

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Η/Υ ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Αποδοτικές Τεχνικές Διαχείρισης Ραδιοπόρων σε Ετερογενή Δίκτυα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παντελής Ε. Δεμένεγας

Επιβλέπων: Δήμητρα – Θεοδώρα Κακλαμάνη

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π

Αθήνα, Μάιος 2018



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Η/Υ ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Αποδοτικές Τεχνικές Διαχείρισης Ραδιοπόρων σε Ετερογενή Δίκτυα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παντελής Ε. Δεμένεγας

Επιβλέπων : Δήμητρα – Θεοδώρα Κακλαμάνη

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

.....

Δήμητρα Κακλαμάνη Νικόλαος Ουζούνογλου Ιάκωβος Βενιέρης

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π Καθηγητής Ε.Μ.Π Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Μάιος 2018

.....

Δεμένεγας Ε. Παντελής

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

Copyright © Παντελής Δεμένεγας, 2018

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.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα σύγχρονα πολυκυψελωτά ασύρματα δίκτυα 4G, LTE και τα αναμενόμενα δίκτυα 5ης γενιάς έχουν ανάγκη πρόσβασης σε νέες ζώνες λειτουργίας (αδειοδοτούμενες και μη). Το ήδη περιορισμένο ραδιοφάσμα απαιτεί αποδοτικότερη διαχείριση. Τέλος, απαραίτητη είναι και η αποδοτική διαχείριση των πόρων ισχύος.

Πρόσθετα, τα πολυκυψελωτά δίκτυα υποφέρουν από ομοδιαυλικές παρεμβολές. Η αντιμετώπιση αυτών των παρεμβολών είναι σημαντική για τη βελτιστοποίηση της απόδοσής τους. Για το λόγο αυτόν πρέπει να υιοθετηθεί ένα σχήμα διαμόρφωσης και πολλαπλής πρόσβασης. Μια τέτοια τεχνική αποτελεί η OFDMA, που αυξάνει τη χωρητικότητα του δικτύου και συνδυάζεται με τις τεχνικές πολλαπλών κεραιοστοιχείων MIMO και Massive MIMO. Τα συστήματα Massive MIMO χρησιμοποιούν χωρική πολυπλεξία και συμβάλλουν στην περαιτέρω αύξηση της χωρητικότητας.

Λόγω του αυξανόμενου αριθμού χρηστών των ασύρματων δικτύων η κυψελική τους διάