήματος που πραγματεύεται η διπλωματική, και στο **5^ο Κεφάλαιο** τα αριθμητικά αποτελέσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις των αλγορίθμων. Η παρούσα διπλωματική ολοκληρώνεται με το **6^ο Κεφάλαιο**, όπου δίνονται κάποιες προτάσεις για μελλοντική έρευνα στο συγκεκριμένο ερευνητικό πεδίο.

Λέξεις Κλειδιά

OFDMA, Κλασματική Επαναχρησιμοποίηση Συχνότητας, WiMAX, Πολλαπλή πρόσβαση με ορθογωνική διαίρεση συχνότητας, Ασύρματο κανάλι διάδοσης, Κυψελωτά δίκτυα επόμενης γενιάς, OFDM, Έλεγχος ισχύος, Αλγόριθμοι εκχώρησης φερόντων, Ανάθεση εύρους ζώνης, Διαχείριση ραδιοπόρων

ABSTRACT

WiMAX is a metropolitan area network (MAN) wireless technology that provides high-quality broadband services to mobile users.

The employment of next generation networks, which promises rendering of quality services, is expected to trigger a large raise on the network traffic. For maximum usage of the available spectrum, each cell should operate on the whole available bandwidth. However, this leads to unacceptable interference for cell edge users and reduces the coverage. Fractional Frequency Reuse (FFR) is a promising approach for reducing interference at the cell edge. Fractional Frequency Reuse can provide significant coverage gains by reducing the cell edge interference, while retaining high utilization of the spectrum. Fractional Frequency Reuse, can therefore be regarded as an essential technique for interference management in WiMAX networks.

The aim of the present diploma thesis is to examine adaptive techniques of frequency reuse for next-generation cellular systems.

In **Chapter 1** is described the evolution of wireless cellular systems. In **Chapter 2** is referred in detail the wireless communication channel and its characteristics. In **Chapter 3**, the physical layer of the multiplexing technique OFDM, on which the OFDMA is based, and the Fractional Frequency Reuse, is presented in detail. In **Chapter 4** is made a detailed presentation of OFDMA simulator, the model thesis of the problem, and in **Chapter 5** the arithmetic results of algorithm's simulations. The present diploma thesis is concluded in **Chapter 6**, where some proposals for future research, based on the state of the art at this research field, are suggested.

Key Words

OFDMA, Fractional Frequency Reuse, WiMAX, Orthogonal Frequency Division Multiple Access, Wireless Communication Channel, Next-generation Cellular systems, OFDM, Power Control, Subcarrier allocation algorithm, Bandwidth assignment, Radio resource management

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική συντάχθηκε το πρώτο εξάμηνο του 2014 στη Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, στον Τομέα Συστημάτων Μετάδοσης Πληροφορίας και Τεχνολογίας Υλικών.

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την κ. Δήμητρα Κακλαμάνη, υπεύθυνη καθηγήτρια της διπλωματικής μου εργασίας, για την ανάθεση αυτής και την δυνατότητα ενασχόλησης με το συγκεκριμένο θέμα, καθώς και τον κ. Παναγιώτη Γκόνη, επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας και μεταδιδακτορικό ερευνητή στο εργαστήριο Ευφών Επικοινωνιών και Δικτύων Ευρείας Ζώνης (ICBNET), για την καταλυτική βοήθεια και καθοδήγηση, την υπομονή και τις γνώσεις που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της συγκεκριμένης εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, για την ηθική, ψυχική και υλική συμπαράσταση, όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου και τη βοήθεια περάτωσης αυτών.

Νικόλαος Γ. Πεππές
Ιούλιος 2014

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1. Εισαγωγή	13
1.1 Ιστορική αναδρομή για τις ασύρματες και κινητές επικοινωνίες.....	14
1.2 Ιστορική αναδρομή κινητών κυψελωτών δικτύων	16
1.2.1 1 ^η γενιά κυψελωτών συστημάτων.....	16
1.2.2 2 ^η γενιά κυψελωτών συστημάτων.....	17
1.2.3 2,5 ^η γενιά κυψελωτών συστημάτων.....	18
1.2.4 3 ^η γενιά κυψελωτών συστημάτων.....	19
1.2.5 4 ^η γενιά κυψελωτών συστημάτων.....	20
2. Το ασύρματο κανάλι διάδοσης	22
2.1 Γενικές αρχές διάδοσης στο ασύρματο κανάλι	23
2.2 Απώλειες διαδρομής (Path Losses)	23
2.2.1 Μοντέλο ελεύθερου χώρου	23
2.2.2 Μοντέλο επίπεδης επιφάνειας	24
2.2.3 Εκθετικό μοντέλο	25
2.2.4 Μοντέλο Okumura - Hata	25
2.3 Σκίαση	26
2.4 Πολύοδη διάδοση ή διάδοση πολλαπλών διαδρομών	28
2.4.1 Διαλείψεις επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα – Χρονική διασπορά	28
2.4.2 Διαλείψεις επιλεκτικές ως προς το χρόνο – Διασπορά Doppler.....	30
2.4.3 Διαλείψεις επιλεκτικές ως προς το χώρο – Χωρική διασπορά	32
2.5 Παρεμβολές	33
2.5.1 Θόρυβος.....	33
2.5.2 Ομοδιαυλική παρεμβολή	34
2.5.3 Παρεμβολές γειτονικών διαύλων.....	34
2.5.4 Διασυμβολική παρεμβολή.....	35
2.6 Το κανάλι Rayleigh	35
3. Ορθογωνική διαίρεση συχνότητας (OFDM-OFDMA)	38
3.1 Ιστορία της OFDM τεχνικής	39
3.2 Ποιοτική ανάλυση της OFDM τεχνικής.....	40
3.3 Η σημασία της ορθογωνιότητας.....	43
3.4 Επιλογή βασικών παραμέτρων συστήματος OFDM	45
3.4.1 Χρήσιμη διάρκεια συμβόλου.....	45

3.4.2	Αριθμός φερόντων.....	46
3.4.3	Σχήμα διαμόρφωσης	46
3.5	Γενικά συμπεράσματα περί της OFDM τεχνικής.....	48
3.5.1	Πλεονεκτήματα της OFDM τεχνικής.....	49
3.5.2	Μειονεκτήματα της OFDM τεχνικής.....	49
3.6	Η χρησιμοποίηση της OFDMA τεχνικής στα σύγχρονα δίκτυα.....	49
3.7	Η συνέχεια του OFDMA.....	51
3.8	Κλασματική επαναχρησιμοποίηση συχνότητας στα δίκτυα WiMAX.....	55
4.	Ο προσομοιωτής OFDMA	60
4.1	Το περιβάλλον προσομοίωσης.....	61
4.2	Μοντέλο προσομοίωσης κυψελωτού OFDMA συστήματος.....	61
4.3	Αλγόριθμοι κατανομής φερόντων.....	64
4.3.1	Σειριακός αλγόριθμος.....	65
4.3.2	Τυχαίος αλγόριθμος.....	66
4.3.3	Συντεταγμένος αλγόριθμος	66
4.4	Έλεγχος ισχύος.....	67
4.5	Αλγόριθμοι διαχείρισης ασύρματων πόρων.....	69
4.5.1	Μοναδική διαμόρφωση – Απομάκρυνση τελευταίου εισερχόμενου χρήστη.....	70
4.5.2	Μοναδική διαμόρφωση – Απομάκρυνση προβληματικού χρήστη	72
4.5.3	Μοναδική διαμόρφωση – Εκχώρηση φερόντων με κριτήριο την ισχύ	74
4.5.4	Προσαρμοστική διαμόρφωση – Εκχώρηση φερόντων με κριτήριο την ισχύ	77
4.5.5	Μοναδική διαμόρφωση – Εκχώρηση φερόντων με κριτήριο την απόσταση.....	80
4.5.6	Προσαρμοστική διαμόρφωση – Εκχώρηση φερόντων με κριτήριο την απόσταση.....	83
4.5.7	Μοναδική διαμόρφωση – Εκχώρηση φερόντων με κριτήριο την ισχύ – Αλγόριθμος Απομάκρυνσης προβληματικού χρήστη με λιγότερα φέροντα	86
4.6	Ζητούμενα προσομοιώσεων	89
5.	Ανάλυση αποτελεσμάτων	91
5.1	Σταθερή εκχώρηση φερόντων – Απόρριψη τελευταίου εισερχόμενου χρήστη.....	93
5.2	Σταθερή εκχώρηση φερόντων – Απόρριψη προβληματικού χρήστη	97
5.3	Προσαρμοστική εκχώρηση φερόντων με βάση την ισχύ.....	101
5.4	Προσαρμοστική εκχώρηση φερόντων με βάση την απόσταση	108
6.	Συμπεράσματα – Μελλοντικές προτάσεις	116
	Βιβλιογραφία	120

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1 Εξέλιξη κινητών επικοινωνιών	20
Σχήμα 2 Συνθήκες σκίασης σε επίγεια συστήματα.....	27
Σχήμα 3 Χρονική διασπορά.....	29
Σχήμα 4 Προφίλ καθυστέρησης ισχύος	29
Σχήμα 5 Ολίσθηση Doppler	30
Σχήμα 6 Διασπορά Doppler στο φάσμα του απλού τόνου	31
Σχήμα 7 Διασπορά γωνίας στον δέκτη.....	32
Σχήμα 8 Κατανομή Rayleigh	37
Σχήμα 9 Σύγκριση χρησιμοποίησης διαθέσιμου εύρους ζώνης FDM-OFDM.....	40
Σχήμα 10 Βελτίωση απόδοσης λόγω υιοθέτησης multicarrier συστήματος	41
Σχήμα 11 OFDM φάσμα μετάδοσης	44
Σχήμα 12 Κυματομορφή φερόντων σε OFDM μετάδοση	44
Σχήμα 13 Αστερισμοί κυριότερων διαμορφώσεων.....	47
Σχήμα 14 Διαχωρισμός υποκαναλιών στο WiMAX	50
Σχήμα 15 Τυπικοί παράμετροι WiMAX.....	54
Σχήμα 16 Διαχωρισμός χρονικών και φασματικών πόρων OFDM.....	55
Σχήμα 17 Κλασματική επαναχρησιμοποίηση συχνότητας.....	57
Σχήμα 18 Πλαίσιο μεταφοράς με πολλαπλές ζώνες μετάδοσης.....	58
Σχήμα 19 Εσωτερική κι εξωτερική περιοχή κατά την FFR.....	59
Σχήμα 20 Απεικόνιση πολυκυψελωτού OFDMA συστήματος.....	62
Σχήμα 21 Απεικόνιση πολυκυψελωτού OFDMA συστήματος με Tier και sectors 60°	63
Σχήμα 22 Διάγραμμα ροής σειριακού αλγόριθμου.....	65
Σχήμα 23 Διάγραμμα ροής τυχαίου αλγόριθμου	66
Σχήμα 24 Διάγραμμα ροής συντεταγμένου αλγόριθμου	67
Πίνακας 1 Τιμές SINR για τις βασικές διαμορφώσεις.....	68
Σχήμα 25 Αλγόριθμος μοναδικής διαμόρφωσης με απόρριψη τελευταίου χρήστη.....	71
Σχήμα 26 Αλγόριθμος μοναδικής διαμόρφωσης με απόρριψη προβληματικού χρήστη	73
Σχήμα 27 Αλγόριθμος μοναδικής διαμόρφωσης με κριτήριο την ισχύ	76
Σχήμα 28 Αλγόριθμος προσαρμοστικής διαμόρφωσης με κριτήριο την ισχύ	79
Σχήμα 29 Τομεοποίηση κυψελών, για αλγόριθμο με βάση την απόσταση.....	80
Σχήμα 30 Αλγόριθμος μοναδικής διαμόρφωσης με κριτήριο την απόσταση.....	82
Σχήμα 31 Αλγόριθμος προσαρμοστικής διαμόρφωσης με κριτήριο την απόσταση	85

Σχήμα 32 Αλγόριθμος μοναδικής διαμόρφωσης με κριτήριο την απόσταση-Απόρριψη προβληματικού χρήστη με τα λιγότερα φέροντα	88
Πίνακας 2 Ρυθμός δεδομένων ανά φέρον με τις βασικές διαμορφώσεις.....	90
Σχήμα 33 Χρήστες-Φέροντα_Σταθερή εκχώρηση φερόντων-Τελευταίος χρήστης	93
Σχήμα 34 Χρήστες κεντρικής κυψ. _Σταθερή εκχώρηση φερόντων-Τελευταίος χρήστης	93
Σχήμα 35 Συνολική ισχύς_Σταθερή εκχώρηση φερόντων-Τελευταίος χρήστης	94
Σχήμα 36 Συν. ισχύς κεντρ. Κυψ._Σταθερή εκχώρηση φερόντων-Τελευταίος χρήστης ...	95
Σχήμα 37 Μέση ισχύς_Σταθερή εκχώρηση φερόντων-Τελευταίος χρήστης.....	95
Σχήμα 38 Ρυθμοαπόδοση_Σταθερή εκχώρηση φερόντων-Τελευταίος χρήστης	96
Σχήμα 39 Χρήστες-Φέροντα_Σταθερή εκχώρηση φερόντων-Προβληματικός χρήστης ...	97
Σχήμα 40 Χρ. κεντρ. κυψ. _Σταθερή εκχώρηση φερόντων-Προβληματικός χρήστης	98
Σχήμα 41 Συνολική ισχύς_Σταθερή εκχώρηση φερόντων-Προβληματικός χρήστης.....	99
Σχήμα 42 Συν. ισχύς κεντρ. κυψ._Σταθ. εκχώρηση φερόντων-Προβληματικός χρήστης ...	99
Σχήμα 43 Μέση ισχύς_Σταθερή εκχώρηση φερόντων- Προβληματικός χρήστης.....	100
Σχήμα 44 Ρυθμοαπόδοση_Σταθερή εκχώρηση φερόντων- Προβληματικός χρήστης....	101
Σχήμα 45 Χρήστες_Προσαρμοστική εκχώρηση φερόντων με βάση την ισχύ.....	102
Σχήμα 46 Χρήστ. Κεντρ. κυψ. _ Προσαρμοστική εκχ. φερόντων με βάση την ισχύ	102
Σχήμα 47 Συνολική ισχύς_ Προσαρμοστική εκχώρηση φερόντων με βάση την ισχύ	103
Σχήμα 48 Συν. ισχύς κεντρ. Κυψ._ Προσαρμ. εκχώρηση φερόντων με βάση την ισχύ ..	104
Σχήμα 49 Μέση ισχύς_ Προσαρμοστική εκχώρηση φερόντων με βάση την ισχύ.....	104
Σχήμα 50 Κατανομή φερόντων_QPSK διαμόρφωση_ Πρ. εκχ. φερ. με βάση την ισχύ..	105
Σχήμα 51 Κατανομή φερόντων_Προσαρ. διαμόρφ._ Πρ. εκχ. φερ. με βάση την ισχύ ..	106
Σχήμα 52 Ρυθμοαπόδοση_ Προσαρμοστική εκχώρηση φερόντων με βάση την ισχύ ...	106
Σχήμα 53 Κατανομή φερόντων διαμορφώσεων_ Προσαρ. εκχ. φερ. με βάση την ισχύ	107
Σχήμα 54 Χρήστες_Προσαρμοστική εκχώρηση φερόντων με βάση την απόσταση.....	108
Σχήμα 55 Χρήστ. Κεντρ. κυψ. _ Προσαρμ. εκχ. φερόντων με βάση την απόσταση.....	109
Σχήμα 56 Συνολική ισχύς_ Προσαρμ. εκχώρηση φερόντων με βάση την απόσταση	110
Σχήμα 57 Συν. ισχύς κεντρ. Κυψ._ Προσαρμ.εκχ. φερόντων με βάση την απόσταση....	110
Σχήμα 58 Μέση ισχύς_ Προσαρμοστική εκχώρηση φερόντων με βάση την απόσταση	111
Σχήμα 59 Κατ. φερ._QPSK διαμόρφωση_ Πρ. εκχ. φερ. με βάση την απόσταση	112
Σχήμα 60 " " " " _ Πρ. εκχ. φερ. με βάση την απόστ._Απόρρ. Χρ. με λιγότερα φέροντα	112
Σχήμα 61 Κατ. φερ._Προσαρ. διαμόρφωση_ Πρ. εκχ. φερ. με βάση την απόσταση	113
Σχήμα 62 Ρυθμοαπόδοση_ Προσαρμ. εκχ. φερόντων με βάση την απόσταση	113
Σχήμα 63 Καταν. φερ. διαμορφώσεων_ Προσαρ. εκχ. φερ. με βάση την απόσταση	114

Κεφάλαιο 1^ο

Εισαγωγή

1.1 Ιστορική αναδρομή για τις ασύρματες και κινητές επικοινωνίες

Τα ασύρματα δίκτυα είναι ευέλικτοι τρόποι μεταφοράς δεδομένων [1]. Έχουν τη δυνατότητα μεταφοράς δεδομένων χρησιμοποιώντας μια ευρεία γκάμα κυμάτων από το υπέρυθρο φάσμα έως τις συχνότητες της κινητής τηλεφωνίας. Για το λόγο αυτό, η ασύρματη και κινητή δικτύωση είναι συχνά συσχετιζόμενες. Τόσο στις ασύρματες ψηφιακές επικοινωνίες, όσο και στις κινητές, οι πρώτες προσπάθειες αποτελεσματικών ζεύξεων αναφέρονται γύρω στο 1880. Τα πρώτα πειράματα του Marconi πραγματοποιήθηκαν το 1897 στη συχνότητα των 2 MHz και είχαν σαν αποτέλεσμα την εγκατάσταση του πρώτου συστήματος κινητής τηλεφωνίας, στο νησί Wight της Αγγλίας για λογαριασμό της Βασίλισσας Βικτώριας [2,3]. Η κινητή μονάδα ήταν το βασιλικό γιοτ σε απόσταση 18 μιλίων από τη νήσο, στο οποίο τοποθετήθηκε ένας VHF πομποδέκτης με την αντίστοιχη κεραία. Ο σταθμός βάσης, ήταν ένας πομποδέκτης με την κεραία του, αντίστοιχος με αυτόν της κινητής μονάδας, ο οποίος εγκαταστάθηκε στο παλάτι της Βασίλισσας.

Πριν από τον δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο οι Βρετανοί χρησιμοποιούσαν την τηλεφωνία για λογαριασμό της αστυνομίας. Η ζώνη συχνοτήτων που χρησιμοποιούνταν ήταν της τάξης των 2-3 MHz. Το έτος 1935, χρησιμοποίησαν για την υπηρεσία αυτή, συχνότητες στην περιοχή VHF. Κατά τη διάρκεια του δεύτερου παγκοσμίου πολέμου, η χρήση των συστημάτων αυτών επεκτάθηκε στις ένοπλες δυνάμεις και στις υπηρεσίες άμεσου επεμβάσεως (π.χ έκτακτες ανάγκες, πυροσβεστική υπηρεσία). Ο τύπος διαμόρφωσης του μεταδιδόμενου σήματος, ήταν Διαμόρφωση Πλάτους (AM), ενώ την εποχή εκείνη οι Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής χρησιμοποιούσαν δοκιμαστικά τη Διαμόρφωση Συχνότητας (FM), για τη βελτίωση της ποιότητας του λαμβανόμενου σήματος από την προκαλούμενη εξασθένηση αυτού, με την εμφάνιση του ηλεκτρικού θορύβου.

Το 1945 στο Ηνωμένο Βασίλειο (UK), υπήρχαν περίπου 1000 χρήστες των συστημάτων κινητής τηλεφωνίας κι ο αριθμός αυξανόταν συνεχώς. Το 1947 στα πλαίσια των εργασιών του Διεθνούς Συνεδρίου Ράδιο-Επικοινωνιών (International Radio-Communication Conference), η οποία έλαβε χώρα στο Atlantic City των ΗΠΑ, πραγματοποιήθηκε η κατανομή του ραδιοφάσματος για τους χρήστες των κινητών επικοινωνιών.

Στα πλαίσια της διαχρονικής καταγραφής της κινητής τηλεφωνίας σε παγκόσμιο επίπεδο, οφείλουμε να δώσουμε μερικά ιστορικά σημεία της εξέλιξης των κινητών επικοινωνιών στις ΗΠΑ. Το έτος 1921 στην Αστυνομία του Detroit, εγκαταστάθηκε το πρώτο σύστημα το οποίο λειτουργούσε στην περιοχή των 2 MHz [4]. Κατόπιν, περί το 1940, νέες συχνότητες στην περιοχή των 30 και 40 MHz, καταχωρήθηκαν για τις κινητές επικοινωνίες. Επειδή ο αριθμός των χρηστών οι οποίοι ζητούσαν πρόσβαση στα συστήματα αυτά αυξανόταν με μεγάλο ρυθμό, η Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών των ΗΠΑ Federal Communications Commission – FCC), παραχώρησε επιπλέον συχνότητες στην περιοχή των 30 και 500 MHz για διάφορες ειδικές χρήσεις. Τα πρώτα αυτά συστήματα κινητών επικοινωνιών, λειτουργούσαν αυτόνομα και δεν υπήρχε επικοινωνία με το τηλεφωνικό δίκτυο της χώρας.

Αμέσως μετά τον δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο, τα εργαστήρια Bell (Bell Laboratories) δρομολόγησαν ένα πρόγραμμα για την παροχή των επικοινωνιακών υπηρεσιών, με συστήματα τα οποία χρησιμοποιούσαν κοινό φορέα (common carrier), προκειμένου να εξυπηρετούνται πολλοί χρήστες μαζί, κινούμενοι σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές. Η υπηρεσία αυτή καταχωρήθηκε στην FCC με το όνομα Δημόσια Εσωτερική Υπηρεσία Επίγειων Κινητών Ασύρματων Επικοινωνιών (Domestic Public Land Mobile Radio Service – DPLMRS). Η υπηρεσία DPLMRS δρομολόγησε τα παρακάτω δυο συστήματα:

Το πρώτο από αυτά, λειτούργησε το 1946 για την κάλυψη των επικοινωνιακών αναγκών των χρηστών, οι οποίοι κινούνταν εντός της πόλης του St. Louis, χρησιμοποιώντας τρεις ραδιο-διαύλους στην περιοχή των 150 MHz. Πρέπει να σημειωθεί ότι στην αρχή, η FCC είχε καταχωρήσει έξι ραδιοδιαύλους για την κάλυψη των αναγκών, αλλά επειδή οι χρησιμοποιούμενοι πομποδέκτες δεν ήταν υψηλής τεχνολογίας για την εποχή εκείνη, παρατηρήθηκαν προβλήματα από παρεμβολές γειτονικών ραδιο-διαύλων (καναλιών) στην ίδια περιοχή, οπότε τελικά χρησιμοποιήθηκαν μόνο οι τρεις ραδιο-διάυλοι. Το σύστημα του St. Louis ήταν γνωστό με το όνομα Urban System.

Το 1947, εγκαταστάθηκε ένα δεύτερο σύστημα για την κάλυψη των επικοινωνιακών αναγκών των χρηστών οι οποίοι κινούνταν στον αυτοκινητόδρομο New York – Boston. Το σύστημα αυτό χρησιμοποίησε συχνότητες στην περιοχή 35-44 MHz και ήταν γνωστό με τον όνομα Highway System.

Το 1964, λειτούργησε ένα νέο σύστημα στα 150 MHz, το οποίο ήταν γνωστό με την ονομασία MJ και το έτος 1969 εγκαταστάθηκε και λειτούργησε το σύστημα MK, χρησιμοποιώντας συχνότητες στην περιοχή του ραδιοφάσματος των 450 MHz. Πρέπει να σημειωθεί ότι τόσο το MJ όσο και το MK, ήταν τμήματα του Βελτιωμένου Συστήματος Κινητής Τηλεφωνίας (Improved Mobile Telephone System – IMTS).

Το IMTS ήταν το πρώτο δίκτυο κινητών επικοινωνιών το οποίο συνδέονταν με το δίκτυο δημόσιας υπηρεσίας και χρησιμοποιούσε πλήρως αμφίδρομες ζεύξεις (full duplex). Παρόλα αυτά, η χρήση πλήρως αμφίδρομων ζεύξεων σε συνδυασμό με το συνεχώς αυξανόμενο πλήθος χρηστών απαιτούσαν όλο και μεγαλύτερο εύρος ζώνης.

Τη λύση στο συγκεκριμένο πρόβλημα έφεραν τα Bell Laboratories εισάγοντας την έννοια της κυψέλης. Βασική ιδέα των κυψελωτών συστημάτων είναι η διαίρεση της περιοχής, την οποία εξυπηρετεί ένα σύστημα, σε μικρότερες κυψέλες, κάθε μια από τις οποίες επαναχρησιμοποιεί διαύλους, ώστε να αυξηθεί η χωρητικότητα του συστήματος. Έτσι είχαμε την αρχή των πρώτων κυψελωτών συστημάτων επικοινωνιών.

1.2 Ιστορική αναδρομή κινητών κυψελωτών συστημάτων

Στη παράγραφο αυτή θα γίνει σύντομη αναδρομή στην ιστορία των κυψελωτών δικτύων, με σκοπό την καλύτερη κατανόηση της εξέλιξης της τεχνολογίας και των συστημάτων που τελικά καθιερώθηκαν [5,6].

Θα γίνει αναφορά στους προκατόχους των 3G δικτύων και στις αναβαθμίσεις που έγιναν στα συστήματα πρώτης και δεύτερης γενιάς, ώστε τελικά να προκύψουν οι πολύ υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης και υψηλή ποιότητα των σημερινών 4G συστημάτων.

Η ιστορία των ασύρματων επικοινωνιών μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε διαδοχικές διαφορετικές γενιές δικτύων. Κάθε γενιά αποτέλεσε ένα ξεχωριστό μεγάλο βήμα συνοδευόμενο από επαναστατικές κινήσεις στο χώρο των κινητών τηλεπικοινωνιών. Την αναλογική 1^η γενιά, ακολούθησε η 2^η ψηφιακή γενιά. Το όραμα της 3^{ης} ήταν να απελευθερώσει πλήρως τη μετάδοση δεδομένων πολυμεσικών, όπως και τη φωνητική επικοινωνία. Παράλληλα εφαρμόστηκε και μια έντονη ερευνητική προσπάθεια, σχετικά με το μέλλον της ασύρματης πρόσβασης, γνωστή ως ασύρματη πρόσβαση 4^{ης} γενιάς ή 4G.

Κεντρική ιδέα αυτής είναι τα all-IP δίκτυα, δηλαδή οποτεδήποτε κι οπουδήποτε βρίσκεται ένας κινητός χρήστης να έχει κάλυψη από οποιοδήποτε IP δίκτυο, είτε πρόκειται για κυψελωτό, είτε για WLAN, είτε για δορυφορικό. Η τεχνολογία 4G εξέλιξε τις επιδόσεις και υπηρεσίες των ασύρματων συστημάτων, παρέχοντας ρυθμούς δεδομένων έως και 100 Mbps σε ευρεία περιοχή κάλυψης κι έως 1 Gbps σε τοπική περιοχή κάλυψης.

Η International Telecommunication Union (ITU) προώθησε τις International Mobile Telecommunications (IMT-2000) ως εναρκτήριο λάκτισμα για την κάλυψη υψηλών ευρυζωνικών ταχυτήτων βασισόμενη σε κινητά συστήματα που υποστηρίζουν σύνδεση δικτύου-δικτύου, διαφάνεια υπηρεσιών, παγκόσμια περιήγηση κι αδιάλειπτες υπηρεσίες ανεξαρτήτως τοποθεσίας. Επιπλέον, στόχος της, ηπήρξε και οι κινητές πολυμεσικές τηλεπικοινωνίες στην παγκόσμια αγορά να είναι υψηλής ποιότητας μεγαλύτερης ταχύτητας και πιο αποδοτικές σε περιπτώσεις υψηλών απαιτήσεων σε όγκο δεδομένων, δηλαδή «παροχή υπηρεσιών πάντα και παντού»

1.2.1 Πρώτη γενιά κυψελωτών δικτύων (First Generation 1G)

Τα δίκτυα της 1^{ης} γενιάς εμφανίστηκαν στα τέλη της δεκατίας του 1980 και ήταν αναλογικά. Δεν αποτέλεσαν την αρχή των κινητών επικοινωνιών, καθώς προϋπήρχαν δίκτυα κινητών επικοινωνιών, τα οποία δεν ήταν κυψελωτά [5,8]. Η 1^η γενιά χρησιμοποιούσε τεχνικές αναλογικής μετάδοσης για την κάλυψη αποκλειστικά φωνής και η υποστήριξη της κινητικότητας των χρηστών ήταν υποτυπώδης και προβληματική. Η τεχνική πολυπλεξίας που χρησιμοποίησε η 1^η γενιά ήταν η προσπέλαση με διαίρεση συχνότητας (Frequency Division Multiply Access – FDMA).

Δεν υπήρχε κάποιο πρότυπο που να επικράτησε, αλλά διάφορα ανταγωνιστικά συστήματα. Τα κυριότερα και πιο πετυχημένα συστήματα που αναπτύχθηκαν είναι:

- TACS (Total Access Communication System)
- NMT (Nordic Mobile Telephone)
- AMPS (Advanced Mobile Phone Service)

Το TACS αναπτύχθηκε στη Μεγάλη Βρετανία κι αργότερα υιοθετήθηκε κι από άλλες χώρες κεντρικές κι ανατολικές κι από την νότια Ευρώπη. Το NMT αρχικά χρησιμοποιήθηκε στη Σκανδιναβία και στη συνέχεια υιοθετήθηκε από κάποιες χώρες της κεντρικής και νότιας Ευρώπης. Βασίζεται στον σύστημα AMPS, αλλά χρησιμοποιεί την μπάντα των 900 MHz. Το σύστημα AMPS αναπτύχθηκε στις ΗΠΑ και χρησιμοποιεί την μπάντα των 800 MHz. Εκτός από την Βόρεια Αμερική, το AMPS χρησιμοποιήθηκε κι από χώρες της Νότιας Αμερικής, της Μέσης Ανατολής, καθώς στη Νέα Ζηλανδία και την Αυστραλία. Το NTT's MCS ήταν το πρώτο εμπορικό κυψελωτό δίκτυο στην Ιαπωνία.

Η Ελλάδα ήταν η μόνη χώρα της Δυτικής Ευρώπης, η οποία δεν υιοθέτησε κανένα σύστημα αναλογικών κινητών δικτύων.

1.2.2 Δεύτερη γενιά κυψελωτών δικτύων (Second Generation 2G)

Στη 2^η γενιά κυψελωτών συστημάτων χρησιμοποιείται ψηφιακή μετάδοση για την κίνηση, σε αντίθεση με την 1^η γενιά [4,7]. Αρχικά σχεδιάστηκε για μεταφορά κλήσεων, σαν σύστημα μεταγωγής κυκλωμάτων (circuit switched system) και το σύστημα βελτιστοποιήθηκε για κίνηση φωνής. Τα δίκτυα 2^{ης} γενιάς έχουν σαφώς μεγαλύτερη χωρητικότητα και δυνατότητες αναλογικά με αυτά της 1^{ης} γενιάς. Ένα κανάλι συχνοτήτων διαιρείται και μπορεί να χρησιμοποιηθεί από πολλούς διαφορετικούς χρήστες, είτε με διαίρεση χρόνου, είτε με διαίρεση κώδικα. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται ιεραρχικές δομές κελιών, δηλαδή η περιοχή κάλυψης διαιρείται σε μακροκύτταρα (macrocells), μικροκύτταρα (microcells) και πικοκύτταρα (picocells), με σκοπό την περαιτέρω αύξηση των δυνατοτήτων των δικτύων. Υπάρχουν τέσσερα κύρια πρότυπα για τα κινητά δίκτυα 2^{ης} γενιάς:

- Global System for Mobile (GSM) communications και τα παράγωγα του
- Digital AMPS
- Code Division Multiple Access (CDMA) IS-95
- Personal Digital Cellular (PDC)

Το GSM είναι μακράν το πιο πετυχημένο και διαδεδομένο σύστημα 2^{ης} γενιάς. Ξεκίνησε ως Ευρωπαϊκό πρότυπο από την Ευρωπαϊκή επιτροπή CEPT (European Conference of Postal and Telecommunications Administrations), αλλά γρήγορα υιοθετήθηκε παγκοσμίως. Μόνο στην Αμερική το GSM δεν είχε μεγάλη διάδοση. Στη Βόρεια Αμερική το Personal Communication System-1900 (PCS-1900, παράγωγο του GSM, ονομάζεται και GSM-1900) κέρδισε έδαφος, ενώ στη Νότια Αμερική το GSM είχε

ευρεία διάδοση. Παρόλα αυτά, το 2001 η βορειοαμερικάνικη κοινότητα για την Πολλαπλή Πρόσβαση με Διάρθρωση χρόνου (Time Division Multiple Access – CDMA) αποφάσισε να υιοθετήσει το σύστημα Wideband CDMA (WCDMA) που ορίστηκε από το Third Generation Partnership Project (3GPP). Προκειμένου να προετοιμαστούν για το WCDMA πολλές αμερικάνικες εταιρείες που χρησιμοποιούσαν το D-AMPS υιοθέτησαν το σύστημα GSM/GPRS.

Το βασικό σύστημα GSM χρησιμοποιεί τη ζώνη συχνοτήτων των 900 MHz. Υπάρχουν όμως κι αρκετά παράγωγα, τα οποία χρησιμοποιούν τη ζώνη των 1800 ή 1900 MHz. Ο κυριότερος λόγος ήταν η έλλειψη χωρητικότητας στη ζώνη των 900 MHz. Οι ζώνες των 1800 και 1900 MHz μπορούν να εξυπηρετήσουν μεγαλύτερο αριθμό χρηστών, κυρίως σε πυκνοκατοικημένες περιοχές, αλλά η περιοχή κάλυψης μειώνεται συγκριτικά με τη ζώνη των 900 MHz. Επίσης, το ίδρυμα European Telecommunications Standards Institute (ETSI), ανέπτυξε τα πρότυπα GSM-400 και GSM-800, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν συμπληρωματικά επί των δικτύων GSM με υψηλότερες συχνότητες. Παρόλο που το σύστημα αυτό ήταν αρκετά αποδοτικό σε αραιοκατοικημένες περιοχές, το πρότυπο GSM-400 δεν χρησιμοποιείται πλέον.

Μέχρι και το 2005 η τεχνολογία GSM κατείχε το 70% της παγκόσμιας αγοράς στα συστήματα κινητής τηλεφωνίας 2^{ης} γενιάς. Στην Ελλάδα το 1992 δόθηκαν άδειες για δίκτυα GSM στις εταιρείες Panafon και STET Hellas.

1.2.3 2,5 γενιά κυψελωτών δικτύων (2,5 Generation 2,5G)

Ο όρος «γενιά 2,5» αναφέρεται στο σύνολο των αναβαθμίσεων που έγιναν στα κινητά δίκτυα 2^{ης} γενιάς [7]. Πολλές από αυτές τις αναβαθμίσεις παρέχουν σχεδόν τις ίδιες δυνατότητες με αυτές των κινητών δικτύων 3^{ης} γενιάς. Παρόλο που η διαχωριστική γραμμή μεταξύ των δικτύων 2^{ης} γενιάς και 2,5 γενιάς είναι λεπτή, υπάρχουν ορισμένες τεχνολογίες οι οποίες χαρακτηρίζουν τη γενιά 2,5. Αυτές είναι:

- High Speed Circuit-Switched Data (HSCSD)
- General Packet Radio Services (GPRS)
- Enhanced Data Rates for Global Evolution (EDGE)

Το μεγαλύτερο πρόβλημα που παρουσίασαν οι αρχικές μορφές του GSM ήταν οι χαμηλοί ρυθμοί μετάδοσης στον αέρα που περιορίζονταν στα 9,6 Kbps. Αργότερα τέθηκαν οι προδιαγραφές για τα 14,4 Kbps παρόλο που δε χρησιμοποιήθηκαν ευρέως. Η λύση που προτάθηκε ήταν η τεχνολογία HSCSD. Με την τεχνολογία αυτή ένας χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει περισσότερες χρονοσχισμές (time-slots) αντί μια, για μια σύνδεση μεταφοράς δεδομένων. Η υλοποίηση της συγκεκριμένης τεχνολογίας είναι σχετικά απλή και φθηνή και για να υλοποιηθεί απαιτεί πρόσθετο λογισμικό στα κέντρα, και καινούργιες φορητές συσκευές που θα υποστηρίζουν HSCSD. Το βασικότερο μειονέκτημα ήταν η χρήση της μεταγωγής κυκλώματος. Αυτός ο τρόπος μεταγωγής είχε ως αποτέλεσμα τη σπατάλη πόρων του δικτύου, αφού οι χρονοσχισμές δεσμεύονταν ακόμα κι όταν δεν

χρησιμοποιούνταν. Αυτό το χαρακτηριστικό καθιστά την HSCSD τεχνολογία την καλύτερη επιλογή για εφαρμογές πραγματικού χρόνου (real time), όπου επιτρέπονται πολύ μικρές καθυστερήσεις.

Η επόμενη λύση που προτάθηκε ήταν η τεχνολογία GPRS. Με αυτήν την τεχνολογία μπορούν να επιτευχθούν ρυθμοί μετάδοσης των 115 Kbps ή και ακόμα μεγαλύτεροι στο downlink (δηλαδή στη μετάδοση από τον σταθμό βάσης προς το τερματικό), αν αγνοηθεί η διόρθωση σφαλμάτων. Αυτό που έχει μεγάλη σημασία είναι ότι η τεχνολογία GPRS χρησιμοποιεί την τεχνολογία μεταγωγής πακέτου, δηλαδή επιτρέπει την κίνηση με την μορφή πακέτων (συνήθως IPv4 ή IPv6 πακέτα). Επομένως δεσμεύει τους πόρους του δικτύου μόνο όταν υπάρχει ανάγκη για αποστολή δεδομένων. Στην ουσία είναι η προσθήκη δικτύου μεταγωγής πακέτων στο ήδη υπάρχον δίκτυο μεταγωγής κυκλωμάτων του GSM. Η υλοποίηση του GPRS είναι αρκετά πιο ακριβή από αυτή του HSCSD. Παρόλα αυτά η τεχνολογία GPRS προσφέρει πολύ μεγαλύτερες δυνατότητες για την αποστολή δεδομένων μέσω των κινητών δικτύων. Είναι σίγουρο πλέον, πως η αύξηση της κίνησης δεδομένων στα δίκτυα, καθιστά την GPRS τεχνολογία αναπόσπαστο στοιχείο ενός συστήματος κινητής τηλεφωνίας.

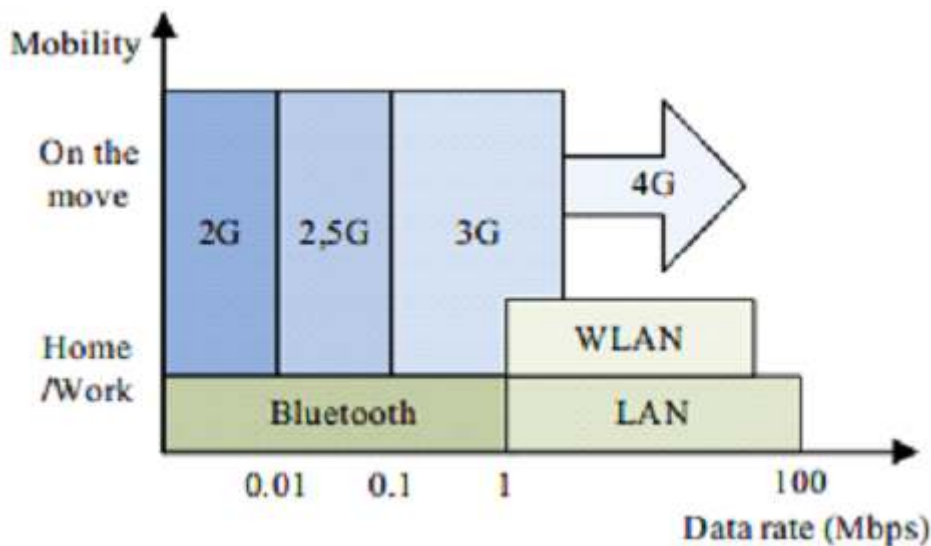
Τέλος, η τρίτη και τελευταία βελτίωση του GSM προκειμένου να εξελιχθεί σε ένα δίκτυο 2,5 γενιάς είναι η τεχνολογία EDGE. Στηρίζεται σε μια τεχνική διαμόρφωσης που ονομάζεται Eight-Phase Shift Keying (8PSK). Η τεχνική αυτή επηρεάζει μόνο το λογισμικό των σταθμών βάσης, ενώ προσφέρει έως και τριπλάσιο ρυθμό μετάδοσης του GSM. Επιπλέον, δεν αντικαθιστά, αλλά μπορεί να συνυπάρξει με την τεχνική διαμόρφωσης Gaussian Minimum Shift Keying (GMSK), η οποία χρησιμοποιείται στη βασική μορφή του GSM. Ο συνδυασμός EDGE με το GPRS λέγεται EGPRS (enhanced GPRS) και με αυτόν επιτυγχάνονται ρυθμοί μετάδοσης έως και 384 Kbps.

1.2.4 Τρίτη γενιά κυψελωτών δικτύων (Third Generation 3G)

Η γρήγορη εξέλιξη των κινητών τηλεπικοινωνιών ήταν ένα από τα αναμφισβήτητα γεγονότα της δεκαετίας του 1990. Το Δεκέμβριο του 2002 υπήρχαν παγκοσμίως 780 εκατομμύρια συνδρομητές σε δίκτυα GSM, οι οποίοι συνιστούσαν το 71% του συνολικού αριθμού των χρηστών κινητής τηλεφωνίας. Το πρώτο εμπορικό GSM λειτούργησε στη Φιλανδία το 1991. Την ίδια χρονιά το ίδρυμα ETSI ξεκινούσε τη προτυποποίηση της επόμενης γενιάς δικτύων κινητών τηλεπικοινωνιών. Το σύστημα που προέκυψε ονομάστηκε Universal Mobile Telecommunications System (UMTS). Η ανάπτυξη των κινητών δικτύων 3^{ης} γενιάς δεν έγινε μόνο στο ETSI. Υπήρξαν πολλοί οργανισμοί κι ερευνητικά ιδρύματα, σε παγκόσμιο επίπεδο, που προσπαθήσαν να αναπτύξουν συστήματα 3^{ης} γενιάς. Το UMTS θεωρείται πλέον το κυρίαρχο πρότυπο στα 3G δίκτυα κι έπεται το πρότυπο US CDMA2000. Στην Ιαπωνία, που είναι η πιο εξελιγμένη χώρα όσον αφορά την 3G τεχνολογία, η μετάβαση από τα 2G στα 3G δίκτυα ολοκληρώθηκε το 2006 και πλέον δυο συστήματα χρησιμοποιούνται: το W-CDMA (που είναι πιο συμβατό με το σύστημα UMTS) και το CDMA2000 [7,9].

Βασικός στόχος της ανάπτυξης των κινητών δικτύων 3^{ης} γενιάς είναι η παροχή των κινητών υπηρεσιών «οπουδήποτε» και «κάθε στιγμή». Αυτό σημαίνει ότι ένας χρήστης κινητών δικτύων 3^{ης} γενιάς μπορεί να μετακινείται οπουδήποτε και να εξυπηρετείται ακόμα και σε περιοχές όπου δεν υπάρχει κάλυψη από συστήματα 3^{ης} γενιάς, αλλά υπάρχουν άλλους είδους ασύρματα δίκτυα. Για την ακρίβεια, ο χρήστης θα μπορεί να εξυπηρετείται από άλλα είδη ασύρματων συστημάτων, από άλλα κυψελωτά κινητά δίκτυα, καθώς κι από δορυφορικά δίκτυα.

Επιπλέον, οι παρεχόμενες υπηρεσίες επεκτείνονται σε υπηρεσίες διαδικτύου και σε υπηρεσίες πολυμέσων με υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης. Στο σχήμα 1 απεικονίζεται η εξέλιξη των κινητών επικοινωνιών, όσον αφορά τις ταχύτητες που μπορούν να επιτευχθούν από τα συστήματα της κάθε γενιάς. Παρατηρούνται ρυθμοί που ξεκινούν από τα 144 Kbps και φτάνουν ακόμα και σε ρυθμούς της τάξης των Mbps.



Σχήμα 1. Εξέλιξη κινητών επικοινωνιών

1.2.5 Τέταρτη γενιά κυψελωτών δικτύων (Fourth Generation 4G)

Η επόμενη γενιά μετά τη 3G είναι η 4G, η οποία είναι σε εξέλιξη. Τα πλεονεκτήματα της 4G είναι κυρίως, η αποδοτικότητα φάσματος του συστήματος, η υψηλή χωρητικότητα του δικτύου, η υψηλή ποιότητα υπηρεσιών για την υποστήριξη των πολυμέσων της επόμενης γενιάς, η τεχνολογία για το packet switched network και το global roaming. Θα χρησιμοποιηθεί για να υποστηρίξει σε ποιότητα και αξία τις απαιτήσεις εφαρμογών 4^{ης} γενιάς, όπως mobile TV, και υπηρεσίες φωνής και δεδομένων οπουδήποτε και σε οποιαδήποτε στιγμή.

Στόχος της γενιάς αυτής είναι η ανάπτυξη συστημάτων πλήρως βασισμένα στην τεχνολογία IP. Αυτό πρόκειται να επιτευχθεί με την σύγκλιση ενσύρματων κι ασύρματων τεχνολογιών και θα είναι δυνατόν να παρέχουν ταχύτητες μετάδοσης από 100 Mbit/s έως και 1 Gbit/s, με εξαιρετική ποιότητα και υψηλό επίπεδο ασφαλείας. Οι κυρίαρχες

τεχνολογίες είναι η τεχνολογία OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) κι επίσης OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), για την καλύτερη τοποθέτηση πολλαπλών χρηστών. Τέλος, η 4G τεχνολογία θα βασίζεται μόνο σε μεταγωγή πακέτων, σε αντίθεση με τη 3G που υποστηρίζει μετάδοση και με μεταγωγή κυκλωμάτων.

Κεφάλαιο 2^ο

Το ασύρματο κανάλι διάδοσης

2.1 Γενικές αρχές διάδοσης στο ασύρματο κανάλι

Οι κινητές επικοινωνίες χρησιμοποιούν κυρίως ηλεκτρομαγνητικά κύματα με συχνότητες που εκτείνονται από μερικές εκατοντάδες MHz μέχρι λίγα GHz.

Οι μηχανισμοί που διέπουν τη διάδοση σημάτων στο ασύρματο κανάλι διακρίνονται στις εξείς περιπτώσεις [9,10]:

- Απευθείας διάδοση
- Ανάκλαση
- Περίθλαση
- Σκέδαση

Βασική απαίτηση για αξιόπιστη επικοινωνία σε μια συγκεκριμένη περιοχή ή έναν συγκεκριμένο χώρο αποτελεί η κατανομή της μέσης ηλεκτρομαγνητικής ισχύος, η οποία θα πρέπει να επαρκεί μεν για την εξυπηρέτηση της ζητούμενης ζεύξης, χωρίς δε να προκαλεί παρεμβολή σε άλλη ζεύξη με την ίδια συχνότητα που λειτουργεί σε άλλη κυψέλη. Λόγω της κίνησης του τερματικού, το ασύρματο περιβάλλον αλλάζει, οπότε εκτός από τη μέση ισχύ ενδιαφέρει και η στατιστική συμπεριφορά της.

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 κι ανεξάρτητα μεταξύ τους φυσικά φαινόμενα [10,11]:

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

2.2 Απώλειες διαδρομής (Path Losses)

Κατά καιρούς, έχουν προταθεί πολλά μοντέλα διάδοσης, τα οποία χρησιμοποιούνται στις τηλεπικοινωνίες. Δυο από τα συνηθέστερα αποτελούν το εκθετικό μοντέλο και το επεκτεταμένο μοντέλο Okumura – Hata [1]. Εκτός από αυτά γίνεται αναφορά και στο μοντέλο ελεύθερου χώρου, όπως και στο μοντέλο επίπεδης επιφάνειας.

2.2.1 Μοντέλο ελεύθερου χώρου

Το μοντέλο διάδοσης ελεύθερου χώρου χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος, όταν το περιβάλλον διάδοσης είναι ο ελεύθερος χώρος, όταν δηλαδή δεν παρουσιάζονται εμπόδια μεταξύ πομπού και δέκτη φτάνει μόνο η απευθείας συνιστώσα (line-of-sight, LOS). Στη συγκεκριμένη περίπτωση η λαμβανόμενη ισχύς δίνεται από την εξίσωση του Friis [1,11,12]:

$$P_r = P_t \cdot G_t \cdot G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 = P_t \cdot G_t \cdot G_r \left(\frac{c}{4\pi f d} \right)^2 \quad (2.1)$$

, όπου P_r και P_t είναι αντίστοιχα η λαμβανόμενη κι εκπεμπόμενη ισχύς, λ το μήκος κύματος για στη συχνότητα λειτουργίας f , c η ταχύτητα του φωτός και d η απόσταση πομπού – δέκτη, ενώ G_r και G_t τα κέρδη των κεραιών λήψης κι εκπομπής.

Από τη παραπάνω εξίσωση γίνεται αντιληπτό, ότι η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης, άρα κάθε φορά που η απόσταση δεκαπλασιάζεται, η στάθμη ισχύος μειώνεται κατά 20 dB.

Σε κυψελωτά περιβάλλοντα διάδοσης, όπου λαμβάνουν χώρα ανακλάσεις στην επιφάνεια της γης, το μοντέλο ελεύθερου χώρου είναι ακατάλληλο.

2.2.2 Μοντέλο επίπεδης επιφάνειας

Για μικρές σχετικά αποστάσεις, της τάξης των μερικών δεκάδων χιλιομέτρων, αποτελεί το πλεον κατάλληλο μοντέλο, όπου μπορούμε να παραβλέψουμε τη καμπυλότητα της γης, στο οποίο θεωρείται πως η γη είναι ένα τέλεια αγωγίμο επίπεδο. Το σήμα στη κεραία του δέκτη προκύπτει από τη συμβολή του απευθείας κύματος με ένα ανακλώμενο στην επιφάνεια της γης κύμα με διαφορετική διανυόμενη απόσταση για το καθένα. Στην περίπτωση που ισχύουν οι συνθήκες [1,11,12]:

$$1) d \gg h_t h_r$$

$$2) d \gg 2\pi h_t h_r / \lambda$$

, όπου h_r κι h_t τα ύψη της κεραίας του πομπού και του δέκτη αντίστοιχα, ενώ η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος δίνεται από τη σχέση:

$$P_r = P_t \left(\frac{h_t h_r}{d^2} \right)^2 G_t G_r \quad (2.2)$$

Από τα παραπάνω προκύπτει, ότι ενώ οι απώλειες ελεύθερου χώρου μεταβάλλονται με το τετράγωνο της απόστασης πομπού και δέκτη, για διάδοση πάνω από την επιφάνεια, η λαμβανόμενη ισχύς μεταβάλλεται με την τέταρτη δύναμη της απόστασης, δηλαδή όταν έχουμε δεκαπλασιασμό της απόστασης, η στάθμη ισχύος του σήματος μειώνεται κατά 40 dB.

2.2.3 Εκθετικό μοντέλο

Η πλειονότητα των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων λειτουργεί σε περιβάλλοντα μη οπτικής επαφής (NLOS) [1,12,13,16]. Εμπειρικά έχει διατυπωθεί ότι οι απώλειες διάδοσης για περιπτώσεις που δεν υπάρχει οπτική επαφή πομπού – δέκτη ακολουθούν το γενικό εκθετικό μοντέλο της παρακάτω σχέσης:

$$L(d) \subset L_o \left(\frac{d}{d_o} \right)^n \quad (2.3)$$

, όπου d_o η απόσταση αναφοράς ή η απόσταση για την οποία ισχύει διάδοση LOS, L_o οι απώλειες διάδοσης σε απόσταση d_o και διάδοση LOS, d η απόσταση μεταξύ κεραιών εκπομπής και λήψης και $L(d)$ οι αντίστοιχες απώλειες διάδοσης. Ο εκθέτης n καλείται συντελεστής απωλειών διάδοσης ή εξασθένισης κι εκφράζει τη συμπεριφορά της ισχύος του σήματος συναρτήσει της απόστασης. Για τα μοντέλα ελεύθερου χώρου κι επίπεδης επιφάνειας, ο συντελεστής παίρνει τιμές $n=2$ και $n=4$ αντίστοιχα, ενώ σε πραγματικά περιβάλλοντα διάδοσης παίρνει τιμές από 2,6 σε κλειστούς κυρίως χώρους όπου προσομοιώνονται συνθήκες κυματοδήγησης, έως και 6 σε αστικές περιοχές με υψηλό δείκτη σκέδασης.

Η απόλυτη μέση τιμή απωλειών διάδοσης σε dB ορίζεται μέσω της σχέσης:

$$L(d) = L_o + 10 \cdot n \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{d_o} \right) \quad (2.4)$$

2.2.4 Μοντέλο Okumura – Hata

Από τα πλέον συνηθισμένα μοντέλα περιγραφής των απωλειών διάδοσης αποτελούν αυτά που βασίζονται σε στατιστική επεξεργασία πειραματικών δεδομένων. Το πιο διαδεδομένο από αυτά είναι το μοντέλο Okumura – Hata [1]. Ο Okumura πραγματοποίησε σειρά μετρήσεων στο φάσμα από 500 MHz – 2 GHz, ενώ στη συνέχεια ο Hata έκανε κάποιες απλοποιήσεις καθιστώντας το πιο πρακτικό, με αποτέλεσμα το μοντέλο Okumura – Hata, στο οποίο έχουν προσμετρηθεί όλοι οι παράγοντες απωλειών. Το μοντέλο αναφέρεται σε αστικό περιβάλλον για συγκεκριμένες συνθήκες:

- Συχνότητα της τάξης των 150 MHz έως 1500 MHz
- Ύψος κεραιάς σταθμού βάσης μεταξύ 30 και 200 m
- Ύψος κεραιάς κινητού τερματικού μεταξύ 1 και 10 m
- Απόσταση πομπού - δέκτη μεταξύ 1 και 20 km

Οι απώλειες διάδοσης δίνονται από τη σχέση:

$$PL = 69.55 + 26.16 \log_{10} f - 13.82 \log_{10} h_{\beta} - C_H + [44.9 - 6.55 \log_{10} h_{\beta}] \log_{10} d \quad (2.5)$$

,όπου για μικρού ή μεσαίου μεγέθους πόλη

$$CH = 0.8 + (1.1 \log_{10} f - 0.7) h_M - 1.56 \log_{10} f \quad (2.6)$$

,ενώ για μεγάλες πόλεις

$$CH = 8.29 (\log_{10} (1.54 h_M))^2 - 1.1, \text{ για } 150 \text{MHz} \leq f \leq 200 \text{MHz}$$
$$CH = 3.2 (\log_{10} (11.75 h_M))^2 - 4.97, \text{ για } 200 \text{MHz} \leq f \leq 1500 \text{MHz} \quad (2.7)$$

,όπου

PL= Απώλειες διαδρομής σε αστικές περιοχές (dB)

h_{β} = Ύψος κεραιάς σταθμού βάσης (m)

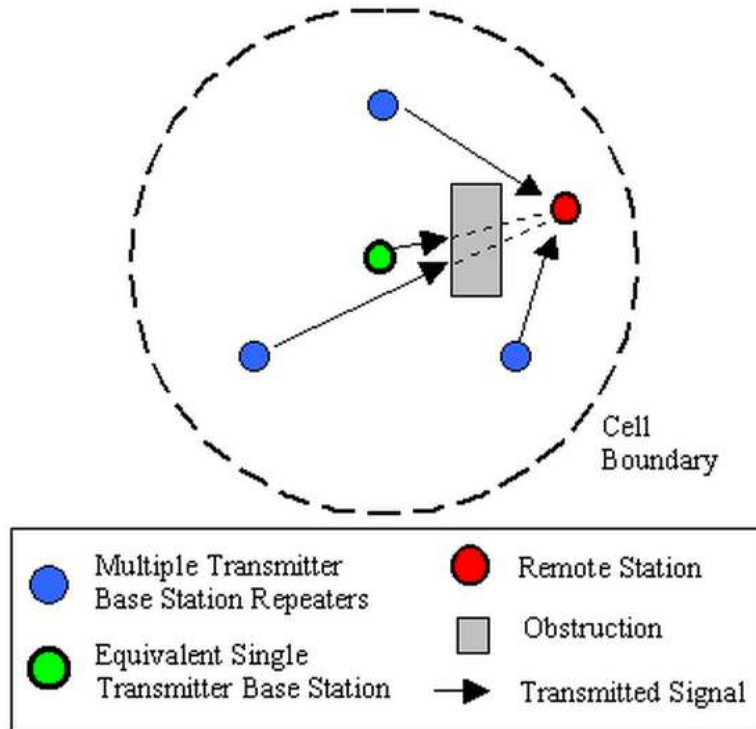
h_M = Ύψος κεραιάς κινητού τερματικού (m)

f= Συχνότητα μετάδοσης (MHz)

d= Απόσταση μεταξύ βάσης κινητών τερματικών (km).

2.3 Σκίαση

Με τον όρο σκίαση περιγράφεται το φαινόμενο που προκαλείται εξαιτίας της γενικότερης αταξίας του ασύρματου περιβάλλοντος. Φυσικά ή και τεχνητά εμπόδια μεγάλων κυρίως διαστάσεων προκαλούν διακυμάνσεις στην ισχύ του λαμβανόμενου σήματος που δεν εξαρτώνται από την απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη, όπως φαίνεται και στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 2. Συνθήκες σκίασης σε επίγεια ασύρματα συστήματα

Συνέπεια της σκίασης είναι οι τυχαίες, αργά εξελισσόμενες μεταβολές στις οποίες υπόκειται το σήμα, που ονομάζονται μακροσκοπικές διαλείψεις ή διαλείψεις σκίασης. Η τιμή των απωλειών διάδοσης $L(d)$ [1] σε μια συγκεκριμένη θέση είναι μια τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί λογαριθμοκανονική κατανομή με μέση τιμή των απωλειών που υπολογίζεται συναρτήσει της απόστασης, όπως φαίνεται κι από τον ακόλουθο τύπο:

$$L(d) = L_o + 10 \cdot n \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{d_o} \right) + X_\sigma \text{ (dB)} \quad (2.8)$$

X_σ είναι τυχαία μεταβλητή Gauss με μηδενική μέση τιμή, τυπική απόκλιση σ (dB) και συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot \exp \left(-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2} \right) \quad (2.9)$$

, όπου χ η μετρούμενη στάθμη ισχύος σε dBW, μ η μέση τιμή των απωλειών διάδοσης που εξαρτώνται από την απόσταση και σ η τυπική απόκλιση, η οποία εξαρτάται μόνο από το περιβάλλον διάδοσης. Συνηθισμένες τιμές για το σ είναι μεταξύ του εύρους 4-12 dB, με συνηθέστερη αυτή των 8 dB.

2.4 Πολύοδη διάδοση ή διάδοση πολλαπλών διαδρομών

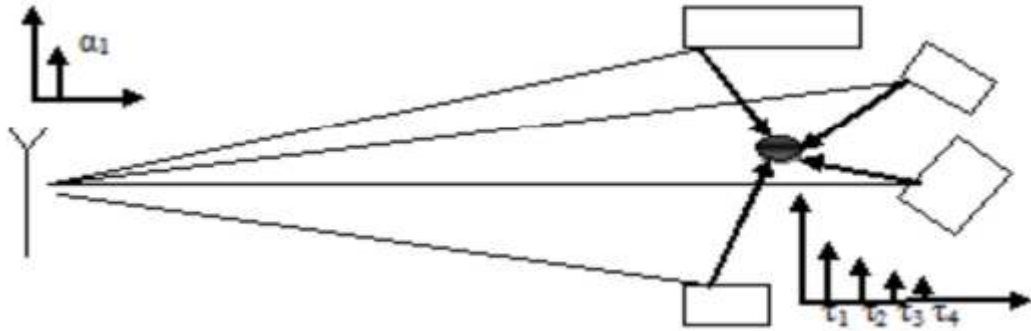
Σε ένα τυπικό περιβάλλον κινητών επικοινωνιών το σήμα κατά τη διάδοση του από τον πομπό στο δέκτη υπόκειται σε όλους σχεδόν τους μηχανισμούς διάδοσης ανάκλαση, περίθλαση και σκέδαση [1,14]. Αποτέλεσμα όλων αυτών των μηχανισμών διάδοσης είναι το σήμα να φτάνει στο δέκτη μέσω πολλαπλών διαδρομών. Οι συνιστώσες που λαμβάνει ο δέκτης από κάθε διαδρομή διαφέρουν μεταξύ τους στο χρόνο άφιξης, στη φάση αλλά και στο πλάτος. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται πολύοδη διάδοση ή διάδοση πολλαπλών διαδρομών. Έτσι, όταν συνδυάζονται διανυσματικά μεταξύ τους παράγεται ένα σύνθετο λαμβανόμενο σήμα. Η διανυσματική αυτή άθροιση οδηγεί των συνιστωσών του σήματος οδηγεί σε αρνητική ή θετική συμβολή, γεγονός που αποτυπώνεται τις αυξομειώσεις στο πλάτος του λαμβανόμενου σήματος.

Επιπλέον, εξαιτίας της κίνησης των αντικειμένων του περιβάλλοντος και του κινητού τερματικού οι καθυστερημένες εκδοχές του σήματος που λαμβάνει ο δέκτης μεταβάλλονται και σε συνάρτηση με το χρόνο. Το διαρκώς μεταβαλλόμενο περιβάλλον έχει σαν αποτέλεσμα έχει σαν αποτέλεσμα τα σήματα που φτάνουν από διαφορετικές διαδρομές στον δέκτη να συμβάλλουν είτε θετικά είτε αρνητικά, με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται συνεχώς η περιβάλλουσα του σήματος. Καθώς λοιπόν, ο δέκτης μετακινείται, οι χωρικές μεταβολές της περιβάλλουσας εμφανίζονται ως χρονικές μεταβολές και το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως διαλείψεις περιβάλλουσας ή μικροσκοπικές διαλείψεις. Οι διαλείψεις περιβάλλουσας λόγω πολύοδης διάδοσης μπορεί να είναι:

- Επιλεκτικές ως προς το χρόνο
- Επιλεκτικές ως προς το χώρο
- Επιλεκτικές ως προς την συχνότητα

2.4.1 Διαλείψεις επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα – Χρονική διασπορά

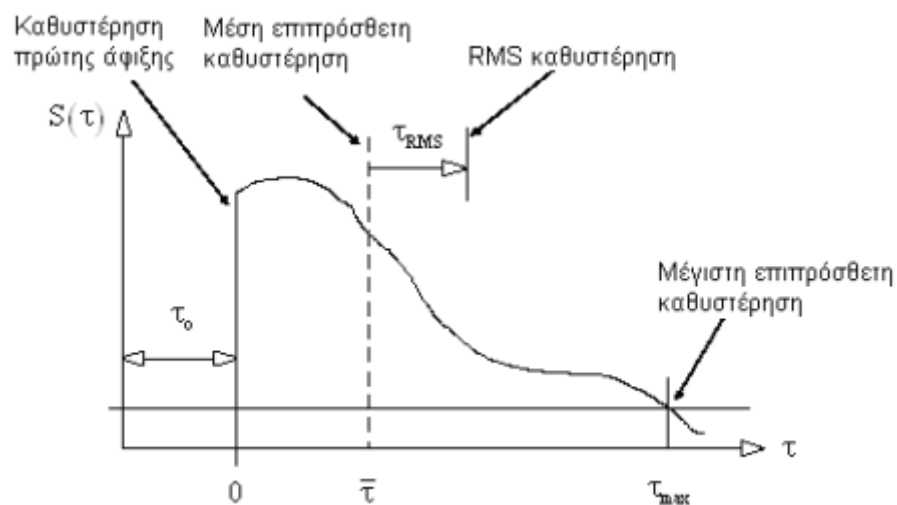
Σε ένα κανάλι πολύοδης διάδοσης, το σήμα το οποίο στέλνει ο πομπός φθάνει στο δέκτη μέσα από πολλαπλές διαδρομές εισάγοντας στο σήμα ή κάθε διαδρομή, μια διαφορετική καθυστέρηση. Οι συνιστώσες αυτές συμβάλλουν στο δέκτη και μπορεί να προκαλέσουν ισχυρές διαλείψεις, οι οποίες εμφανίζονται όταν έχουμε αρνητική συμβολή των συνιστωσών στο δέκτη. Όταν το εκπεμπόμενο σήμα είναι ένας κρουστικός παλμός το φαινόμενο της χρονικής διασποράς παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα [1,14]:



Σχήμα 3. Χρονική διασπορά

Παρατηρούμε, ότι εάν σταλεί ένας κρουστικός παλμός από το πομπό στο χρόνο $t=0$, τότε στο δέκτη θα φτάσουν ένας αριθμός κρουστικών παλμών ίσος με τον αριθμό των σκεδαστών. Σε πραγματικό περιβάλλον όπου έχουμε πολύ μεγάλο αριθμό σκεδαστών, οι λαμβανόμενοι παλμοί παίρνουν τη μορφή ενός συνεχούς παλμού διάρκειας τ_{RMS} , η οποία ονομάζεται διασπορά καθυστέρησης, για τον υπολογισμό της οποίας γίνεται χρήση του προφίλ καθυστέρησης ισχύος του καναλιού, όπως αυτό απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα 4 κι αναπαριστά την λαμβανόμενη ισχύ συναρτήσει της καθυστέρησης.

Η διασπορά καθυστέρησης τ_{RMS} δίνεται από τη σχέση:



Σχήμα 4. Προφίλ καθυστέρησης ισχύος

, όπου τ_{max} είναι η μέγιστη χρονική καθυστέρηση που αντιστοιχεί στο μεγαλύτερο μονοπάτι διάδοσης για το σήμα ενώ τα είναι η μέση επιπρόσθετη καθυστέρηση, η οποία ισούται:

$$\bar{\tau} = \frac{\int_0^{\tau_{max}} \tau \cdot S(\tau) d\tau}{\int_0^{\tau_{max}} S(\tau) d\tau} \quad (2.10)$$

Ο βαθμός αποσυσχέτισης των φασματικών συνιστωσών εξαρτάται από την εξάπλωση των χρονοκαθυστερήσεων, αφού οι διαφορές φάσης προκύπτουν από διαφορετικά μήκη διαδρομών. Όταν λοιπόν έχουμε διάδοση μέσω πολλών διαφορετικών διαδρομών υπάρχει μεγάλη εξάπλωση χρονοκαθυστερήσεων, με αποτέλεσμα οι φάσεις των λαμβανόμενων φασματικών συνιστωσών του ίδιου σήματος να μπορεί να διαφέρουν κατά πολύ, ακόμη κι να έχουν μικρή διαφορά στη συχνότητα.

Όταν το φάσμα του εκπεμπόμενου σήματος είναι μεγαλύτερο από το εύρος ζώνης στο οποίο οι φασματικές συνιστώσες επηρεάζονται με παρόμοιο τρόπο, θα έχουμε παραμόρφωση των συνιστωσών του σήματος. Το εύρος ζώνης μέσα στο οποίο οι φασματικές συνιστώσες επηρεάζονται με παρόμοιο τρόπο κι ο διάυλος θεωρείται επίπεδος ονομάζεται εύρος ζώνης συνοχής (coherence bandwidth) B_c . Όταν το εύρος ζώνης του σήματος είναι μικρότερο από το B_c , τότε όλες οι συνιστώσες που διέρχονται από τον διάυλο εμφανίζουν περίπου το ίδιο κέρδος και γραμμική φάση και λέμε ότι έχουν επίπεδες διαλείψεις, ειδάλως εάν συνιστώσες διαφέρουν και ως προς το πλάτος και ως προς τη φάση, και το κανάλι εμφανίζει διαλείψεις επιλεκτικές προς τη συχνότητα.

Εάν θέλουμε να έχουμε συντελεστή συσχέτισης τουλάχιστον το 0,5, το εύρος ζώνης συνοχής δίνεται από τη σχέση:

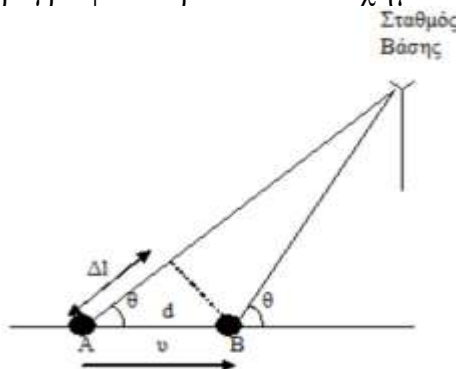
$$B_c \approx \frac{1}{5 \cdot \tau_{RMS}} \quad (2.11)$$

,ενώ για συντελεστή συσχέτισης τουλάχιστον 0,9 ισχύει:

$$B_c \approx \frac{1}{50 \cdot \tau_{RMS}} \quad (2.12)$$

2.4.2 Διαλείψεις επιλεκτικές ως προς το χρόνο – Διασπορά Doppler

Το φαινόμενο της μεταβολής φάσης του λαμβανόμενου σήματος, λόγω των διαλείψεων που προκαλούνται από τη κίνηση του κινητού τερματικού αλλά και των αντικειμένων του περιβάλλοντος διάδοσης, ονομάζεται ολίσθηση Doppler και περιγράφεται βάσει του σχήματος 5 [1,11].



Σχήμα 5. Ολίσθηση Doppler

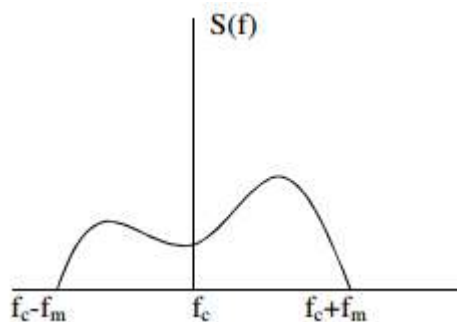
, όπου d η απόσταση μεταξύ των θέσεων A και B του κινητού τερματικού, v η σταθερή ταχύτητα του κινητού τερματικού, Δt ο χρόνος που χρειάζεται για να μετακινηθεί από το ένα σημείο στο άλλο και θ η γωνία ανάμεσα στην κατεύθυνση άφιξης του σήματος και την κατεύθυνση κίνησης του κινητού, η οποία δεν αλλάζει, καθώς ο σταθμός βάσης θεωρείται πολύ απομακρυσμένος. Οι διαδρομές από το σταθμό βάσης προς τα δυο σημεία διαφέρουν κατά $\Delta l = d \cos \theta = v \Delta t \cdot \cos \theta$. Η μεταβολή φάσης του λαμβανόμενου σήματος ισούται με:

$$\Delta \varphi = \frac{2\pi \cdot \Delta l}{\lambda} = \frac{2\pi \cdot v \cdot \Delta t}{\lambda} \cos \theta \quad (2.13)$$

, ενώ η ολίσθηση Doppler f_D είναι ίση:

$$f_D = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta \varphi}{\Delta t} = \frac{1}{2\pi} \frac{2\pi v}{\lambda} \cos \theta \Rightarrow f_D = \frac{v}{\lambda} \cos \theta \quad (2.14)$$

Γίνεται αντιληπτό, ότι η ολίσθηση Doppler εξαρτάται από τη ταχύτητα του κινητού και τη γωνία μεταξύ της κατεύθυνσης της κίνησης του δέκτη και της κατεύθυνσης άφιξης του σήματος. Εάν το μεταδιδόμενο σήμα είναι απλός τόνος με φέρουσα συχνότητας f_c , το φάσμα του λαμβανόμενου σήματος θα έχει τη μορφή:



Σχήμα 6. Διασπορά Doppler στο φάσμα του απλού τόνου

Η διασπορά Doppler μπορεί να υπολογιστεί ως η RMS τιμή του φάσματος του σήματος:

$$f_{RMS} = \sqrt{\frac{\int_{f_c - f_m}^{f_c + f_m} (f - \bar{f})^2 S(f) df}{\int_{f_c - f_m}^{f_c + f_m} S(f) df}} \quad (2.15)$$

Καθώς μεταβάλλεται η ταχύτητα του κινητού, η ολίσθηση Doppler αλλάζει. Η διασπορά του φάσματος προκαλεί μια χρονική αποσυσχέτιση του σήματος με χρονική περίοδο $1/f_D$, με αποτέλεσμα η επίδραση του διαύλου στο σήμα να μεταβάλλεται με το χρόνο κι επακόλουθα δυο σήματα ίδιας συχνότητας τα οποία φτάνουν στο δέκτη σε διαφορετικές χρονικές στιγμές

μπορούν να παρουσιάσουν μεγάλο βαθμό αποσυσχέτισης δημιουργώντας στο σήμα διαλείψεις επιλεκτικές ως προς το χρόνο.

Ο χρόνος συνοχής (coherence time – T_c) περιγράφει τη συμπεριφορά του διαύλου στο πεδίο του χρόνου και είναι αντιστρόφως ανάλογος με τη διασπορά Doppler και συνήθως δίνεται από τον τύπο:

$$T_c \approx \frac{1}{f_{RMS}} \quad (2.16)$$

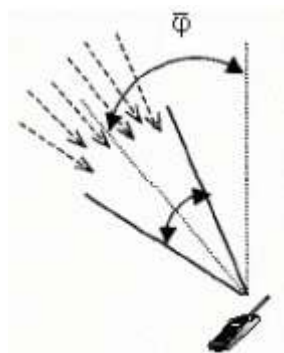
Ο χρόνος συνοχής συμβολίζει το χρόνο μέσα στον οποίο ο δίαυλος παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά με αποτέλεσμα οι φασματικές συνιστώσες του σήματος να μεταβάλλονται κατά παρόμοιο τρόπο. Στην περίπτωση που η περίοδος του εκπεμπόμενου σήματος είναι μεγαλύτερη από το χρόνο συνοχής, ο δίαυλος μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της μετάδοσης του σήματος και τότε λέμε ότι το σήμα υπόκειται σε ταχείες διαλείψεις, ενώ στην περίπτωση που η περίοδος συμβόλου είναι μικρότερη του T_c , το σήμα υπόκειται αργές διαλείψεις.

Αν ο χρόνος συνοχής ορίζεται ως το χρονικό διάστημα στο οποίο η συνάρτηση χρονικής συσχέτισης είναι τουλάχιστον 0,5, τότε:

$$T_c \approx \frac{9}{16\pi f_m} \quad (2.17)$$

2.4.3 Διαλείψεις επιλεκτικές ως προς το χώρο – Χωρική διασπορά

Εξαιτίας της πολύοδης διάδοσης, στο δέκτη φτάνουν πολλές εκδοχές του μεταδιδόμενου σήματος μέσω διαφορετικών διαδρομών και ως αποτέλεσμα οι γωνίες άφιξης (Angle Of Arrival – AOA) των σημάτων είναι διαφορετικές όπως φαίνεται από το επόμενο σχήμα [1]:



Σχήμα 7. Διασπορά γωνίας στο δέκτη

Οι διαφορετικές γωνίες άφιξης δημιουργούν διασπορά στο πεδίο του χώρου. Το φαινόμενο των επιλεκτικών ως προς το χώρο διαλείψεων στο δέκτη περιγράφεται μέσω της RMS τιμής της AOA, που δίνεται από τη σχέση:

$$\varphi_{RMS} = \sqrt{\frac{\int_{-\pi}^{\pi} (\varphi - \bar{\varphi})^2 S(\varphi) d\varphi}{\int_{-\pi}^{\pi} S(\varphi) d\varphi}} \quad (2.18)$$

Για τη περιγραφή της χωρικής διασποράς ορίζεται η απόσταση συνοχής (coherence distance – D_c), η οποία περιγράφεται ως ένα διάστημα συνοχής εντός του οποίου τα πλάτη των λαμβανόμενων συνιστωσών είναι επαρκώς συσχετισμένα και η συμβολή τους δεν προκαλεί διάλειαση, και δίνεται από το τύπο:

$$D_c \approx \frac{1}{\varphi_{RMS}} \quad (2.19)$$

Η διασπορά διάδοσης εξαρτάται από το περιβάλλον διάδοσης, καθώς και από παράγοντες της στοιχειοκεραίας, όπως το είδος της, το ύψος της, την απόσταση, καθώς και το μήκος των στοιχείων της.

Εκτός, από τη χωρική διασπορά στο δέκτη, παρουσιάζεται και διασπορά γωνίας στον πομπό (AOD spread) που περιγράφεται μέσω της RMS τιμής της AOD.

2.5 Παρεμβολές

Κατά τη διάδοση στο ασύρματο κανάλι επικοινωνίας, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το σήμα που εκπέμπεται από τον πομπό φτάνει τελικά στο δέκτη, έχοντας υποστεί κάποιες μορφές παρεμβολών:

- Θόρυβος
- Ομοδιαυλική παρεμβολή
- Διασυμβολική παρεμβολή
- Παρεμβολές γειτονικών διαύλων

2.5.1 Θόρυβος

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

$$S_{AWGN}(f) = N_0, \quad 0 \leq f < \infty \quad (2.20)$$

, όπου $N_0 = kT_e$, με τιμές μεταβλητών:

- $K = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K, η σταθερά Boltzman
- T_e : Η ισοδύναμη θερμοκρασία του δέκτη

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

- $T_e = (F-1)T_0$, όπου $T_0 = 290$ K.

Εάν λοιπόν το εύρος ζώνης του χρησιμοποιούμενου καναλιού είναι B , η ισχύς του θορύβου θα είναι τελικά ίση με:

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

2.5.2 Ομοδιαυλική παρεμβολή

Κυριότερη στενωπός για τη χωρητικότητα των ασύρματων επικοινωνιών, είναι η ομοδιαυλική παρεμβολή. Στην περιοχή κάλυψης ενός συστήματος κινητών επικοινωνιών, για να επιτευχθεί καλύτερη εκμετάλλευση του (περιορισμένου πάντα) φάσματος που διατίθεται, επαναχρησιμοποιούνται διάυλοι 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 τον 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 κι αυτό υφίσταται, διότι αύξηση της ισχύος σε μια κυψέλη συνεπάγεται αύξηση της παρεμβολής στις ομοδιαυλικές κυψέλες.

Έστω, ότι ο εξεταζόμενος δέκτης λαμβάνει σήμα από “κ” παρεμβάλλοντες ομοδιαυλικούς πομπούς ισχύος $I_k, k=1 \dots \kappa$, ενώ το επιθυμητό σήμα πρέπει να λάβει 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:

$$I = \sum_{k=1}^{\kappa} I_k \quad (2.21)$$

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

$$SNIR = \frac{S}{N+1} \quad (2.22)$$

2.5.3 Παρεμβολές γειτονικών διαύλων

Οι παρεμβολές από γειτονικούς διαύλους προέρχονται από τη μερική επικάλυψη της φασματικής πυκνότητας ισχύος του επιθυμητού από ανεπιθύμητα (συνήθως γειτνιαζόντα 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) [1,9].

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 διατηρούμε όσο μεγαλύτερη φασματική απόσταση γίνεται μεταξύ των διαύλων του σταθμού βάσης.

2.5.4 Διασυμβολική παρεμβολή

Η διασυμβολική παρεμβολή οφείλεται είτε σε σχετικά μεγάλη εξάπλωση της χρονοκαθυστέρησης 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 τη φαινόμενο της εξάπλωσης καθυστέρησης [1].

Να αναφερθεί επιγραμματικά, ότι η ποιότητα του σήματος επηρεάζεται από φαινόμενα όπως, η ενδοδιαμόρφωση, η οποία οφείλεται σε μη γραμμικές διαδικασίες, που 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.

2.6 Το κανάλι Rayleigh

Το μοντέλο περιγραφής του ασύρματου καναλιού που χρησιμοποιείται κυρίως στις σύγχρονες κινητές τηλεπικοινωνίες είναι το μοντέλο Rayleigh. Βασική προϋπόθεση προκειμένου να θεωρήσουμε το ασύρματο κανάλι Rayleigh είναι η πολύοδη διάδοση του εκπεμπόμενου σήματος να είναι ιδιαίτερα έντονη στις τοποθεσίες που εγκαθίστανται σήμερα συστήματα κινητών τηλεπικοινωνιών (βλέπε αστικά κέντρα), γεγονός που εξηγεί την ευρεία χρήση του μοντέλου αυτού [11].

Η παρουσία πολλών διαδρόμων διάδοσης για το σήμα είναι απαραίτητη λόγω της ανάγκης ισχύος του κεντρικού οριακού θεωρήματος, ώστε να μπορεί η λαμβανόμενη μιγαδική περιβάλλουσα να μοντελοποιείται ως μιγαδική τυχαία διαδικασία Gauss.

Πιο συγκεκριμένα, θεωρούμε ότι εκπέμπεται γύρω από την συχνότητα f_c το ζωνοπερατό σήμα $x(t)$, του οποίου το εύρος ζώνης είναι σημαντικά μικρό σε σχέση με την f_c , ώστε να μπορεί να θεωρηθεί στενής ζώνης. Σε αυτή τη περίπτωση το εκπεμπόμενο σήμα έχει τη μορφή:

$$x(t) = \text{Re}\{\bar{u}(t) \cdot \exp(2j\pi f_c t)\} \quad (2.23)$$

, όπου $u(t)$ η μιγαδική περιβάλλουσα του εκπεμπόμενου σήματος και f_c η φέρουσα συχνότητα. Αν υποθεθεί πως το σήμα διαδίδεται μέσω N διαδρομών, για να φτάσει στο δέκτη, τότε το λαμβανόμενο ζωνοπερατό σήμα θα είναι:

$$s(t) = \text{Re}\left\{\exp(2\pi f_c t) \sum_{i=1}^N A_i(t) \exp(-j\phi_i(t) \cdot \bar{u}(t - \tau_i(t)))\right\} \quad (2.24)$$

, όπου $A_i(t)$, $\tau_i(t)$, και $\phi_i(t)$ είναι το πλάτος, η καθυστέρηση και η φάση της συνιστώσας που μεταδίδεται μέσω της i -οστής διαδρομής. Η προηγούμενη σχέση γράφεται κι ως:

$$s(t) = \text{Re}\{\tilde{r}(t) \cdot \exp(j2\pi f_c t)\} \quad (2.25)$$

, όπου $r(t)$ η μιγαδική περιβάλλουσα του λαμβανόμενου σήματος.

Δεχόμενοι πως το εκπεμπόμενο σήμα είναι ζωνοπερατό στενής ζώνης, η μιγαδική περιβάλλουσα του λαμβανόμενου σήματος μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει της συμμασικής κι ορθογωνικής συνιστώσας του $s(t)$:

$$\tilde{r}(t) = s_c(t) + js_s(t) \quad (2.26)$$

, ενώ η περιβάλλουσα $r(t)$ του λαμβανόμενου σήματος δίνεται από το μέτρο της $r(t)$:

$$r(t) = \sqrt{s_c^2(t) + s_s^2(t)} \quad (2.27)$$

Σε ένα περιβάλλον κινητών επικοινωνιών, όπου δεν υπάρχει LOS συνιστώσα, οι συνιστώσες του εκπεμπόμενου σήματος, οι οποίες φθάνουν στο δέκτη είναι ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές. Όταν το πλήθος των πολλαπλών διαδρομών είναι μεγάλο, ώστε να ισχύει το κεντρικό οριακό θεώρημα, η συμμασική κι ορθογώνια συνιστώσα της μιγαδικής περιβάλλουσας μπορούν να θεωρηθούν συναρτήσεις Gauss. Η μιγαδική περιβάλλουσα μπορεί να μοντελοποιηθεί, ως μια μιγαδική στοχαστική ανέλιξη Gauss.

Το μέτρο της μιγαδικής περιβάλλουσας του λαμβανόμενου σήματος είναι η τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος δυο συναρτήσεων Gauss ίδιας διασποράς και μέσης τιμής. Επομένως ακολουθεί κατανομή Rayleigh και η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας δίνεται από τον τύπο:

$$p(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.28)$$

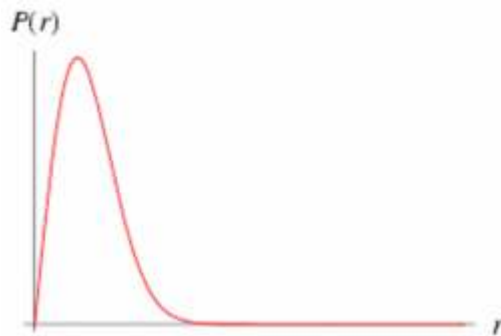
, όπου σ^2 η μέση τετραγωνική τιμή των $s_c(t), s_s(t)$ συνιστωσών. Άρα η μέση ισχύς του σήματος του οποίου η περιβάλλουσα $r(t)$ ακολουθεί την κατανομή Rayleigh θα είναι:

$$P = E[r^2(t)] = E[s_c^2(t) + s_s^2(t)] = 2\sigma^2 \quad (2.29)$$

, ενώ η προηγούμενη σχέση λαμβάνει τη μορφή:

$$p(r) = \frac{2r}{P} \exp\left(-\frac{r^2}{P}\right) \quad (2.30)$$

Η γραφική απεικόνιση της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας φαίνεται στο σχήμα 8:



Σχήμα 8. Κατανομή Rayleigh

Εκτός από τα παραπάνω, υπάρχουν ορισμένες περιπτώσεις στις οποίες δεν ισχύει η κατανομή Rayleigh της μιγαδικής περιβάλλουσας του σήματος. Οι περιπτώσεις αυτές είναι:

- Όταν ο αριθμός των διαδρομών δεν είναι επαρκώς μεγάλος, ώστε να ισχύει η προσέγγιση του κεντρικού οριακού θεωρήματος.
- Όταν υπάρχουν συνθήκες κυματοδήγησης. Κυματοδήγηση στις κινητές επικοινωνίες μπορεί να λάβει χώρα σε περίπτωση που το κύμα διαδίδεται κατά μήκος του δρόμου με πολλά κτίρια ή σε διαδρόμους.
- Όταν υπάρχει μεταδιδόμενη συνιστώσα οπτικής επαφής ή επικρατούσα διαδρομή διάδοσης. Σε αυτή τη περίπτωση, η αναζήτηση πυκνότητας πιθανότητας γίνεται Rice, της οποίας οριακή περίπτωση είναι η Rayleigh, με την επικρατέστερη συνιστώσα ίση με το μηδέν.

Κεφάλαιο 3^ο
Ορθογωνική διαίρεση συχνότητας (OFDM –
OFDMA)

3.1 Η ιστορία της OFDM τεχνικής

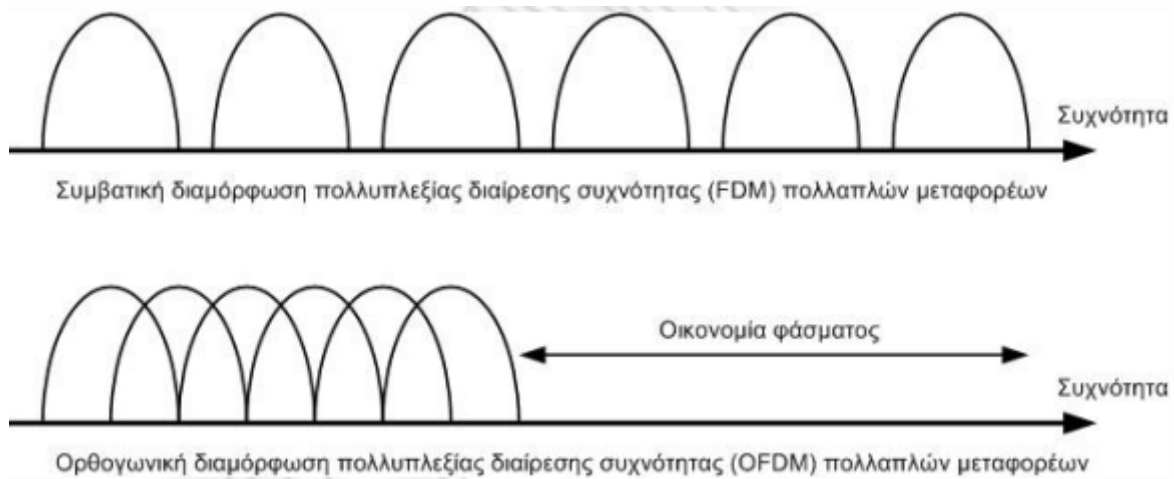
Για να επιτευχθούν υψηλές ταχύτητες μετάδοσης και παράλληλα να διασφαλισθεί η ακριβής μετάδοση δεδομένων δεν αρκεί, ένα σύστημα απλού φέροντος (όπου ολόκληρη η πληροφορία μεταφέρεται σε μια και μοναδική συχνότητα). Ως εκ τούτου, δημιουργήθηκε η ανάγκη να χρησιμοποιηθεί ένα σύστημα πολλαπλών φερόντων (όπου η πληροφορία διαμοιράζεται σε πολλές συχνότητες) που θα είναι σε θέση να αντιμετωπίσει τα εμπόδια, που το ασύρματο περιβάλλον θέτει, και ένα σύστημα απλού φέροντος δεν είναι σε θέση να αντιμετωπίσει.

Η έννοια της χρησιμοποίησης παράλληλης μετάδοσης πληροφορίας με τη βοήθεια πολυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας (Frequency Division Multiplexing – FDM) δημοσιεύθηκε στα μέσα της δεκαετίας του '60. Ενδιαφέρον για αυτή την φερέλιδα τεχνική και κάποια πρόωμη ανάπτυξη είχε ξεκινήσει στη δεκαετία του '50 [17,18]. Ένα αμερικάνικο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας συμπληρώθηκε κι εκδόθηκε τον Ιανουάριο του 1970 [19]. Η ιδέα ήταν να χρησιμοποιηθούν παράλληλα ρεύματα πληροφορίας και FDM, με επικάλυψη υποκαναλιών για να αποφευχθεί η χρήση εξισοροποιητή (equalizer) υψηλής ταχύτητας και για να καταπολεμηθεί ο ωστικός θόρυβος (impulse noise) και η πολλαπλών διοδεύσεων παραμόρφωση, καθώς επίσης και για χρησιμοποιήσει πλήρως το διαθέσιμο εύρος ζώνης (σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα FDM που δεν χρησιμοποιούν επικάλυψη υποκαναλιών). Η αρχή των παράλληλων ρευμάτων πληροφορίας, η οποία στηριζόταν στο γνωστό ρητό Divide et Impera (διαίρει και βασίλευε) και θα γίνει κατανοητό στις επόμενες παραγράφους.

Οι αρχικές εφαρμογές ήταν στις στρατιωτικές επικοινωνίες (KINEPLEX [20], ANDEFT [21], KATHRYN [22]). Στο τηλεπικοινωνιακό τομέα, ο όρος διακριτός πολύτονος (Discrete Multi-Tone), πολυδιαυλική διαμόρφωση (Multichannel Modulation) και διαμόρφωση πολλαπλών φερόντων (Multi Carrier Modulation) είναι ευρέως χρησιμοποιούμενα και μερικές φορές ομότιμης σημασίας με την OFDM τεχνική.

Στην OFDM τεχνική, κάθε φέρον είναι ορθογώνιο με όλα τα άλλα φέροντα. Εντούτοις, αυτή η προϋπόθεση δεν διατηρείται πάντα στο MCM. Η OFDM τεχνική είναι μια βέλτιση έκδοση των παραπάνω πολλαπλών φερόντων σχεδίων μετάδοσης.

Οι Weinstein και Ebert [23] εφάρμοσαν το διακριτό μετασχηματισμό Fourier (DFT), για να παραλληλίσουν το σύστημα μετάδοσης στοιχείων, ως τμήμα της διαδικασίας της διαμόρφωσης κι αποδιαμόρφωσης. Εκτός από την εξάλειψη των ταλαντωτών φερόντων και των συνελεκτικών αποδιαμορφωτών που απαιτούνταν από ένα σύστημα FDM, μια απολύτως ψηφιακή εφαρμογή θα μπορούσε να κατασκευαστεί γύρω από ένα εξειδικευμένο λογισμικό εκτελώντας τον γρήγορο μετασχηματισμό Fourier (FFT). Οι πρόσφατες πρόοδοι στην τεχνολογία VLSI επιτρέπουν την κατασκευή μεγάλων ταχυτήτων διόδων, που μπορούν να εκτελούν μεγάλο μέγεθος FFT, σε μικρό κόστος.



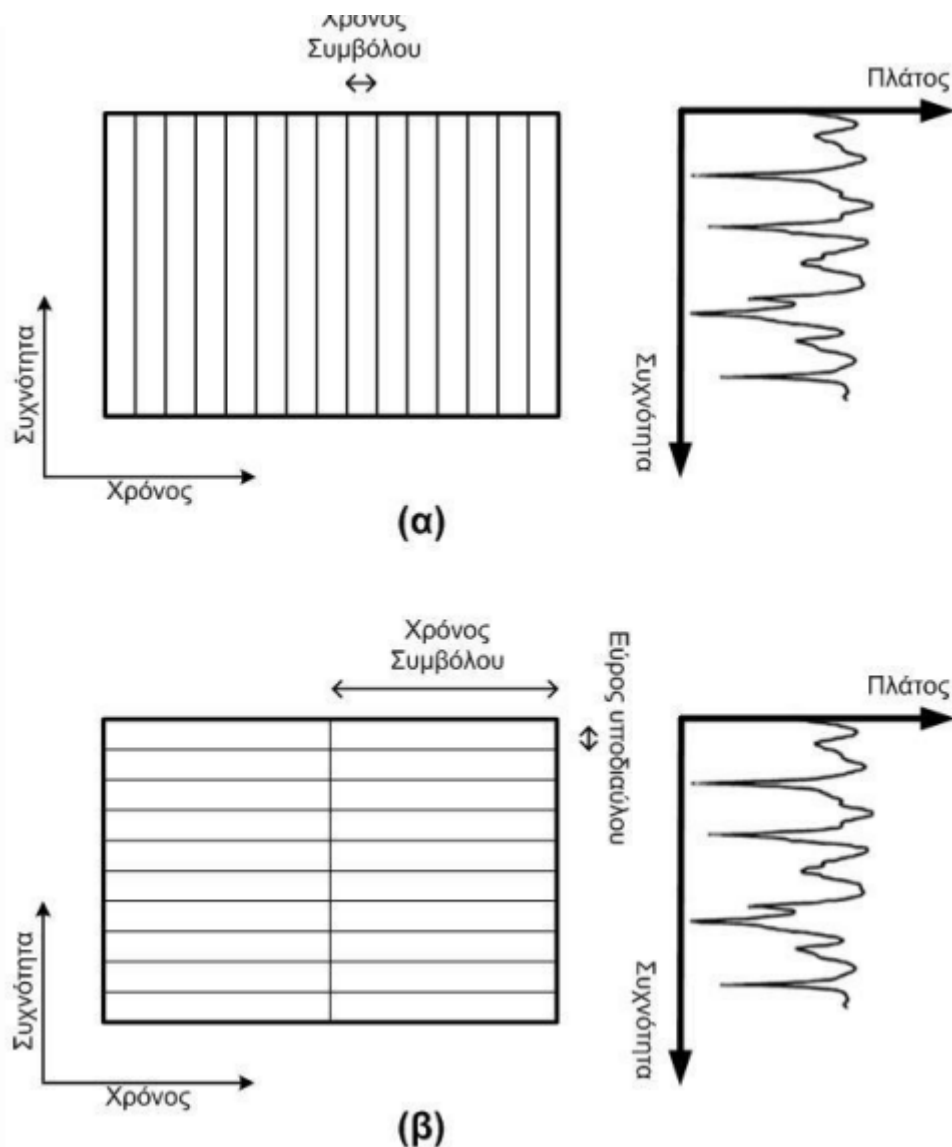
Σχήμα 9. Σύγκριση χρησιμοποίησης διαθέσιμου εύρους ζώνης για FDM και OFDM

Στη δεκαετία του '80, η OFDM τεχνική μελετήθηκε για μεγάλης ταχύτητας modems, στις ψηφιακές κινητές τηλεπικοινωνίες και την υψηλής ποιότητας ψηφιακή εγγραφή [24]. Ένα από τα συστήματα χρησιμοποίησε πειραματικό (πilotικό) τόνο για την σταθεροποίηση του φέροντος και τον έλεγχο συχνότητας ρολογιού [25]. Παράλληλα, διάφορα γρήγορα modems αναπτύχθηκαν για τα τηλεφωνικά δίκτυα [26].

Στη δεκαετία του '90, η OFDM τεχνική χρησιμοποιήθηκε για ευρείας ζώνης μετάδοση πληροφορίας σε ραδιοκανάλια FM, στις ψηφιακές συνδρομητικές γραμμές υψηλού ρυθμού (HDSL, 1.6 Mbps), στις ασύρματες ψηφιακές συνδρομητικές γραμμές (ADSL, έως 6 Mbps), σε πολύ μεγάλο ρυθμού ψηφιακές συνδρομητικές γραμμές (VHDSL, 100 Mbps), στον ραδιοφωνικό ψηφιακό ήχο (DAB) και στην επίγεια αναμετάδοση HDTV.

3.2 Ποιοτική ανάλυση της OFDM τεχνικής

Στο σχήμα 10 φαίνεται η επίδραση της υιοθέτησης ενός συστήματος Πολλαπλού φέροντος (multicarrier). Για ένα δεδομένο ρυθμό πληροφορίας (data rate), αυξάνοντας τον αριθμό των φερόντων μειώνεται ο ρυθμός πληροφορίας που κάθε μεμονωμένο φέρον πρέπει να μεταβιβάσει, κι ως εκ τούτου (για ένα δεδομένο σύστημα διαμόρφωσης) επιμηκύνει την περίοδο συμβόλων. Αυτό σημαίνει, ότι η ενδοσυμβολική παρεμβολή (ISI) επηρεάζει σε μικρότερο ποσοστό κάθε σύμβολο, καθώς ο αριθμός φερόντων και άρα ο ρυθμός συμβόλων μεγαλώνει. Για ένα σύστημα απλού φέροντος (single carrier), οι χρονικές αποκρίσεις των συμβόλων επικαλύπτονται και συνεπώς προκαλούν ενδοσυμβολική παρεμβολή (ISI) και αυτό φαίνεται και από την frequency-selective απόκριση ραδιοδιαύλου. Το multicarrier σύστημα είναι ισχυρό ενάντια σε αυτή τη φυσική επίδραση και οι επιπτώσεις της ενδοσυμβολικής περιορίζονται.



Σχήμα 10. Βελτίωση απόδοσης λόγω υιοθέτησης multicarrier συστήματος. (α) single-carrier σύστημα σε διάυλο με frequency-selective απόκριση συχνότητας, (β) multi-carrier σύστημα σε διάυλο με frequency-selective απόκριση συχνότητας

Σε ένα συμβατικό σειριακό σύστημα, τα σύμβολα διαβιβάζονται διαδοχικά, με το φάσμα συχνότητας κάθε συμβόλου πληροφορίας να επιτρέπει να καταλαμβάνει ολόκληρο το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Σε ένα παράλληλο σύστημα μετάδοσης στοιχείων τα διάφορα σύμβολα διαβιβάζονται συγχρόνως, το οποίο προσφέρει τη δυνατότητα να αντιμετωπίζονται πολλά από τα προβλήματα, που εμφανίζονται στα σειριακά συστήματα.

Με την OFDM τεχνική, η πληροφορία διαιρείται μεταξύ μεγάλου αριθμού κοντινών κατά διαστήματα χωρισμένων φερόντων. Αυτό αποτελεί τη “πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (Frequency Division Multiplexing – FDM)” μέρος του ονόματος της OFDM τεχνικής. Αυτό δεν σημαίνει ότι αποτελεί μια τεχνική πολλαπλής πρόσβασης (multiple access technique), δεδομένου ότι δεν υπάρχει κανένα κοινό μέσο που μοιράζεται. Μια ενιαία πηγή στοιχείων γεμίζει ολόκληρο το εύρος ζώνης. Αντί, να έχουμε

διαβίβαση με σειριακό τρόπο, η πληροφορία μεταφέρεται παράλληλα. Μόνο ένα μικρό ποσοστό της πληροφορίας μεταφέρεται από κάθε φέρον και με αυτή τη μείωση του ρυθμού δυαδικών ψηφίων ανά φέρον (όχι το συνολικό ρυθμό δυαδικών ψηφίων), η επιρροή της ενδοσυμβολικής παρεμβολής μειώνεται σημαντικά. Σε γενικές γραμμές, πολλά σχέδια διαμόρφωσης θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για να διαμορφώσουν την πληροφορία σε χαμηλό ρυθμό δυαδικών ψηφίων επάνω σε κάθε φέρον.

Λόγω της διαίρεσης ολόκληρου του εύρους ζώνης καναλιών σε πολλές στενές υποζώνες, η απόκριση συχνότητας πέρα από κάθε μεμονωμένη υποζώνη είναι σχετικά επίπεδη, δηλαδή το εύρος ζώνης του διαύλου είναι μικρότερο από το εύρος ζώνης συνοχής B_c (correlation bandwidth). Δεδομένου, ότι κάθε υποκανάλι καλύπτει μόνο ένα μικρό μέρος του αρχικού εύρους ζώνης, ο εξισορροπητής (equalizer) [23] είναι ενδεχομένως απλούστερος απ'ότι σε ένα σειριακό σύστημα στοιχείων απλού φέροντος (single carrier) ή αν σχεδιαστεί κατάλληλα το σύστημα δεν υπάρχει ανάγκη για equalizers. Ένας απλός αλγόριθμος εξισορρόπησης μπορεί να ελαχιστοποιήσει τη μέση τετραγωνική παραμόρφωση σε κάθε υποδιάυλο, καθώς επίσης η εφαρμογή διαφορικής κωδικοποίησης μπορεί να καταστήσει πιθανό να αποφευχθεί εντελώς η χρήση equalizer. Αυτό επιτρέπει την ακριβή αναδημιουργία της πλειοψηφίας των συμβόλων, ακόμη και χωρίς διόρθωση λάθους (Forward Error Correction).

Επιπλέον, με τη χρησιμοποίηση ενός διαστήματος προστασίας (guard time interval), η ευαισθησία του συστήματος στην καθυστέρηση μπορεί να μειωθεί, όπως θα εξηγηθεί και παρακάτω. Σε ένα κλασσικό παράλληλο σύστημα, η συνολική ζώνη συχνότητας σημάτων διαιρείται σε N μη αλληλεπικαλυπτόμενα υποκανάλια. Κάθε υποκανάλι είναι διαμορφωμένο με ένα ξεχωριστό σύμβολο και κατόπιν, τα N υποκανάλια πολυπλέκονται στη συχνότητα. Υπάρχουν 2 τρόποι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να χωρίσουν τις υποζώνες:

1) Χρήση φίλτρων για να χωριστούν εντελώς οι υποζώνες. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται από τη συμβατική τεχνολογία FDM. Ο περιορισμός της εφαρμογής φίλτρων αναγκάζει το εύρος ζώνης, κάθε υποζώνης για να είναι ίσο με $(1+\alpha) \cdot f_m$, όπου α είναι ο παράγοντας roll-off και f_m είναι το εύρος ζώνης Nyquist. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι η δυσκολία κατασκευής ενός αντιστοιχημένου φίλτρου (matched filter), όταν ο αριθμός των φερόντων είναι μεγάλος.

2) Χρήση διακριτού μετασχηματισμού κατά Fourier (DFT), για να διαμορφωθούν και να αποδιαμορφωθούν τα παράλληλα στοιχεία, κάτι που συνεπάγεται εκμετάλλευση της ορθογωνιότητας. Τα μεμονομένα φάσματα είναι τώρα συναρτήσεις sinc. Η τεχνική FDM επιτευχγάνεται, όχι με το ζωνοπερατό φιλτράρισμα, αλλά με την baseband επεξεργασία. Χρησιμοποιώντας αυτή τη μέθοδο, και ο πομπός και ο δέκτης μπορούν να κάνουν χρήση αποδοτικών τεχνικών FFT, που μειώνουν τον αριθμό διαδικασιών από το N^2 στον DFT, κάτω σε $N \log N$.

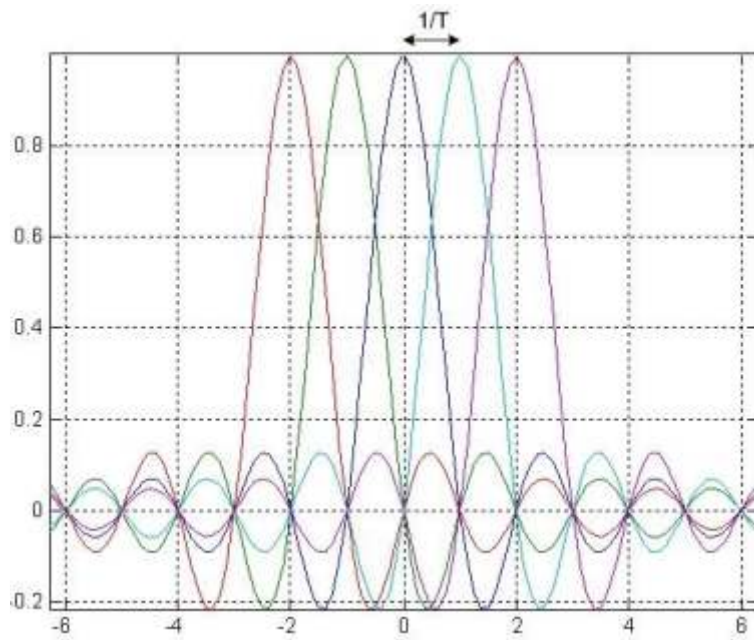
Η τεχνική OFDM μπορεί να οριστεί απλά, ως μια μορφή διαμόρφωσης πολλαπλών φερόντων (multicarrier modulation), όπου το διάστημα μεταξύ των φερόντων επιλέγεται προσεκτικά, ώστε κάθε φέρον να είναι ορθογώνιο στα άλλα φέροντα. Αυτό αποτελεί το “ορθογώνιο” μέρος του ονόματος της OFDM τεχνικής. Όπως είναι ευρέως γνωστό, τα ορθογώνια σήματα μπορούν να χωριστούν στο δέκτη από τις τεχνικές συσχετισμού και ως εκ τούτου η ενδοσυμβολική παρεμβολή μεταξύ των καναλιών να καταπολεμηθεί. Ορθογωνιότητα μπορεί να επιτευχθεί με προσεκτική επιλογή των διαστημάτων μεταξύ των φερόντων, όπως να αφήσουμε τα διαστήματα που χωρίζουν τα φέροντα να είναι ίσα με το αντίστροφο της χρήσιμης περιόδου συμβόλων, χωρίς δηλαδή το χρονικό διάστημα προστασίας (guard interval).

Ενώ, ένα σύστημα που χρησιμοποιεί OFDM λύνει το πρόβλημα της ενδοσυμβολικής παρεμβολής, με τη χρήση κυκλικού προθέματος-όπως αναφέρθηκε προηγούμενος και θα εξηγηθεί εκτενέστερα πιο μετά-και με προσεκτική επιλογή των παραμέτρων του συστήματος, έχει να αντιμετωπίσει και το πρόβλημα της ενδοπαρεμβολής φερόντων (Intercarrier Interference – ICI), δηλαδή η παρεμβολή μεταξύ όμορων φερόντων, που προκαλείται από την απώλεια της ορθογωνιότητας των φερόντων, λόγω αστάθειας στη συχνότητα φέροντος, timing offset (μετατόπιση συχνότητας) ή λόγω θορύβου φάσης και γενικότερα λόγω έλλειψης ακριβούς συγχρονισμού πομπού-δέκτη. Η ISI και η ICI είναι δυαδικά ανάλογα (duals). Η ISI εμφανίζεται στο πεδίο του χρόνου και η ICI στο πεδίο της συχνότητας. Η ενδοπαρεμβολή φερόντων είναι το μεγαλύτερο πρόβλημα ενός συστήματος πολλαπλών φερόντων και πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη, κατά τη σχεδίαση ενός OFDM συστήματος.

3.3 Η σημασία της ορθογωνιότητας

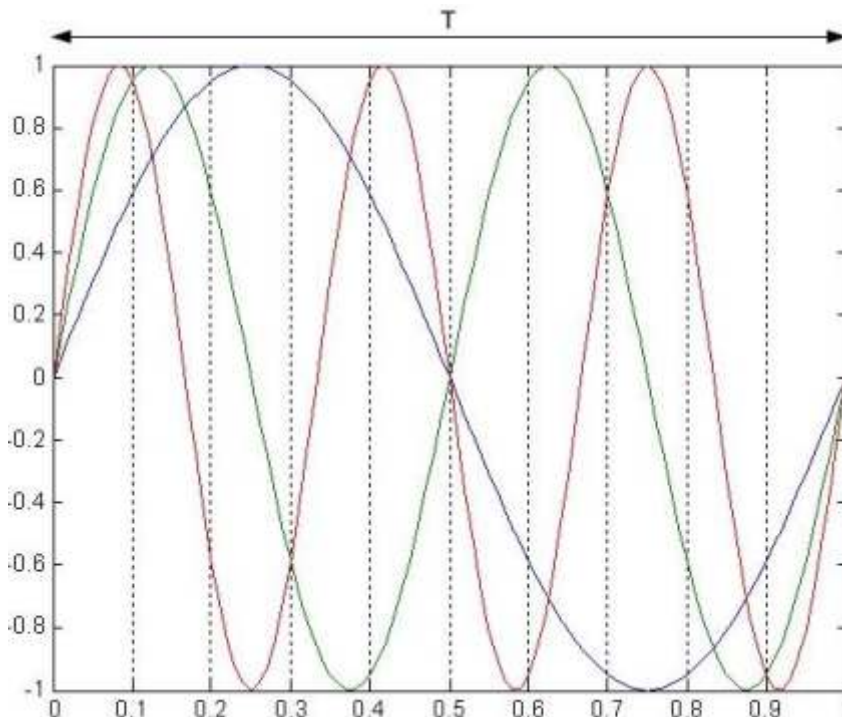
Το “ορθογώνιο” μέρος του ονόματος OFDM δείχνει ότι υπάρχει μια ακριβής μαθηματική σχέση μεταξύ των συχνοτήτων των φερόντων στο σύστημα. Σε ένα κανονικό σύστημα FDM, τα φέροντα χωρίζονται κατά διαστήματα, μακριά το ένα από το άλλο, όπως φαίνεται στο σχήμα 11, με τέτοιο τρόπο, ώστε τα σήματα μπορούν να παραληφθούν χρησιμοποιώντας συμβατικά φίλτρα και αποδιαμορφωτές. Σε τέτοιους δέκτες, οι ζώνες προστασίας πρέπει να εισαχθούν μεταξύ των διαφορετικών φερόντων, και η εισαγωγή αυτών των guard bands (ζώνες προστασίας) φέρνει ως αποτέλεσμα στη περιοχή συχνότητας μείωση της αποδοτικότητας της χρήσης του φάσματος.

Εντούτοις, είναι δυνατό να τακτοποιηθούν τα φέροντα σε ένα σήμα OFDM, έτσι ώστε οι πλευρικές ζώνες συχνοτήτων των μεμονομένων φερόντων να επικαλύπτονται και τα σήματα να μπορούν ακόμα, να παραληφθούν χωρίς παρακείμενη ενδοπαρεμβολή φερόντων (intercarrier interference). Προκειμένου να γίνει αυτό, τα φέροντα πρέπει να είναι από μαθηματική άποψη ορθογώνια (σχήμα 11).



Σχήμα 11. OFDM φάσμα μετάδοσης

Ο δέκτης ενεργεί ως συστοιχία αποδιαμορφωτών, που μεταφράζουν κάθε φέρον. Έπειτα, το προκύπτον σήμα ενσωματώνεται κατά τη διάρκεια μιας περιόδου συμβόλων, για να ανακτηθεί η ακατέργαστη πληροφορία (raw data). Εάν, τα άλλα φέροντα “κτυπούν” σε συχνότητες, που στη χρονική περιοχή (time domain), έχουν ακέραιο αριθμό κύκλων στην περίοδο συμβόλου (T), τα αποτελέσματα της διαδικασίας ολοκλήρωσης οδηγούν σε μηδενικό αποτέλεσμα για όλα τα φέροντα. Κατά συνέπεια, τα φέροντα είναι γραμμικά ανεξάρτητα (ορθογώνια δηλαδή), εάν το διάστημα φερόντων είναι πολλαπλάσιο του $1/T$ ($\Delta f = k/\tau$, όπου k φυσικός αριθμός).



Σχήμα 12. Η κυματομορφή των φερόντων σε μια OFDM μετάδοση

Από μαθηματική άποψη, υποθέτουμε ότι έχουμε ένα σύνολο σημάτων ψ , όπου ψ_p είναι το p -στοιχείο του συνόλου. Τα σήματα είναι ορθογώνια, εάν:

$$\int_a^b \Psi_p(t) \bar{\Psi}_q(t) dt = 0, p \neq q \quad (3.1)$$

, όπου το σύμβολο “ $\bar{}$ ” δείχνει το μιγαδικό συζυγή και το διάστημα $[a,b]$ είναι μια περίοδος συμβόλων. Η περίπτωση που μας ενδιαφέρει στη προκειμένη περίπτωση είναι:

$$\int_0^{T_s} e^{j2\pi f_p t} \cdot e^{-j2\pi f_q t} dt = 0, p \neq q \quad (3.2)$$

,όπου $f_k = k/T_s$.

3.4 Επιλογή βασικών παραμέτρων συστήματος OFDM

Βασικές παράμετροι ενός OFDM συστήματος αποτελούν:

- Η χρήσιμη διάρκεια συμβόλου
- Ο αριθμός των φερόντων
- Το σχήμα διαμόρφωσης (modulation scheme)

3.4.1 Χρήσιμη διάρκεια συμβόλου

Η χρήσιμη διάρκεια Τα συμβόλου επηρεάζει τα διαστήματα που χωρίζουν τα φέροντα και την καθυστέρηση κωδικοποίησης. Για να διατηρηθεί η ρυθμαπόδοση της πληροφορίας (data throughput), μια μεγαλύτερη χρήσιμη διάρκεια συμβόλων οδηγεί στην αύξηση του αριθμού φερόντων και του μεγέθους του FFT (θεωρούμε ότι το σχήμα διαμόρφωσης είναι σταθερό). Στην πράξη, η μετατόπιση (offset) των φερόντων και η σταθερότητα φάσης μπορούν να έχουν επιπτώσεις στο πόσο κοντά δύο φέροντα μπορούν να βρεθούν. Εάν μας ενδιαφέρει κινητός δέκτης, το διάστημα μεταξύ των φερόντων πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο, έτσι ώστε να γίνει η επίδραση της μετατόπισης Doppler αμελητέα. Γενικά, η χρήσιμη διάρκεια συμβόλων πρέπει να επιλεγθεί, έτσι ώστε το κανάλι να είναι σταθερό (flat fading), κατά τη διάρκεια ενός συμβόλου.

3.4.2 Αριθμός φερόντων

Ο αριθμός των φερόντων μπορεί να βασιστεί στο εύρος ζώνης του καναλιού, στην ρυθμοαπόδοση της πληροφορίας (data throughput) και στη χρήσιμη διάρκεια συμβόλου (χωρίς να συνυπολογίζεται ο ρυθμός κωδικοποίησης και το σχήμα διαμόρφωσης).

Όπου T ο χρόνος συμβόλου (ο οποίος περιλαμβάνει το χρήσιμο χρόνο T_m και το κυκλικό πρόθεμα T_{gi}) και T_s , ο χρόνος δειγματοληψίας που είναι ίσος με B^{-1} (το αντίστροφο του εύρους ζώνης).

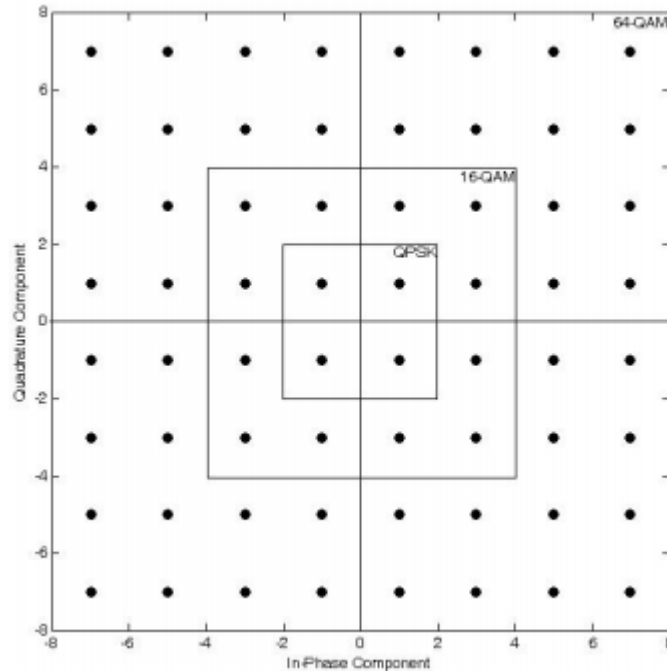
Τα φέροντα χωρίζονται κατά διαστήματα, τα οποία είναι ίσα με το αντίστροφο της χρήσιμης περιόδου συμβόλου. Ο αριθμός των φερόντων αντιστοιχεί στον αριθμό μιγαδικών σημείων που επεξεργάζονται από τον FFT. Για παράδειγμα, σε εφαρμογές τηλεόρασης υψηλής ευκρίνειας (HDTV), ο αριθμός των φερόντων είναι της τάξης αρκετών χιλιάδων, έτσι ώστε να εξυπηρετηθεί ο ρυθμός πληροφορίας (data rate) και οι απαιτήσεις σε διάστημα προστασίας (guard interval). Επίσης, εκμεταλλευόμαστε το γεγονός, ότι ο δέκτης είναι σταθερός και δεν έχουμε φαινόμενα Doppler spread, εν αντιθέσει με τις εφαρμογές πολυμέσων, που καλούνται να εξυπηρετηθούν από κινητούς δέκτες. Στους τελευταίους, ο αριθμός των φερόντων είναι μικρότερος και πιο συγκεκριμένα της τάξης των δεκάδων ή εκατοντάδων.

3.4.3 Σχήμα διαμόρφωσης (modulation scheme)

Το σχήμα διαμόρφωσης σε ένα σύστημα OFDM μπορεί να επιλεγθεί βάσει των απαιτήσεων ισχύος ή της αποδοτικότητας του φάσματος. Ο τύπος διαμόρφωσης μπορεί να διευκρινιστεί από το μιγαδικό αριθμό $d_n = a_n + jb_n$. Τα σύμβολα a_n και b_n μπορούν να πάρουν συγκεκριμένες τιμές για διάφορα σχήματα διαμόρφωσης (πχ $\pm 1, \pm 3$) για 16QAM και ± 1 για QPSK. Γενικά, η επιλογή του σχεδίου διαμόρφωσης, που ισχύει για κάθε subchannel εξαρτάται απλώς από το συμβιβασμό μεταξύ της απαίτησης ποσοστού στοιχείων και της ευρωστίας μετάδοσης, δηλαδή τι BER μπορούμε να ανεχτούμε.

Μετά την ανάθεση bits σε κάθε φέρον στον πομπό, αυτά αντιστοιχίζονται με βάση το εκάστοτε σχήμα διαμόρφωσης σε συγκεκριμένο πλάτος και φάση του subcarrier, που απεικονίζονται από από το παραπάνω 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 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 μπορεί να εφαρμοστεί μεγάλος αριθμός σχημάτων διαμόρφωσης, στα οποία συγκαταλέγονται η BPSK, QPSK, 8QAM, 16QAM και 64QAM, των οποίων τους αστερισμούς παραθέτουμε στο σχήμα 13 [2,11].



Σχήμα 13. Αστερισμοί κυριότερων διαμορφώσεων (QPSK, 16QAM, 64QAM)

Από το προηγούμενο σχήμα προκύπτει, ότι η διαμόρφωση δεν είναι παρά η αντιστοίχιση μιας λέξης δεδομένων σε ένα πραγματικό (In-Phase) κι ένα φανταστικό διάνυσμα (Quadrature) στον αστερισμό της εκάστοτε διαμόρφωσης. Ο αριθμός των bits που μπορούν να μεταδοθούν από ένα σύμβολο προκύπτει από τη σχέση $b = \log_2 M$, όπου M ο αριθμός των σημείων στον αστερισμό.

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 64QAM έχει φασματική απόδοση 6 bps/Hz, ενώ η BPSK έχει μόλις 1 bps/Hz. Παρόλα αυτά, ο μεγαλύτερος αριθμός σημείων στον αστερισμό δυσχεραίνει τη διαδικασία ανάκτησης τους στο δέκτη, καθώς συνεπάγεται, ότι οι θέσεις των IQ διανυσμάτων βρίσκονται πιο κοντά μεταξύ τους, οπότε και η παραμικρή υποψία θορύβου προκαλεί σφάλματα κατά τη μετάδοση. Υπάρχει λοιπόν, η ανάγκη για συμβιβασμό μεταξύ της ανοχής στο θόρυβο και της αξιοποίησης του φάσματος από το σχήμα διαμόρφωσης, όπως προκύπτει και από τη θεωρία του Shannon, κατά την οποία η φασματική απόδοση S_E αποτελεί μέτρο των μεταφερόμενων ανά δευτερόλεπτο bits για κάθε Hz του εύρους ζώνης, το οποίο δίνεται από τη σχέση:

$$S_E = \frac{C}{W} = \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (3.3)$$

, όπου:

- C: Η μέγιστη χωρητικότητα του διαύλου
- W: Το εύρος ζώνης του καναλιού
- N: Η ισχύς του θορύβου
- S: Η ισχύς του επιθυμητού σήματος

3.5 Γενικά συμπεράσματα της OFDM τεχνικής

Η τεχνική OFDM έχει μελετηθεί από καιρό κι έχει εφαρμοστεί για να καταπολεμήσει τα εμπόδια που θέτουν τα κανάλια μετάδοσης. Οι εφαρμογές της έχουν επεκταθεί από τις ραδιοεπικοινωνίες υψηλής συχνότητας, στα τηλεφωνικά δίκτυα, την ψηφιακή ραδιοφωνική αναμετάδοση ήχου και την επίγεια αναμετάδοση της ψηφιακής τηλεόρασης. Τα πλεονεκτήματα της OFDM τεχνικής, ειδικά στην πολλαπλών διοδεύσεων διάδοση, στην παρεμβολή και σε περιβάλλον διαλείψεων, κάνουν την τεχνολογία αυτήν, μια ελπιδοφόρο εναλλακτική λύση στις ψηφιακές επικοινωνίες των κινητών πολυμέσων.

Η έρευνα πάνω στις επικοινωνίες και η τρέχουσα ανάπτυξη της τεχνικής OFDM σε όλο τον κόσμο θα παράσχουν, τα πολύτιμα συμπεράσματα στην θεωρία, αλλά και στην εφαρμογή της. Περαιτέρω μελέτες πρέπει να πραγματοποιηθούν στο συγχρονισμό του OFDM, στις απαιτήσεις ισχύος και στη μη γραμμικότητα των ενισχυτών.

Η πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας με ορθογώνια φέροντα (OFDMA) είναι, με βάση τον Pietrzyk (ιδρυτή των Innonative Solution, μια επιχείρηση διαβούλευσης και ανάπτυξης που ειδικεύεται στο σχέδιο και την εφαρμογή συστημάτων ασύρματης πρόσβασης) [16], μια από τις πιο ελπιδοφόρες τεχνολογίες πολλαπλής πρόσβασης, που ικανοποιούν τις μελλοντικές ευρυζωνικές απαιτήσεις συστημάτων ασύρματης πρόσβασης, για την υποστήριξη των υψηλών ρυθμών μετάδοσης, λειτουργία σε ένα εχθρικό περιβάλλον πολλαπλών ραδιοδιαύλων, παροχή διαφόρων μοντέλων QoS κι ελάχιστη κατανάλωση εύρους ζώνης και μετάδοσης ισχύος. Στόχος της εργασίας του είναι να παρουσιάσει και να αναλύσει τους διοικητικούς αλγόριθμους ασύρματων πόρων για το downlink των OFDMA συστημάτων πολλαπλής πρόσβασης, που περιλαμβάνουν αλγόριθμους για ανάθεση σταθμών βάσης, απόδοσης υπομεταφορέων, φόρτωση δεδομένων και τον έλεγχο μετάδοσης ισχύος. Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται σε τρεις περιπτώσεις συστημάτων OFDMA:

- Χωρίς την επαναχρησιμοποίηση φάσματος (υπομεταφορείς)
- Με την επαναχρησιμοποίηση φάσματος στην ίδια κυψέλη, με την εφαρμογή μιας αποκαλούμενης ενσωματωμένης διαμόρφωσης
- Με κυψελοειδή επαναχρησιμοποίηση φάσματος

3.5.1 Πλεονεκτήματα της OFDM τεχνικής

- Η αποδοτική χρήση του διαθέσιμου εύρους ζώνης, από τη στιγμή που τα subchannels αλληλεπικαλύπτονται, χωρίς να προκαλείται κανενός είδους παρεμβολή υπό φυσιολογικές συνθήκες.
- Διαδίδει την διάλειαση σε πολλά σύμβολα, τυχαioποιούνται δηλαδή τα λάθη ρίπης (burst errors) αποτελεσματικά, που προκαλούνται από τη διάλειαση Rayleigh, έτσι ώστε αντί να καταστρέφονται εντελώς παρακείμενα σύμβολα, στην περιοχή του χρόνου για συστήματα απλού φέροντος, πολλά παράλληλα σύμβολα ελαφρώς και μόνο να παραμορφώνονται.
- Η περίοδος συμβόλων αυξάνεται κι έτσι, η ευαισθησία του συστήματος στην καθυστέρηση διάδοσης μειώνεται.

3.5.2 Μειονεκτήματα της OFDM τεχνικής

- Το σήμα OFDM επηρεάζεται από τη μη γραμμική διαστρέβλωση/παραμόρφωση του ενισχυτή ισχύος, επειδή είναι μια συνδυασμένη διαμόρφωση πλάτους σήματος – συχνότητας (απαραίτητη προϋπόθεση η διατήρηση της γραμμικότητας) και το πρόβλημα αυτό οξύνεται από το εγγενές χαρακτηριστικό της OFDM τεχνικής, του σχετικά υψηλού λόγου μέγιστης-μέσης ισχύος σήματος (peak-to-average power ratio – PARP).
- Η διαμόρφωση OFDM είναι πολύ ευαίσθητη στο offset συχνότητας φέροντος που προκαλείται από το jitter των φερόντων, τον θόρυβο φάσης και της επίδρασης Doppler, που προκαλούνται με την κίνηση του κινητού τερματικού.

3.6 Η χρησιμοποίηση της OFDMA τεχνικής στα σύγχρονα δίκτυα

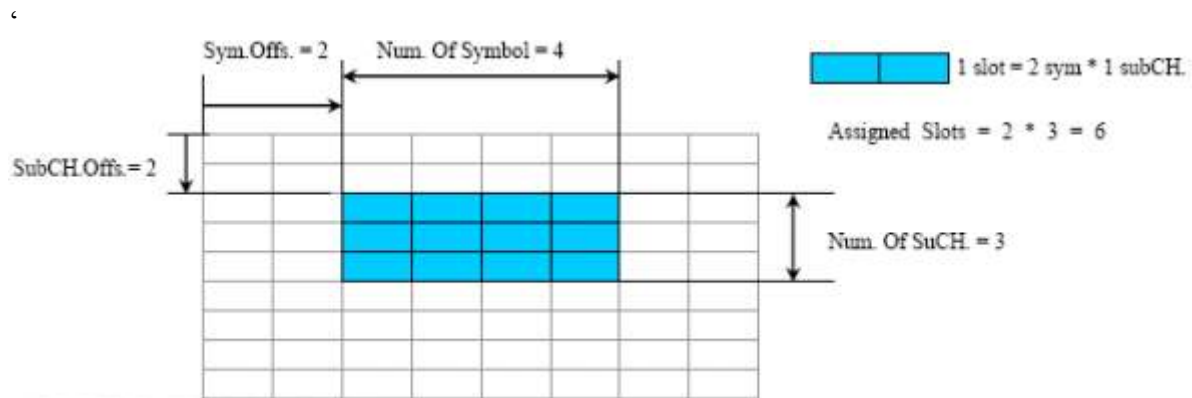
Η διαμόρφωση OFDMA χρησιμοποιείται σήμερα στο αναπτυσσόμενο wimax, όσο και στην τεχνολογία 3gpp.

Το WiMAX ή αλλιώς IEEE802.16 είναι ένα καθολικό, ευρυζωνικό πρότυπο ασύρματης πρόσβασης ικανό να αποδώσει υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης σε σταθερούς χρήστες, καθώς επίσης και σε φορητούς και κινητούς για μεγάλο χρονικό διάστημα. Ουσιαστικά, χάρη σε ένα νέο φυσικό επίπεδο βασισμένο στο OFDM, καθώς επίσης και σε άλλα χαρακτηριστικά, όπως Adaptive Modulation and Coding (AMC), Hybrid Automatic Repeat Request (H-ARQ), υψηλή απόδοση στις δομές υποκαναλιών του Uplink (UL), Multiple-Input-Multiple-Output (MIMO) και προηγμένα συστήματα κεραιών (AAS) [25,26,27].

Η διαμόρφωση OFDM επιτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση των ψηφιακά διαμορφωμένων ομάδων πληροφορίας παράλληλα, πάνω σε

ορθογώνιες μεταξύ τους ή αλλιώς υπομεταφορείς. Αυτό με τη σειρά του, μειώνει το μήκος των συμβόλων ανά υπομεταφορέα, που οδηγεί μια πολύ χαμηλότερη ευαισθησία στη διασυμβολική παρεμβολή (ISI).

Για τις επικοινωνίες πολλών χρηστών, μια μορφή εφαρμογής του OFDM αποτελεί η διαίρεση του συνολικού εύρους ζώνης σε υποκανάλια (subchannels), όπου κάθε ένα να περιέχει ένα σύνολο υπομεταφορέων. Η μέθοδος καλείται OFDMA. Το WiMAX OFDMA PHY υποστηρίζει διαχωρισμό υποκαναλιών και στις δυο συνδέσεις uplink και downlink και η ελάχιστη μονάδα των πόρων συχνότητας και χρόνου του υποκαναλιού είναι ένα slot, που ισούται με 48 υπομεταφορείς, όπως φαίνεται και στο σχήμα 14 [27].



Σχήμα 14. Διαχωρισμός υποκαναλιών στο WiMAX

Η διαμόρφωση υποκαναλιών στο uplink επιφέρει πρόσθετη βελτίωση απόδοσης, επειδή η ισχύς με την οποία αποστέλει πληροφορία ο χρήστης είναι περιορισμένη, δηλαδή χρησιμοποιώντας OFDMA με 1024 υπομεταφορείς και 16 υποκανάλια, εάν έχουμε μόνο ένα χρήστη και διαθέτουμε ένα υποκανάλι σε αυτόν τον χρήστη, όλη η ισχύς θα συγκεντρωθεί στο 1/16 του διαθέσιμου φάσματος και μπορεί να φέρει το πρόσθετο στη διαμόρφωση OFDM.

Υπάρχουν 3 τύποι υπομεταφορέων:

- Υπομεταφορείς πληροφορίας για τις μεταδόσεις δεδομένων
- Πιλοτικοί υπομεταφορείς για την εκτίμηση του καναλιού και το συγχρονισμό
- Μηδενικοί υπομεταφορείς, για τις άμεσες τρέχουσες ζώνες (DC) μεταφορέων και διαστημάτων φύλαξης.

Η κατανομή των υπομεταφορέων στα κανάλια μπορεί να γίνει με δύο διαφορετικούς τρόπους: συνεχόμενα ή κατανεμημένα [28]. Η συνεχόμενη κατανομή ομαδοποιεί υπομεταφορείς στο ίδιο εύρος συχνοτήτων, στο ίδιο υποκανάλι κι έτσι ένας χρήστης μπορεί να μεταπηδά τυχαία μεταξύ διαφορετικών υποκαναλιών, κατά τη διάρκεια μιας κλήσης. Στη κατανεμημένη μέθοδο, η συχνότητα διατίθεται στους χρήστες βάση των υποκαναλιών, κάθε ένα από το οποίο αποτελείται από ψευδοτυχαία επιλεγμένους υπομεταφορείς από κάθε ομάδα, ώστε να διαμορφωθεί το υποκανάλι. Η συνεχόμενη μέθοδος υπομεταφορέων παρέχει την καλύτερη

ρυθμαπόδοση και χωρητικότητα στο κανάλι επιλογής συχνοτήτων, δεδομένου ότι είναι σε θέση, να εκμεταλλευτεί την ποικιλομορφία πολλών χρηστών, με τη διάθεση υποκαναλιών στο χρήστη, όπου το σήμα προς την παρεμβολή και ο θόρυβος είναι υψηλή [29]. Παρόλα αυτά, από την άποψη της εξασθένησης, ο κατανεμημένος τρόπος είναι περισσότερο συμπαγής, υπό την έννοια, ότι εάν εκεί υπάρχει μια μεγάλη εξασθένηση περιορισμένης ζώνης, επηρεάζεται μόνο ένα μέρος από τους υπομεταφορείς σε κάθε υποκανάλι.

Προκειμένου να εναρμονιστούν τα ποσοστά μετάδοσης, με τις συνθήκες που επικρατούν στα κανάλια, κάθε χρονική στιγμή βάση των χαρακτηριστικών των καναλιών, στον εκπομπό χρησιμοποιείται προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση στο OFDMA WiMAX. Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται η ρυθμαπόδοση κατά τη μετάδοση των δεδομένων και η αξιοπιστία του συστήματος, με τη χρησιμοποίηση διαφορετικού μεγέθους πλειάδων στους διαφορετικούς υπομεταφορείς. Πράγματι, στο WiMAX IEEE802.1 πρότυπο [27], χρησιμοποιούνται συνεκτικά σχήματα διαμόρφωσης ξεκινώντας από τις διαμορφώσεις χαμηλής αποδοτικότητας (BPSK με ποσοστό $\frac{1}{2}$ κωδικοποίησης), σε εκείνες υψηλής αποδοτικότητας (64QAM με ποσοστό $\frac{3}{4}$ κωδικοποίησης), ανάλογα με τη θέση των χρηστών στην κυψέλη. Αυτό οδηγεί στη χαμηλότερη ρυθμαπόδοση, για τους χρήστες που βρίσκονται μακριά από το σταθμό βάσης, ως προς τους κοντινούς χρήστες.

Θα θεωρήσουμε, χωρίς απώλεια γενικότητας, ότι όλοι οι χρήστες αντιμετωπίζουν τις ίδιες συνθήκες μέσα στο κανάλι, δηλαδή την απώλεια πορειών και την εξασθένηση, οι οποίες αντιστοιχούν στην περίπτωση, όπου μόνο ένα σχήμα διαμόρφωσης χρησιμοποιείται. Το παρόν πρότυπο και η ανάλυση ανταποκρίνονται στη γενικότερη περίπτωση, η οποία περιγράφηκε προηγουμένως. Η κυκλοφορία των δεδομένων, όπως η φωνή, χρειάζεται συνήθως ένα σταθερό ποσοστό δυαδικών ψηφίων και έχει απαιτήσεις πραγματικού χρόνου.

3.7 Η συνέχεια του OFDMA

Στα τελευταία έτη, οι προμηθευτές OFDM πρόσβασης έκαναν στην αγορά, μια είσοδο εντυπωσιασμού, που υπόσχεται μεγάλης χωρητικότητας, κινητή ευρυζωνική πρόσβαση πολύ μπροστά από όταν αναμενόταν να είναι διαθέσιμες οι WiMAX και 3G υπηρεσίες. Εντούτοις, πιο πρόσφατα, εκείνη η διαφημιστική εκστρατεία σταμάτησε. Αφότου ανήγγειλε η Qualcomm, την απόκτηση του μεγαλύτερου OFDMA ενισχυτή τον Αύγουστο του 2005, η ανηλεής ώθηση εμπορευματοποίησης του OFDMA ως ιδιόκτητη τεχνολογία έχει πάψει.

Ο λόγος είναι, ότι ο πρωτοπόρος OFDM από την Adaptix έχει μια απλή απάντηση: πρότυπα. Οι τεχνολογίες OFDM έχουν αγκαλιαστεί τόσο εύκολα από τους οργανισμούς προτύπων, τόσο για την ευρυζωνική βιομηχανία ασύρματης πρόσβασης, όσο και για την κυψελοειδή βιομηχανία, που το να ακολουθήσεις την τεχνολογία ανεξάρτητα από το WiMAX FORUM

ή από τους δυο σημαντικούς 3G οργανισμούς προτύπων (3GPP και 3GPP2) είναι άσκοπο, όπως αναφέρει ο Mike Pisterzi της Adaptix.

Το OFDM ήταν αυτονόητα στα πρότυπα 802.16-2004, όπου δημιουργήθηκαν τα θεμέλια για το σταθερό WiMAX και ακολούθως το OFDMA γράφτηκε στην προδιαγραφή 802.16e, που επικυρώθηκε τον Δεκέμβριο του 2007 από IEEE και θα προετοιμάσει το έδαφος για τις κινητές λύσεις WiMAX.

«Το OFDMA είναι υποχρεωτικό στα πρότυπα 802.16e – στην πραγματικότητα είναι το S-OFDMA ή εξελικτικό OFDMA» είπε ο Paul Sergeant, ανώτερος διευθυντής μάρκετινγκ για την εναλλακτική πρόσβαση της Motorola. «Έτσι κάνουμε OFDMA και όλοι θα το κάνουν αυτό και θα είναι επίσης ένας από τους λόγους, για τους οποίους το 802.16e δεν είναι άμεσα συμβατό με το παλαιότερο 802.16-2004».

Αν και πολλά προϊόντα που βασίζονται στα πρότυπα 802.16e είναι ακόμα στη φάση της ανάπτυξης, η Adaptix έχει τη δική της 2^{ης} γενιάς OFDMA-γραμμή παραγωγής διαθέσιμη με επεκτάσεις στην Ασία. Εντούτοις, προβλέπεται η επερχόμενη έκδοση της τεχνολογίας 3^{ης} γενιάς, σχεδιασμένη να καλύψει τις απαιτήσεις του κινητού WiMAX και του προτύπου IEEE802.16e. Η δυνατότητα για κινητό WiMAX είναι απλά τεράστια, με τα πιθανά προφίλ από του φόρουμ του WiMAX που στοχεύει στις συχνότητες 2.5 GHz και 3.5 GHz, που είναι διαθέσιμες και σε λειτουργία σε πολλές χώρες παγκοσμίως, καθώς επίσης και 2.3 GHz, αλλά και σε άλλες επίσης συχνότητες. Τα αρχικά προφίλ του WiMAX φόρουμ θα καλύψουν επίσης ένα ευρύ φάσμα προδιαγραφών των καναλιών ευρείας ζώνης, συμπεριλαμβανομένων των 5 MHz, 7 MHz, 8.75 MHz και 10 MHz.

«Το να συνεχίσουμε να στοχεύουμε το δρόμο της αγοράς με ιδιοκτήτη την τεχνολογία έχει λίγο νόημα, εάν μια τυποποιημένη έκδοση εκείνης της τεχνολογίας δεν άρπαζε τις μαζικές αγορές», αναφέρει ο Pisterzi. «Εάν, ένας προμηθευτής είναι άνετος με μια μεταβλητή τεχνολογία και μια μικρή βάση πελατών, αυτό είναι το πρόβλημα του, αλλά η βιομηχανία συνολικά κινείται συνεχώς προς την τυποποίηση».

Συχνά παρεξηγημένες έννοιες η μια με την άλλη, OFDM και OFDMA είναι πραγματικά δυο μεγάλες παραλλαγές της ίδιας τεχνολογίας. Και οι δυο διαιρούν ένα εξαιρετικά «γρήγορο» σήμα σε πολυάριθμα «αργά» σήματα, κάθε ένα που χωρίζεται κατά διαστήματα χώρια στις ακριβείς συχνότητες. Το πλεονέκτημα εδώ είναι ότι εκείνα τα μεμονωμένα αργά σήματα ή υπομεταφορείς δεν υπόκεινται στην ίδια ένταση των πολλαπλών διαδρομών παραμόρφωσης, που αντιμετωπίζεται από μια μετάδοση, ενός μόνο φέροντος, όπου τα δεδομένα ταξιδεύουν αρκετά αργά και τα αποτελέσματα της παραμόρφωσης γίνονται αμελητέα. Οι πολυάριθμοι μεταφορείς, έπειτα συλλέγονται στο δέκτη και επανασυντονίζονται για να διαμορφώσουν μια υψηλής ταχύτητας μετάδοση.

Η διαφορά μεταξύ OFDM και OFDMA [33,34] είναι ότι το δεύτερο έχει τη δυνατότητα να ορίσει δυναμικά ένα υποσύνολο εκείνων των

υπομεταφορέων στους μεμονωμένους χρήστες, προσαρμόζοντας την τεχνολογία στις ιδιαίτερες απαιτήσεις κινητικότητας. Κατά συνέπεια, οι τεχνολογίες OFDM καταλαμβάνουν τα νομαδικά, σταθερά και μονόδρομα πρότυπα μετάδοσης, που κυμαίνονται από τις τηλεοπτικές μεταδόσεις στο Wi-Fi, καθώς επίσης και στο σταθερό WiMAX και τα νεότερα πολλαπλής διανομής ασύρματα συστήματα, όπως το Qualcomm's Forward Link Only (FLO). Το OFDMA, εντούτοις, προσθέτει την αληθινή κινητικότητα στο μίγμα, διαμορφώνοντας τον κύριο κορμό του κινητού WiMAX και του νέου προτύπου 3GPP για τη μακροχρόνια εξέλιξη του 3G(LTE). Επιπλέον, το S-OFDMA επιτρέπει μια αύξηση στη σειρά των ευρυζωνικών καναλιών από 1.25 MHz μέχρι 20 MHz.

«Το κινητό WiMAX ή 802.16-2005 είναι πραγματικά κακώς αποκαλούμενο έτσι», λέει ο Mark Whitton, αντιπρόεδρος και γενικός διευθυντής για WiMAX στην Nortel. «Το 802.16-2005 είναι μια ιδανική λύση για κινητές, φορητές και σταθερές εφαρμογές WiMAX και είναι ουσιαστικά ένα υπερσύνολο του 802.16-2004, με τα σημαντικά πλεονεκτήματα απόδοσης, όπως το MIMO και το εξελικτικό OFDMA».

Στην 3G πλευρά, το 3GPP πρόσφατα οριστικοποίησε τον αρχικό κατάλογο απαιτήσεων για την 3G κινητικότητα και έπλασε τον όρο LTE. Τα προκαταρκτικά χαρακτηριστικά απαιτούν μια πλήρη μετατόπιση των 3G προτύπων μακριά από ευρείας ζώνης (CDMA σε OFDM), σημαίνοντας ότι το μέλλον της ασύρματης τεχνολογίας και των δισεκατομμυρίων χρηστών της οδηγείται στην OFDMA κατεύθυνση. Οι προμηθευτές κυψελοειδών συστημάτων έχουν υπερπηδήσει τις νέες προδιαγραφές, που διαμορφώνουν τα έτη έρευνας σε OFDM και οι σχετικές τεχνολογίες στη νέα διαδρομή προτύπων.

«Όπου τα συμβατικά έξυπνα συστήματα κεραιών παραδίδουν κέρδη απόδοσης με την προσθήκη σύνθετου, δαπανηρού και ογκώδους εξοπλισμού στην κορυφή πύργων, το MIMO εκμεταλλεύεται τις μικρότερες και απλούστερες αλλαγές, τόσο στις συσκευές, όσο και στην υποδομή, για να παραδώσει βελτίωση της απόδοσης πολύ πέρα από αυτό που ακόμη και οι πιο περίπλοκες έξυπνες κεραιές μπορούν να παραδώσουν», αναφέρει ο Whitton.

Η Nortel παρουσίασε τη γραμμή παραγωγής του LTE, που την ονόμασε υψηλής ταχύτητας OFDM πρόσβαση πακέτων (HSOPA) στο 3GSM παγκόσμιο συνέδριο στις Κάννες, στη Γαλλία το Φεβρουάριο του 2005. Η πλατφόρμα προορίζεται να πάρει τη σκυτάλη, εκεί όπου οι πρόσφατες UMTS uplink και downlink βελτιώσεις σταματάνε. Το Qualcomm ακολουθεί OFDM και OFDMA, χρησιμοποιώντας OFDM για τις πολλαπλής διανομής τεχνολογίες της και στην αναζήτηση του προτύπου 802.11n, για την εξέλιξη του ασύρματου τοπικού LAN. Με την απόκτηση \$600 εκατομμυρίων της Flarion, η Qualcomm προσφέρει το βάρος του \$1 δισεκατομμυρίου ετήσιου R&D προϋπολογισμού στην περαιτέρω ανάπτυξη της τεχνολογίας του OFDMA, προς πρότυπο IEEE 802.20, μια ευρυζωνική ασύρματη τεχνολογία, που όχι μόνο έχει την κινητικότητα, αλλά την πραγματικά γρήγορη

κινητικότητα (χαρακτηριστικό παράδειγμα, αυτό ενός χρήστη που διατηρεί μια σταθερή σύνδεση δεδομένων βρισκόμενος μέσα σε ένα κινούμενο μέσο).

Η ανάπτυξη των ασύρματων συστημάτων, με τη βαθιά εστίαση στο διαδίκτυο και οι κινητές πλατφόρμες υπολογισμού έχουν παραγάγει μεγάλο ενδιαφέρον για την κινητή πρόσβαση δικτύων δεδομένων, ιδιαίτερα το ευρυζωνικό ασύρματο σύστημα επικοινωνιών. Η επιλογή των κατάλληλων τεχνολογιών, που θα ταιριάζουν συγκεκριμένα τη δυνατότητα εφαρμογής, για το επόμενης γενιάς κινητό ασύρματο σύστημα διαδικτύου θα βασιστεί σε διάφορους παράγοντες, από τη συνδεσιμότητα υψηλής ταχύτητας στην κινητικότητα. Επειδή, το OFDMA μπορεί να υπερνικήσει τα εμπόδια της μετάδοσης του σήματος και να αυξήσει την ταχύτητα μετάδοσης, αντιμετωπίζοντας τις απρόβλεπτες αλλαγές του περιβάλλοντος των ραδιοσυχνοτήτων, αποτελεί μια καλή επιλογή, για τις εφαρμογές κινητικότητας στο ασύρματο δίκτυο ευρέως φάσματος.

Όπως προαναφέρθηκε, η αγορά εστιάζει περισσότερο στην φορητότητα και τη κινητικότητα του χρήστη παρά στον υψηλό ρυθμό μετάδοσης σε ένα σταθερό χρήστη. Οι προσδοκίες και απαιτήσεις για τα μελλοντικά ασύρματα συστήματα επικοινωνιών συνεχίζουν να αυξάνονται και να εξελίσσονται. Γενικά, υποτίθεται ότι η downlink σύνδεση μια νέας διεπαφής στον αέρα θα είναι βασισμένη σε OFDMA και θα υιοθετήσει κάποια μορφή υβριδικού ARQ (HARQ).

Το 3GPP [32] υποτίθεται ότι ήταν ένα σύστημα βασισμένο σε πακέτα all-IP απευθυνόμενο, να παρέχει 100 Mbps στο downlink και 50 Mbps στο uplink. Τα νέα πρότυπα στοχεύουν να μειώσουν τις καθυστερήσεις, να βελτιώσουν την ευελιξία φάσματος και να μειώσουν το κόστος, για τους πάροχους και τους χρήστες [30,31].

Το OFDMA, όσον αφορά την δυναμική απόδοση υπομεταφορέων έχει ερευνηθεί προηγουμένως για τα κυψελοειδή συστήματα επόμενης γενιάς. Στο σχήμα 15 παρουσιάζονται κάποιες τυπικοί παράμετροι στο WiMAX.

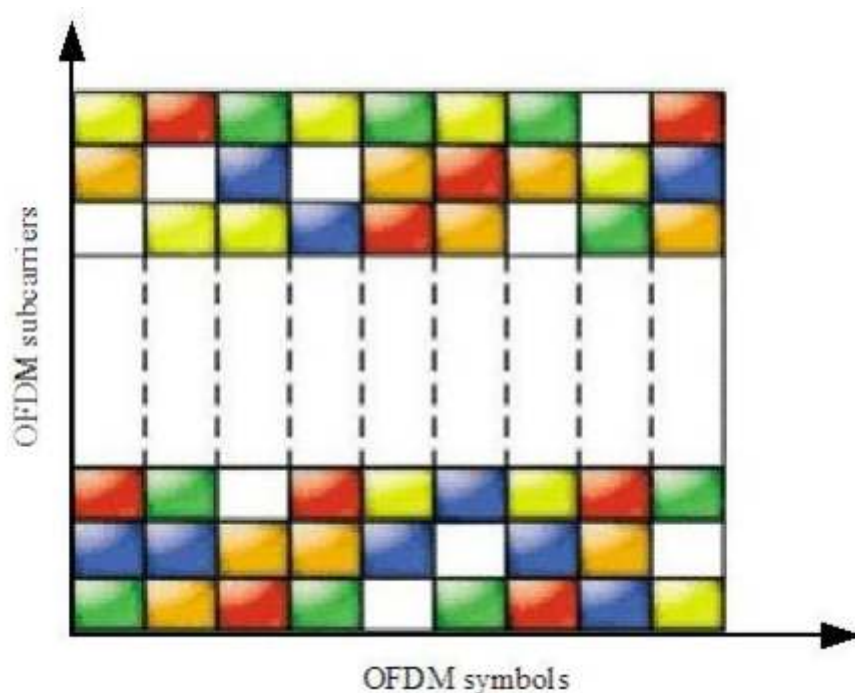
Transmission BW		10 MHz
Sub-frame duration		0.5ms
Sub-carrier spacing		15kHz
Sampling frequency		15.36MHz (4x3.84MHz)
FFT size		1024
Number of occupied sub-carriers		601
Number of OFDM symbols per sub frame (Short/Long CP)		7/6
CP length (μs/samples)	Short	(4.69/72)x6 (5.21/80)x1
	Long	(16.67/256)

Σχήμα 15. Τυπικοί παράμετροι WiMAX

Το OFDMA επιτρέπει το διαχωρισμό των χρονικών και φασματικών πόρων σε:

- OFDMA σύμβολα
- OFDMA φέροντα ή subcarriers

Κάθε ένα από τα OFDMA σύμβολα ή φέροντα μπορούν να αποδοθούν σε διαφορετικούς χρήστες, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 16. Πλήθος διαφορετικών χρηστών μπορεί να λαμβάνει διαφορετικό πλήθος φερόντων και συμβόλων, 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 ασύρματων πόρων του συστήματος, η οποία και πρόκειται να εξεταστεί στα επόμενα κεφάλαια.



Σχήμα 16. Διαχωρισμός χρονικών και φασματικών πόρων του OFDM

3.8 Κλασματική επαναχρησιμοποίηση συχνότητας στα δίκτυα WiMAX

Κάνοντας μια ανακεφαλαίωση, σε όσα έχουν αναφερθεί μέχρι στιγμής στο υπάρχον κεφάλαιο, η τεχνολογία WiMAX προωθείται ως η κορυφαία εκ των υποψηφίων, για την παροχή ασύρματων ευρυζωνικών υπηρεσιών, με πολύ υψηλά επίπεδα ποιότητας υπηρεσίας (QoS), αναλογικά με τις ψηφιακές συνδρομητικές γραμμές (DSLs). Το κινητό WiMAX, γνωστό και ως IEEE 802.16e, που είναι η νεότερη έκδοση της οικογένειας IEEE 802.16, επιτρέπει ευρυζωνική ασύρματη πρόσβαση, ακόμα και για τους χρήστες

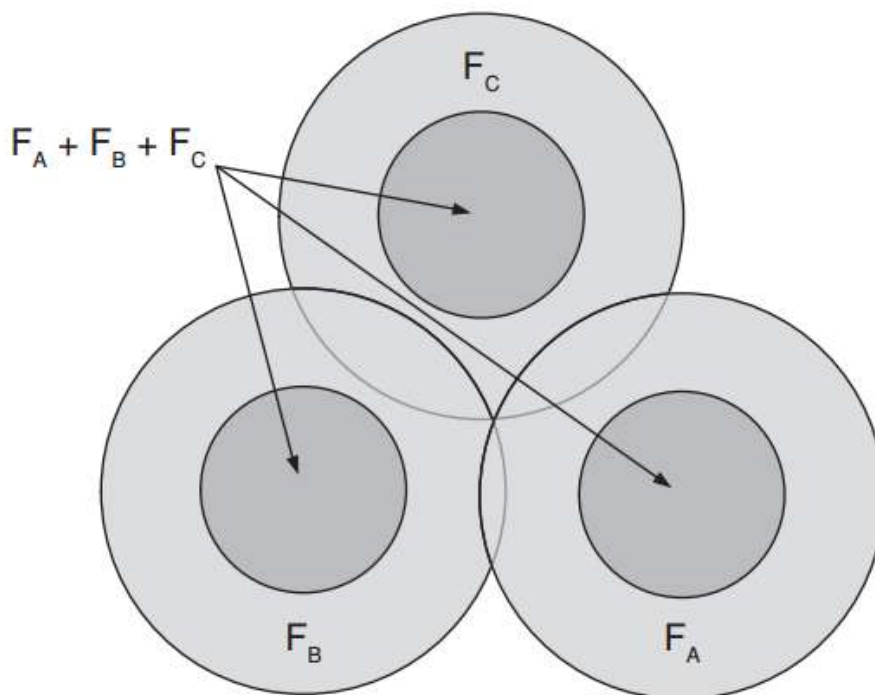
υψηλότερων απαιτήσεων. Το IEEE 802.16e υποστηρίζει μέγεθος επιπέδων downlink της τάξης των 63 Mb/s, ενώ το IEEE 802.16m φτάνει μέχρι την τάξη των 100 Mb/s. Μια από τις πρωτοποριακές προσαρμογές στο κινητό WiMAX είναι η χρήση της ορθογώνιας διαίρεσης συχνότητας πολλαπλής πρόσβασης (OFDMA), όπου διαφορετικοί χρήστες πολυπλέκονται με κατανομές πόρων χρόνου-συχνότητας στο ίδιο πλαίσιο μεταφοράς. Σε κάθε χρήστη κατανέμονται υποκανάλια, που αποτελούν τμήματα ενός συγκεκριμένου τμήματος ή αριθμού-κοντινής μπάντας-φέροντα. Τα συγκεκριμένα φέροντα είναι ορθογώνια μεταξύ τους, ώστε να εμφανίζονται αμελητέα επίπεδα παρεμβολής-μεταξύ τους-σε μια κυψέλη ή ένα τομέα αυτής. Η κύρια πηγή παρεμβολής είναι η χρήση του ίδιου υπό-φέροντος στην ίδια χρονοσχισμή, εντός κοντινών κυψελών ή τομέων. Το συγκεκριμένο φαινόμενο ονομάζεται σύγκρουση. Το πρότυπο 802.16e επιτρέπει τη χρήση ίδιας μπάντας συχνοτήτων σε γειτονικές κυψέλες ή τομείς, γνωστή ως επαναχρησιμοποίηση συχνότητας 1 ή R1 σε ένα κυψελωτό διαδικτυακό σχεδιασμό. Ενώ, κάτι τέτοιο μπορεί να βελτιώσει τη γενικότερη ρυθμοαπόδοση (throughput) του συστήματος, οι χρήστες κοντά στα όρια της κυψέλης θα εμφανίσουν μη αποδεκτά επίπεδα παρεμβολής εξαιτίας του υψηλού επιπέδου συγκρούσεων, ως αποτέλεσμα της χαμηλής κάλυψης. Το πρότυπο IEEE 802.16e παρέχει τυχαία σενάρια υποκαναλοποίησης, όπου οι χρήστες γειτονικών κυψελών επιλέγουν υποφέροντα σύμφωνα με μια σειρά αλγορίθμων/στρατηγικών κατανομής φερόντων, με σκοπό την ελαχιστοποίηση της πιθανότητας συγκρούσεων. Παρόλα αυτά, το πλήρες φάσμα των υποφερόντων χρησιμοποιείται στην ταχύτητα, κυρίως στο downlink, ώστε το πλεονέκτημα της τυχαίας υποκαναλοποίησης, να χάνεται από ένα σημείο και μετά.

Η λύση που έχει προταθεί, στα συγκεκριμένα προβλήματα παρεμβολής είναι η κλασματική επαναχρησιμοποίηση συχνότητας (fractional frequency reuse ή FFR) [35]. Στην κλασματική επαναχρησιμοποίηση συχνότητας, οι χρήστες στα όρια των κυψελών/τομέων, λειτουργούν με ένα κλάσμα του διαθέσιμου εύρους ζώνης, ενώ οι χρήστες στο εσωτερικό της κυψέλης με τη συχνότητα R1. Στα πλαίσια μεταφοράς, οι χρήστες συχνότητας R3 ομαδοποιούνται εντός μιας ζώνης R3, που τους διαχωρίζει από τους χρήστες R1. Τα πλεονεκτήματα-που γίνονται αντιληπτά σε αυτή τη περίπτωση-της κλασματικής επαναχρησιμοποίησης συχνότητας εντοπίζονται στην καλύτερη ποιότητα σήματος στους χρήστες που βρίσκονται στα όρια των κυψελών, η οποία αναμένεται να επιφέρει ακόμα υψηλότερα επίπεδα ρυθμοαπόδοσης (throughput). Ωστόσο, κάτι τέτοιο συνοδεύεται από το κόστος χαμηλότερης κατανομής πόρων του υπάρχοντος φάσματος, οπότε είναι πολύ σημαντικό να ισοζυγίσουμε τα πλεονεκτήματα αναλογικά με τις συνέπειες, που επιφέρει κάτι τέτοιο.

Ένας από του καθοριστικούς παράγοντες απόδοσης της κλασματικής επαναχρησιμοποίησης συχνότητας είναι το κριτήριο κατανομής των χρηστών στις ζώνες συχνοτήτων R1 και R3.

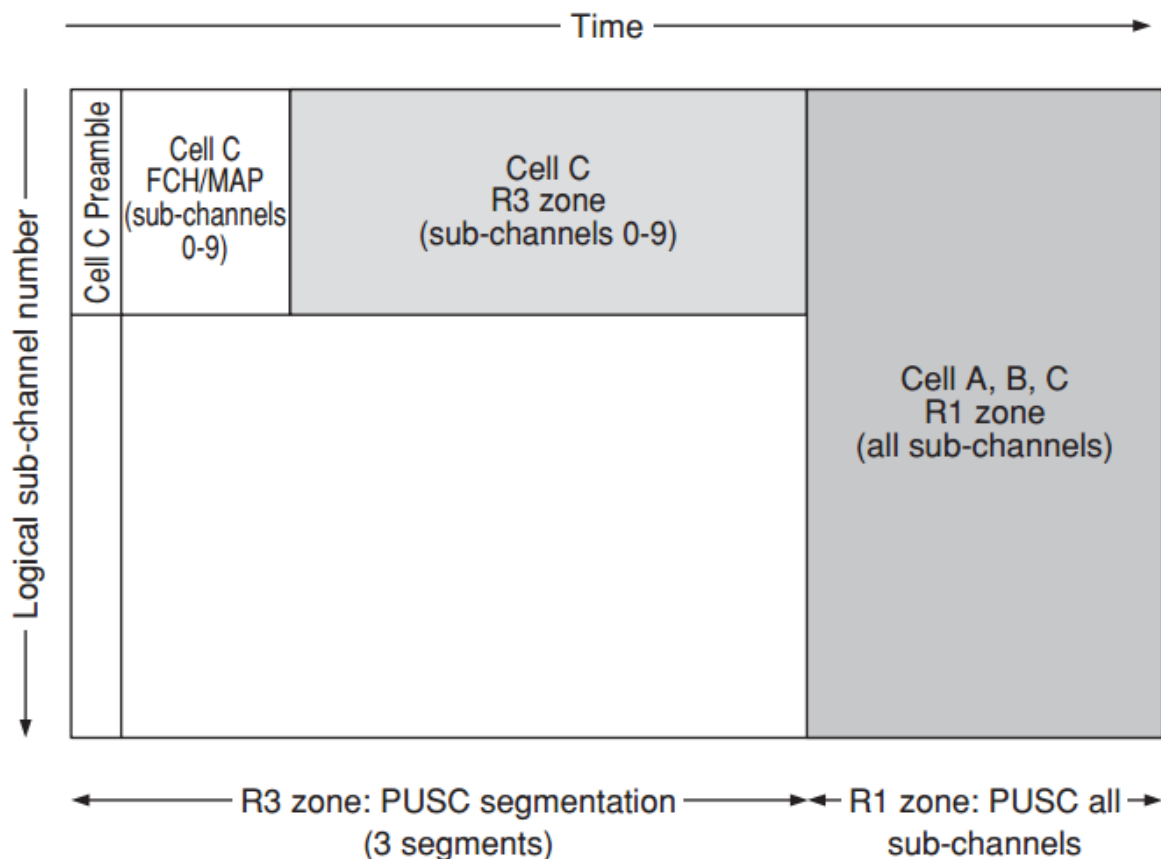
Η γενική ιδέα της κλασματικής επαναχρησιμοποίησης συχνότητας είναι η απομάκρυνση, των χρηστών στα όρια της κυψέλης, από τη λειτουργία συχνότητας R1 και η εκχώρηση ενός μόνο υποτεμάχιου του

διαθέσιμου εύρους ζώνης. Το παραπάνω επεξηγείται στο σχήμα 17, όπου F_A , F_B και F_C είναι διαφορετικά τμήματα υποκαναλιών στην ίδια συχνότητα καναλιού, όπου η πλήρης φόρτωση της χρησιμοποιούμενης συχνότητας $R1$, διατηρείται στους κεντρικούς χρήστες με σκοπό τη μεγιστοποίηση της αποδοτικότητας του φάσματος, ενώ η χρήση FFR (Fractional Frequency Reuse) στους χρήστες κοντά στα όρια της κυψέλης εκχωρεί τη συχνότητα της ζώνης $R3$. Στο σχήμα 18 παρουσιάζεται η δομή του πλαισίου μεταφοράς, με κατανομή πόρων χρόνου και συχνότητας για τις ζώνες $R1$ και $R3$. Το πλαίσιο επικεφαλίδας χειρισμού (FCH/MAP) παρέχει πληροφορίες για την κατανομή υποκαναλιών, κι επιτρέπει στους χρήστες να εντοπίζουν το μπλόκ πόρων, εντός του πλαισίου. Επιπρόσθετα, το τμήμα FCH/MAP μεταφέρει άλλα σήματα, όπως στοιχεία πληροφορίας για τη ζώνη επιλογής, που υποδεικνύει τα σημεία διαχωρισμού μεταξύ των ζωνών $R1$ και $R3$.



Σχήμα 17. Κλασματική επαναχρησιμοποίηση συχνότητας

Η αρχική πιστοποίηση του κινητού WiMAX περιλαμβάνει διαίρεση χρόνου αμφίδρομης λειτουργίας (Time Division Duplexing ή TDD). Στο TDD, οι μεταφορές uplink και downlink εκτελούνται συνεχόμενα στη διάρκεια του χρόνου, χωριζόμενες από κενά ασφαλείας (guard gaps). Ακόμα, το πλαίσιο μεταφοράς σε δυο υποπλαίσια. Επιπλέον, υπάρχουν διαφορετικές ζώνες για τη συχνότητα $R1$ και $R3$, εντός του υποπλαισίου. Αυτές έχουν κοινά σύνορα, για όλες τις κυψέλες που έχουν οργανωθεί εντός του διαδικτύου, ώστε να μην εμφανίζεται ποτέ ενδοσυμβολική παρεμβολή μεταξύ των ζωνών $R1$ και $R3$.



Σχήμα 18. Πλαίσιο μεταφοράς με πολλαπλές ζώνες μετάθεσης

Ένας σημαντικός παράγοντας της εκχώρησης χρήστη, εντός των ζωνών R1 και R3 είναι η δυναμική εκχώρηση του περιβάλλοντος της ζώνης FFR, η οποία πρέπει να βρίσκεται στα ίδια επίπεδα με την ποιότητα σήματος του χρήστη και τις μεταβολές της θέσης αυτού. Ο σταθμός βάσης πρέπει να περιέχει τακτική ανατροφοδότηση από το χρήστη και θα πρέπει να αποφασίζει, εάν τελικά θα πρέπει να τον κατανείμει στην ζώνη R1 ή στην R3. Για ταχύτερες κινήσεις του χρήστη, οι ανανεώσεις θα πρέπει να είναι πιο συχνές. Αυτό συνήθως είναι ένα θέμα μεταξύ του καθορισμού της στόχευσης της ζώνης και της απαιτούμενης αναπληροφόρησης και σηματοδότησης.

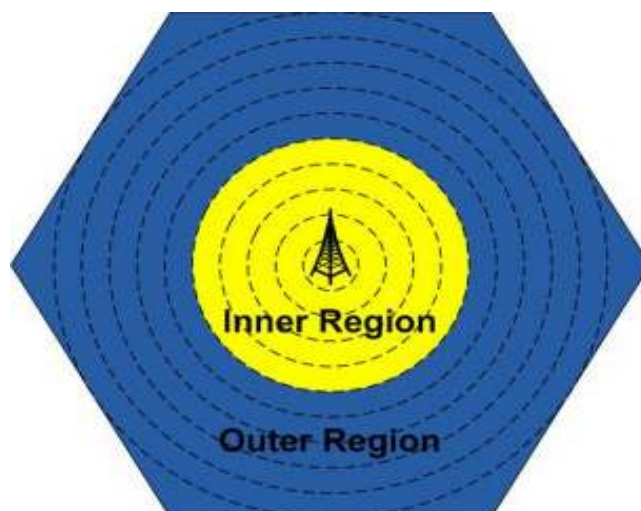
Ο καθορισμός της ζώνης FFR στο σταθμό βάσης, για ένα συγκεκριμένο χρήστη μπορεί να βασίζεται σε αρκετές παραμέτρους, οι οποίες πρέπει να καθορίζονται από τα σήματα ανατροφοδότησης από το κινητό τερματικό στον σταθμό βάσης, όπως αυτά υποστηρίζονται από το πρότυπο 802.16e.

Μια εμφανής παράμετρος καθορισμού της ζώνης είναι το εύρος (απόσταση) από το σταθμό βάσης, σε ένα δοθέν κινητό τερματικό. Ο σταθμός βάσης μπορεί να επιβεβαιώσει τη πλήρη χρησιμοποίηση των ζωνών R1 και R3, εναρμονισμένα με το κατώφλι της απόστασης, με ένα σημαντικό μειονέκτημα ότι η ποιότητα των, μικρής διάρκειας, σημάτων δεν είναι απαραίτητα συσχετισμένη με την απόσταση από τον σταθμό βάσης, καθώς

πιθανή παρέκκλιση του σήματος μπορεί να είναι αποτελέσματα σκίασης ή fast fading.

Οι προτεινόμενες λύσεις, για εφαρμογή της κλασματικής επαναχρησιμοποίησης συχνότητας στα δίκτυα WiMAX διακρίνονται σε [36]:

- **Βέλτιστες λύσεις:** Το πρόβλημα της κλασματικής επαναχρησιμοποίησης συχνότητας προσεγγίζεται ως πρόβλημα βελτιστοποίησης. Το πρόβλημα περιλαμβάνει, τόσο το προσδιορισμό του προσδιορισμού του κλάσματος του εύρους ζώνους στο κάθε χρήστη, όσο και την εκχώρηση των καναλιών στους τελικούς/αποδεκτούς χρήστες. Σημαντικό μειονέκτημα της μεθόδου αποτελεί η υψηλή υπολογιστική πολυπλοκότητα, με αποτέλεσμα να προωθούνται άλλες υποβέλτιστες μεν, αλλά λιγότερο πολύπλοκες δε, ώστε να αντιμετωπιστεί το συγκεκριμένο πρόβλημα.
- **Λύσεις βασισμένες στην απόσταση:** Σε αυτή την εκδοχή, η επιφάνεια της κυψέλης χωρίζεται σε (δύο ή περισσότερες) ομόκεντρες περιοχές, την εσωτερική και την εξωτερική. Οι χρήστες που βρίσκονται κοντύτερα στον σταθμό βάσης (εσωτερική περιοχή) εξυπηρετούνται με συντελεστή επαναχρησιμοποίησης 1, ενώ οι αντίστοιχοι που βρίσκονται στην εξωτερική περιοχή, κοντά δηλαδή στα όρια της κυψέλης, με συντελεστή επαναχρησιμοποίησης 3.
- **Λύσεις βασισμένες στο SINR:** Τελευταία εκδοχή, των λύσεων με κλασματική επαναχρησιμοποίηση συχνότητας αποτελεί αυτή που βασίζεται στον σηματοθορυβικό λόγο, με το σκεπτικό να είναι εφάμιλλο της προσέγγισης των λύσεων που βασίζονται στην απόσταση, με τη διαφορά του καθορισμού της εσωτερικής και της εξωτερικής περιοχής συναρτήσει ενός προκαθορισμένου κατωφλίου SINR. Όταν το SINR του χρήστη υπερβεί αυτό το κατωφλι, τότε ο χρήστης βρίσκεται στην εσωτερική περιοχή με συντελεστή επαναχρησιμοποίησης 1, ενώ σε αντίθετη περίπτωση βρίσκεται στην εξωτερική περιοχή, με συντελεστή επαναχρησιμοποίησης 3.



Σχήμα 19. Εσωτερική κι εξωτερική περιοχή, κατά την επίλυση κλασματικής επαναχρησιμοποίησης συχνότητας

Κεφάλαιο 4^ο

Ο προσομοιωτής OFDMA

4.1 Το περιβάλλον προσομοίωσης

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η μελέτη, η προσομοίωση, η παρουσίαση και η ανάλυση χαρακτηριστικών της τεχνικής OFDMA, μέσω της προσομοίωσης στρατηγικών κλασματικής επαναχρησιμοποίησης συχνότητας, ενός πολυκυψελωτού OFDMA συστήματος κινητών χρηστών κάνοντας χρήση του λογισμικού Matlab R2013b της MathWorks. Η επιλογή του σχεδιαστικού/υπολογιστικού αυτού εργαλείου έγινε, καθώς θεωρείται μια υψηλής απόδοσης γλώσσα για τον τεχνικό προγραμματισμό. Πρόκειται για ένα διαδραστικό σύστημα, το οποίο ενσωματώνει τις λειτουργίες της απεικόνισης, του μαθηματικού υπολογισμού και του προγραμματισμού σε ένα άκρως ευέλικτο περιβάλλον.

Τα στάδια υλοποίησης της προσομοίωσης περιλαμβάνουν τον υπολογισμό των συντεταγμένων και την σχεδίαση του κυψελωτού συστήματος, το οποίο πρόκειται να μελετηθεί, την εισαγωγή των χρηστών και τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών τους, καθώς και τη χρήση διαφορετικών στρατηγικών εκχώρησης φερόντων σε αυτούς και αποδοχής ή απόρριψής τους, με απώτερο σκοπό την εκτίμηση της χωρητικότητας του συστήματος, της ρυθμοαπόδοσης (throughput) και της ισχύος αυτών σε κάθε εκδοχή.

4.2 Μοντέλο προσομοίωσης κυψελωτού OFDMA συστήματος

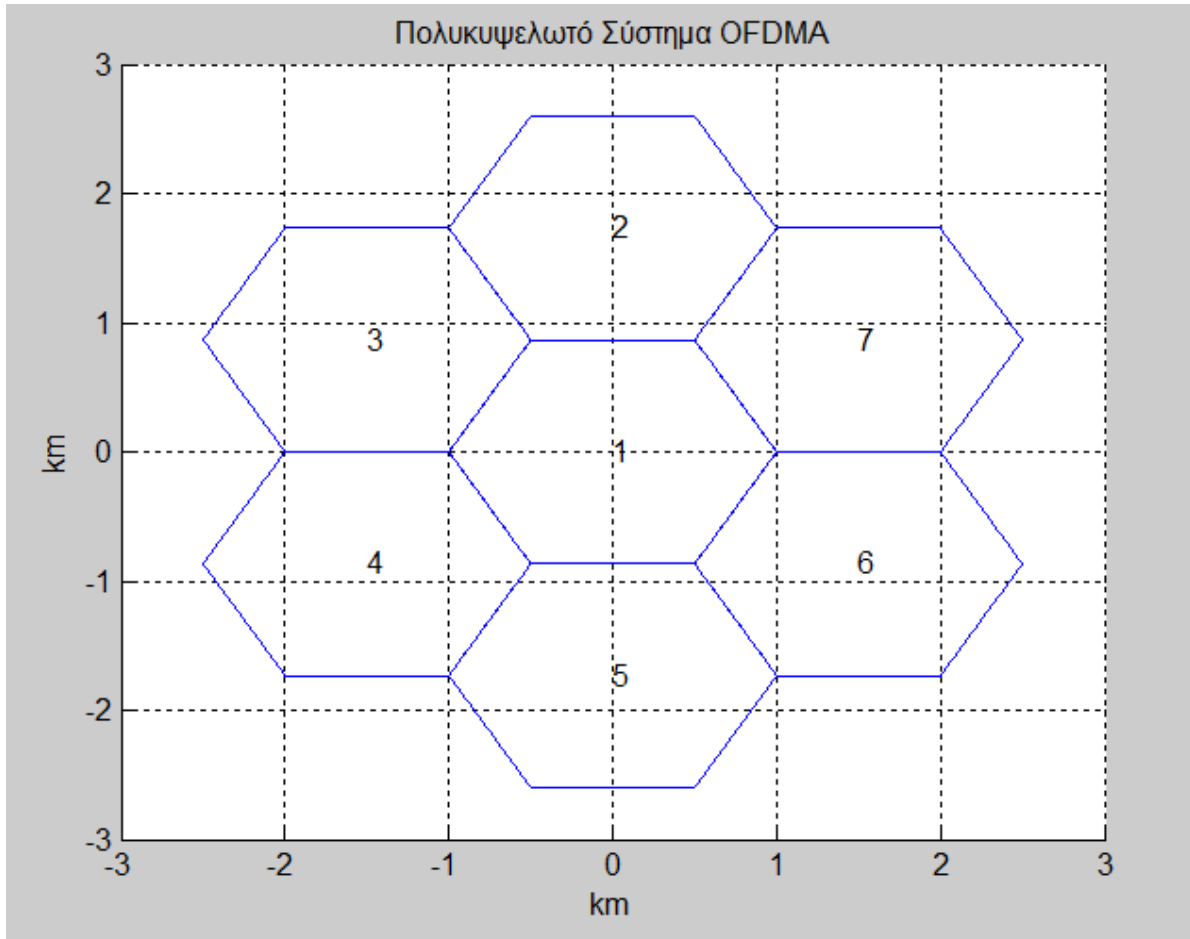
Το πρώτο τμήμα των προσομοιώσεων περιλαμβάνει το σχεδιασμό της τοπολογίας του πολυκυψελωτού OFDMA συστήματος, χωρίς γνώση του καναλιού διάδοσης, στο οποίο πρόκειται να λάβουν χώρα οι προσομοιώσεις των αλγορίθμων.

Το πολυκυψελωτό OFDMA σύστημα αποτελείται από C κυψέλες, εξαγωνικού σχήματος κι ακτίνας R (km), όπου στο κέντρο κάθεμιας υπάρχει ένας σταθμός βάσης (BaseStation), που εξυπηρετεί το σύνολο των χρηστών της περιοχής της κυψέλης. Ο (εκάστοτε) σταθμός βάσης (BS) έχει ομοιοκατευθυντική κεραία, ενώ στη διάθεση του βρίσκεται το σύνολο του εύρους ζώνης. Οι κυψέλες αναπτύσσονται σε στρώσεις κυψελών γύρω από το κέντρο του συστήματος, οι οποίες αποκαλούνται Tiers.

Το προαναφερθέν σύστημα μπορεί να εξυπηρετήσει ένα σύνολο χρηστών U , ομοιόμορφα κατανεμημένων στην περιοχή κάλυψης του συστήματος, όπου κάθε χρήστης δεν μπορεί να εξυπηρετείται από περισσότερους του ενός σταθμούς βάσης. Η χωρητικότητα του εκάστοτε πολυκυψελωτού OFDMA συστήματος εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος αυτού (θόρυβος, αριθμός κυψελών, αριθμός τομέων), την στρατηγική εκχώρησης εύρους ζώνης στους χρήστες (τυχαία, συντεταγμένη ή σειριακή), καθώς και τον αλγόριθμο αποδοχής ή απόρριψης των εισερχόμενων χρηστών στο σύστημα.

Στις προσομοιώσεις έγινε χρήση ενός πολυκυψελωτού συστήματος, με αριθμός κυψελών $C=7$ κυψέλες, μια κεντρική κι έξι περιφερειακές. Το

κέντρο της κυψέλης $C=1$ τοποθετείται κατά σύμβαση στο σημείο $0(X=0,Y=0)$, ενώ η αρίθμηση των κυψελών γίνεται ανθρωπολογικά. Κάθε κυψέλη περιλαμβάνει ένα (κεντρικό) σταθμό βάσης, ενώ διαιρείται σε 3 τομείς των 120° , έκαστος.



Σχήμα 20. Απεικόνιση πολυκυψελωτού OFDMA συστήματος

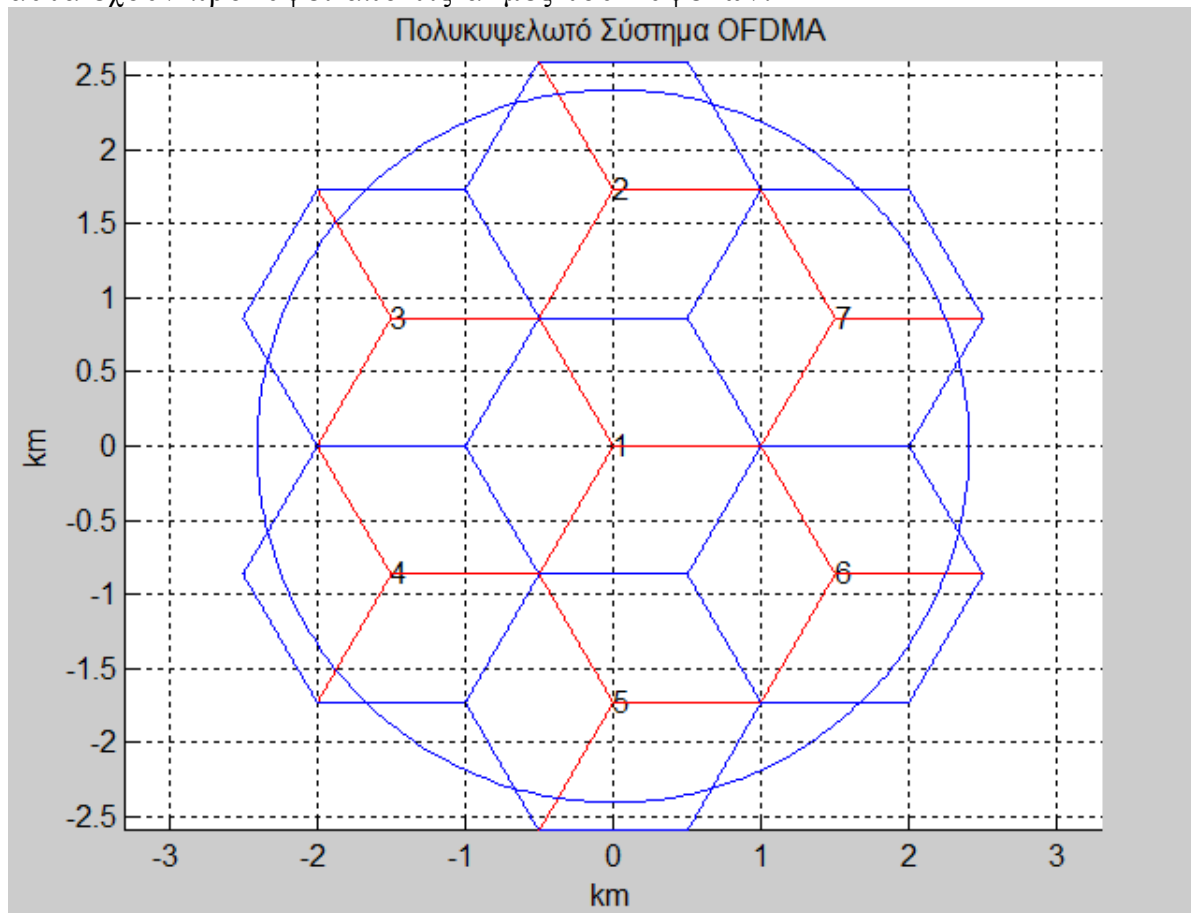
Η διάσπαση των κυψελών του συστήματος βελτιώνει τη χωρητικότητα του συστήματος. Όταν χρησιμοποιείται χωρισμός των κυψελών σε τομείς, οι διάυλοι που χρησιμοποιούνται σε μια επιμέρους κυψέλη χωρίζονται σε ομάδες και κάθε ομάδα χρησιμοποιείται σε ένα συγκεκριμένο τομέα. Η μείωση της παρεμβολής, που επιτυγχάνεται με την τομεοποίηση των κυψελών, βοηθάει στη μείωση του συντελεστή επαναχρησιμοποίησης και παρέχει έναν επιπρόσθετο βαθμό ελευθερίας στην κατανομή των διαύλων.

Ο κάθε χρήστης, κατά την είσοδο του λαμβάνει συντεταγμένες, για τις οποίες θα πρέπει να ισχύει ότι:

$$R_{\text{user}} = \text{Sqrt}(X^2_{\text{user}} + Y^2_{\text{user}}) \geq R_c \quad (4.1)$$

, όπου R_{user} , η ακτίνα του χρήστη, ως προς το tier του πολυκυψελωτού συστήματος, ενώ R_c η ακτίνα του tier του συστήματος, με άλλα λόγια δεν

πρέπει να βρίσκεται εκτός των γεωμετρικών ορίων του συστήματος, όπως αυτά έχουν προκύψει από τις ακμές του κυψελών.



Σχήμα 21. Απεικόνιση πολυκυψελωτού OFDMA συστήματος, με Tier, χωρισμένο σε τομείς 120°

Στην συνέχεια των προσομοιώσεων, γίνεται ενασχόληση με τη ζεύξη καθόδου (downlink), όπου οι σταθμοί βάσης των κυψελών, επικοινωνούν με τους χρήστες, μέσω N OFDMA φερόντων, τα οποία αποτελούν το συνολικό εύρος ζώνης BandWidth (BW). Λόγω της επαναχρησιμοποίησης φερόντων μεταξύ χρηστών διαφορετικών κυψελών, κάθε κυψέλη περιλαμβάνει το συνολικό εύρος ζώνης BW, οπότε προκύπτει ότι κάθε φέρον μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί σε διαφορετικές κυψέλες, από διαφορετικούς χρήστες, με την προϋπόθεση πάντα, ότι οι τελευταίοι ανήκουν/εξυπηρετούνται από διαφορετικές κυψέλες. Εντός της ίδιας κυψέλης, τα φέροντα δεν μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν, καθώς εκχωρούνται στους χρήστες κατ' αποκλειστικότητα.

Αφού υπεισέλθει ο χρήστης εντός του συστήματος, υπολογίζονται οι απώλειες διάδοσης (Path Losses), από όλους τους σταθμούς βάσης (BS) του συστήματος, κάνοντας χρήση του μοντέλου Okumura-Hata:

$$PL=137,4 + 35,2 \cdot 10 \log(\text{distance}_{u,C}) \quad (4.2)$$

, ενώ υπολογίζεται επιπρόσθετα και η επίδραση της σκίασης με διασπορά $\sigma=8\text{dB}$.

Οι απώλειες που υφίσταται κάθε χρήστης (ή αλλιώς το κέρδος ανάμεσα στο κανάλι της κυψέλης C και τον χρήστη U), από το σύνολο των σταθμών βάσης των κυψελών, προκύπτουν από το άθροισμα των απωλειών διάδοσης (PL) και της επίδρασης της σκίασης (σ) της (εκάστοτε) κυψέλης, σε σχέση με τον υπο εξέταση χρήστη:

$$\text{Losses}=\text{PL}+\sigma \quad (4.3)$$

Αφού υπολογιστούν οι απώλειες του χρήστη, ως προς κάθε κυψέλη του συστήματος, και τοποθετηθούν στον αντίστοιχο πίνακα, γίνεται επιλογή του σταθμού βάσης από τον οποίο εξυπηρετείται και πραγματοποιείται εκχώρηση των φερόντων (εκχώρηση εύρους ζώνης δηλαδή), βάσει της μικρότερης τιμής των απωλειών, της καλύτερης δηλαδή ποιότητας καναλιού, όπως την αντιλαμβάνεται ο εκάστοτε χρήστης.

Αφού υπολογιστεί η γωνία του χρήστη, ως προς τη κυψέλη στην οποία ανήκει επιλέγεται ο τομέας (sector), τον οποίο βλέπει ο χρήστης, ώστε να γίνει χρήση στη πορεία της προσομοίωσης, κατά τον έλεγχο ισχύος.

Οι συνολικές απώλειες του χρήστη υπολογίζονται, αφού ληφθούν υπόψη το κέρδος σταθμού βάσης G_b , το κέρδος του κινητού τερματικού G_m και ο συντελεστής γωνιακής εξασθένισης της κεραίας του σταθμού βάσης $A(\theta)$:

$$\text{Total Losses}=\text{PL}+\sigma+G_b+G_m+A(\theta) \quad (4.4)$$

Στη παρούσα διπλωματική θεωρούμε ότι:

- $G_b=14$ dB
- $G_m=0$ dB
- $A(\theta)=0$ dB, για τους τομείς (sectors) που “βλέπει” ο χρήστης, ενώ $A(\theta)=20$ dB, για τους υπόλοιπους

4.3 Αλγόριθμοι κατανομής φερόντων

Η επιλογή αλγόριθμου/στρατηγικής κατανομής των φερόντων της κυψέλης που τον εξυπηρετεί, στον χρήστη, αποτελεί μια αρκετά σημαντική διαδικασία, όσον αφορά τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Η επιλογή του αριθμού των φερόντων, καθώς και τα φερόντα, που πρόκειται να εκχωρηθούν στο χρήστη (subcarrier allocation) είναι άμεσα εξαρτημένα τόσο με τον αριθμό των χρηστών που γίνονται αποδεκτοί από το σύστημα, όσο και με το συνολικό ρυθμό δεδομένων (ρυθμοαπόδοση ή throughput), που προσφέρεται από το σύστημα.

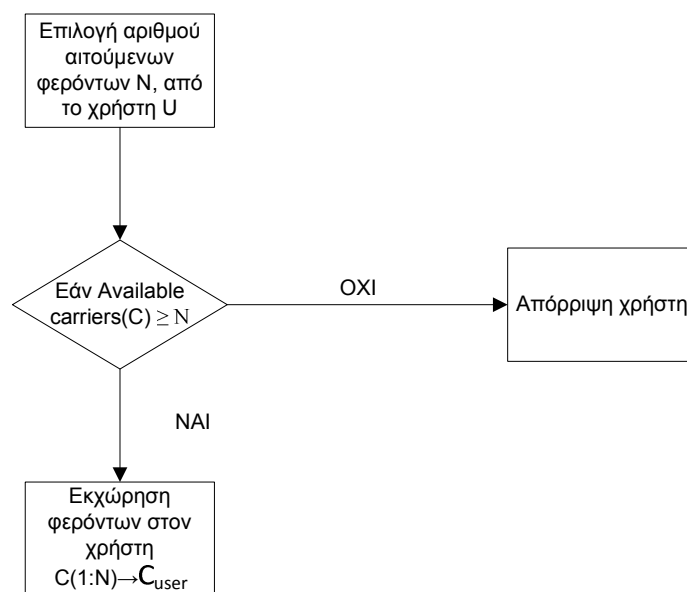
Υπάρχουν αρκετές στρατηγικές κατανομής φερόντων στους χρήστες, ώστε να εξασφαλισθεί, ο καλύτερος κατά το δυνατόν συνδυασμός

αποδοτικότητας και ποιότητας του κυψελωτού συστήματος OFDMA. Στην παρούσα διπλωματική εργασία πρόκειται να γίνει χρήση των παρακάτω αλγορίθμων κατανομής [36,37,38,39]:

- Σειριακός αλγόριθμος
- Τυχαίος αλγόριθμος
- Συντεταγμένος αλγόριθμος

4.3.1 Σειριακός αλγόριθμος

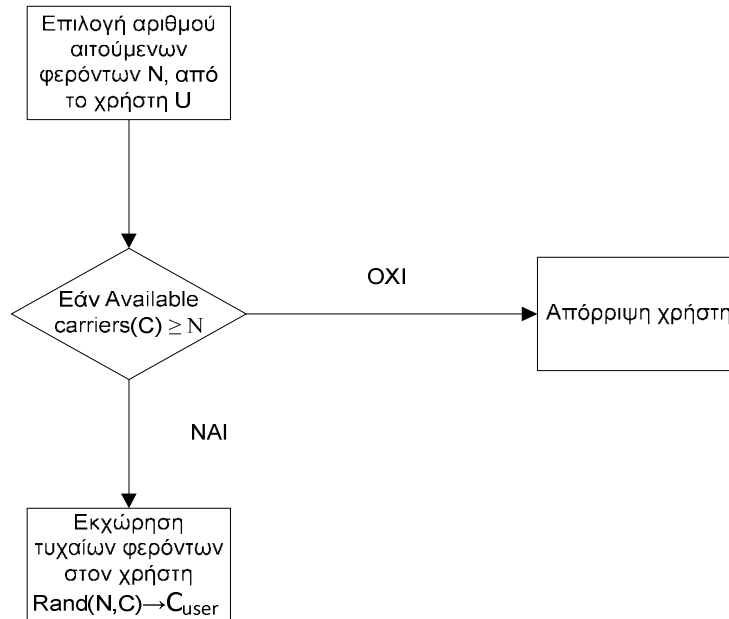
Ο αλγόριθμος σειριακής κατανομής φερόντων στον χρήστη αποτελεί μια από τις πιο απλοϊκές στρατηγικές κατανομής φερόντων, καθώς στερείται ευφυίας, με αποτέλεσμα να οδηγεί σε σημαντικές (ομοδιαυλικές) παρεμβολές μεταξύ των χρηστών κοντινών κυψελών, σε συστήματα με περισσότερες από μια κυψέλες. Σε κάθε νέο χρήστη U , που υπεισέρχεται στο σύστημα, γίνεται εκχώρηση των πρώτων N φερόντων, της κυψέλης C , από την οποία εξυπηρετείται ο χρήστης.



Σχήμα 22. Διάγραμμα ροής σειριακού αλγόριθμου

4.3.2 Τυχαίος αλγόριθμος

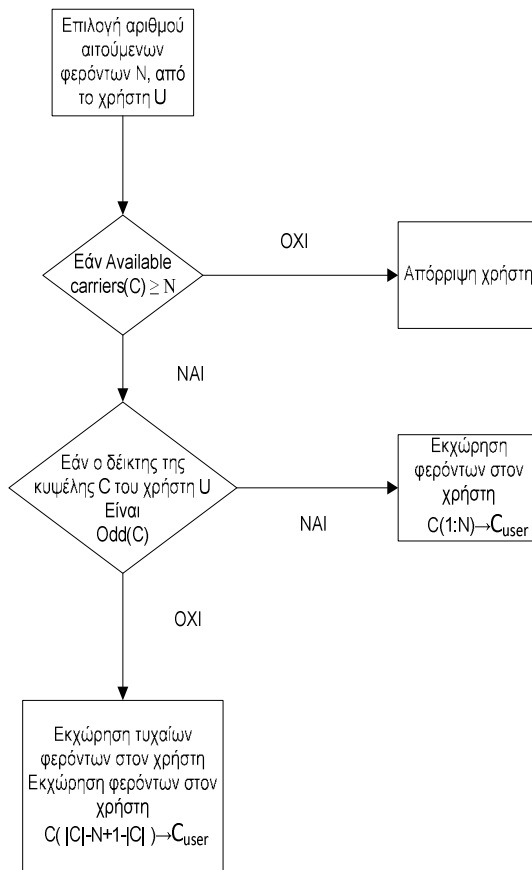
Αποτελεί μια γνωστή τεχνική, καθώς έχει ήδη προταθεί από τα δίκτυα 2^{ης} γενιάς, και αποσκοπεί στον ομοιόμορφο διαμορισμό των φερόντων στους χρήστες, άρα και των ομοδιαυλικών παρεμβολών. Σε κάθε νέο χρήστη U επιλέγονται κι εκχωρούνται με τυχαίο τρόπο, N φέροντα, της κυψέλης C , η οποία εξυπηρετεί τον χρήστη.



Σχήμα 23. Διάγραμμα ροής τυχαίου αλγόριθμου

4.3.3 Συντεταγμένος αλγόριθμος

Από τις πλέον αποδοτικές στρατηγικές αλγορίθμων κατανομής φερόντων στους χρήστες, καθώς μειώνεται η πιθανότητα ταυτόχρονης χρησιμοποίησης του ίδιου φέροντος από διαφορετικούς χρήστες (σε διαφορετικές προφανώς κυψέλες). Σε ένα πολυκυψελωτό σύστημα OFDMA, οι κυψέλες χωρίζονται με βάση τον δείκτη τους σε κυψέλες με περιττό δείκτη και σε κυψέλες με άρτιο δείκτη. Σε κάθε νέο χρήστη U , εάν η κυψέλη C που τον εξυπηρετεί έχει περιττό δείκτη, τότε επιλέγονται κι εκχωρούνται τα πρώτα N φέροντα αυτής, ειδάλως εάν έχει άρτιο δείκτη επιλέγονται τα τελευταία N φέροντα.



Σχήμα 24. Διάγραμμα ροής συντεταγμένου αλγόριθμου

4.4 Έλεγχος ισχύος

Η επιθυμητή επίτευξη επικοινωνίας μεταξύ του χρήστη U , με τον σταθμό βάσης BS , της κυψέλης C που χρησιμοποιεί, κάνοντας χρήση του φέροντος n από το σύνολο των φερόντων N , που έχουν εκχωρηθεί στον χρήστη, υποστηρίζοντας ένα συγκεκριμένο επίπεδο διαμόρφωσης, προϋποθέτει ο λόγος σήματος προς παρεμβολή και θόρυβο που λαμβάνει ο χρήστης (Signal to Interference plus Noise Ratio – SINR), να μην υπερβαίνει ένα ελάχιστο κατώφλι σήματος προς παρεμβολή και θόρυβο (SINR), το οποίο προκύπτει από τη τιμή του μέγιστου επιθυμητού επιπέδου διαμόρφωσης.

Ο λόγος σήματος προς παρεμβολή και θόρυβο του χρήστη C ως προς το φέρον n του σταθμού βάσης BS της κυψέλης C από την οποία εξυπηρετείται ($SINR_{u,n,C}$) προκύπτει από τη σχέση:

$$SINR_{u,n,C} = \frac{P_1}{TL_{11}} / \left(\frac{P_2}{TL_{12}} + \dots + \frac{P_m}{TL_{1m}} + \text{Noise} \right) \quad (4.5)$$

, όπου P_i η εκπεμπόμενη ισχύς του χρήστη i , TL_{ii} οι συνολικές απώλειες του χρήστη i ως προς τον σταθμό βάσης που ανήκει και TL_{ij} οι συνολικές απώλειες του χρήστη i ως προς το σταθμό βάσης που ανήκει ο χρήστης j , ενώ με τον όρο Noise εννοούμε το θόρυβο από τον οποίο υποφέρει το σήμα και για τις προσομοιώσεις θεωρείται ίσος με $\text{Noise} = -103 \text{ dBm}$.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, για την επίτευξη επικοινωνίας μεταξύ του χρήστη U και του σταθμού βάσης BS θα πρέπει να ισχύει η σχέση:

$$\text{SINR}_{u,n,C} \geq \text{SINR}_{\text{modulation}} \quad (4.6)$$

, όπου για τις διαμορφώσεις (QPSK, 16QAM, 64QAM), που πρόκειται να λάβουν χώρα στις προσομοιώσεις της παρούσας διπλωματικής, τα κατώφλια SINR που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν δίνονται στον κάτωθι πίνακα:

Διαμόρφωση	Τιμή (dB)
QPSK	9,6
16QAM	16,4
64QAM	22,6

Πίνακας 1. Τιμές SINR για τις διαμορφώσεις QPSK, 16QAM, 64QAM

Κάνοντας αναδιάταξη της προηγούμενης σχέσης, λαμβάνουμε μια σειρά ανισώσεων οι οποίες θα πρέπει να τηρούνται για κάθε ενεργή κυψέλη C στο φέρον n που έχει εκχωρηθεί στο χρήστη U , ενώ από την (γραμμική) επίλυση του συστήματος αυτών λαμβάνουμε ένα διάνυσμα ή ένα σύνολο διανυσμάτων, της εκπεμπόμενης ισχύος $P_{u,n}$, που αφορά την ισχύ του χρήστη ή των χρηστών, στο συγκεκριμένο φέρον, για το οποίο πραγματοποιήθηκε έλεγχος ισχύος. Οι τιμές της ισχύος αφορούν τους χρήστες, στους οποίους έχει εκχωρηθεί το συγκεκριμένο φέρον. Θα πρέπει φυσικά να ληφθεί υπόψη και η ύπαρξη της ισχύος της ομοδιαυλικής παρεμβολής, που λαμβάνεται από το χρήστη U χρησιμοποιώντας το φέρον n της κυψέλης C κι αφορά το σύνολο των παρεμβολών που προκαλούνται από τους άλλους χρήστες που έχουν καταλάβει επίσης το συγκεκριμένο φέρον, σε διαφορετικές προφανώς κυψέλες.

Ως αποδεκτό διάνυσμα ισχύος εκπομπής λαμβάνεται εκείνο, για το οποίο ισχύει ότι $P_{u,n} > 0$. Σε περίπτωση μηδενικού διανύσματος ισχύος $P_{u,n} = 0$, το φέρον n στο σταθμό βάση BS της κυψέλης C είναι ανενεργό. Τέλος, σε περίπτωση εύρεσης διανύσματος αρνητικής ισχύος $P_{u,n} < 0$, οι εν λόγω ομοδιαυλικοί χρήστες δεν μπορούν να χρησιμοποιήσουν το αυτό φέρον n , καθώς η ομοδιαυλική ισχύς θα είναι υπερβολικά μεγάλη, ενώ και η τιμή του SINR τους κάτω από το επιθυμητό επίπεδο.

4.5 Αλγόριθμοι διαχείρισης ασύρματων πόρων

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η υλοποίηση μιας σειράς αλγορίθμων εισαγωγής χρηστών, σε ένα πολυκυψελωτό σύστημα OFDMA, με απώτερο σκοπό την ελαχιστοποίηση της συνολικής εκπεμπόμενης ισχύς, αλλά και της ισχύος ανα αποδεκτό χρήστη, εντός του συστήματος διατηρώντας όσο το δυνατόν ακέραιη την προσφερόμενη υπηρεσία (QoS) του στους χρήστες. Οι χρήστες αυτοί έχουν την δυνατότητα να εισέρχονται και να εξέρχονται του συστήματος δίνοντας την δυνατότητα, η αλλαγή των συνθηκών των καναλιών και της κίνησης, να μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου, προσαρμόζοντας το σύστημα στις μεταβαλλόμενες συνθήκες του περιβάλλοντος.

Επιπλέον, σημαντική παράμετρο αποτελεί η διαχείριση των αλλαγών των χαρακτηριστικών, των ήδη υπάρχοντων χρηστών, κατά την διαδικασία εισόδου νέων χρηστών στο σύστημα. Είναι αναγκαστικά λοιπόν, η ύπαρξη ενός προσαρμοστικού μηχανισμού, ώστε να μην προκληθεί υποβάθμιση της προσφερόμενης υπηρεσίας στους ήδη υπάρχοντες χρήστες, λόγω και της ύπαρξης της ομοδιαυλικής παρεμβολής, λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη και τις απαιτήσεις των νέων (εισερχόμενων) χρηστών στο κυψελωτό σύστημα.

Στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου γίνεται παρουσίαση μιας σειράς αλγορίθμων, με σκοπό την ικανοποίηση των παραπάνω συνθηκών.

4.5.1 Μοναδική διαμόρφωση – Αλγόριθμος σταθερής εκχώρησης - απομάκρυνση τελευταίου εισερχόμενου χρήστη

Ο αλγόριθμος μοναδικής διαμόρφωσης, με απομάκρυνση του τελευταίου εισερχόμενου χρήστη, σε ένα πολυκυψελωτό σύστημα OFDMA αποτελεί την πιο απλοϊκή περίπτωση, από όσους αλγόριθμους πρόκειται να προσομοιωθούν στην παρούσα διπλωματική.

Αφού αρχικά εισέλθει ο χρήστης U στο σύστημα, λαμβάνει μια σειρά από βασικές παρεμέτρους, τις οποίες και καταχωρεί σε συγκεκριμένους πίνακες/μήτρες εκχώρησης. Στη συνέχεια υπολογίζονται σημαντικά δεδομένα του χρήστη για την προσομοίωση (απόσταση από σταθμό βάσης, απώλειες, συνολικές απώλειες, σταθμός βάσης που τον εξυπηρετεί), και δίνεται ένας συγκεκριμένος αριθμός φερόντων N προς εκχώρηση.

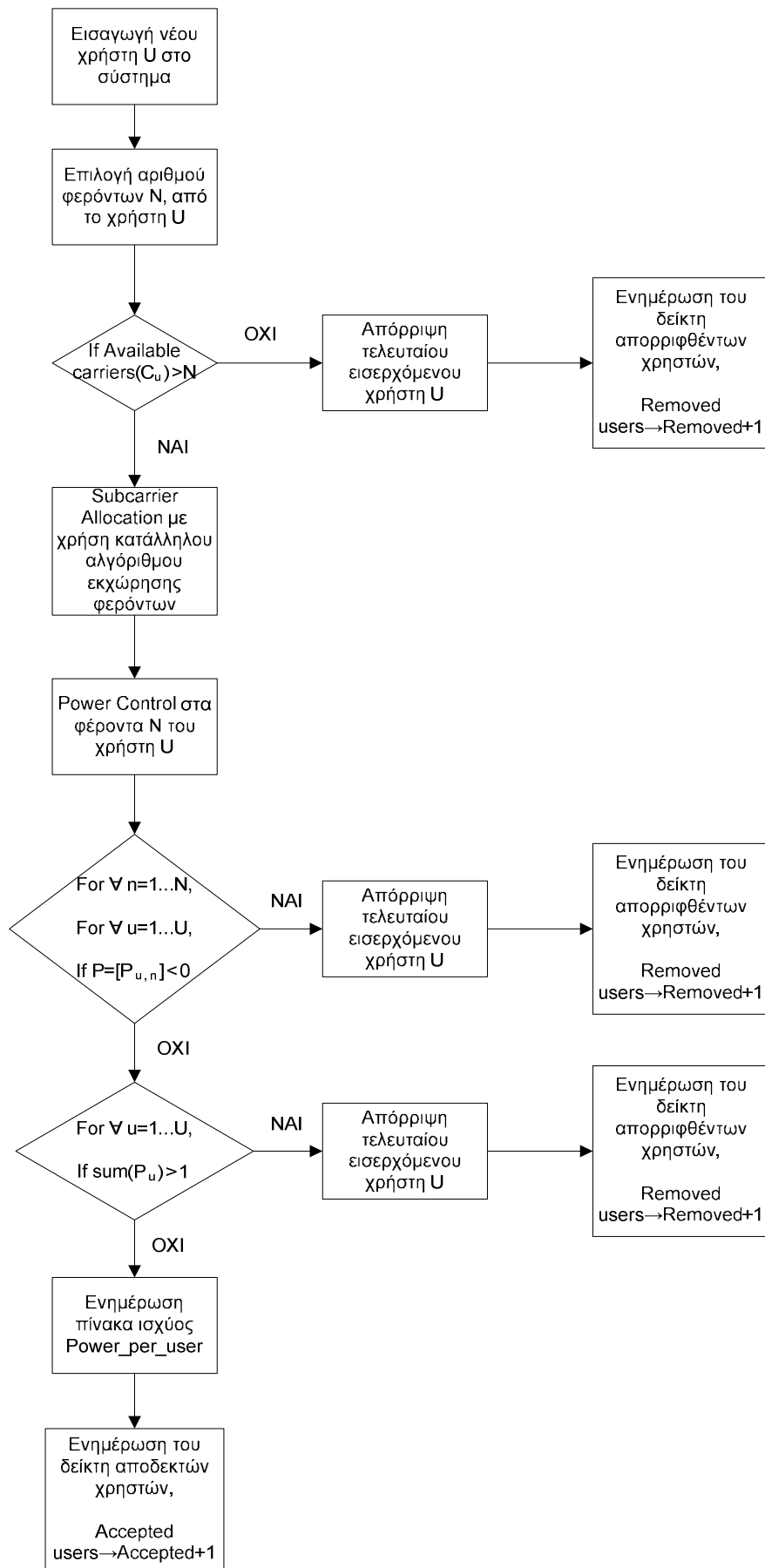
Εξετάζεται αρχικά, η διαθεσιμότητα του πλήθους των ζητούμενων φερόντων, στη κυψέλη C του σταθμού βάσης BS που τον εξυπηρετεί. Εάν δεν υπάρχει διαθεσιμότητα απορρίπτεται ο τελευταίος εισερχόμενος χρήστης.

Στη συνέχεια, εφόσον υπάρχει διαθεσιμότητα του ζητούμενου πλήθους φερόντων, γίνεται εκχώρηση N φερόντων, από τη κυψέλη $C(U)$, κάνοντας χρήση της κατάλληλης στρατηγικής φερόντων κατανομής (random, coordinated ή sequential) στον χρήστη U .

Ακολουθεί, ο έλεγχος ισχύος (Power Control) στα φέροντα N που έχουν εκχωρηθεί στον εισερχόμενο χρήστη U , για όλους τους χρήστες που έχουν καταλάβει κάποιο αντίστοιχο από τα παραπάνω σε άλλη κυψέλη, με σκοπό την ενημέρωση του συστήματος, λόγω της ύπαρξης των ομοδιαυλικών παρεμβολών μεταξύ των χρηστών με ίδια φέροντα σε διαφορετικές κυψέλες.

Μετά το πέρας του Power Control, εάν δεν εντοπιστεί χρήστης με αρνητικό διάνυσμα ισχύος ή συνολική ισχύ άνω του 1 watt, ο χρήστης γίνεται αποδεκτός και γίνεται, εκ νέου, ενημέρωση της μήτρας ισχύος ανα χρήστη του συστήματος. Σε αντίθετη περίπτωση, ο χρήστης απορρίπτεται από το σύστημα.

Στη συνέχεια δίνεται μια διαγραμματική απεικόνιση (σχήμα 25) του αλγορίθμου που περιγράφηκε προηγουμένως.



Σχήμα 25. Αλγόριθμος μοναδικής διαμόρφωσης, με απόρριψη τελευταίου εισερχόμενου χρήστη

4.5.2 Μοναδική διαμόρφωση – Αλγόριθμος σταθερής εκχώρησης - απομάκρυνση προβληματικού χρήστη

Συγκριτικά με τον προηγούμενο αλγόριθμο, η ουσιαστική διαφοροποίηση έγκειται στην απόφαση απομάκρυνσης του χρήστη.

Αφού αρχικά εισέλθει ο χρήστης U στο σύστημα, λαμβάνει μια σειρά από βασικές παρεμέτρους, τις οποίες και καταχωρεί σε συγκεκριμένους πίνακες/μήτρες εκχώρησης. Στη συνέχεια υπολογίζονται σημαντικά δεδομένα του χρήστη για την προσομοίωση (απόσταση από σταθμό βάσης, απώλειες, συνολικές απώλειες, σταθμός βάσης που τον εξυπηρετεί) και δίνεται ένας συγκεκριμένος αριθμός φερόντων N προς εκχώρηση.

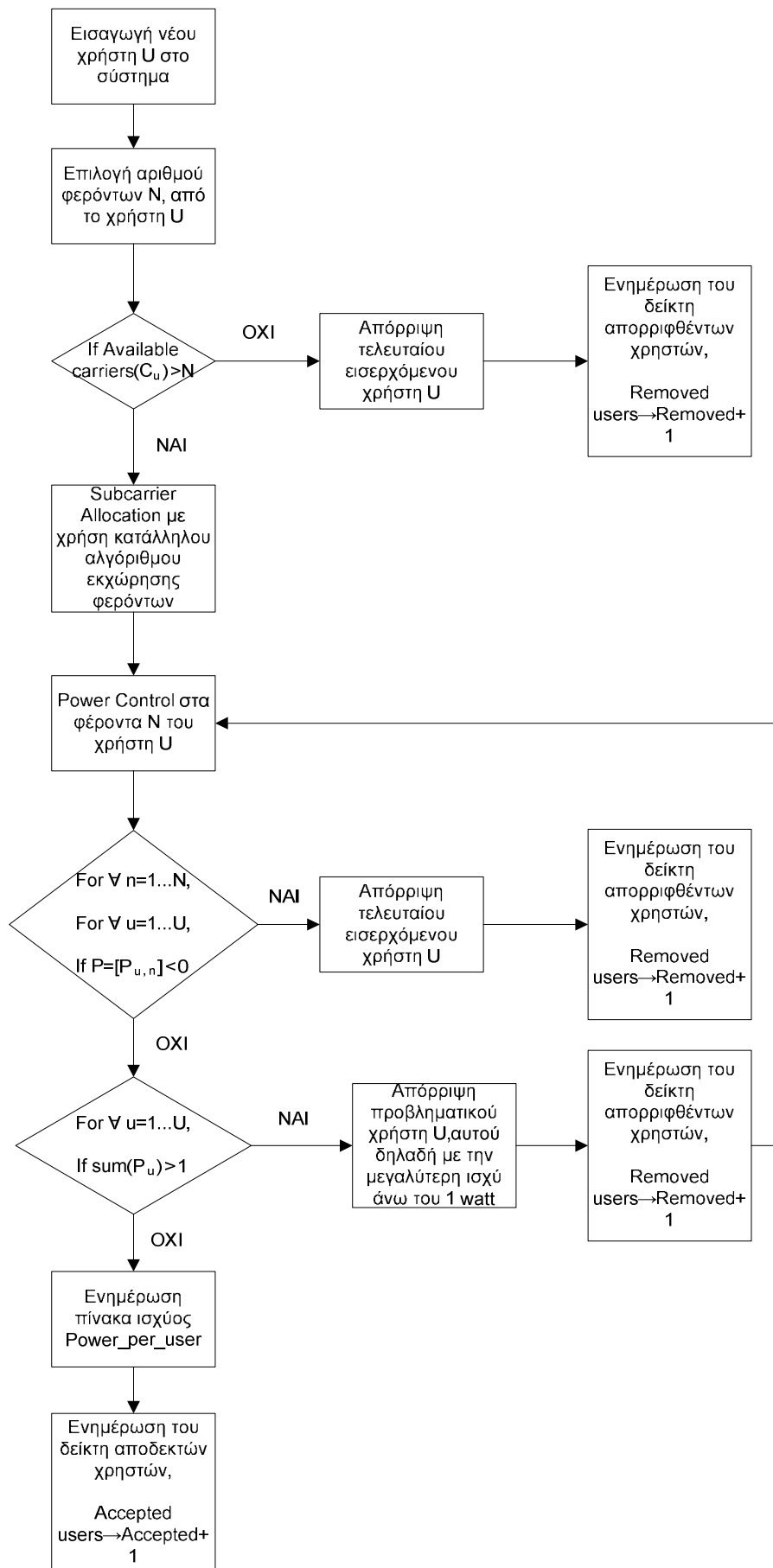
Εξετάζεται ξανά η διαθεσιμότητα του πλήθους των ζητούμενων φερόντων, στη κυψέλη C του σταθμού βάσης BS που τον εξυπηρετεί. Εάν δεν υπάρχει διαθεσιμότητα απορρίπτεται ο τελευταίος εισερχόμενος χρήστης.

Στη συνέχεια, εφόσον υπάρχει διαθεσιμότητα του ζητούμενου πλήθους φερόντων, γίνεται εκχώρηση N φερόντων, από τη κυψέλη $C(U)$, κάνοντας χρήση της κατάλληλης στρατηγικής φερόντων κατανομής (random, coordinated ή sequential) στον χρήστη U .

Ακολουθεί, ο έλεγχος ισχύος (Power Control) στα φέροντα N που έχουν εκχωρηθεί στον εισερχόμενο χρήστη U , για όλους τους χρήστες που έχουν καταλάβει κάποιο αντίστοιχο από τα παραπάνω σε άλλη κυψέλη, με σκοπό την ενημέρωση του συστήματος, λόγω της ύπαρξης των ομοδιαυλικών παρεμβολών μεταξύ των χρηστών με ίδια φέροντα σε διαφορετικές κυψέλες.

Μετά το πέρας του Power Control, εάν εντοπιστεί χρήστης με αρνητικό διάνυσμα ισχύος, γίνεται απόρριψη του τελευταίου εισερχόμενου χρήστη. Σε περίπτωση μη ύπαρξης αρνητικού διανύσματος ισχύος, γίνεται έλεγχος της συνολικής ισχύος κάθε χρήστη, του προβλήματος. Προβληματικός χρήστης νοείται αυτός με ισχύ άνω του 1 watt. Σε περίπτωση ύπαρξης παραπάνω του ενός χρήστη με ισχύ >1 watt, απορρίπτουμε αυτόν (τον προβληματικό) με τη μεγαλύτερη τιμή. Επαναλαμβάνουμε τον έλεγχο ισχύος και την προηγούμενη διαδικασία, μέχρι να απορριφθούν, όλοι οι προβληματικοί χρήστες, που έχουν υπεισέλθει στο σύστημα. Σε περίπτωση αποδεκτού χρήστη ενημερώνεται εκ νέου ο πίνακας ισχύος ανά χρήστη.

Στη συνέχεια δίνεται η διαγραμματική απεικόνιση (σχήμα 26) του αλγορίθμου που περιγράφηκε προηγουμένως.



Σχήμα 26. Αλγόριθμος μοναδικής διαμόρφωσης, με απόρριψη προβληματικού χρήστη

4.5.3 Μοναδική διαμόρφωση – Προσαρμοστικός αλγόριθμος εκχώρησης φερόντων με κριτήριο την ισχύ DP

Σε σχέση με τους προηγούμενους αλγόριθμους, που ο κάθε χρήστης U λαμβάνει σταθερό αριθμό N φερόντων, σε αυτή τη περίπτωση κριτήριο εκχώρησης φερόντων σε κάθε χρήστη αποτελεί η διαφορά ισχύος που προκαλείται, μετά την-πιθανή-εκχώρηση ενός φέροντος.

Αφού αρχικά εισέλθει ο χρήστης U στο σύστημα, λαμβάνει μια σειρά από βασικές παρεμέτρους, τις οποίες και καταχωρεί σε συγκεκριμένους πίνακες/μήτρες εκχώρησης. Στη συνέχεια υπολογίζονται σημαντικά δεδομένα του χρήστη για την προσομοίωση (απόσταση από σταθμό βάσης, απώλειες, συνολικές απώλειες, σταθμός βάσης που τον εξυπηρετεί) και δίνεται ένας μέγιστος αριθμός φερόντων N_{max} , ο οποίος μπορεί να εκχωρηθεί σε αυτόν.

Με τον όρο διαφορά ισχύος ανά φέρον, ονομάζουμε ένα μέγιστο κατώφλι ισχύος που προκύπτει από τη σχέση: $DP=1/N_{max}$, όπου σε περίπτωση υπέρβασης αυτού κατά την εκχώρηση ενός φέροντος, αυτό απορρίπτεται.

Εξετάζεται ξανά η διαθεσιμότητα του πλήθους των ζητούμενων φερόντων, στη κυψέλη C του σταθμού βάσης BS που τον εξυπηρετεί. Εάν δεν υπάρχει διαθεσιμότητα απορρίπτεται ο τελευταίος εισερχόμενος χρήστης.

Στη συνέχεια, εφόσον υπάρχει διαθεσιμότητα του ζητούμενου πλήθους φερόντων, γίνεται εκχώρηση N φερόντων, από τη κυψέλη $C(U)$, κάνοντας χρήση της κατάλληλης στρατηγικής φερόντων κατανομής (random, coordinated ή sequential) στον χρήστη U .

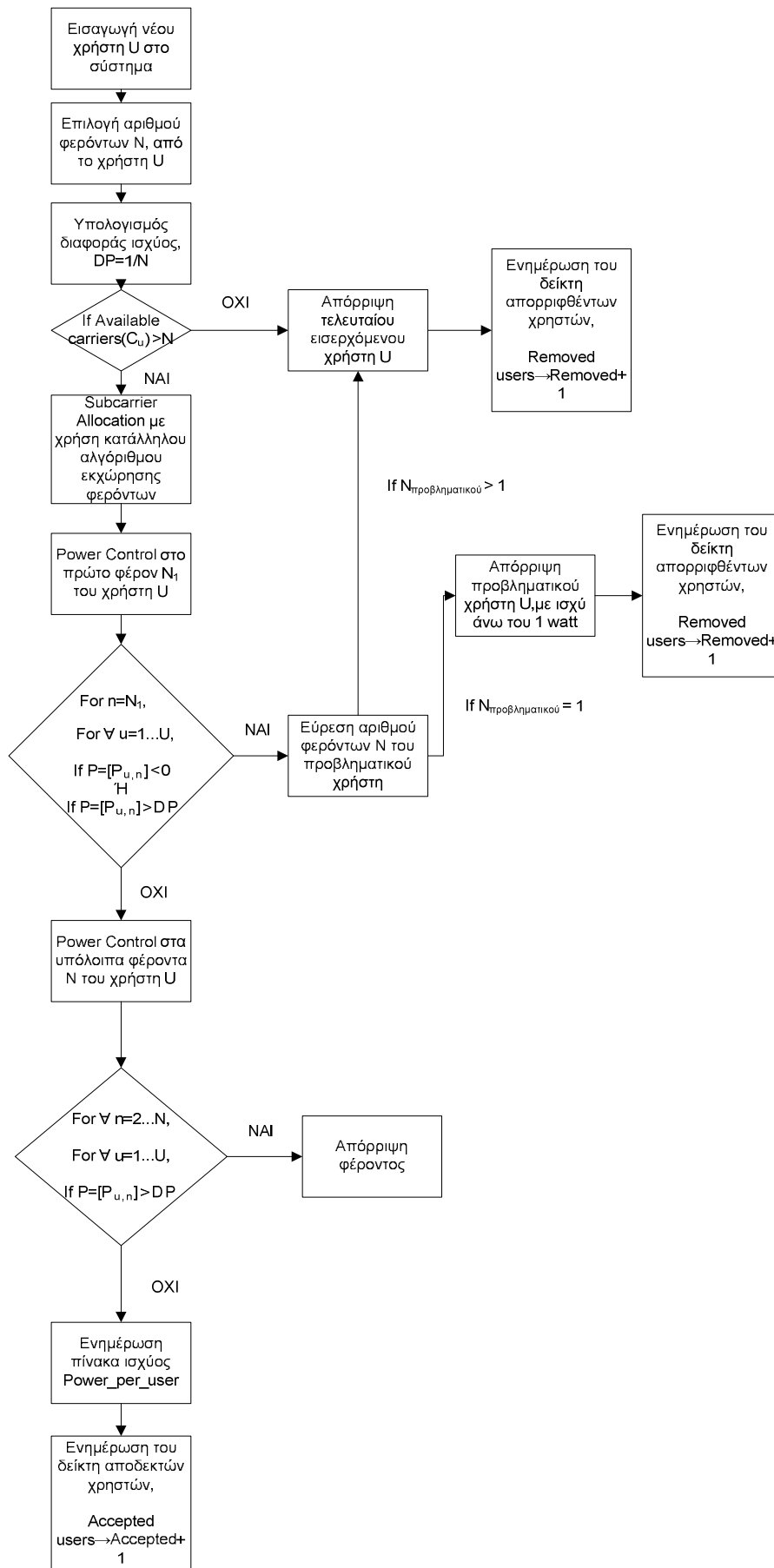
Ακολουθεί, ο έλεγχος ισχύος (Power Control) στα φέροντα N που έχουν εκχωρηθεί στον εισερχόμενο χρήστη U , για όλους τους χρήστες που έχουν καταλάβει κάποιο αντίστοιχο από τα παραπάνω σε άλλη κυψέλη, με σκοπό την ενημέρωση του συστήματος, λόγω της ύπαρξης των ομοδιαυλικών παρεμβολών μεταξύ των χρηστών με ίδια φέροντα σε διαφορετικές κυψέλες.

Μετά το πέρας του Power Control στο πρώτο προς εκχώρηση φέρον, εάν εντοπιστεί χρήστης με αρνητικό διάνυσμα ισχύος ή ισχύ άνω του DP υπολογίζουμε τον αριθμό των $N_{\text{προβληματικού}}$ φερόντων του προβληματικού χρήστη κι εάν αυτός είναι $=1$, απορρίπτουμε τον προβληματικό (μπαίνει ένας με ένα φέρον και βγαίνει με ένας με επίσης ένα, οπότε έχουμε ισορροπία στο σύστημα), ενώ εάν >1 τότε απορρίπτουμε τον τελευταίο εισερχόμενο χρήστη. Σε περίπτωση που ο προβληματικός χρήστης συμπίπτει με τον τελευταίο, απορρίπτουμε αυτόν.

Εάν δεν εντοπιστεί σφάλμα στο 1° φέρον, κατά το Power Control, ο χρήστης γίνεται αποδεκτός και κάνουμε έλεγχο για εκχώρηση ή μη και των υπόλοιπων φερόντων. Σε περίπτωση που κατά την διαδικασία του ελέγχου

ισχύος στο εκάστοτε φέρον, δεν ξεπεραστεί το κατώφλι DP, που ορίστηκε προηγουμένως, το φέρον εκχωρείται στον χρήστη U κι ενημερώνεται ο πίνακας ισχύος ανά χρήστη, ειδάλλως το φέρον απορρίπτεται και συνεχίζεται ο έλεγχος ισχύος στο επόμενο προς εκχώρηση φέρον, μέχρι το πέρας της διαδικασίας, όπου και καθορίζεται ο συνολικός αριθμός φερόντων που κατανέιμεται στον χρήστη με βάση την ισχύ DP.

Στη συνέχεια δίνεται η διαγραμματική απεικόνιση (σχήμα 27) του αλγορίθμου που περιγράφηκε προηγουμένως.



Σχήμα 27. Αλγόριθμος μοναδικής διαμόρφωσης, με προσαρμοστική εκχώρηση φερόντων βάσει της ισχύος DP

4.5.4 Προσαρμοστική διαμόρφωση – Προσαρμοστικός αλγόριθμος εκχώρησης φερόντων με κριτήριο την ισχύ DP

Ο αλγόριθμος ακολουθεί ακριβώς τα ίδια βήματα με τον αλγόριθμο 4.5.3, με την διαφορά ότι στο τέλος γίνεται απόπειρα υψηλότερης διαμόρφωσης στα ήδη εκχωρημένα N φέροντα, του αποδεκτού χρήστη U .

Η βασική διαμόρφωση, που χρησιμοποιείται στους αλγόριθμους μοναδικής διαμόρφωσης είναι η BPSK. Αφού ολοκληρωθεί ο έλεγχος ισχύος και τα κριτήρια αποδοχής ή απόρριψης του εισερχόμενου χρήστη U , γίνεται έλεγχος για υψηλότερη διαμόρφωση της τάξης 16QAM ή ακόμα και 64QAM, για ακόμα καλύτερη ποιότητα υπηρεσίας στον χρήστη.

Αφού αρχικά εισέλθει ο χρήστης U στο σύστημα, λαμβάνει μια σειρά από βασικές παρεμέτρους, τις οποίες και καταχωρεί σε συγκεκριμένους πίνακες/μήτρες εκχώρησης. Στη συνέχεια υπολογίζονται σημαντικά δεδομένα του χρήστη για την προσομοίωση (απόσταση από σταθμό βάσης, απώλειες, συνολικές απώλειες, σταθμός βάσης που τον εξυπηρετεί) και δίνεται ένας μέγιστος αριθμός φερόντων N_{max} , ο οποίος μπορεί να εκχωρηθεί σε αυτόν.

Με τον όρο διαφορά ισχύος ανά φέρον, ονομάζουμε ένα μέγιστο κατώφλι ισχύος που προκύπτει από τη σχέση: $DP=1/N_{max}$, όπου σε περίπτωση υπέρβασης αυτού κατά την εκχώρηση ενός φερόντος, αυτό απορρίπτεται.

Εξετάζεται ξανά η διαθεσιμότητα του πλήθους των ζητούμενων φερόντων, στη κυψέλη C του σταθμού βάσης BS που τον εξυπηρετεί. Εάν δεν υπάρχει διαθεσιμότητα απορρίπτεται ο τελευταίος εισερχόμενος χρήστης.

Στη συνέχεια, εφόσον υπάρχει διαθεσιμότητα του ζητούμενου πλήθους φερόντων, γίνεται εκχώρηση N φερόντων, από τη κυψέλη $C(U)$, κάνοντας χρήση της κατάλληλης στρατηγικής φερόντων κατανομής (random, coordinated ή sequential) στον χρήστη U .

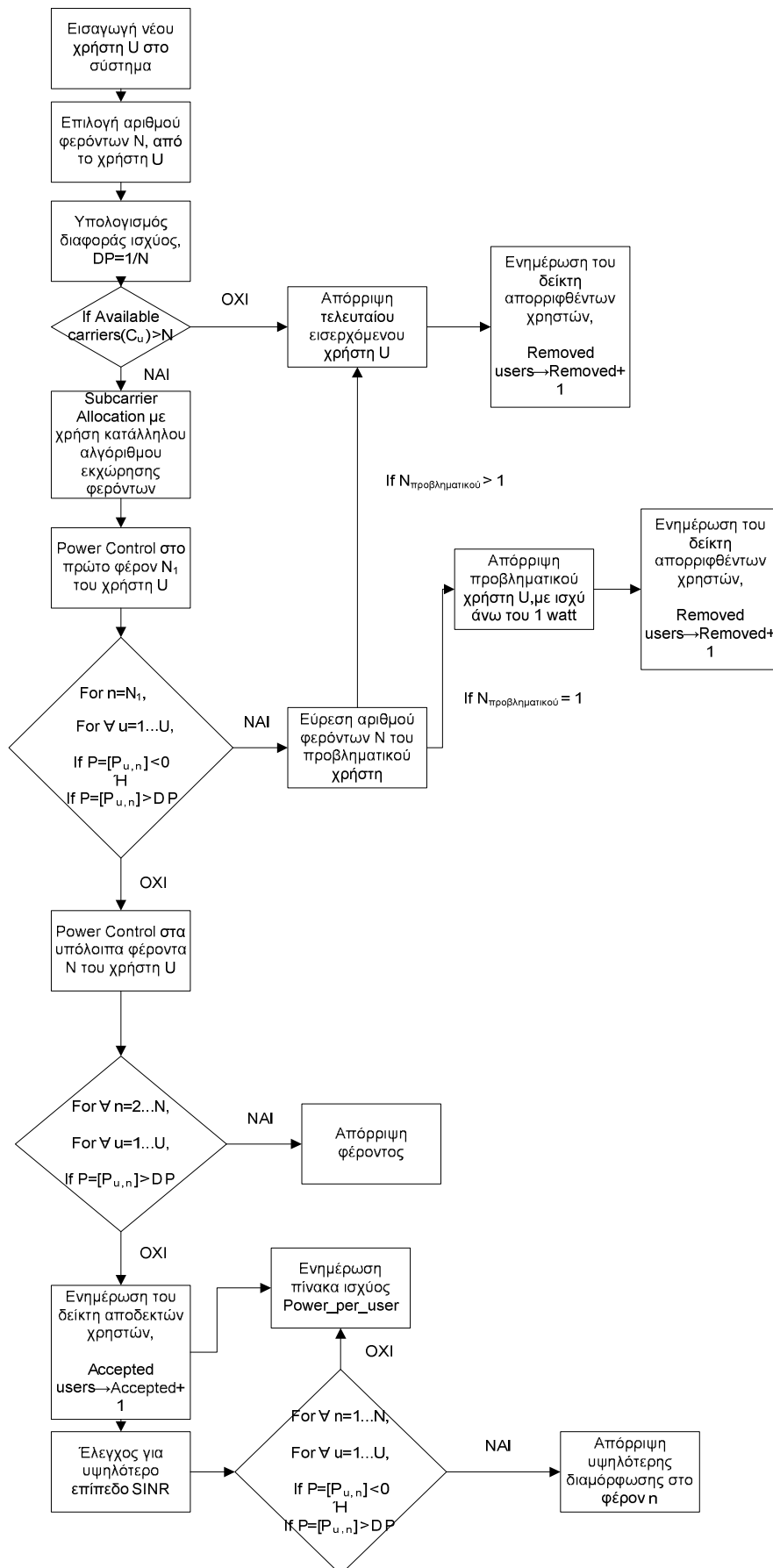
Ακολουθεί, ο έλεγχος ισχύος (Power Control) στα φέροντα N που έχουν εκχωρηθεί στον εισερχόμενο χρήστη U , για όλους τους χρήστες που έχουν καταλάβει κάποιο αντίστοιχο από τα παραπάνω σε άλλη κυψέλη, με σκοπό την ενημέρωση του συστήματος, λόγω της ύπαρξης των ομοδιαυλικών παρεμβολών μεταξύ των χρηστών με ίδια φέροντα σε διαφορετικές κυψέλες.

Μετά το πέρας του Power Control στο πρώτο φέρον προς εκχώρηση, εάν εντοπιστεί χρήστης με αρνητικό διάνυσμα ισχύος ή ισχύ άνω του DP υπολογίζουμε τον αριθμό των $N_{\text{προβληματικού}}$ φερόντων του προβληματικού χρήστη κι εάν αυτός είναι $=1$, απορρίπτουμε τον προβληματικό (μπαίνει ένας με ένα φέρον και βγαίνει με ένας με επίσης ένα, οπότε έχουμε ισορροπία), ενώ εάν >1 τότε απορρίπτουμε τον τελευταίο εισερχόμενο χρήστη. Σε περίπτωση που ο προβληματικός χρήστης συμπίπτει με τον τελευταίο, απορρίπτουμε αυτόν.

Εάν δεν εντοπιστεί σφάλμα στο 1^ο φέρον, κατά το Power Control, ο χρήστης γίνεται αποδεκτός και κάνουμε έλεγχο για εκχώρηση ή μη και των υπόλοιπων φερόντων. Σε περίπτωση που κατά την διαδικασία του ελέγχου ισχύος στο εκάστοτε φέρον, δεν ξεπεραστεί το κατώφλι DP, που ορίστηκε προηγουμένως, το φέρον εκχωρείται στον χρήστη U κι ενημερώνεται ο πίνακας ισχύος ανά χρήστη, ειδάλως το φέρον απορρίπτεται και συνεχίζεται ο έλεγχος ισχύος στο επόμενο προς εκχώρηση φέρον, μέχρι το πέρας της διαδικασίας, όπου και καθορίζεται ο συνολικός αριθμός φερόντων που καταναίμεται στον χρήστη με βάση την ισχύ DP.

Εφόσον ο εισερχόμενος χρήστης γίνει αποδεκτός από το σύστημα, πραγματοποιείται εκ νέου έλεγχος ισχύος με υψηλότερη διαμόρφωση (υψηλότερο SINR, επί πρακτέου), στα φέροντα του αποδεκτού χρήστη. Εάν, δεν υπάρξει χρήστης με αρνητικό διάνυσμα ισχύος ή τιμή άνω του κατωφλίου DP, το επίπεδο διαμόρφωσης γίνεται αποδεκτό, ενημερώνεται ο πίνακας ισχύος ανά χρήστη και ακολουθεί η ίδια διαδικασία στο επόμενο φέρον του χρήστη, ενώ σε αντίθετη περίπτωση επανερχόμαστε στο προηγούμενο επίπεδο διαμόρφωσης.

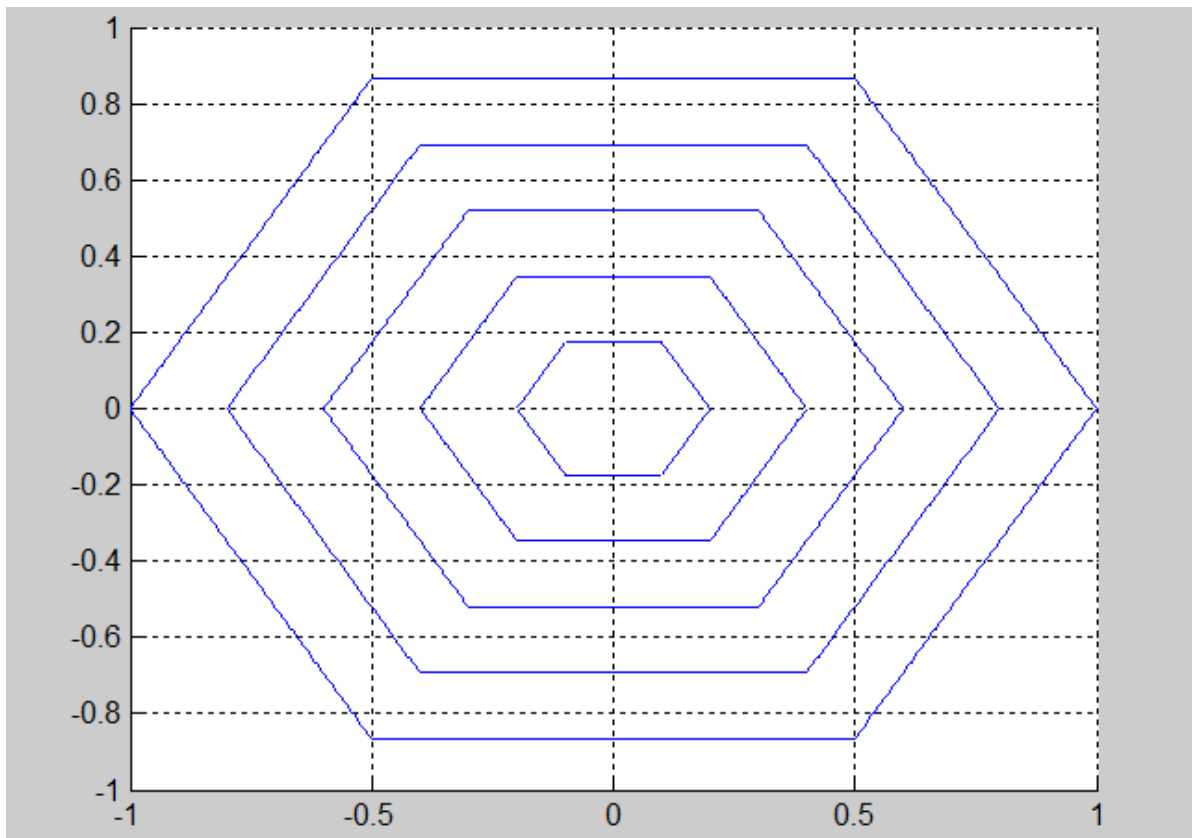
Στη συνέχεια δίνεται η διαγραμματική απεικόνιση (σχήμα 28) του αλγορίθμου που περιγράφηκε προηγουμένως.



Σχήμα 28. Αλγόριθμος προσαρμοστικής διαμόρφωσης, με προσαρμοστική εκχώρηση φερόντων βάσει της ισχύος DP

4.5.5 Μοναδική διαμόρφωση – Προσαρμοστικός αλγόριθμος εκχώρησης φερόντων με κριτήριο την απόσταση του χρήστη

Η συγκεκριμένη κατηγορία αλγορίθμων εντάσσεται σε αυτή της προσαρμοστικής εκχώρησης φερόντων, με τη διαφορά, ότι κριτήριο αποτελεί, η απόσταση του χρήστη από τον σταθμό BS της κυψέλης που τον εξυπηρετεί. Όπως φαίνεται κι από το σχήμα 29, η (εκάστοτε) κυψέλη χωρίζεται σε 5 τμήματα, σε καθένα από τα οποία ο χρήστης λαμβάνει συγκεκριμένο αριθμό φερόντων προς εκχώρηση. Στην περιοχή που βρίσκεται πιο κοντά στον σταθμό βάσης BS ο χρήστης U λαμβάνει 5 φέροντα προς εκχώρηση, ενώ κάθε μια ζώνη που απομακρύνεται, μειώνεται κατά ένα ο αριθμός των προς εκχώρηση φερόντων. Μέγιστη τιμή είναι τα 5 φέροντα (στην περιοχή 1, κοντά στον σταθμό βάσης), ενώ ελάχιστη το 1 φέρον (στην περιοχή στα άκρα της κυψέλης).



Σχήμα 29. Τομεοποίηση κυψελών-Προσαρμοστική εκχώρηση φερόντων με βάση την απόσταση του χρήστη από τον BS

Αφού αρχικά εισέλθει ο χρήστης U στο σύστημα, λαμβάνει μια σειρά από βασικές παραμέτρους, τις οποίες και καταχωρεί σε συγκεκριμένους πίνακες/μήτρες εκχώρησης. Στη συνέχεια υπολογίζονται σημαντικά δεδομένα του χρήστη για την προσομοίωση (απόσταση από σταθμό βάσης, απώλειες, συνολικές απώλειες, σταθμός βάσης που τον εξυπηρετεί) και δίνεται ένας συγκεκριμένος αριθμός φερόντων N προς εκχώρηση, με βάση τη θέση του στη κυψέλη, όπως περιγράφηκε προηγουμένως.

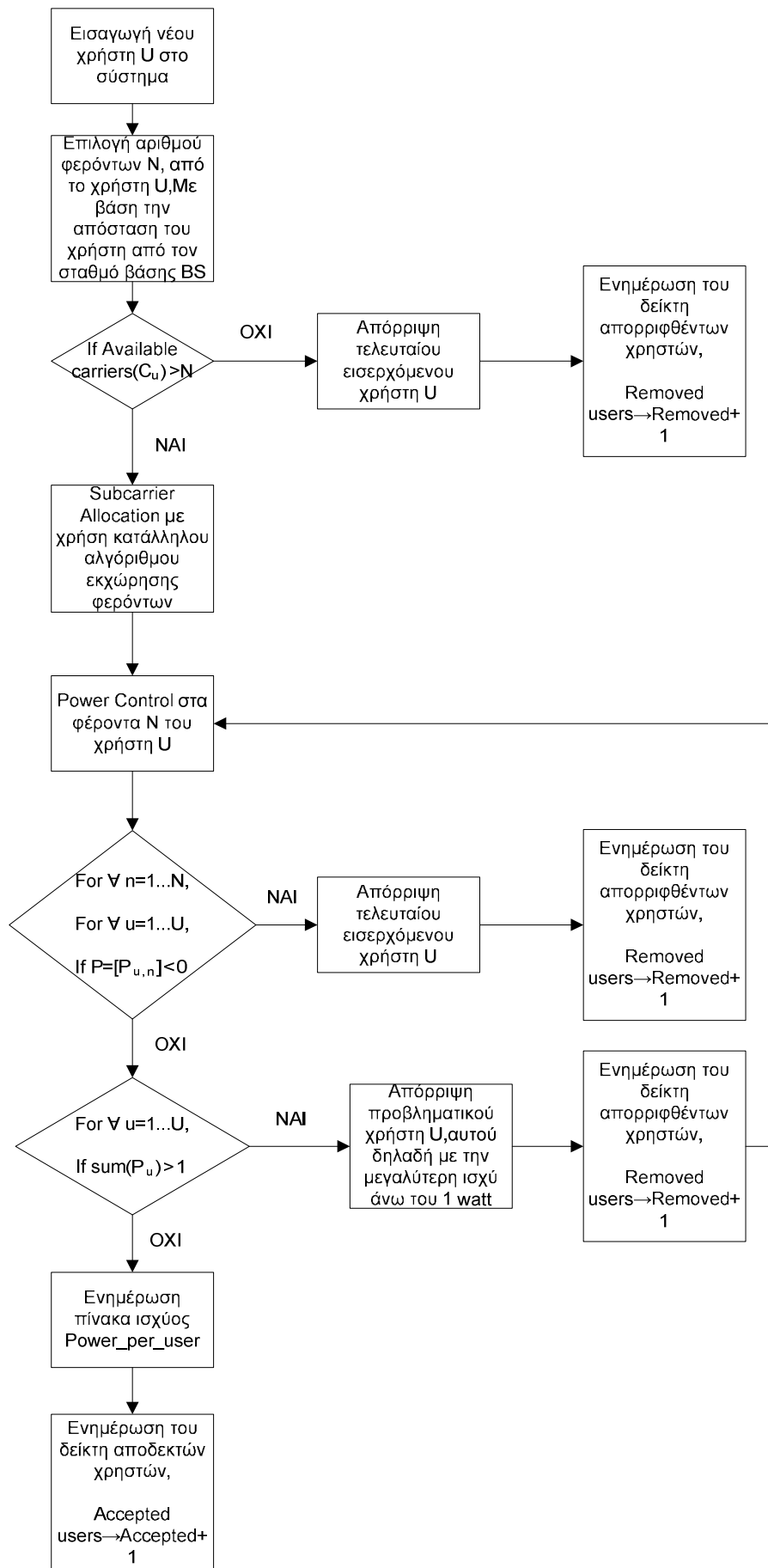
Εξετάζεται ξανά η διαθεσιμότητα του πλήθους των ζητούμενων φερόντων, στη κυψέλη C του σταθμού βάσης BS που τον εξυπηρετεί. Εάν δεν υπάρχει διαθεσιμότητα απορρίπτεται ο τελευταίος εισερχόμενος χρήστης.

Στη συνέχεια, εφόσον υπάρχει διαθεσιμότητα του ζητούμενου πλήθους φερόντων, γίνεται εκχώρηση N φερόντων, από τη κυψέλη C(U), κάνοντας χρήση της κατάλληλης στρατηγικής φερόντων κατανομής (random, coordinated ή sequential) στον χρήστη U.

Ακολουθεί, ο έλεγχος ισχύος (Power Control) στα φέροντα N που έχουν εκχωρηθεί στον εισερχόμενο χρήστη U, για όλους τους χρήστες που έχουν καταλάβει κάποιο αντίστοιχο από τα παραπάνω σε άλλη κυψέλη, με σκοπό την ενημέρωση του συστήματος, λόγω της ύπαρξης των ομοδιαυλικών παρεμβολών μεταξύ των χρηστών με ίδια φέροντα σε διαφορετικές κυψέλες.

Μετά το πέρας του Power Control, εάν εντοπιστεί χρήστης με αρνητικό διάνυσμα ισχύος, γίνεται απόρριψη του τελευταίου εισερχόμενου χρήστη. Σε περίπτωση μη ύπαρξης αρνητικού διανύσματος ισχύος, γίνεται έλεγχος της συνολικής ισχύος κάθε χρήστη, του προβλήματος. Προβληματικός χρήστης νοείται αυτός με ισχύ άνω του 1 watt. Σε περίπτωση ύπαρξης παραπάνω του ενός χρήστη με ισχύ >1 watt, απορρίπτουμε αυτόν (τον προβληματικό) με τη μεγαλύτερη τιμή. Επαναλαμβάνουμε τον έλεγχο ισχύος και την προηγούμενη διαδικασία, μέχρι να απορριφθούν, όλοι οι προβληματικοί χρήστες, που έχουν υπεισέλθει στο σύστημα. Σε περίπτωση αποδεκτού χρήστη ενημερώνεται εκ νέου ο πίνακας ισχύος ανά χρήστη.

Στη συνέχεια δίνεται η διαγραμματική απεικόνιση (σχήμα 30) του αλγορίθμου που περιγράφηκε προηγουμένως.



Σχήμα 30. Αλγόριθμος μοναδικής διαμόρφωσης, με προσαρμοστική εκχώρηση φερόντων απόστασης

4.5.6 Προσαρμοστική διαμόρφωση – Προσαρμοστικός αλγόριθμος εκχώρησης φερόντων με κριτήριο την απόσταση του χρήστη

Ο αλγόριθμος λειτουργεί με την ίδια λογική του προηγούμενου (αλγόριθμος 4.5.5) με την επιπρόσθετο έλεγχο για διαμόρφωση υψηλότερου βαθμού (16QAM ή 64QAM) από τη βασική διαμόρφωση (QPSK).

Η κυψέλη χωρίζεται σε 5 τμήματα, σε καθένα από τα οποία ο χρήστης λαμβάνει συγκεκριμένο αριθμό φερόντων προς εκχώρηση. Στην περιοχή που βρίσκεται πιο κοντά στον σταθμό βάσης BS ο χρήστης U λαμβάνει 5 φέροντα προς εκχώρηση, ενώ κάθε μια ζώνη που απομακρύνεται, μειώνεται κατά ένα ο αριθμός των προς εκχώρηση φερόντων. Μέγιστη τιμή είναι τα 5 φέροντα (στην περιοχή 1, κοντά στον σταθμό βάσης), ενώ ελάχιστη το 1 φέρον (στην περιοχή στα άκρα της κυψέλης).

Αφού αρχικά εισέλθει ο χρήστης U στο σύστημα, λαμβάνει μια σειρά από βασικές παρεμέτρους, τις οποίες και καταχωρεί σε συγκεκριμένους πίνακες/μήτρες εκχώρησης. Στη συνέχεια υπολογίζονται σημαντικά δεδομένα του χρήστη για την προσομοίωση (απόσταση από σταθμό βάσης, απώλειες, συνολικές απώλειες, σταθμός βάσης που τον εξυπηρετεί) και δίνεται ένας συγκεκριμένος αριθμός φερόντων N προς εκχώρηση, με βάση τη θέση του στη κυψέλη, όπως περιγράφηκε προηγουμένως.

Εξετάζεται ξανά η διαθεσιμότητα του πλήθους των ζητούμενων φερόντων, στη κυψέλη C του σταθμού βάσης BS που τον εξυπηρετεί. Εάν δεν υπάρχει διαθεσιμότητα απορρίπτεται ο τελευταίος εισερχόμενος χρήστης.

Στη συνέχεια, εφόσον υπάρχει διαθεσιμότητα του ζητούμενου πλήθους φερόντων, γίνεται εκχώρηση N φερόντων, από τη κυψέλη $C(U)$, κάνοντας χρήση της κατάλληλης στρατηγικής φερόντων κατανομής (random, coordinated ή sequential) στον χρήστη U .

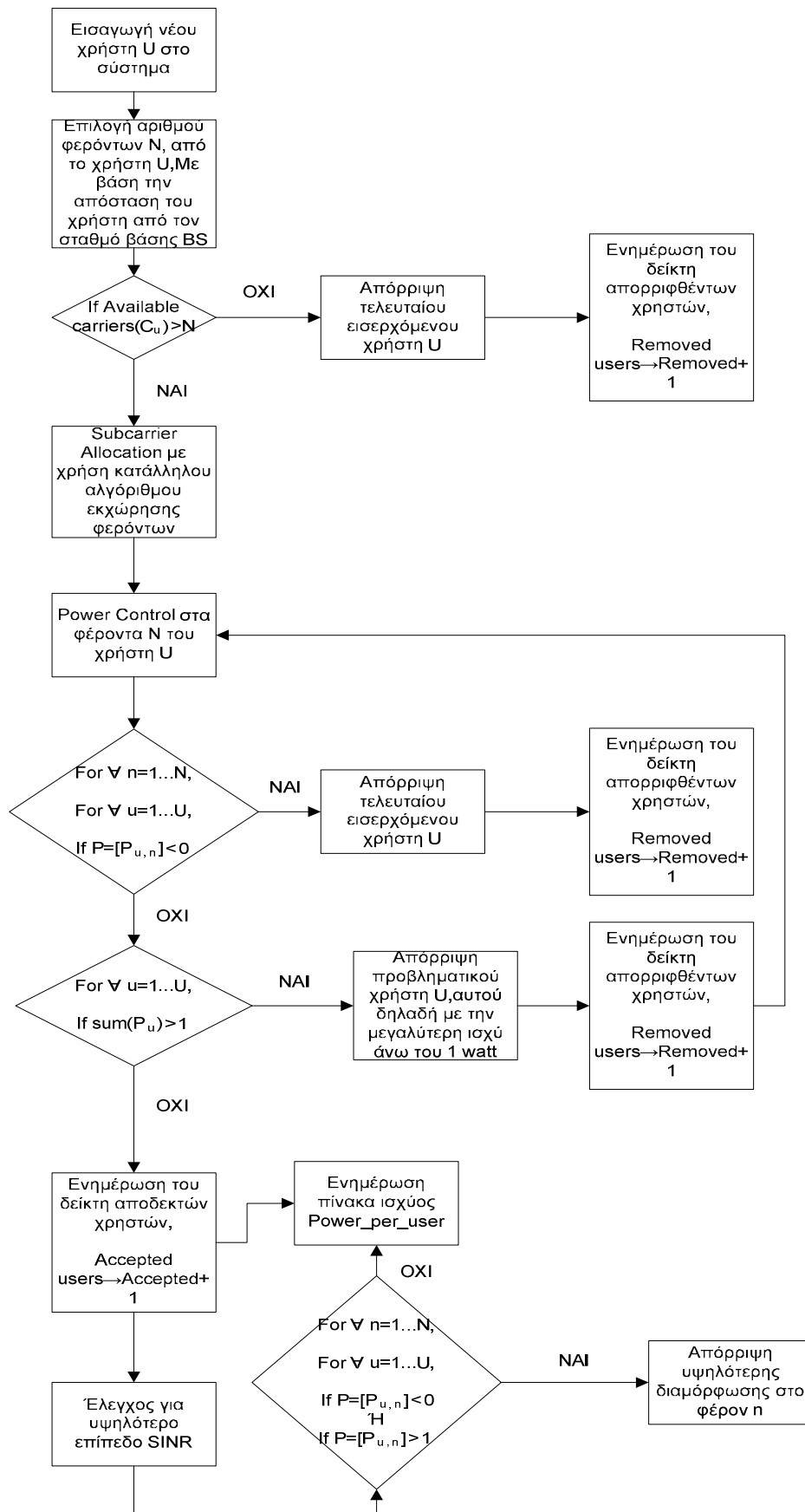
Ακολουθεί, ο έλεγχος ισχύος (Power Control) στα φέροντα N που έχουν εκχωρηθεί στον εισερχόμενο χρήστη U , για όλους τους χρήστες που έχουν καταλάβει κάποιο αντίστοιχο από τα παραπάνω σε άλλη κυψέλη, με σκοπό την ενημέρωση του συστήματος, λόγω της ύπαρξης των ομοδιαυλικών παρεμβολών μεταξύ των χρηστών με ίδια φέροντα σε διαφορετικές κυψέλες.

Μετά το πέρας του Power Control, εάν εντοπιστεί χρήστης με αρνητικό διάνυσμα ισχύος, γίνεται απόρριψη του τελευταίου εισερχόμενου χρήστη. Σε περίπτωση μη ύπαρξης αρνητικού διανύσματος ισχύος, γίνεται έλεγχος της συνολικής ισχύος κάθε χρήστη, του προβλήματος. Προβληματικός χρήστης νοείται αυτός με ισχύ άνω του 1 watt. Σε περίπτωση ύπαρξης παραπάνω του ενός χρήστη με ισχύ >1 watt, απορρίπτουμε αυτόν (τον προβληματικό) με τη μεγαλύτερη τιμή. Επαναλαμβάνουμε τον έλεγχο ισχύος και την προηγούμενη διαδικασία, μέχρι να απορριφθούν, όλοι οι προβληματικοί χρήστες, που έχουν υπεισέλθει στο

σύστημα. Σε περίπτωση αποδεκτού χρήστη ενημερώνεται εκ νέου ο πίνακας ισχύος ανά χρήστη.

Εφόσον ο εισερχόμενος χρήστης γίνει αποδεκτός από το σύστημα, πραγματοποιείται εκ νέου έλεγχος ισχύος με υψηλότερη διαμόρφωση (υψηλότερο SINR, επί πρακτέου), στα φέροντα του αποδεκτού χρήστη. Εάν, δεν υπάρξει χρήστης με αρνητικό διάνυσμα ισχύος ή τιμή άνω του κατωφλίου >1 watt , το επίπεδο διαμόρφωσης γίνεται αποδεκτό, ενημερώνεται ο πίνακας ισχύος ανά χρήστη και ακολουθεί η ίδια διαδικασία στο επόμενο φέρον του χρήστη, ενώ σε αντίθετη περίπτωση επανερχόμαστε στο προηγούμενο επίπεδο διαμόρφωσης.

Στη συνέχεια δίνεται η διαγραμματική απεικόνιση (σχήμα 31) του αλγορίθμου που περιγράφηκε προηγουμένως.



Σχήμα 31. Αλγόριθμος προσαρμοστικής διαμόρφωσης, με προσαρμοστική εκχώρηση φερόντων βάσει απόστασης

4.5.7 Μοναδική διαμόρφωση – Προσαρμοστικός αλγόριθμος εκχώρησης φερόντων με κριτήριο την απόσταση του χρήστη/Απόρριψη προβληματικού χρήστη με τα λιγότερα φέροντα

Ο τελευταίος, προς υλοποίηση, αλγόριθμος, διαφοροποιείται ως προς τον έλεγχο απόφασης της απόρριψης-των υποψήφιων-χρηστών στο σύστημα.

Η κυψέλη χωρίζεται σε 5 τμήματα, σε καθένα από τα οποία ο χρήστης λαμβάνει συγκεκριμένο αριθμό φερόντων προς εκχώρηση. Στην περιοχή που βρίσκεται πιο κοντά στον σταθμό βάσης BS ο χρήστης U λαμβάνει 5 φέροντα προς εκχώρηση, ενώ κάθε μια ζώνη που απομακρύνεται, μειώνεται κατά ένα ο αριθμός των προς εκχώρηση φερόντων. Μέγιστη τιμή είναι τα 5 φέροντα (στην περιοχή 1, κοντά στον σταθμό βάσης), ενώ ελάχιστη το 1 φέρον (στην περιοχή στα άκρα της κυψέλης).

Αφού αρχικά εισέλθει ο χρήστης U στο σύστημα, λαμβάνει μια σειρά από βασικές παρεμέτρους, τις οποίες και καταχωρεί σε συγκεκριμένους πίνακες/μήτρες εκχώρησης. Στη συνέχεια υπολογίζονται σημαντικά δεδομένα του χρήστη για την προσομοίωση (απόσταση από σταθμό βάσης, απώλειες, συνολικές απώλειες, σταθμός βάσης που τον εξυπηρετεί) και δίνεται ένας συγκεκριμένος αριθμός φερόντων N προς εκχώρηση, με βάση τη θέση του στη κυψέλη, όπως περιγράφηκε προηγουμένως.

Εξετάζεται ξανά η διαθεσιμότητα του πλήθους των ζητούμενων φερόντων, στη κυψέλη C του σταθμού βάσης BS που τον εξυπηρετεί. Εάν δεν υπάρχει διαθεσιμότητα απορρίπτεται ο τελευταίος εισερχόμενος χρήστης.

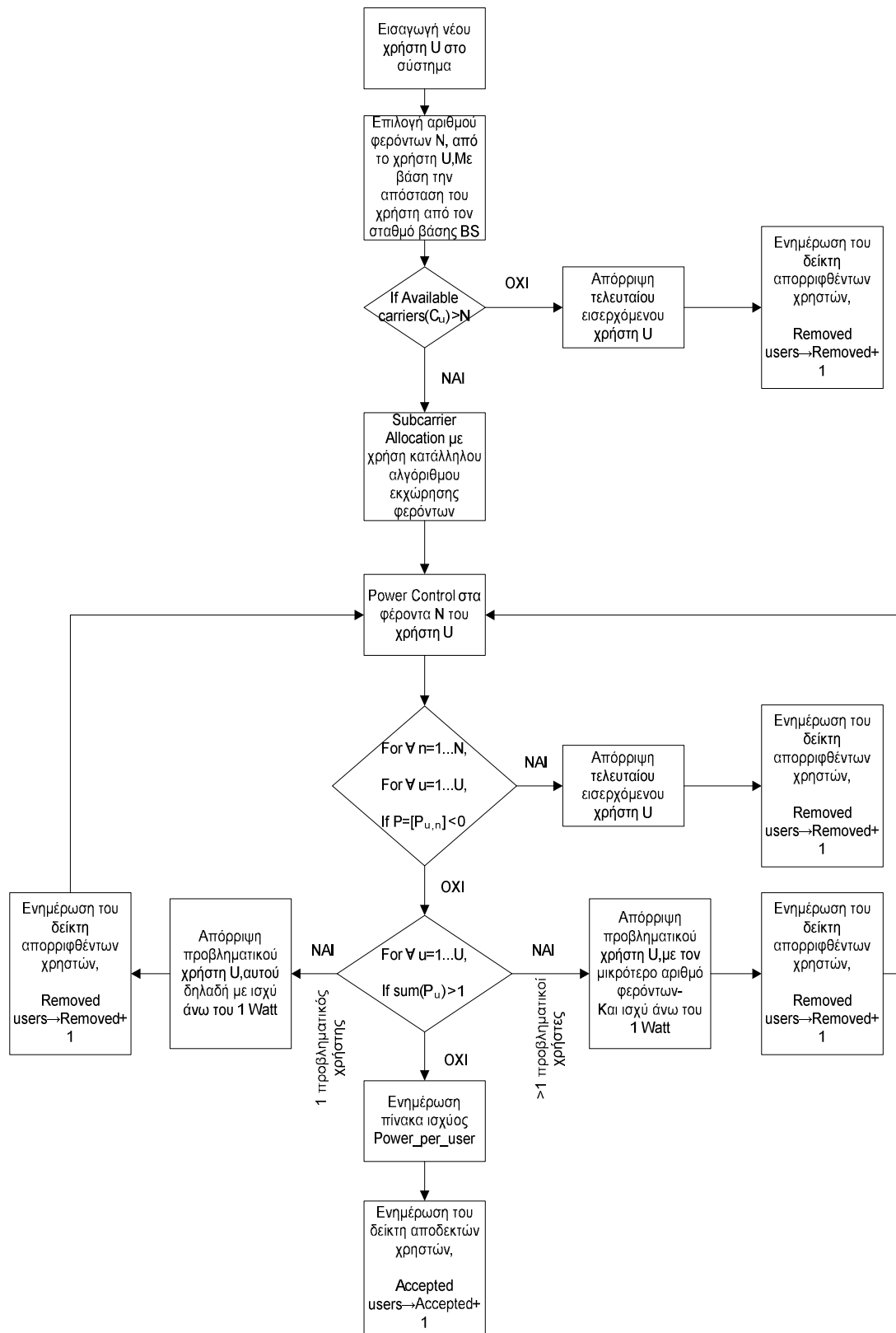
Στη συνέχεια, εφόσον υπάρχει διαθεσιμότητα του ζητούμενου πλήθους φερόντων, γίνεται εκχώρηση N φερόντων, από τη κυψέλη C(U), κάνοντας χρήση της κατάλληλης στρατηγικής φερόντων κατανομής (random, coordinated ή sequential) στον χρήστη U.

Ακολουθεί, ο έλεγχος ισχύος (Power Control) στα φέροντα N που έχουν εκχωρηθεί στον εισερχόμενο χρήστη U, για όλους τους χρήστες που έχουν καταλάβει κάποιο αντίστοιχο από τα παραπάνω σε άλλη κυψέλη, με σκοπό την ενημέρωση του συστήματος, λόγω της ύπαρξης των ομοδιαυλικών παρεμβολών μεταξύ των χρηστών με ίδια φέροντα σε διαφορετικές κυψέλες.

Μετά το πέρας του Power Control, εάν εντοπιστεί χρήστης με αρνητικό διάνυσμα ισχύος, γίνεται απόρριψη του τελευταίου εισερχόμενου χρήστη. Σε περίπτωση μη ύπαρξης αρνητικού διανύσματος ισχύος, γίνεται έλεγχος της συνολικής ισχύος κάθε χρήστη, του προβλήματος. Προβληματικός χρήστης νοείται αυτός με ισχύ άνω του 1 watt. Σε περίπτωση που εντοπιστεί ένας (προβληματικός) χρήστης με ισχύ >1 watt, απορρίπτεται. Σε περίπτωση ύπαρξης παραπάνω του ενός χρήστη με ισχύ >1 watt, απορρίπτουμε αυτόν (τον προβληματικό) με τη λιγότερα φέροντα. Εάν έχουμε δυο ή παραπάνω προβληματικούς χρήστες, με ίδιο αριθμό φερόντων, απορρίπτουμε αυτόν με την μεγαλύτερη ισχύ. Επαναλαμβάνουμε τον έλεγχο

ισχύος και την προηγούμενη διαδικασία, μέχρι να απορριφθούν, όλοι οι προβληματικοί χρήστες, που έχουν υπεισέλθει στο σύστημα. Σε περίπτωση αποδεκτού χρήστη ενημερώνεται εκ νέου ο πίνακας ισχύος ανά χρήστη.

Στη συνέχεια δίνεται η διαγραμματική απεικόνιση (σχήμα 32) του αλγορίθμου που περιγράφηκε προηγουμένως.



Σχήμα 32. Αλγόριθμος μοναδικής διαμόρφωσης, με προσαρμοστική εκχώρηση φερόντων βάσει απόστασης-απόρριψη προβληματικού χρήστη με τα λιγότερα φέροντα

4.6 Ζητούμενα προσομοίωσης

Ολοκληρώνοντας το παρόν κεφάλαιο πρόκειται να αναφερθούμε στα ζητούμενα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, τα οποία και πρόκειται να αναλυθούν και να παρατεθούν στη συνέχεια της διπλωματικής εργασίας.

Όλα τα προσομοιωτικά αποτελέσματα που πρόκειται να παρουσιασθούν στο επόμενο κεφάλαιο, προέκυψαν από 1000 επαναλαμβανόμενες προσομοιώσεις Monte Carlo, για κάθε ένα από τα σενάρια αλγορίθμων που αναλύθηκαν προηγουμένως. Σκοπός της διαδικασίας των προσομοιώσεων αποτελεί η κατάληξη σε εργοδικές μέσες τιμές για τα μελετούμενα μεγέθη, απέχοντας από τυχούσα τυχαιότητα που ενέχει ο προσομοιωτικός κώδικας.

Ο εκάστοτε αλγόριθμος επέρχεται σε κορεσμό εφόσον ξεπεράσει ένα ανώτατο κατώφλι πιθανότητα απόρριψης ή blocking probability που προκύπτει από τη σχέση:

$$P_b = \text{Blocking Probability} = \text{Removed users} / \text{Trials Counter}$$

, όπου ο αριθμητής εκφράζει του απορριφθέντες χρήστες, ενώ ο παρονομαστής το σύνολο των προσπαθειών εισαγωγής χρηστών (αποδεκτών κι απορριφθέντων). Στις προσομοιώσεις μας λήφθηκε ως ανώτατο κατώφλι απόρριψης πιθανότητας $P_{b_max} = 0,5$. Όσο το P_b παραμένει μικρότερο από το κατώφλι που έχουμε ορίσει, το σύστημα συνεχίζει να δέχεται χρήστες, ειδάλως μόλις το φτάσει ή το ξεπεράσει, φτάνει σε κορεσμό και σταματάει η διαδικασία της προσομοίωσης.

Ζητούμενα αποτελέσματα των προσομοιώσεων είναι:

- Ο συνολικός αριθμός αποδεκτών χρηστών του συστήματος, καθώς και ο αποδεκτός αριθμός των χρηστών που έχουν ως σταθμό βάσης λειτουργίας, αυτόν της κεντρικής κυψέλης.
- Η συνολική και η μέση ισχύ των αποδεκτών χρηστών του συστήματος, καθώς και των αντίστοιχων της κεντρικής κυψέλης.
- Τον ρυθμό απόδοσης ή ρυθμοαπόδοση του συστήματος ή Throughput.

Για μοναδική διαμόρφωση προκύπτει από τη σχέση:

$$\text{Throughput} = N \cdot b \cdot W_n$$

, όπου N : ο αριθμός των φερόντων, b : το επίπεδο διαμόρφωσης φέροντος και $W_n = 78,125$ kHz, το φασματικό εύρος ενός εκάστου φέροντος OFDMA

, ενώ για προσαρμοστική διαμόρφωση προκύπτει από τη σχέση:

$$\text{Throughput}=(N_{\text{QPSK}} \cdot b_{\text{QPSK}} \cdot W_n)+(N_{16\text{QAM}} \cdot b_{16\text{QAM}} \cdot W_n)+(N_{64\text{QAM}} \cdot b_{64\text{QAM}} \cdot W_n)$$

, όπου $N=N_{\text{QPSK}}+N_{16\text{QAM}}+N_{64\text{QAM}}$: ο συνολικός αριθμός των φερόντων, b_n : το επίπεδο διαμόρφωσης φέροντος για την εκάστοτε διαμόρφωση και $W_n=78,125$ kHz, το φασματικό εύρος ενός εκάστου φέροντος OFDMA

Στον πίνακα 2 παραθέτουμε τους ρυθμούς δεδομένων ανά φέρον, για κάθε μορφή διαμόρφωσης από αυτές, που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν στις προσομοιώσεις.

Διαμόρφωση	Επίπεδο διαμόρφωσης b	Ρυθμός δεδομένων ανά φέρον R=b·W_n
QPSK	2 bit per second/Hz	$R=b \cdot W_n=2 \cdot 78,125=156,25$ kbps
16QAM	4 bit per second/Hz	$R=b \cdot W_n=4 \cdot 78,125=312,5$ kbps
64QAM	6 bit per second/Hz	$R=b \cdot W_n=6 \cdot 78,125=468,75$ kbps

Πίνακας 2. Ρυθμός δεδομένων ανά φέρον, για τις διαμορφώσεις QPSK,16QAM,64QAM

Κεφάλαιο 5^ο

Ανάλυση αποτελεσμάτων

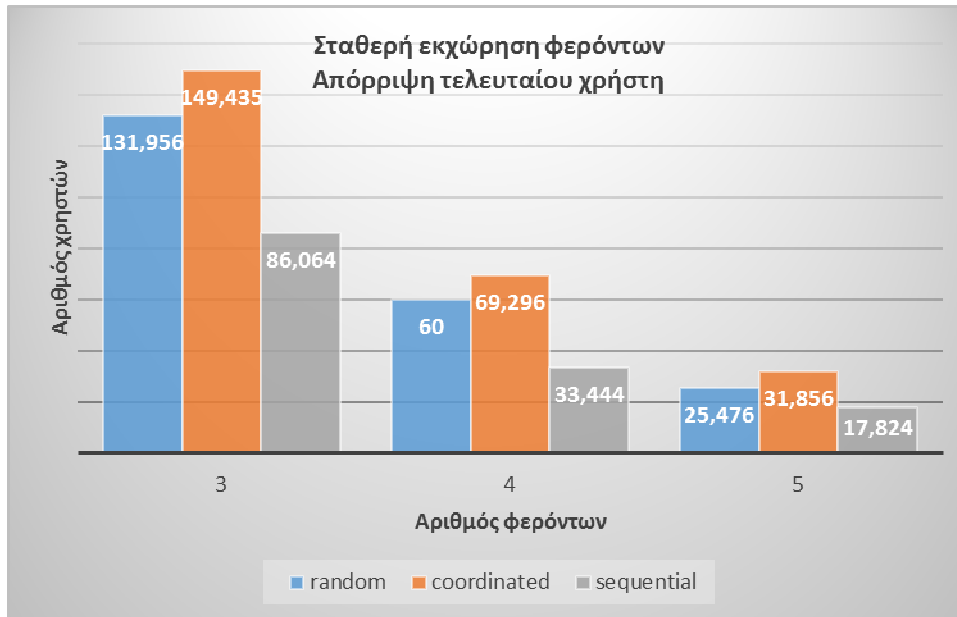
Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο για την ανάλυση και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων, η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε σε ένα σύστημα OFDMA, 7 κυψελών συγκεκριμένων συνθηκών, χωρίς γνώση του καναλιού διάδοσης, για 3 διαφορετικές υποπεριπτώσεις στρατηγικών εκχώρησης φερόντων (random,coordinated,sequential). Λαμβάνουμε ως δεδομένη την ύπαρξη διαμόρφωσης QPSK στο σύνολο των αλγορίθμων, εκτός από τις περιπτώσεις που έχουμε «Προσαρμοστική διαμόρφωση» και γίνεται έλεγχος για δυνατότητα λήψης φερόντων υψηλότερων διαμορφώσεων (16QAM και 64QAM)-από τους ήδη αποδεκτούς χρήστες-όπου επιτρέπεται βάσει και των περιορισμών που έχουν τεθεί ανα αλγόριθμο.

Στη συνέχεια παρατίθενται κι αναλύονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα, για κάθε μορφή αλγορίθμου.

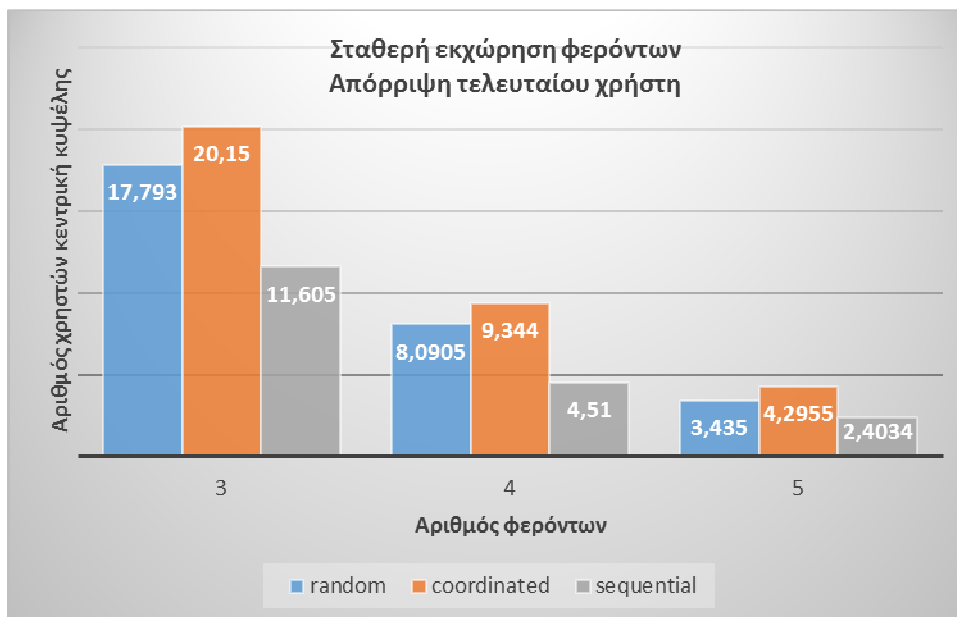
Τα δεδομένα των διαγραμματικών απεικονίσεων των προσομοιώσεων που έλαβαν χώρα, περιλαμβάνουν:

- Τον αριθμό των χρηστών σε σχέση με τον αριθμό των φερόντων (για τη σταθερή και τη προσαρμοστική εκχώρηση φερόντων), καθώς και για κάθε εναλλακτική μορφή αλγορίθμου (προσαρμοστική εκχώρηση).
- Τον αριθμό των χρηστών της κεντρικής κυψέλης, συγκριτικά με τον αριθμό των φερόντων (για τη σταθερή και τη προσαρμοστική εκχώρηση φερόντων), καθώς και για κάθε εναλλακτική μορφή αλγορίθμου (προσαρμοστική εκχώρηση).
- Την συνολική ισχύ των χρηστών του συστήματος, συγκριτικά με τον αριθμό των φερόντων (για τη σταθερή εκχώρηση φερόντων), καθώς και για κάθε εναλλακτική μορφή αλγορίθμου (προσαρμοστική εκχώρηση).
- Την συνολική ισχύ των χρηστών της κεντρικής κυψέλης, συγκριτικά με τον αριθμό των φερόντων (για τη σταθερή εκχώρηση φερόντων), καθώς και για κάθε εναλλακτική μορφή αλγορίθμου (προσαρμοστική εκχώρηση).
- Την μέση ισχύ των χρηστών του συστήματος, συγκριτικά με τον αριθμό των φερόντων (για τη σταθερή εκχώρηση φερόντων), καθώς και για κάθε εναλλακτική μορφή αλγορίθμου (προσαρμοστική εκχώρηση).
- Την ρυθμοαπόδοση (Throughput) του συστήματος, συγκριτικά με τον αριθμό των φερόντων (για τη σταθερή εκχώρηση φερόντων), καθώς και για κάθε εναλλακτική μορφή αλγορίθμου (προσαρμοστική εκχώρηση).

5.1 Σταθερή εκχώρηση φερόντων – Απόρριψη τελευταίου εισερχόμενου χρήστη



Σχήμα 33. Διαγραμματική απεικόνιση αριθμού χρηστών – αριθμού φερόντων για σταθερή εκχώρηση φερόντων, με απόρριψη του τελευταίου εισερχόμενου χρήστη



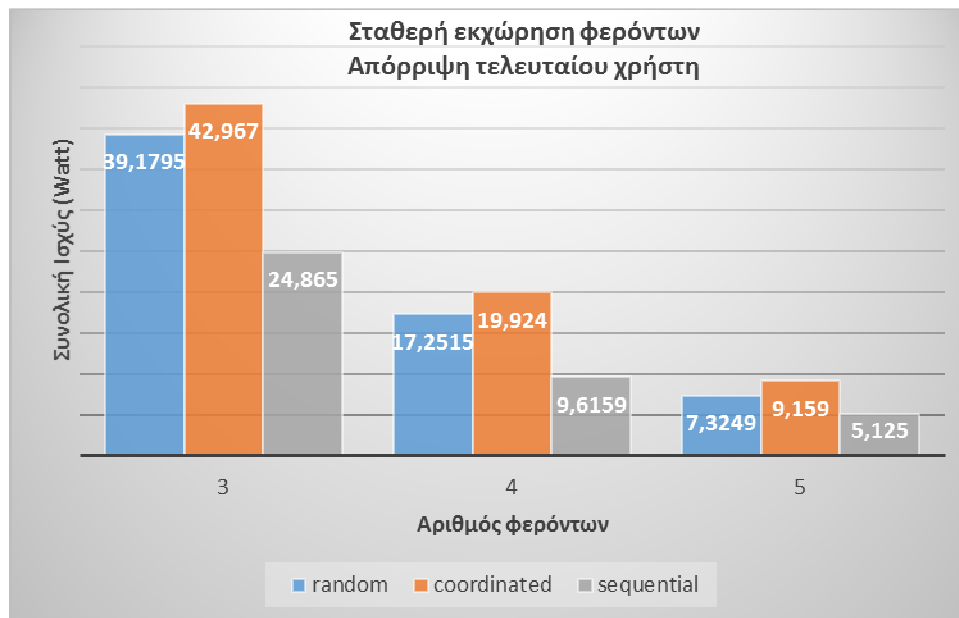
Σχήμα 34. Διαγραμματική απεικόνιση αριθμού χρηστών κεντρικής κυψέλης – αριθμού φερόντων για σταθερή εκχώρηση φερόντων, με απόρριψη του τελευταίου εισερχόμενου χρήστη

Τα διαγράμματα 33 και 34 απεικονίζουν αντίστοιχα τον αριθμό των χρηστών και τον αριθμό των χρηστών της κεντρικής κυψέλης, για κάθε (σταθερό) αριθμό φερόντων που επιβάλλεται από τον αλγόριθμο, κάνοντας κάθε φορά χρήση διαφορετικής στρατηγικής εκχώρησης (βλέπε διαφορετικούς χρωματισμούς).

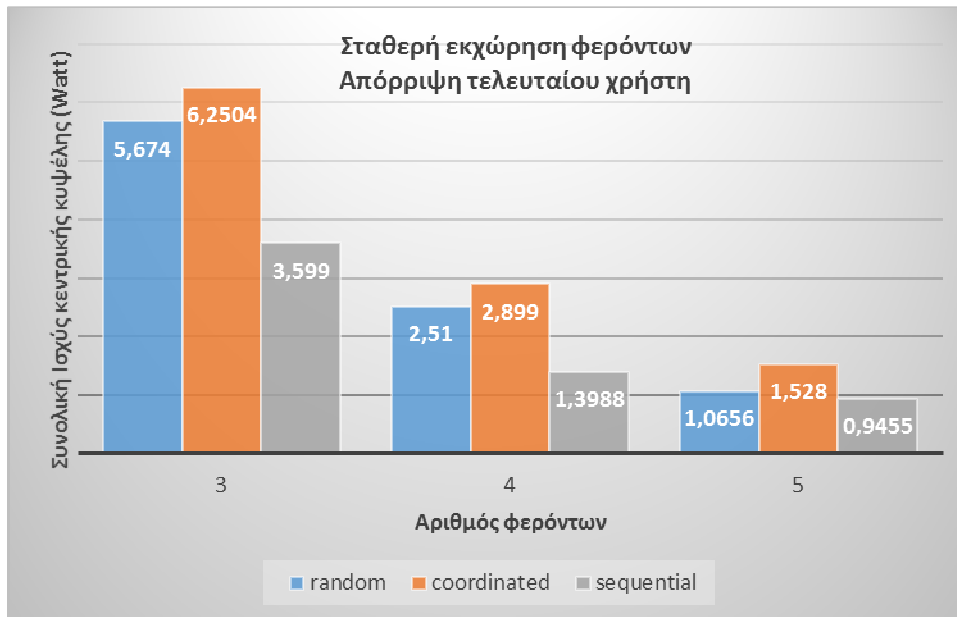
Παρατηρούμε, ότι όσο αυξάνεται ο ρυθμός δεδομένων που παρέχεται στους χρήστες, η αύξηση δηλαδή των φερόντων που εκχωρούνται σε αυτούς, μειώνεται η χωρητικότητα του συστήματος, ο αριθμός δηλαδή των χρηστών που γίνονται αποδεκτοί στο σύστημα, καθώς αυξάνονται οι ομοδιαυλικές παρεμβολές.

Αξίζει να σημειωθεί, με βάση τα όσα προκύπτουν από τα προηγούμενα διαγράμματα, η καλύτερη επίδοση της συντεταγμένης (coordinated) στρατηγικής εκχώρησης φερόντων, σε σχέση με την αντίστοιχη τυχαία (random) και τη σειριακή (sequential).

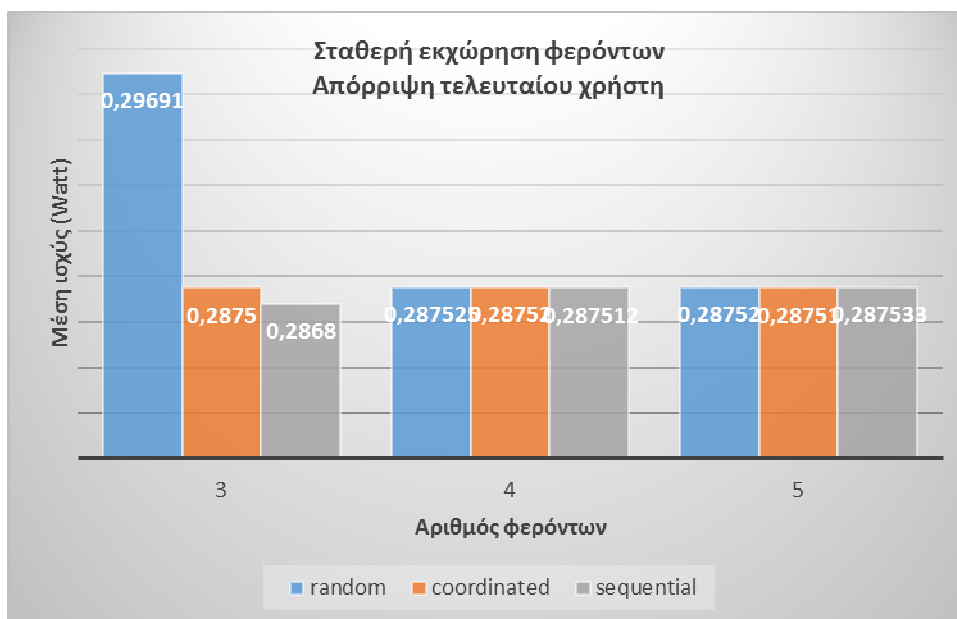
Στη συνέχεια παρατίθενται τα αντίστοιχα διαγράμματα συνολικής ισχύος του συστήματος, συνολικής ισχύος της κεντρικής κυψέλης και μέσης ισχύος, αναλογικά με τον αριθμό των εκχωρηθέντων φερόντων ανά χρήστη.



Σχήμα 35. Διαγραμματική απεικόνιση συνολικής ισχύος συστήματος – αριθμού φερόντων για σταθερή εκχώρηση φερόντων, με απόρριψη του τελευταίου εισερχόμενου χρήστη



Σχήμα 36. Διαγραμματική απεικόνιση συνολικής ισχύος χρηστών κεντρικής κυψέλης – αριθμού φερόντων για σταθερή εκχώρηση φερόντων, με απόρριψη του τελευταίου εισερχόμενου χρήστη



Σχήμα 37. Διαγραμματική απεικόνιση μέσης ισχύος χρηστών του συστήματος – αριθμού φερόντων για σταθερή εκχώρηση φερόντων, με απόρριψη του τελευταίου εισερχόμενου χρήστη

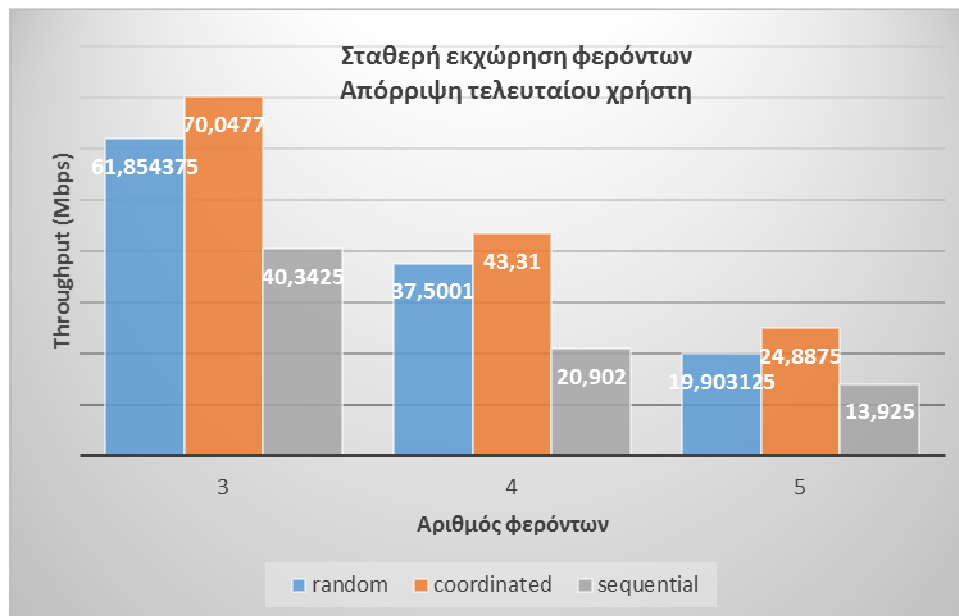
Παρατηρούμε ότι η συνολική ισχύς του συστήματος μειώνεται, όσο αυξάνεται ο προσφερόμενος ρυθμός δεδομένων (τα παρεχόμενα φέροντα δηλαδή) στους χρήστες.

Επιπλέον, είναι εμφανής η μεγαλύτερη κατανάλωση (συνολικής) ισχύος σε συστήματα με περισσότερους αποδεκτούς χρήστες, σε σχέση με αυτά που δέχονται λιγότερους προς εισαγωγή.

Όσον αφορά τους αλγόριθμους εκχώρησης φερόντων, απαιτείται μεγαλύτερη κατανάλωση ισχύος για τις περιπτώσεις του συντεταγμένου αλγόριθμου, συγκριτικά με τις αντίστοιχες του τυχαίου και του σειριακού, καθώς δίνει καλύτερα αποτελέσματα, όσον αφορά το σύνολο των αποδεκτών χρηστών, άρα έχει και μεγαλύτερες απαιτήσεις ενέργειας.

Η μέση ισχύς παραμένει στα ίδια επίπεδα, στο σύνολο των περιπτώσεων, εκτός από μια μικρή απόκλιση στη περίπτωση του τυχαίου αλγόριθμου, για $C=3$ εκχωρηθέντα φέροντα ανα χρήστη, της τάξης του $\sim 0,1W$.

Τέλος, δίνεται το διάγραμμα απεικόνισης της ρυθμοαπόδοσης (Throughput) του συστήματος, για διαφορετικό αριθμό εκχωρηθέντων φερόντων του αλγόριθμου, καθώς και για στρατηγικές εκχώρησης φερόντων (coordinated, random, sequential).



Σχήμα 38. Διαγραμματική απεικόνιση ρυθμοαπόδοσης (Throughput) – αριθμού φερόντων για σταθερή εκχώρηση φερόντων, με απόρριψη του τελευταίου εισερχόμενου χρήστη

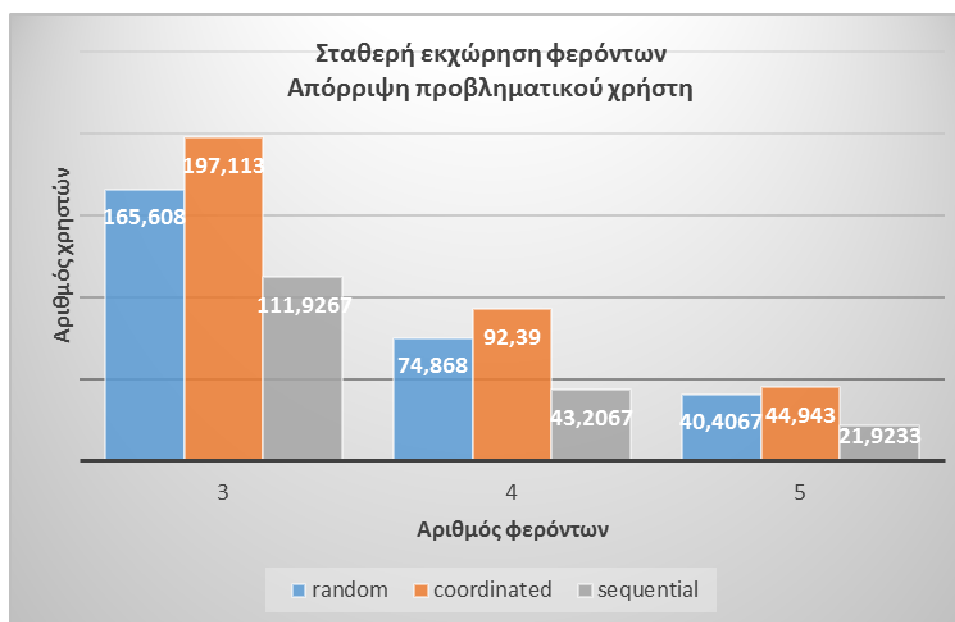
Από τη στιγμή που αναφερόμαστε σε αλγόριθμο με σταθερή εκχώρηση φερόντων, σε κάθε περίπτωση, το σύνολο των χρηστών θα λάβει τον ίδιο αριθμό φερόντων. Επιπλέον θεωρούμε (μοναδική) διαμόρφωση QPSK, οπότε η ρυθμοαπόδοση (throughput) του συστήματος σε αυτή τη περίπτωση συσχετίζεται αποκλειστικά με τη χωρητικότητα του. Στο σχήμα 38 απεικονίζονται οι τιμές της ρυθμοαπόδοσης σε Mbps, για το σύνολο των υποπεριπτώσεων. Όσο αυξάνεται ο αριθμός των φερόντων, μειώνεται ο αριθμός των χρηστών, άρα και η τιμή του παρεχόμενου Throughput του συστήματος. Καλύτερη περίπτωση αποτελεί αυτή του συντεταγμένου αλγόριθμου για $C=3$ φέροντα με παρεχόμενο Throughput της τάξης των 70,477 Mbps.

Προφανώς και σε αυτή τη περίπτωση ο συντεταγμένος αλγόριθμος παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα ρυθμοαπόδοσης, συγκριτικά με τους άλλους δυο, καθώς εισάγει περισσότερους χρήστες στο σύστημα.

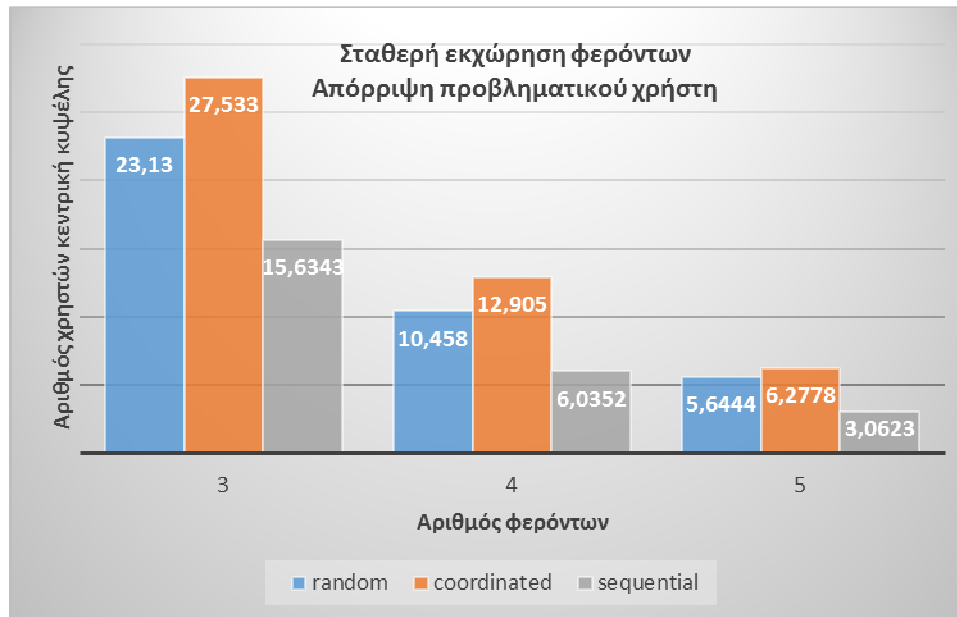
5.2 Σταθερή εκχώρηση φερόντων – Απόρριψη προβληματικού χρήστη

Σε σχέση με την παράγραφο 5.1, η διαφορά του αλγορίθμου έχει να κάνει με την επιλογή του χρήστη προς απομάκρυνση, όταν δεν πληρούνται τα κριτήρια αποδοχής αυτού στο σύστημα. Πιο συγκεκριμένα επιλέγεται προς απομάκρυνση κάθε φορά, ο προβληματικός χρήστης, αυτός δηλαδή που παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ισχύ άνω του 1 watt.

Συγκριτικά με την προηγούμενη περίπτωση σταθερής εκχώρησης φερόντων (απομάκρυνση τελευταίου χρήστη) αναμένονται καλύτερα αποτελέσματα, όσον αφορά τις τιμές της χωρητικότητας και της ρυθμοαπόδοσης του συστήματος, ενώ επακόλουθο αυτών είναι και οι αυξημένες απαιτήσεις ισχύος των χρηστών.



Σχήμα 39. Διαγραμματική απεικόνιση αριθμού χρηστών – αριθμού φερόντων για σταθερή εκχώρηση φερόντων, με απόρριψη του προβληματικού χρήστη



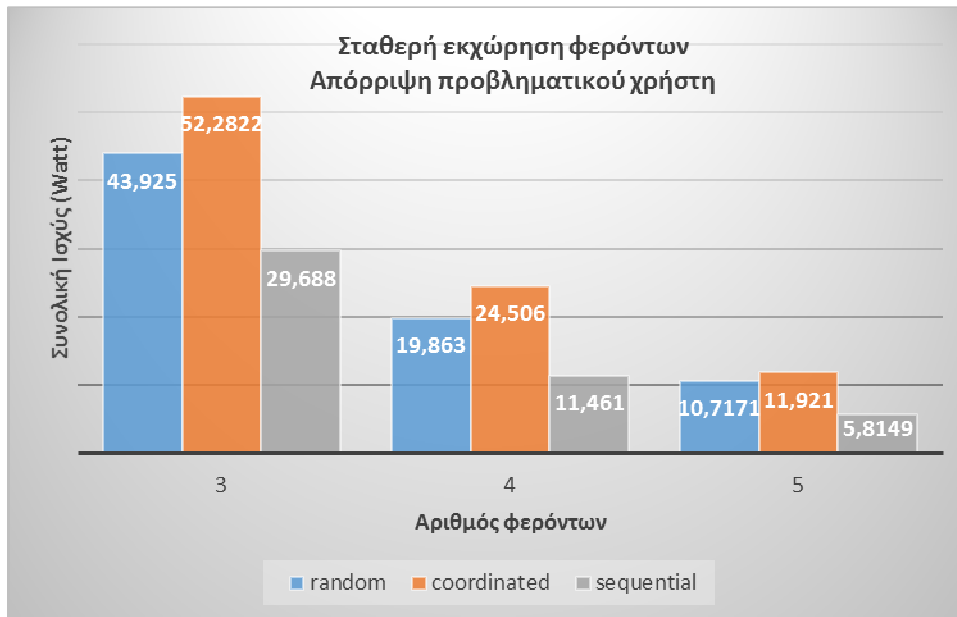
Σχήμα 40. Διαγραμματική απεικόνιση αριθμού χρηστών κεντρικής κυψέλης – αριθμού φερόντων για σταθερή εκχώρηση φερόντων, με απόρριψη του προβληματικού χρήστη

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η χωρητικότητα του συστήματος αυξάνει, συγκριτικά με τον αλγόριθμο σταθερής εκχώρησης που απορρίπτεται ο τελευταίος εισερχόμενος χρήστης, καθώς μεγαλύτερος αριθμός χρηστών γίνεται αποδεκτός.

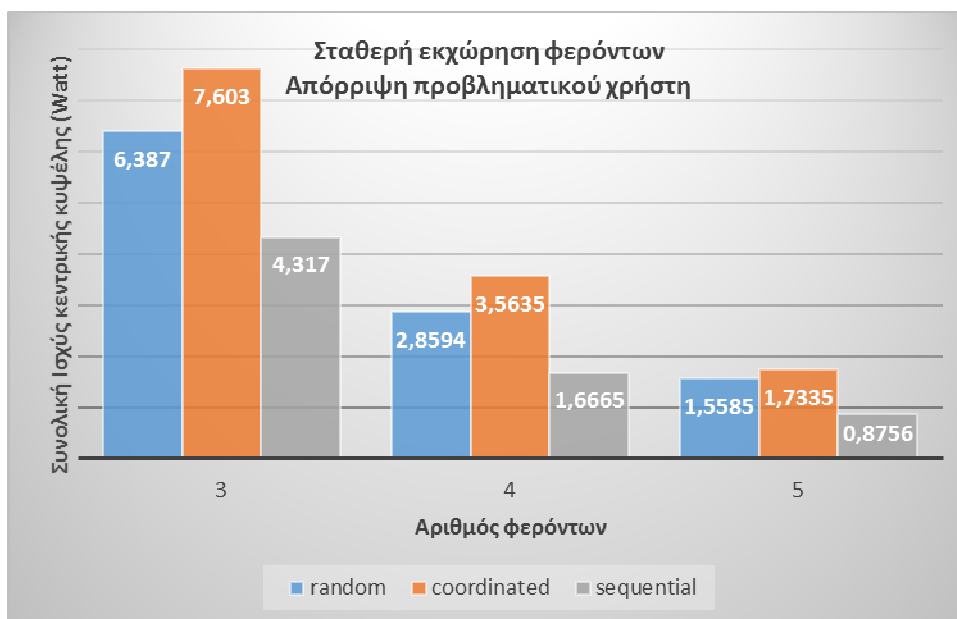
Και σε αυτή την εκδοχή, όσο αυξάνεται ο ρυθμός απόδοσης (αριθμός εκχωρηθέντων φερόντων) ανά χρήστη, παρατηρείται μείωση του αποδεκτού αριθμού των χρηστών στο σύστημα και πάλι λόγω των αυξημένων επιπέδων ομοδιαυλικών παρεμβολών που δημιουργούνται.

Επιπλέον, επιβεβαιώνεται για άλλη μια φορά η αποδοτικότητα του αλγόριθμου συντεταγμένης κατανομής-έναντι του τυχαίου και του σειριακού-όσον αφορά την αύξηση της χωρητικότητας του συστήματος. Και σε αυτή τη περίπτωση τα χειρότερα αποτελέσματα τα λαμβάνουμε για τον λιγότερο ευφυή αλγόριθμο, τον σειριακό.

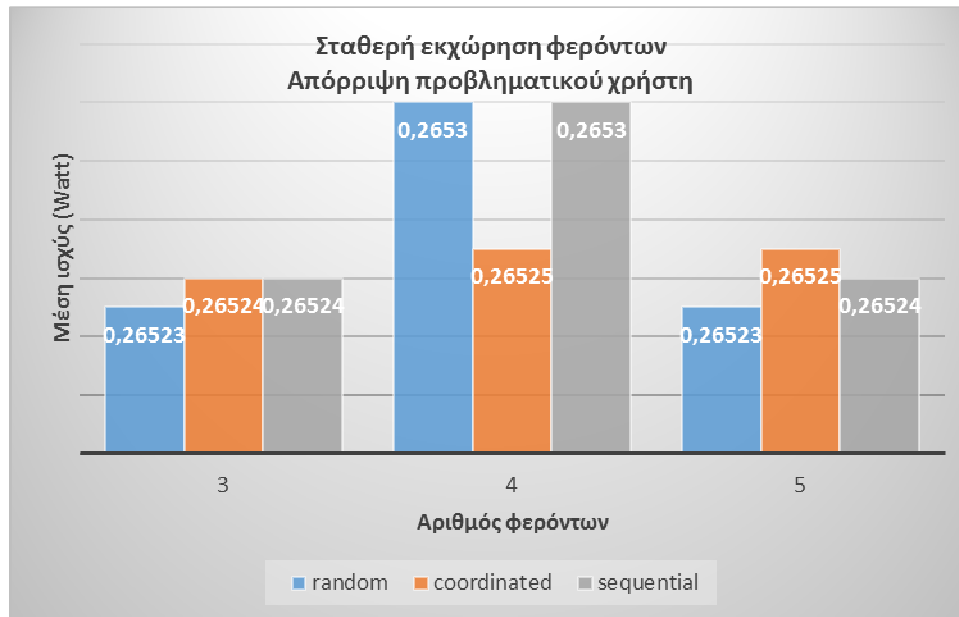
Στη συνέχεια παρατίθενται τα διαγράμματα ισχύος – αριθμού φερόντων ανά χρήστη, όπως αυτά προέκυψαν από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του αλγόριθμου.



Σχήμα 41. Διαγραμματική απεικόνιση συνολικής ισχύος συστήματος – αριθμού φερόντων για σταθερή εκχώρηση φερόντων, με απόρριψη του προβληματικού χρήστη



Σχήμα 42. Διαγραμματική απεικόνιση συνολικής ισχύος χρηστών κεντρικής κυψέλης – αριθμού φερόντων για σταθερή εκχώρηση φερόντων, με απόρριψη του προβληματικού χρήστη



Σχήμα 43. Διαγραμματική απεικόνιση μέσης ισχύος χρηστών του συστήματος – αριθμού φερόντων για σταθερή εκχώρηση φερόντων, με απόρριψη του προβληματικού χρήστη

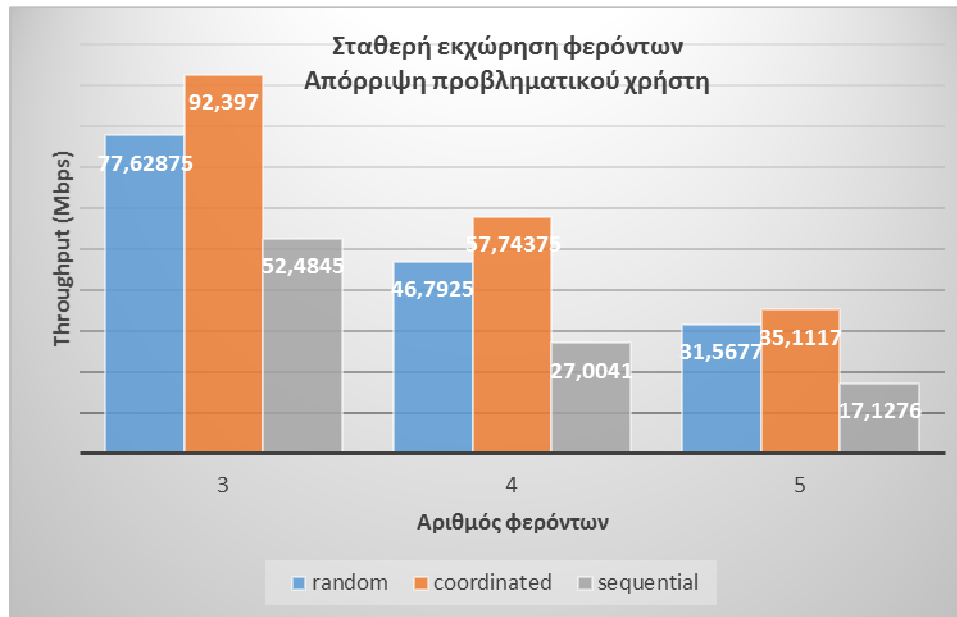
Η αυξημένη αποδοχή χρηστών, σε όλες τις υποπεριπτώσεις, για τον αλγόριθμο σταθερής εκχώρησης, με απόρριψη του προβληματικού χρήστη, έχει σαν αποτέλεσμα την αυξημένη ζήτηση ισχύος σε σχέση με τον αντίστοιχο, όπου απορρίπτεται ο τελευταίος χρήστης.

Όσο αυξάνεται ο αριθμός των φερόντων ανά χρήστη, μειώνεται η (ζητούμενη) ισχύς του συστήματος, ως αποτέλεσμα της αντίστοιχης μείωσης του αριθμού των χρηστών.

Αυξημένα επίπεδα ισχύος παρατηρούνται, για τους αλγόριθμους εκχώρησης φερόντων, συγκριτικά με τη παράγραφο 5.1, ενώ για άλλη μια φορά απαιτητικότερος παραμένει ο συντεταγμένος αλγόριθμος, καθώς υπάρχει μεγαλύτερη ζήτηση λόγω της αποδοτικότητας του, στη παροχή χωρητικότητας στο εκάστοτε σύστημα.

Όσον αφορά τη μέση ισχύ χρηστών του συστήματος παρατηρείται και πάλι ισορροπία στις τιμές, εκτός από μια μικρή απόκλιση για $C=4$ φέροντα ανά χρήστη. Συγκριτικά με τον προηγούμενο αλγόριθμο (απόρριψη τελευταίου εισερχόμενου χρήστη), οι μέσες τιμές ισχύος των χρηστών για κάθε υποπερίπτωση είναι χαμηλότερες, γεγονός που υποδεικνύει καλύτερη επίδοση, όσον αφορά τα ζητούμενα επίπεδα ενέργειας των αποδεκτών χρηστών του συστήματος, ένα σύστημα δηλαδή με αυξημένη χωρητικότητα και μειωμένη κατανάλωση ενέργειας ανά χρήστη, λόγω και της απομάκρυνσης των προβληματικών-σε επίπεδα ισχύος-χρηστών, αντί των τελευταίων εισερχομένων της προηγούμενης περίπτωσης.

Η ρυθμοαπόδοση του συστήματος, δίνεται στη συνέχεια σχήμα 44.



Σχήμα 44. Διαγραμματική απεικόνιση της ρυθμοαπόδοσης (Throughput) του συστήματος – αριθμού φερόντων για σταθερή εκχώρηση φερόντων, με απόρριψη του προβληματικού χρήστη

Η αυξημένη χωρητικότητα που παρέχει ο αλγόριθμος σε συνδυασμό με τη (μοναδική) διαμόρφωση QPSK και τη σταθερή εκχώρηση φερόντων στους χρήστες, έχει σαν αποτέλεσμα αυξημένες επιδόσεις της ρυθμοαπόδοσης του συστήματος, συγκριτικά με αυτές της παραγράφου 5.1, με υψηλότερη τιμή αυτή των 92,397 Mbps, για $C=3$ φέροντα ανά χρήστη.

Όσο αυξάνεται ο ρυθμός δεδομένων ανά χρήστη, μειώνεται το Throughput, καθώς μειώνονται και οι χρήστες που γίνονται αποδεκτοί από το σύστημα, ενώ καλύτερες τιμές λαμβάνουμε με τη χρήση του συντεταγμένου αλγόριθμου και χειρότερες με αυτή του σειριακού.

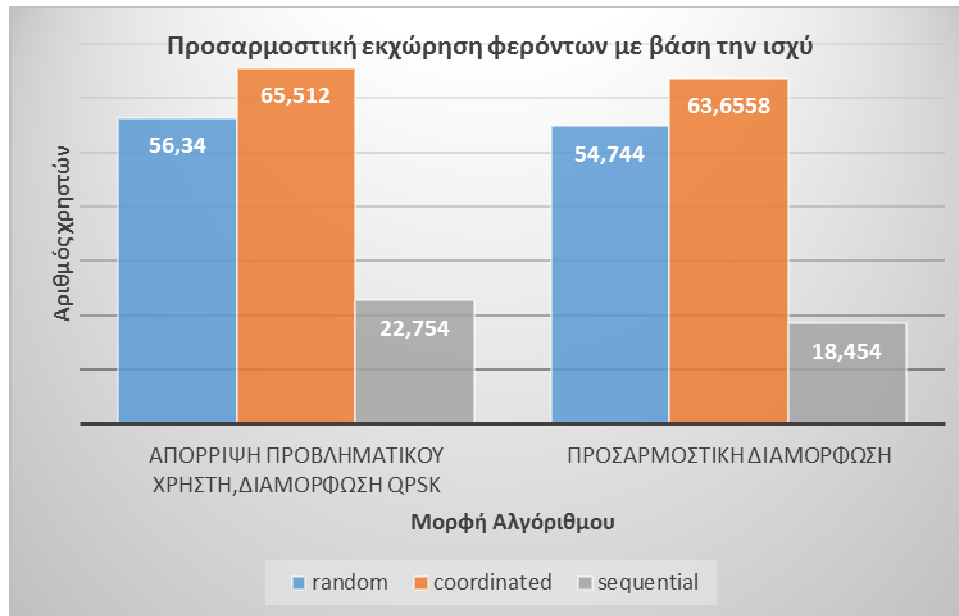
5.3 Προσαρμοστική εκχώρηση φερόντων με βάση την ισχύ

Σε αντίθεση με τις προηγούμενες περιπτώσεις αλγορίθμων που μελετήθηκαν (παρ. 5.1 και 5.2), όπου εκχωρείται σταθερός αριθμός φερόντων στους χρήστες, στους αλγόριθμους προσαρμοστικής εκχώρησης, ο αριθμός των-προς εκχώρηση-φερόντων καθορίζεται από μια σειρά συγκεκριμένων απαιτήσεων και προϋποθέσεων.

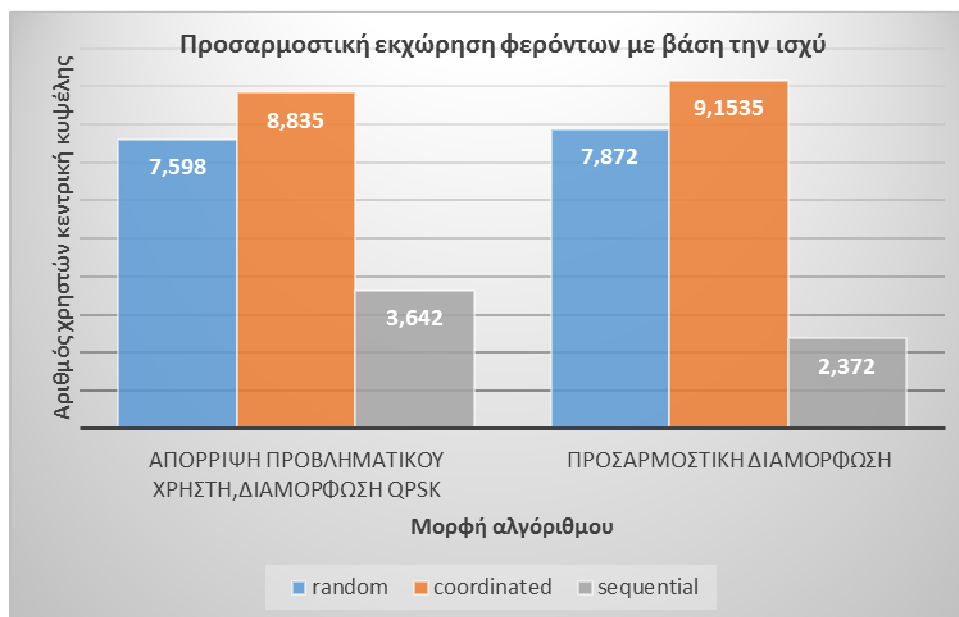
Στη περίπτωση της προσαρμοστικής εκχώρησης βάση της ισχύος (παράγραφοι 4.4.3 και 4.4.4), δίνεται ένα ανώτατο κατώφλι διαφοράς ισχύος $DP_{max}=1/C_{max}=1/5=0,2$ watt. Αν τα πρώτα-προς εκχώρηση-φέροντα δεν καταφέρουν να εκχωρηθούν επιτυχώς σε κάποιο χρήστη, τότε κανένα από τα διαθέσιμα φέροντα δεν πρόκειται να εκχωρηθεί, γεγονός που επιδεικνύει την αυστηρότητα του αλγορίθμου. Σε αντίθετη περίπτωση γίνεται έλεγχος για κάθε φέρον, εάν ξεπερνάει ή όχι το ανώτατο κατώφλι DP_{max} , κι αναλόγως εκχωρείται ή όχι. Η ίδια διαδικασία πραγματοποιείται για όλα τα διαθέσιμα φέροντα του χρήστη.

Στον αλγόριθμο μελετάται τόσο η διαμόρφωση QPSK, όσο και ανώτερα επίπεδα διαμορφώσεων (16QAM κι 64QAM) στον αλγόριθμο «Προσαρμοστικής διαμόρφωσης», όπου στους ήδη αποδεκτούς χρήστες γίνεται έλεγχος εκχώρησης φερόντων ανώτερων διαμορφώσεων, υπό συγκεκριμένες συνθήκες.

Αρχικά δίνονται τα διαγράμματα των αποδεκτών χρηστών και των χρηστών της κεντρικής κυψέλης, στα σχήματα 45 και 46.



Σχήμα 45. Διαγραμματική απεικόνιση αριθμού χρηστών – εκδοχών αλγορίθμου για προσαρμοστική εκχώρηση φερόντων, με βάση την ισχύ



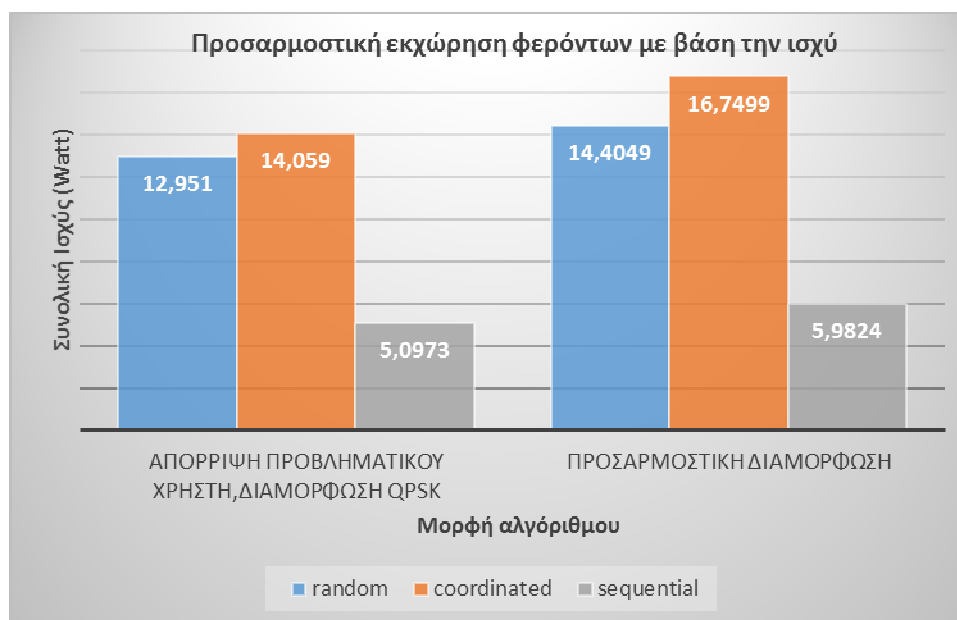
Σχήμα 46. Διαγραμματική απεικόνιση αριθμού χρηστών κεντρικής κυψέλης – εκδοχών αλγορίθμου για προσαρμοστική εκχώρηση φερόντων, με βάση την ισχύ

Οι απεικονίσεις αυτών, επιβεβαιώνουν την αυστηρότητα του αλγορίθμου, καθώς μειώνεται ο αποδεκτός αριθμός χρηστών τόσο στην διαμόρφωση QPSK, όσο και στην Προσαρμοστική διαμόρφωση, με αποτέλεσμα το σύστημα OFDMA, να χαρακτηρίζεται ως χαμηλής χωρητικότητας, σε σχέση με τα αντίστοιχα των παραγράφων 5.1 και 5.2.

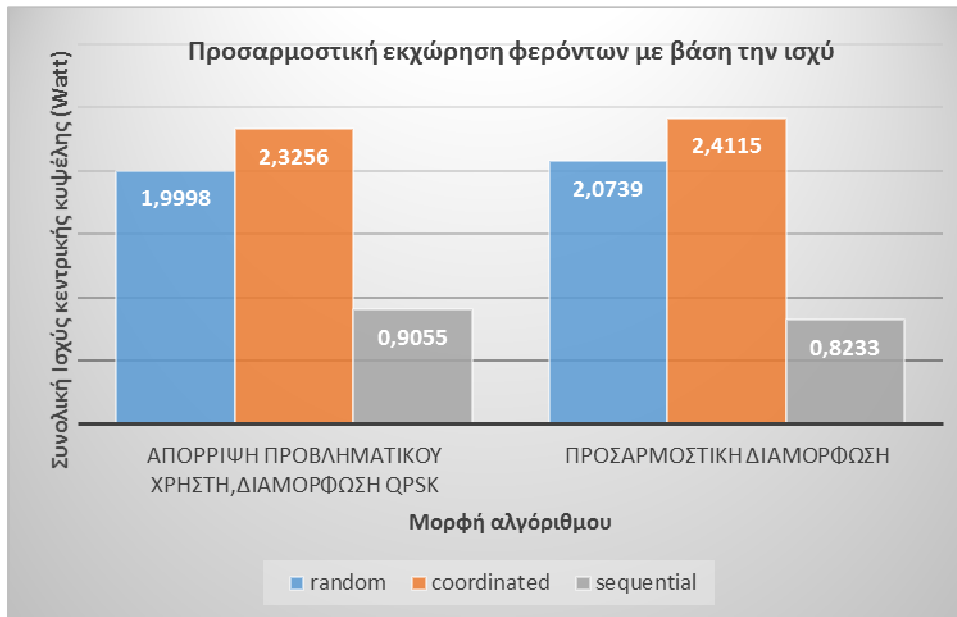
Όσον αφορά τις δυο εκδοχές του προσαρμοστικού αλγορίθμου με βάση την ισχύ, παρατηρείται μια ελάχιστη μείωση στον αριθμό των αποδεκτών χρηστών, κατά τη προσαρμοστική διαμόρφωση, καθώς φέροντα χρηστών έχουν λάβει υψηλότερες διαμόρφώσεις. Παρόλα αυτά, ο αριθμός των χρηστών της κεντρικής κυψέλης είναι οριακά υψηλότερος για τη προσαρμοστική διαμόρφωση σε σχέση με την QPSK διαμόρφωση, δίνοντας έτσι καλύτερη επίδοση, όσον αφορά τη χωρητικότητα στη κεντρική κυψέλη. Το αποτέλεσμα αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς τα κανάλια με υψηλότερο επίπεδο διαμόρφωσης, μειώνονται με μεγαλύτερο ρυθμό όσο απομακρυνόμαστε από το σταθμό βάσης, απ'όσο αυτά με χαμηλότερο επίπεδο διαμόρφωσης.

Επιπλέον, ο συντεταγμένος αλγόριθμος εκχώρησης φερόντων παρέχει υψηλότερη χωρητικότητα σε σχέση με τον τυχαίο κι ακόμα περισσότερο με τον σειριακό.

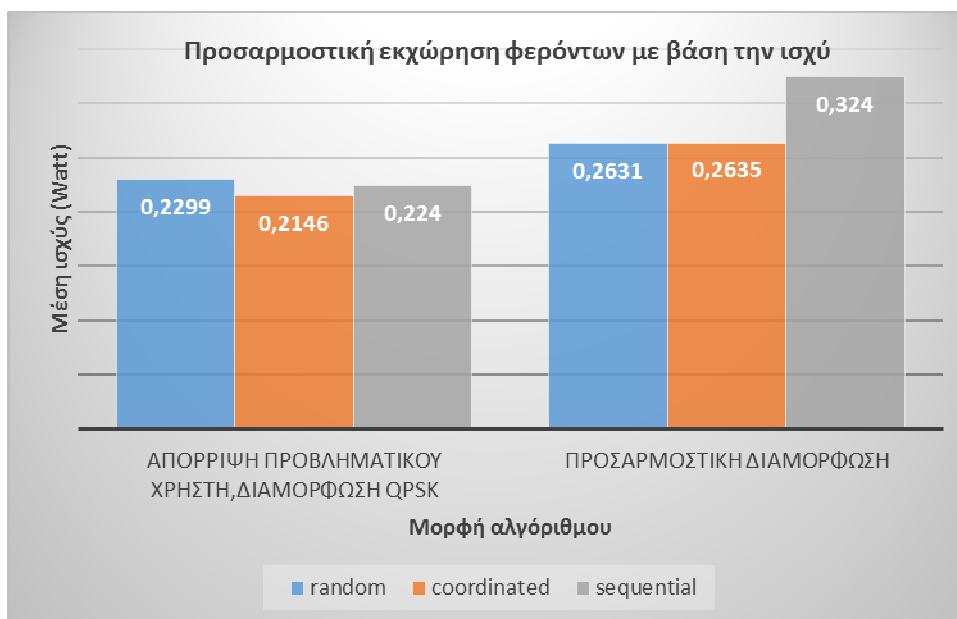
Όσον αφορά την ενεργειακή κατανάλωση, αναμένονται χαμηλότερες απαιτήσεις συνολικής ισχύος συγκριτικά με τους αλγόριθμους των 5.1 και 5.2, λόγω και της χαμηλότερης χωρητικότητας του συστήματος.



Σχήμα 47. Διαγραμματική απεικόνιση συνολικής ισχύος συστήματος – εκδοχών αλγορίθμου για προσαρμοστική εκχώρηση φερόντων, με απόρριψη την ισχύ



Σχήμα 48. Διαγραμματική απεικόνιση συνολικής ισχύος χρηστών κεντρικής κυψέλης – εκδοχών αλγορίθμων για προσαρμοστική εκχώρηση φερόντων, με βάση την ισχύ



Σχήμα 49. Διαγραμματική απεικόνιση μέσης ισχύος χρηστών του συστήματος – εκδοχών αλγορίθμων για προσαρμοστική εκχώρηση φερόντων, με βάση την ισχύ

Επιβεβαιώνεται από τα διαγράμματα, ότι τα συνολικά επίπεδα ισχύος μειώθηκαν συγκριτικά με τους αλγόριθμους των 5.1 και 5.2, λόγω της χαμηλότερης χωρητικότητας, που παρέχει ο συγκεκριμένος τύπος αλγορίθμων.

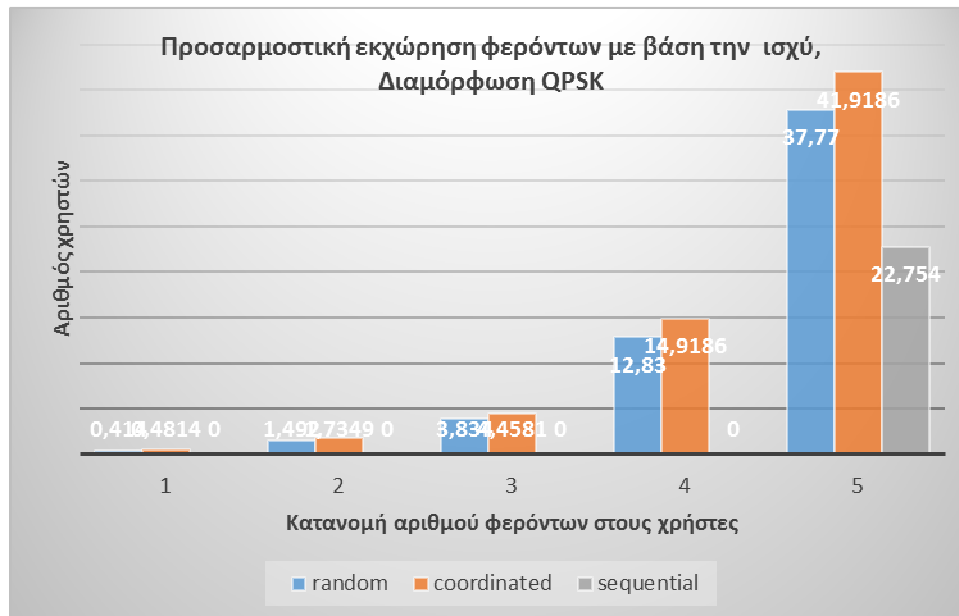
Όπως αναμενόταν, η συνολική κατανάλωσης ισχύος είναι υψηλότερη για τη προσαρμοστική διαμόρφωση σε σχέση με τη (μοναδική) διαμόρφωση QPSK, καθώς απαιτείται περισσότερη ενέργεια για τις-υψηλότερης τάξης-διαμορφώσεις, καθώς και η συνολική ισχύς κεντρικής κυψέλης. Πράγματι

και η μέση τιμή της ισχύος των χρηστών λαμβάνει υψηλότερες τιμές για την προσαρμοστική διαμόρφωση, όπως και η συνολική ισχύς των χρηστών της κεντρικής κυψέλης.

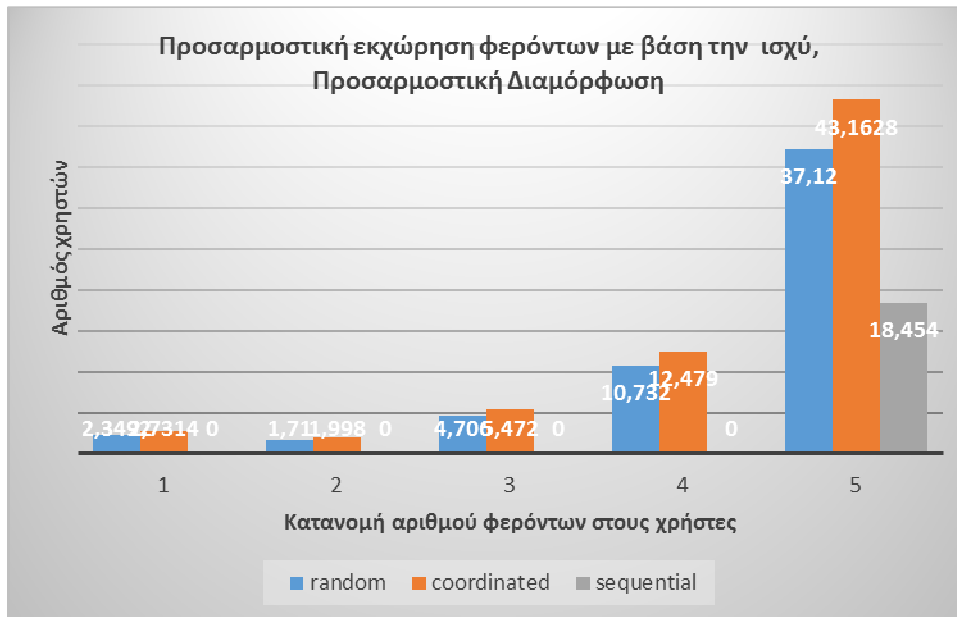
Και σε αυτή τη περίπτωση, ο συντεταγμένος αλγόριθμος έχει μεγαλύτερες ενεργειακές απαιτήσεις, λόγω των καλύτερων αποτελεσμάτων που παρέχει στη χωρητικότητα του συστήματος, σε σχέση πάντα με τον τυχαίο και τον σειριακό.

Σημαντικό πλεονέκτημα του αλγόριθμου αποτελεί η αυστηρότητα επιλογής χρηστών, με βάση την διαφορά ισχύος DP_{max} . Όπως φαίνεται και από το σχήμα 49, η μέση ενεργειακή κατανάλωση των χρηστών του συστήματος είναι μειωμένη, απ'ότι στους προηγούμενους αλγόριθμους 5.1 και 5.2, γεγονός που έχει ευεργετικά οφέλη, τόσο στο κόστος λειτουργίας, όσο και στην περιβαλλοντική επιβάρυνση, από την απαιτούμενη ενέργεια του συστήματος.

Σημαντική παράμετρο αποτελεί η κατανομή των φερόντων στους χρήστες, ώστε να γίνει αντιληπτή η ποιότητα υπηρεσίας (ρυθμός δεδομένων), που παρέχει ο αλγόριθμος στους χρήστες. Στα σχήματα 50 και 51 δίνονται τα διαγράμματα αριθμού χρηστών – κατανομής αριθμού φερόντων στους χρήστες.



Σχήμα 50. Διαγραμματική απεικόνιση αριθμού χρηστών του συστήματος – κατανομής αριθμού φερόντων στους χρήστες για προσαρμοστική εκχώρηση φερόντων και διαμόρφωση QPSK, με βάση την ισχύ



Σχήμα 51. Διαγραμματική απεικόνιση αριθμού χρηστών του συστήματος – κατανομής αριθμού φερόντων στους χρήστες για προσαρμοστική εκχώρηση φερόντων και προσαρμοστική διαμόρφωση, με βάση την ισχύ

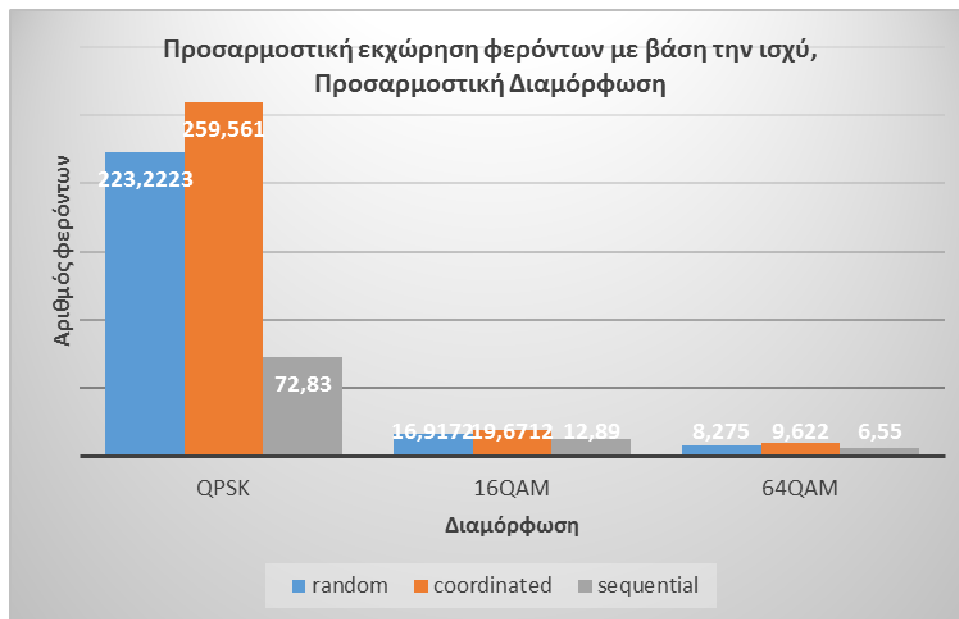
Όπως φαίνεται κι από τις απεικονίσεις των διαγραμμάτων, το σύνολο των χρηστών έχει λάβει μεγάλο αριθμό φερόντων (4 και 5 φέροντα), υψηλό δηλαδή ρυθμό δεδομένων ανά χρήστη, με πλέον αποτελεσματικότερο αλγόριθμο τον συντεταγμένο, ενώ αξίζει να σημειωθεί ότι οι χρήστες που έγιναν αποδεκτοί με τον σειριακό αλγόριθμο έχουν λάβει αποκλειστικά το μέγιστο ρυθμό δεδομένων (5 φέροντα). Σημαντικό λοιπόν πλεονέκτημα του αλγόριθμου αποτελεί επίσης, η υψηλή ποιότητα υπηρεσιών που παρέχει στους χρήστες, που αναμένεται να παίζει ρόλο και στη ρυθμοαπόδοση του συστήματος.



Σχήμα 52. Διαγραμματική απεικόνιση ρυθμοαπόδοσης (Throughput) του συστήματος – εκδοχών αλγορίθμου για προσαρμοστική εκχώρηση φερόντων, με βάση την ισχύ

Όπως αναμενόταν, ο αλγόριθμος, παρά τη χαμηλή χωρητικότητα δίνει ικανοποιητικές τιμές ρυθμοαπόδοσης, γεγονός που οφείλεται στον υψηλό ρυθμό δεδομένων, που παρέχεται στο σύνολο των χρηστών. Ειδικότερα στον αλγόριθμο, που χρησιμοποιείται προσαρμοστική διαμόρφωση οι τιμές του Throughput είναι υψηλότερες, λόγω και των υψηλότερων επιπέδων διαμόρφωσης που έχουν επιτευχθεί σε κάποια φέροντα των χρηστών του συστήματος, επιβεβαιώνοντας τη λήψη καλύτερων αποτελεσμάτων με τη χρήση SINR σε τεχνικές κλασματικής επαναχρησιμοποίησης συχνότητας.

Τέλος, η κατανομή των φερόντων στις διάφορες μορφές διαμορφώσεων (QPSK, 16QAM, 64QAM) απεικονίζεται στο σχήμα 53.



Σχήμα 53. Διαγραμματική απεικόνιση αριθμού φερόντων του συστήματος – διαμορφώσεων που αυτά λαμβάνουν για προσαρμοστική εκχώρηση φερόντων, με βάση την ισχύ

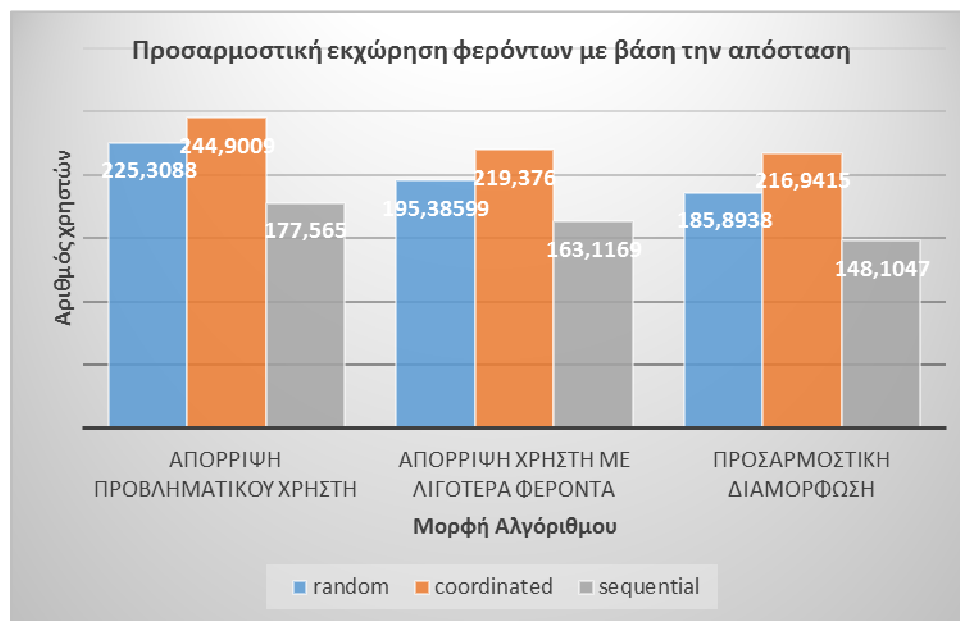
Παρατηρούμε, ότι για την κάλυψη των αναγκών των χρηστών χρησιμοποιούνται σε πολύ μεγάλο ποσοστό φέροντα QPSK, ενώ σε πολύ λιγότερες περιπτώσεις φέροντα 16QAM και 64QAM υψηλότερης τάξης, καθώς είναι περισσότερα σε σχέση με τις χαμηλότερης τάξης διαμορφώσεις. Θα μπορούσαμε να αποφανθούμε, ότι το επίπεδο διαμόρφωσης που θα φορτωθεί ένα φέρον εξαρτάται, τόσο από τη διαθεσιμότητα των φερόντων, όσο και τις ομοδιαυλικές παρεμβολές που δέχεται και προκαλεί, ώστε να εκπέμψει την απαιτούμενη ισχύ που επιβάλλει ένα επίπεδο διαμόρφωσης και βρίσκεται φυσικά εντός των επιτρεπτών περιορισμών που επιβάλλει το σύστημα.

5.4 Προσαρμοστική εκχώρηση φερόντων με βάση την απόσταση

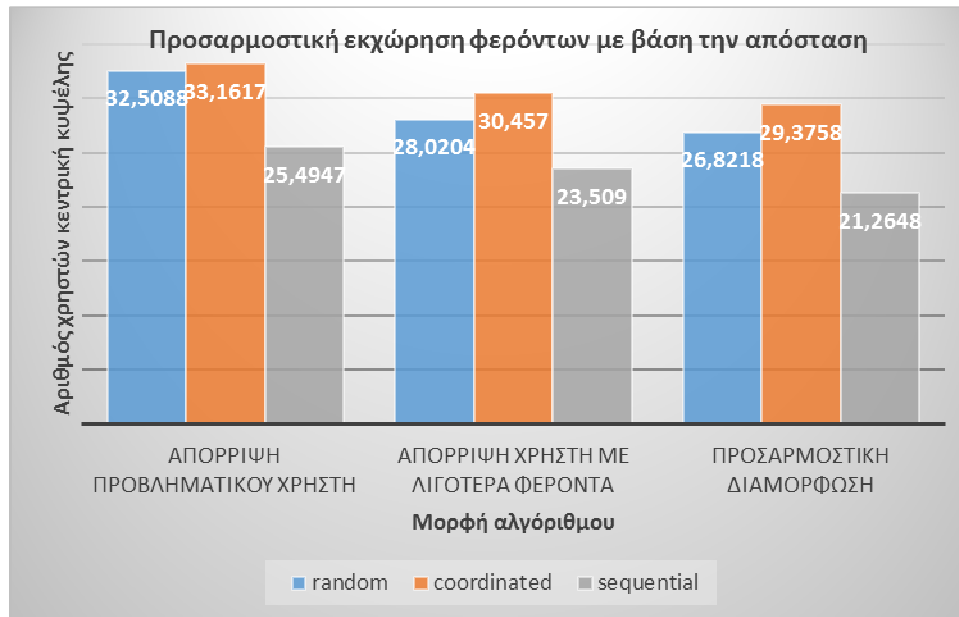
Τελευταία εκδοχή αλγόριθμου που πρόκειται να μελετηθεί αποτελεί αυτή της προσαρμοστικής εκχώρησης φερόντων με βάση την απόσταση (παρ. 4.4.5 και 4.4.6). Σε αυτή τη περίπτωση, ο αριθμός των προς εκχώρηση φερόντων καθορίζεται από την απόσταση του χρήστη σε σχέση με τον σταθμό βάσης, που ανήκει. Όσο πιο κοντά βρίσκεται ο χρήστης στον σταθμό βάσης, τόσο μεγαλύτερο αριθμό φερόντων λαμβάνει, άρα και υψηλότερο ρυθμό δεδομένων, ενώ όσο απομακρύνεται προς τα άκρα της κυψέλης, μικρότερο αριθμό άρα και ρυθμό δεδομένων.

Πρόκειται να μελετηθούν οι εκδοχές αλγορίθμων απόρριψης του προβληματικού χρήστη, για διαμόρφωση QPSK και προσαρμοστική διαμόρφωση, καθώς και του αλγόριθμου απόρριψης των προβληματικών χρηστών με τα ελάχιστα φέροντα για διαμόρφωση QPSK.

Όπως θα φάνει και στις διαγραμματικές απεικονίσεις στα επόμενα σχήματα, λόγω της ομοιόμορφης (προσαρμοστικής) κατανομής μικρότερου αριθμού φερόντων, στο σύνολο το χρηστών, εισάγονται περισσότεροι χρήστες στο σύστημα.



Σχήμα 54. Διαγραμματική απεικόνιση αριθμού χρηστών του συστήματος – εκδοχών αλγορίθμων για προσαρμοστική εκχώρηση φερόντων, με βάση την απόσταση



Σχήμα 55. Διαγραμματική απεικόνιση αριθμού χρηστών κεντρικής κυψέλης του συστήματος – εκδοχών αλγορίθμων για προσαρμοστική εκχώρηση φερόντων, με βάση την απόσταση

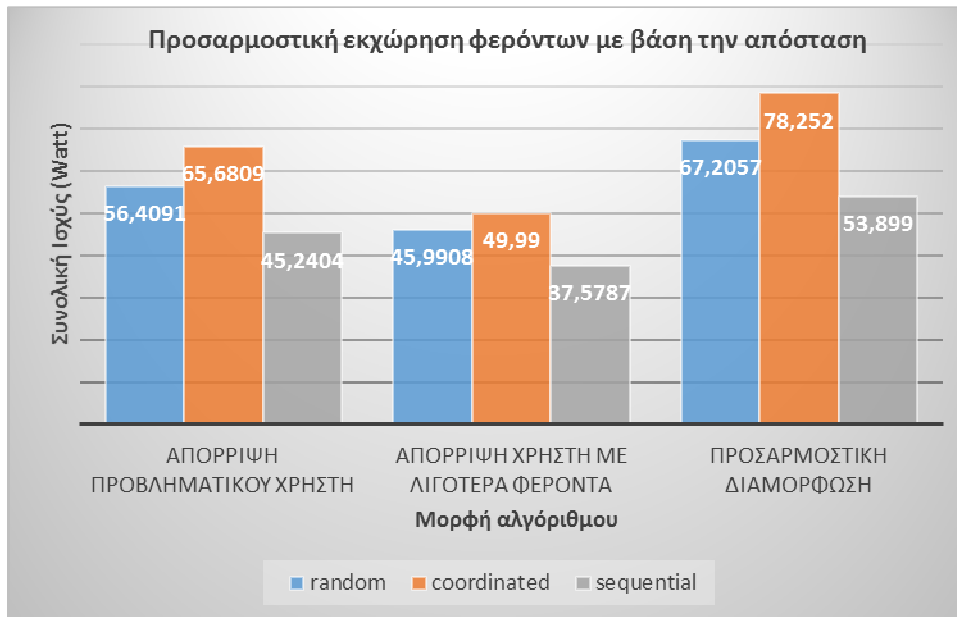
Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, σε σχέση με τους αλγόριθμους που μελετήθηκαν στις παραγράφους 5.1, 5.2 και 5.3, ο αποδεκτός αριθμός των εισαγόμενων χρηστών αυξάνεται σημαντικά.

Μεγαλύτερη χωρητικότητα στο κυψελωτό σύστημα OFDMA, παρέχει ο αλγόριθμος απόρριψης του προβληματικού χρήστη, σε σχέση με τον αντίστοιχο απόρριψης αυτού με τα λιγότερα φέροντα.

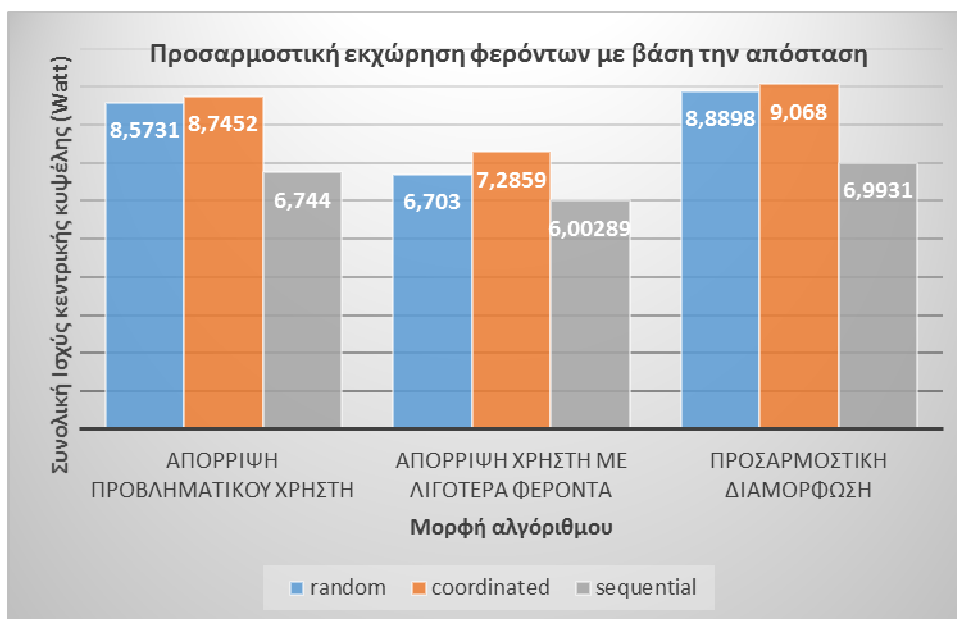
Όπως ήταν αναμενόμενο παρατηρούμε μείωση στην πρώτη περίπτωση, κατά την εφαρμογή προσαρμοστικής διαμόρφωσης στα φέροντα των χρηστών, καθώς υψηλότερης τάξεως διαμορφώσεις, οδηγούν σε μεγαλύτερα επίπεδα ομοδιαυλικών παρεμβολών.

Και πάλι, η προσφερόμενη χωρητικότητα (του συστήματος και της κεντρικής κυψέλης), που περιέχει ο συντεταγμένος αλγόριθμος υπερτερεί έναντι των αντίστοιχων του τυχαίου και του σειριακού.

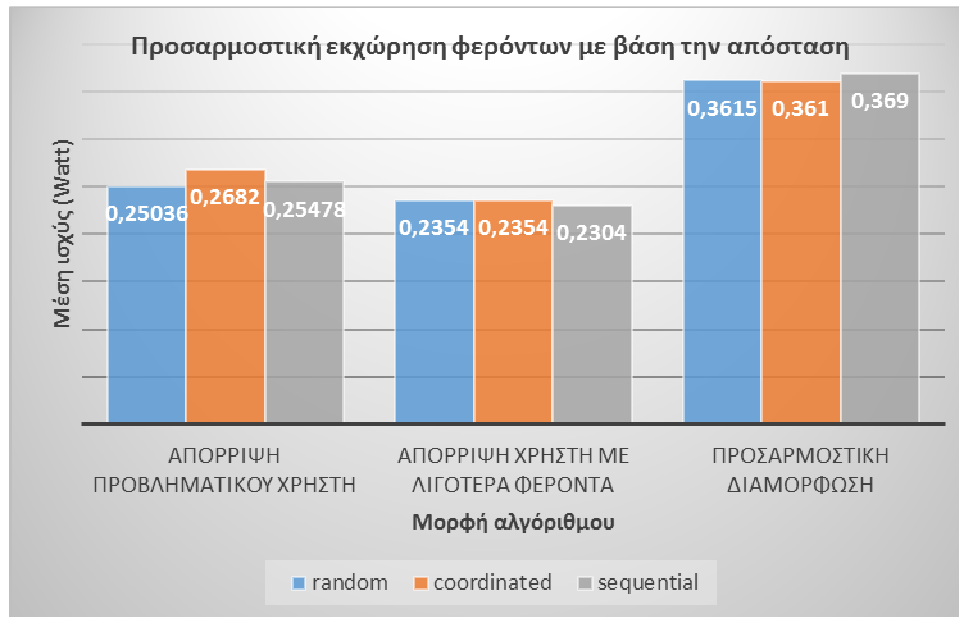
Τα επίπεδα ισχύος του συστήματος, στα σχήματα 56, 57 και 58 δίνουν μια εικόνα για τις ενεργειακές απαιτήσεις του αλγόριθμου.



Σχήμα 56. Διαγραμματική απεικόνιση συνολικής ισχύος χρηστών του συστήματος – εκδοχών αλγορίθμου για προσαρμοστική εκχώρηση φερόντων, με βάση την απόσταση



Σχήμα 57. Διαγραμματική απεικόνιση συνολικής ισχύος χρηστών της κεντρικής κυψέλης του συστήματος – εκδοχών αλγορίθμου για προσαρμοστική εκχώρηση φερόντων, με βάση την απόσταση



Σχήμα 58. Διαγραμματική απεικόνιση μέσης ισχύος χρηστών του συστήματος – εκδοχών αλγορίθμου για προσαρμοστική εκχώρηση φερόντων, με βάση την απόσταση

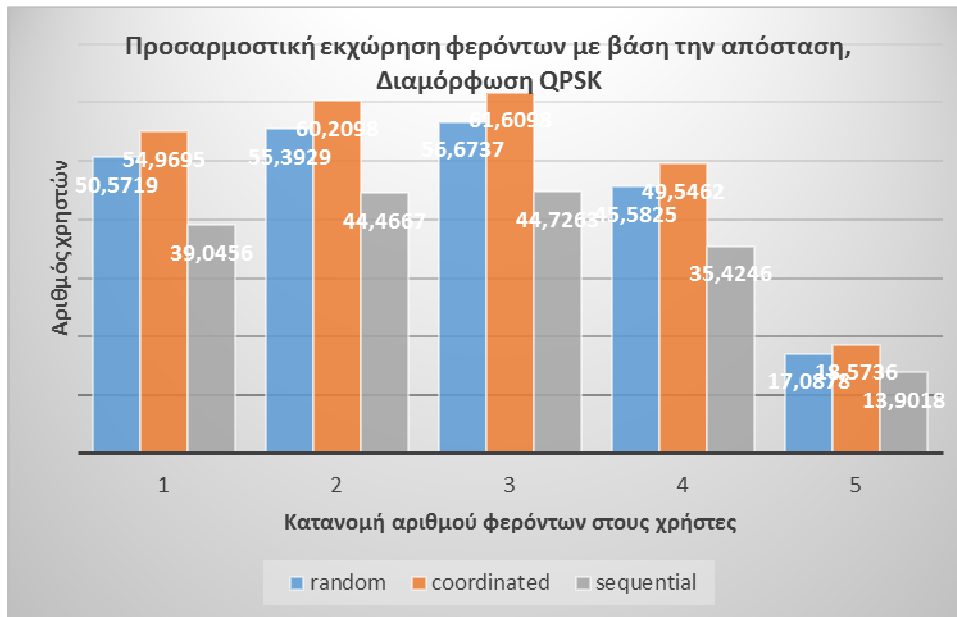
Επιβεβαιώνοντας τα προηγούμενα, η συνολική κατανάλωση ισχύος του συστήματος αυξάνεται σημαντικά, καθώς έχει αυξηθεί και η χωρητικότητα αυτού, σε σχέση με τους προηγούμενους αλγόριθμους.

Ο αλγόριθμος απόρριψης του προβληματικού χρήστη απαιτεί μεγαλύτερα επίπεδα ενέργειας σε σχέση με τον αντίστοιχο της απομάκρυνσης του χρήστη με τα λιγότερα φέροντα, όσον αφορά πάντα τη διαμόρφωση QPSK. Παρόλα αυτά μεγαλύτερες ενεργειακές απαιτήσεις έχει ο αλγόριθμος προσαρμοστικής διαμόρφωσης, εξαιτίας της απόδοσης υψηλότερων διαμορφώσεων σε φέροντα αυτών. Η ισχύς των χρηστών της κεντρικής κυψέλης εξαρτάται επίσης από τη χωρητικότητα του συστήματος.

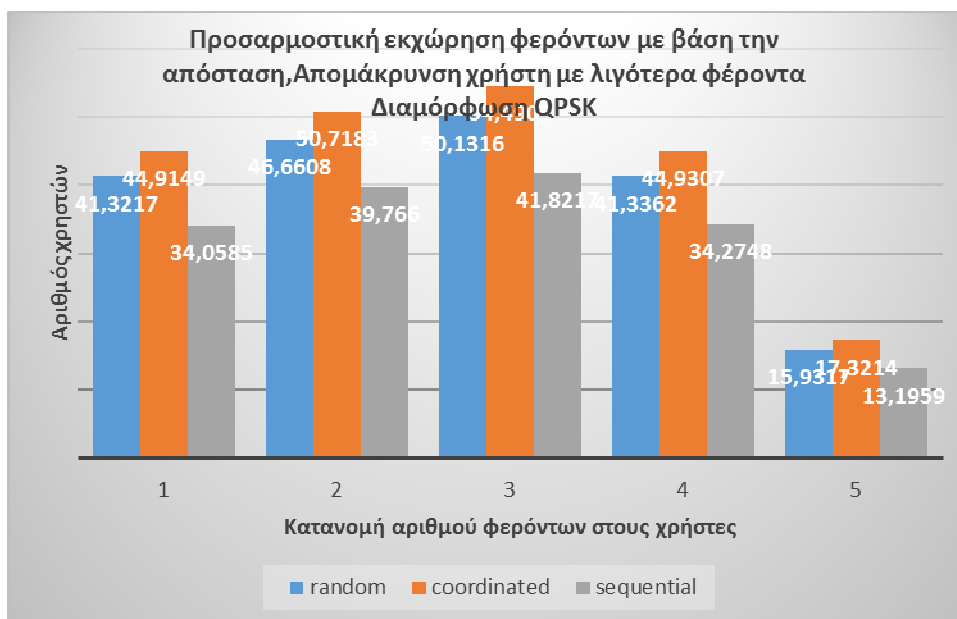
Και σε αυτή τη περίπτωση, ο πλέον απαιτητικός ενεργειακά αλγόριθμος εκχώρησης είναι ο συντεταγμένος.

Όσον αφορά τη μέση ισχύ, παρατηρείται ομοιόμορφη κατανομή στους χρήστες, με μείωση αυτής στον αλγόριθμο με απόρριψη χρηστών με τα ελάχιστα φέροντα, τόσο σε σχέση με τον αλγόριθμο απόρριψης του προβληματικού χρήστη, όσο και με τους αντίστοιχους των παραγράφων 5.1 και 5.2. Σημαντική όμως αύξηση παρατηρούμε στα αντίστοιχα αποτελέσματα αυτών της προσαρμοστικής διαμόρφωσης δίνοντας μας μια πιο ξεκάθαρη εικόνα, για την κατανάλωση ενέργειας που απαιτείται σε περιπτώσεις υψηλότερων τάξεων διαμορφώσεων.

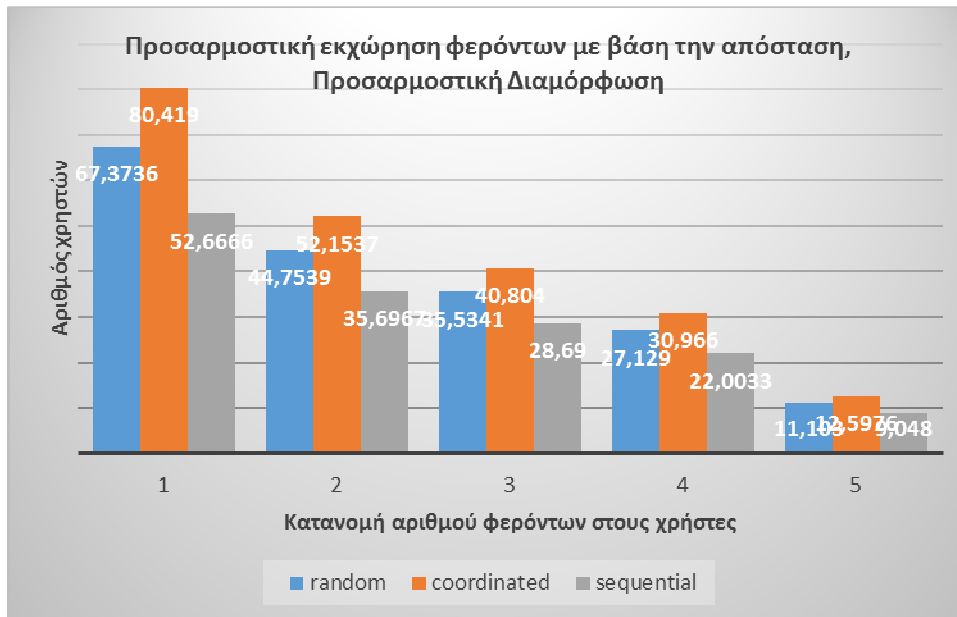
Σημαντική παράμετρο για το σύστημα, αποτελεί η κατανομή των φερόντων στους χρήστες όπως αυτή απεικονίζεται στα σχήματα 59, 60 κι 61.



Σχήμα 59. Διαγραμματική απεικόνιση αριθμού χρηστών του συστήματος – κατανομής αριθμού φερόντων στους χρήστες για προσαρμοστική εκχώρηση φερόντων, απομάκρυνση του προβληματικού χρήστη και διαμόρφωση QPSK, με βάση την απόσταση

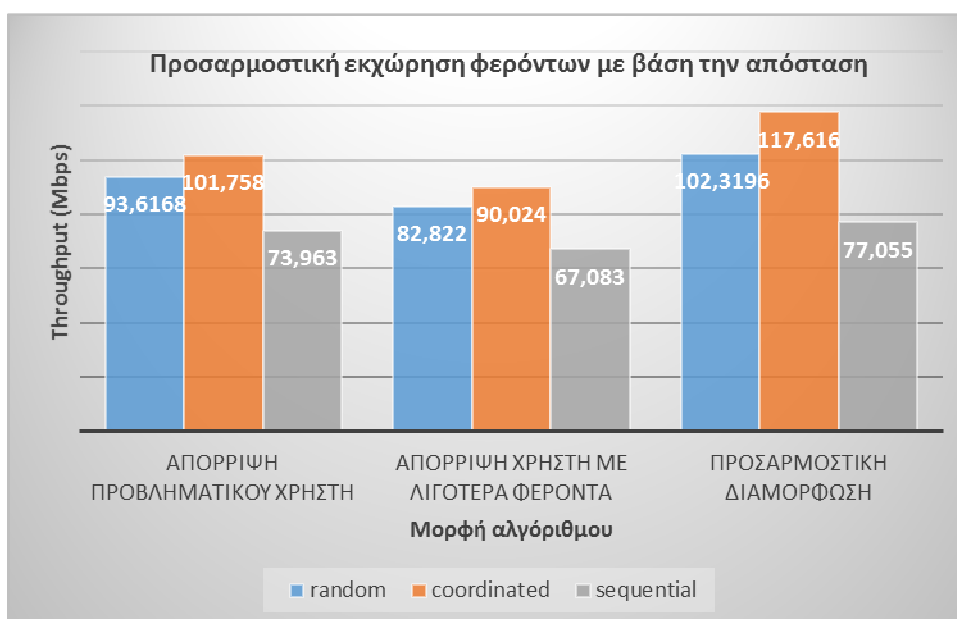


Σχήμα 60. Διαγραμματική απεικόνιση αριθμού χρηστών του συστήματος – κατανομής αριθμού φερόντων στους χρήστες για προσαρμοστική εκχώρηση φερόντων, απομάκρυνση του χρήστη με τα λιγότερα φέροντα και διαμόρφωση QPSK, με βάση την απόσταση



Σχήμα 61. Διαγραμματική απεικόνιση αριθμού χρηστών του συστήματος – κατανομής αριθμού φερόντων στους χρήστες για προσαρμοστική εκχώρηση φερόντων, απομάκρυνση του προβληματικού χρήστη και προσαρμοστική διαμόρφωση, με βάση την απόσταση

Από τις απεικονίσεις των διαγραμμάτων, γίνεται αντιληπτή η ομοιόμορφη κατανομή φερόντων στους χρήστες χαμηλότερου ρυθμού δεδομένων (κυρίως αριθμού 1-3 φερόντων), γεγονός που παρέχει χαμηλότερη ποιότητα υπηρεσιών σε σχέση με τον αλγόριθμο προσαρμοστικής εκχώρησης με βάση την ισχύ και τους αλγόριθμους σταθερής εκχώρησης, όταν επιλέγεται υψηλότερος αριθμός φερόντων προς εκχώρηση στους χρήστες. Παρά λοιπόν την αυξημένη χωρητικότητα, μια τέτοια παράμετρος έχει τις δικές της επιπτώσεις στην ρυθμοαπόδοση (throughput) του συστήματος.



Σχήμα 62. Διαγραμματική απεικόνιση της ρυθμοαπόδοσης (throughput) του συστήματος – κατανομής αριθμού φερόντων στους χρήστες για προσαρμοστική εκχώρηση φερόντων, με βάση την απόσταση

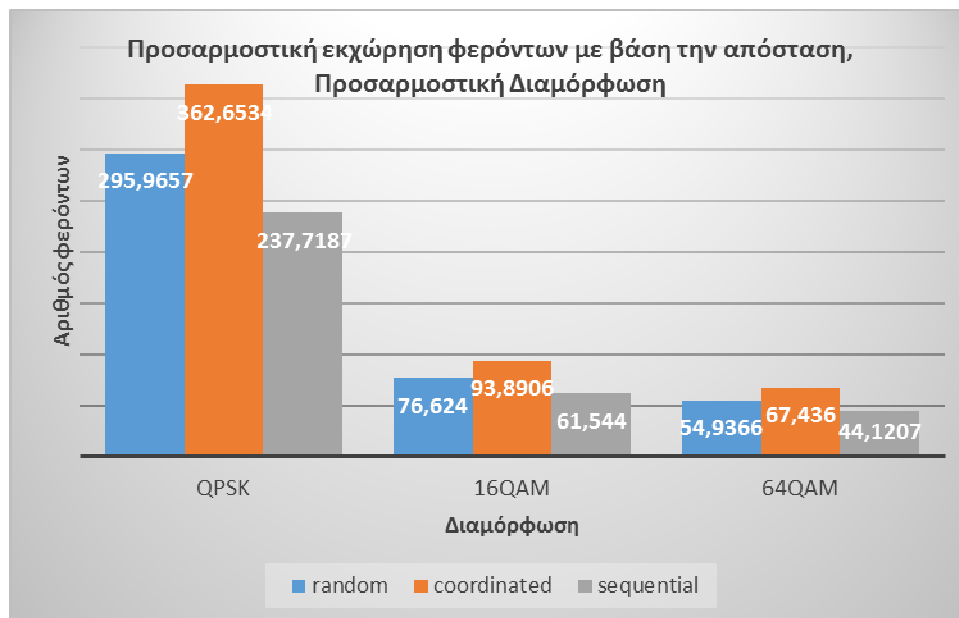
Όσον αφορά την εκδοχή διαμόρφωσης QPSK, ο μεγαλύτερος αριθμός εξυπηρετούμενων χρηστών (άρα και περισσότερων χρησιμοποιούμενων φερόντων) καταλήγει σε αύξηση της ρυθμοαπόδοσης (Throughput) του συστήματος. Καλύτερη λοιπόν, επίδοση ρυθμοαπόδοσης παρουσιάζεται για την απόρριψη προβληματικού χρήστη, ενώ παρατηρείται μείωση αυτής όταν κάνουμε χρήση του αλγόριθμου απόρριψης του (προβληματικού) χρήστη με τα λιγότερα φέροντα.

Κατά την εφαρμογή προσαρμοστικής διαμόρφωσης, παρατηρείται εκ νέου, μείωση του αριθμού των αποδεκτών χρηστών στο σύστημα, παρόλα αυτά λαμβάνουμε τα υψηλότερα επίπεδα throughput στο σύστημα, λόγω των ανώτερων επιπέδων διαμόρφωσης, των φερόντων που έχουν επιλεγεί, από τους χρήστες, αναλογικά με όσες προσομοιώσεις αλγορίθμων έλαβαν χώρα στη παρούσα διπλωματική.

Συγκριτικά με τους αλγόριθμους των παραγράφων 5.1, 5.2 και 5.3 έχουμε μεγιστοποίηση του προσφερόμενου throughput του συστήματος, με τη διαφορά ότι η ποιότητα παροχής υπηρεσιών στους χρήστες υστερεί, λόγω της προαναφερθείσας κατανομής των φερόντων σε αυτούς, από τους αλγόριθμους προσαρμοστικής εκχώρησης φερόντων με βάση την απόσταση.

Αποτελεσματικότερη στρατηγική εκχώρησης φερόντων παραμένει ο συντεταγμένος αλγόριθμος, με τον σειριακό να δίνει τα χειρότερα αποτελέσματα.

Σημαντική και πάλι είναι η παράθεση του διαγράμματος κατανομής των διαμορφώσεων στα φέροντα των χρηστών.



Σχήμα 63. Διαγραμματική απεικόνιση αριθμού φερόντων του συστήματος – διαμορφώσεων που αυτά λαμβάνουν για προσαρμοστική εκχώρηση φερόντων, με βάση την απόσταση

Η επιλογή φερόντων χαμηλότερου επιπέδου διαμόρφωσης QPSK, υπερτερεί έναντι αυτών με υψηλότερες διαμορφώσεις. Παρόλα αυτά, ο αυξημένος αριθμός φερόντων υψηλότερης τάξης, σε σχέση τον αλγόριθμο 5.3, διατηρεί τη ρυθμοαπόδοση του συστήματος σε υψηλά επίπεδα.

Κεφάλαιο 6^ο
Συμπεράσματα – Μελλοντικές προτάσεις

Η ορθογώνια διαίρεση συχνότητας πολλαπλής πρόσβασης OFDMA αποτελεί μια άκρως ενδιαφέρουσα τεχνολογία, για ασύρματα ευρυζωνικά δίκτυα πολλαπλής πρόσβασης. Σε διάστημα 10 χρόνων έγινε η κυρίαρχη τεχνολογία για τα επόμενης γενιάς δίκτυα, στο εγγύς και το απώτερο μέλλον. Ειδικότερα, η υψηλή ευελιξία του OFDMA είναι μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις, λόγω και των συνεχώς αυξανόμενων επιπέδων πολυπλοκότητας των συστημάτων επικοινωνιών.

Η παρούσα διπλωματική εστίασε στη μελέτη και την προσομοίωση ασύρματων κυψελωτών συστημάτων επικοινωνιών πολλαπλής πρόσβασης OFDMA, όπου οι χρήστες αποκτούν πρόσβαση κάνοντας χρήστη OFDM φερόντων. Απώτερο στόχο αποτελεί η μελέτη προσαρμοστικών τεχνικών επαναχρησιμοποίησης συχνότητας σε κυψελωτά δίκτυα επόμενης γενιάς και η αποτίμηση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων αυτών, εστιάζοντας σε συστήματα με αυξημένες προδιαγραφές χωρητικότητας και απόδοσης ρυθμού δεδομένων σε συνδυασμό με την αποδοτικότερη αξιοποίηση της καταναλισκόμενης ενέργειας αυτών.

Για το σκοπό αυτό μελετήθηκε και προσομοιώθηκε ένα OFDMA σύστημα-χωρίς γνώση του καναλιού διάδοσης-7 κυψελών, κάθεμια από τις οποίες είναι χωρισμένη σε τομείς των 120° , με την ύπαρξη ενός σταθμού βάσης BS, συγκεκριμένων χαρακτηριστικών, στο κέντρο τους. Παρατηρήσαμε τη συμπεριφορά του συστήματος για διαφορετικές εκδοχές κατηγοριών προσαρμοστικών τεχνικών επαναχρησιμοποίησης συχνότητας, ως προς τον αποδεκτό αριθμό χρηστών, τη συνολική και τη μέση ισχύ, καθώς και τη ρυθμοαπόδοση (Throughput) αυτού.

Στις προσομοιώσεις που έλαβαν χώρα, έγινε χρήση μιας σειράς αλγορίθμων κατανομής φερόντων στους χρήστες. Ο αλγόριθμος συντεταγμένης κατανομής (sequential algorithm), στον οποίο τα OFDMA φέροντα εκχωρούνται με αντίστροφη σειρά από τους σταθμούς βάσης, δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα. Ο αλγόριθμος τυχαίας κατανομής, που όπως προκύπτει κι από την ονομασία του, οι σταθμοί βάσης εκχωρούν τυχαία φέροντα στους χρήστες, και τέλος ο αλγόριθμος σειριακής κατανομής, ο λιγότερο ευφυής από όλους, καθώς η εκχώρηση των φερόντων στους χρήστες γίνεται σειριακά, με αποτέλεσμα να αυξάνονται αισθητά οι ομοδιαυλικές παρεμβολές και να μειώνεται κατ'επέκταση το σύνολο των αποδεκτών χρηστών.

Για την περάτωση των προσομοιώσεων και την λήψη των ζητούμενων αποτελεσμάτων υλοποιήθηκαν διαφορετικές μορφές (αλγόριθμοι) τεχνικών επαναχρησιμοποίησης. Στην πρώτη εκδοχή, όπου έχουμε σταθερή εκχώρηση αριθμού φερόντων στο χρήστη με απόρριψη του τελευταίου εισερχόμενου χρήστη, λάβαμε αποτελέσματα ικανοποιητικής χωρητικότητας για το σύστημα, καθώς είχαμε μεγάλο αριθμό αποδεκτών χρηστών. Κατά συνέπεια, η συνολική απαιτούμενη ισχύς ήταν υψηλή, ενώ και η ρυθμοαπόδοση (throughput) του συστήματος έλαβε υψηλές τιμές. Στην συνέχεια, μελετήθηκε ξανά ο αλγόριθμος σταθερής εκχώρησης φερόντων, με την μόνη διαφοροποίηση, της απόρριψης του προβληματικού χρήστη. Τα αποτελέσματα, όσον αφορά τον αποδεκτό αριθμό χρηστών (χωρητικότητα

του συστήματος) ήταν καλύτερα συγκριτικά με πριν, με συνέπεια τις αυξημένες απαιτήσεις συνολικής ισχύος, όπως και της ρυθμοαπόδοσης του συστήματος. Παρόλα αυτά, η μέση ισχύς ανά χρήστη μειώθηκε, δίνοντας τελικά ένα σύστημα με αυξημένη χωρητικότητα, και μείωση της μέσης απαιτούμενης ισχύος ανά χρήστη. Στη συνέχεια, έγινε χρήση αλγορίθμων προσαρμοστικής εκχώρησης φερόντων στους χρήστες με βάση την ισχύ, για QPSK διαμόρφωση και Προσαρμοστική Διαμόρφωση. Ως αποτέλεσμα της αυστηρότητας του αλγορίθμου, οι αποδεκτοί χρήστες του συστήματος μειώθηκαν, όπως και οι συνολικές ενεργειακές απαιτήσεις αυτού. Παρόλα αυτά η ποιότητα παροχής υπηρεσιών στους χρήστες ήταν υψηλή, ενώ επετεύχθη ακόμα μεγαλύτερη μείωση της μέσης απαιτούμενης ισχύος ανά χρήστη, κι επιπλέον η ρυθμοαπόδοση (throughput) του συστήματος παρέμεινε σε ικανοποιητικά επίπεδα, παρά τη σημαντική μείωση της χωρητικότητας, κυρίως κατά την εφαρμογή της προσαρμοστικής διαμόρφωσης, όπου οι χρήστες έλαβαν φέροντα διαμορφώσεων ανώτερων τάξεων (16QAM κι 64QAM) και υψηλότερες τιμές ισχύος. Η τελευταία εκδοχή αλγορίθμου αποτελεί αυτή της προσαρμοστικής εκχώρησης φερόντων με βάση την απόσταση, με απόρριψη του προβληματικού χρήστη για QPSK και προσαρμοστική διαμόρφωση κι απόρριψη του προβληματικού χρήστη με τα λιγότερα φέροντα, μόνο για QPSK διαμόρφωση. Αποτέλεσμα της κατανομής μικρότερου αριθμού φερόντων στους χρήστες, ήταν η αυξημένη χωρητικότητα σε σχέση με όλες τις προηγούμενες εκδοχές αλγορίθμων, η παροχή χαμηλότερης ποιότητας υπηρεσιών και οι αυξημένες απαιτήσεις του συστήματος σε ισχύ. Ως συνάρτηση των αποδεκτών χρηστών το Throughput του συστήματος ήταν αρκετά αυξημένο, κυρίως κατά τη προσαρμοστική διαμόρφωση, όπως φυσικά και η ισχύς (μέση και συνολική) του συστήματος.

Με βάση την ιστορική εξέλιξη στο ερευνητικό πεδίο των δικτύων OFDMA παρατηρούμε τη μετάβαση των μελετών από τα δίκτυα μοναδικής κυψέλης, στα πολυκυψελωτά δίκτυα. Η ανακοίνωση όμως, από την ITU (International Telecommunication Union) των προδιαγραφών και των απαιτήσεων, που θα πρέπει να πληρούνται από τα μελλοντικά ασύρματα δίκτυα επικοινωνίας, ως τμήμα του IMT-Advanced (International Mobile Telecommunications-Advanced) [40,41], κάνει πιο επιτακτική τη προσπάθεια μετατόπισης των ερευνητικών ενδιαφερόντων από τα πολυκυψελωτά στα δίκτυα αναμεταδοτών ή relays, όπως είναι η διεθνής τους ονομασία.

Ζητούμενα του IMT-Advanced αποτελούν, η αύξηση της χωρητικότητας των δικτύων επικοινωνιών, καθώς και η διαλειτουργικότητα αυτών, ώστε να επιτυγχάνεται η συνύπαρξη περισσότερων του ενός δικτύων στον ίδιο χώρο, με άκρως ικανοποιητική εκμετάλλευση των διαφορετικών δυνατοτήτων αυτών. Η ιδέα του femtocells αποτελεί την αρχή της συνεργασίας μεταξύ των ενσύρματων με τα ασύρματα δίκτυα. Επιπρόσθετα με αυτά όμως, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και ο περιορισμός της καταναλισκόμενης ενέργειας των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων, ώστε η εξέλιξη των δικτύων τόσο σε ερευνητικό, όσο και στο πεδίο εφαρμογής τους να αποσκοπεί συν τοις άλλοις σε βελτίωση κι όχι σε επιπλέον επιβάρυνση των περιβαλλοντικών συνθηκών.

Στο εγγύς μέλλον, οι προαναφερθείσες τεχνολογικές αδυναμίες, όπως η υψηλή κατανάλωση ενέργειας και τα προβλήματα κάλυψης σε εσωτερικούς χώρους πρόκειται να επιλυθούν βοηθώντας τους διαχειριστές να φέρουν τα, βασισμένα στο OFDMA, δίκτυα σε υψηλότερη κλίμακα. Οι εμπειρίες που πρόκειται να αποκομίσουν από την προσπάθεια ανάπτυξης θα βοηθήσουν στην περαιτέρω ανάπτυξη των 4G-IMT-Advanced δικτύων. Ωστόσο, η πολυπλοκότητα των συστημάτων και η εισαγωγή των διαφορετικών κι όχι αποδεδειγμένων στο πεδίο, τεχνολογιών, όπως των MU-MIMO πρόκειται να αποτελέσουν μια από τις σπουδαιότερες προκλήσεις, τόσο για τους διαχειριστές, όσο και για τους πωλητές.

Η ερευνητική κοινότητα κατέχει θέση κλειδί για την ενεργοποίηση της επιτυχίας των ασύρματων ευρυζωνικών συστημάτων επικοινωνιών OFDMA, επενδύοντας σε πρακτικές λύσεις στο πραγματικό κόσμο, όπως αυτό αντιμετωπίζονται από τους διαχειριστές και τους πωλητές και ωθώντας παράλληλα τα άκρα των τεχνολογικών ορίων προς την κατεύθυνση των ασύρματων δικτύων πολύ υψηλής χωρητικότητας.

Βιβλιογραφία

- [1] Θεολόγου, Μ.Ε, “Δίκτυα Κινητών και Προσωπικών Επικοινωνιών”, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π 2010.
- [2] Proakis, J.G and Salehi, M., “Συστήματα Τηλεπικοινωνιών”, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμια Αθηνών 2002.
- [3] Flickenger, Rob, “Building Wireless Communication Networks”, O’Reilly 2002.
- [4] Ali-Yahira, T., ” Understanding LTE and its Performance”, Springer 2011.
- [5] Korhonen, J., “Introduction to 3G Mobile Communications”, Artech House 2003.
- [6] Bannister, J., Mather, P., Coope, S., “Convergence Technologies for 3G, IP, UMTS, EGPRS and ATM”, Wiley 2005.
- [7] Lescuyer, P., & Lucidarme, T., “Evolved Packet System (EPS), The LTE and SAE Evolution of 3G UMTS”, John Wiley & Sons, Ltd 2008.
- [8] “LTE:The Future of Mobile Broadband Technology”, Verizon Wireless 2009 (White Paper).
- [9] Κανατάς, Α., Κωνσταντίνου, Φ., Πάντος, Γ., “Συστήματα Κινητών Επικοινωνιών, Εκδόσεις Παπασωτηρίου 2008.
- [10] Κωνσταντίνου, Φ., “Κινητές Τηλεπικοινωνίες-Μοντέλα Ραδιοκάλυψης”, 2002.
- [11] Κωττής, Π., Αράπογλου, Π.-Δ., “Ασύρματες Επικοινωνίες”, Εκδόσεις Τζιόλα 2011.
- [12] Pavlathan, K., Krishnamurthy, P., “Principles of Wireless Networks:An Unified Approach”, PH PTR 2003.
- [13] Tse, D., Viswanath, P., “Fundamentals of Wireless Communication”, Cambridge 2005.
- [14] Bird, E., “Wireless, Cellular and Personal Telecommunication”, Southern Methodist University, 2003.
- [15] Pietrzyk, S., “OFDMA for Broadband Wireless Access”, Artech House 2006.
- [16] Cox, D.C., “Correlation Bandwidth and Delay Spread Multipath Propagation Statistics for 910 MHz Urban Mobile Radio Channels”, IEEE Trans. On Commun 1975.
- [17] Chang, R.W., “Synthesis of an Efficient Parallel Data Transmission System”, Bell System Technology 1966.
- [18] Salzberg, B.R., “Performance of an Efficient Parallel Data Transmission System”, Community Technology 1967.
- [19] “Orthogonal Frequency Division Multiplexing”, U.S Patent No 3 1966.
- [20] Mosier, R. R., Clabaugh R., G., “Kineplex, a Bandwidth Efficient Binary Transmission System”, AIEE Trans. 1958 .
- [21] Porter, G. C., “Error Distribution and Diversity Performance of a Frequency Differential PSK HF”, IEEE Trans 1968.
- [22] Zimmerman, M. S., Kirsch A.L., “The AN/GSC variable rate data modem for HF radio”, IEEE Trans 1967.

- [23] Weinstein, S.B, Ebert, P.M, “Data Transmission by Frequency-Division Multiplexing using the Discrete Fourier Transform”, IEEE Trans 1971.
- [24] Hirosaki, B., “An Orthogonally Multiplexed QAM System Using the Discrete Fourier Transform”, IEEE Trans. 1981.
- [25] Hirosaki, B., “Voice Band Data Modem Based on Orthogonally Multiplexed QAM Techniques”
- [26] Keasler, W.E., Bitzer, D.L, “High Speed Modem Suitable for Operating with Switched Network”, U.S patent 1980.
- [27] “Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems, IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks, IEEE 802.16-2004 2004.
- [28] Ghosh, A., Wolter, D., Andrews J., Chen R., “Broadband Wireless Access with WiMAX/802.16 Current Performance Benchmarks and Future Potential”, IEEE Communications Magazine 2005.
- [29] www.wimaxforum.org
- [30] “3GPP; Technical Specification Group Radio Access Network; Requirements for E-ULRA and E-UTRAN (R7), 3GPP TR 25.913 V7.3.0 2006.
- [31] Doufexi, A., Armour, S., “Design Considerations and Physical Layer Performance Results for a 4G OFDMA System Employing Dynamic Subcarrier Allocation”.
- [32] “3GPP; Technical Specification Group Radio Access Network; Physical”.
- [33] Prasad, R., Velez, F., “OFDMA WiMAX Physical Layer”, Springer 2010.
- [34] “WiMAX A Way Forward In India”, WiMAX Forum 2010.
- [35] Sarperi, L., Hunukumbure, M., Vadgama, S., “Simulation Study of Fractional Frequency Reuse in WiMAX Networks”, FUJITSU Sci. Tech 2008.
- [36] Στειακογιαννάκης, Ι., «Αλγόριθμοι Διαχείρισης Ασύρματων Πόρων για Πολυκυψελωτά OFDMA Δίκτυα με Εφαρμογή στα Δίκτυα WiMAX”, Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο 2011.
- [37] Zarbouti, D.A., Stiakogiannakis, I.N., Tsoulos, G.V., Athanasiadou, G.A., Kaklamani, D.I., “Performance Evaluation of OFDMA Techniques in Multicellular Networks”, School of Electrical and Computer Engineering, National Technical University of Athens, Department of Telecommunication Science and Technology, University of Peloponnese 2008.
- [38] Zarbouti, D.A., Stiakogiannakis, I.N., Tsoulos, G.V., Athanasiadou, G.A., Kaklamani, D.I., “OFDMA Techniques in Multicellular Networks with Total Frequency Reuse”, School of Electrical and Computer Engineering, National Technical University of Athens, Department of Telecommunication Science and Technology, University of Peloponnese 2008.
- [39] Zarbouti, D.A., Stiakogiannakis, I.N., Tsoulos, G.V., Athanasiadou, G.A., Kaklamani, D.I., “Subcarrier Allocation Algorithms for Multicellular OFDMA Networks Without Channel State Information”, School of Electrical and Computer Engineering, National Technical

University of Athens, Department of Telecommunication Science and Technology, University of Peloponnese 2008.

- [40] Marks, R., IEEE 802.16: The 4G Pioneer, Huawei Technologies 2008.
- [41] Maeder, A., Zein, N., "OFDMA in the Field: Current and Future Challenges", Network Laboratories Europe 2010.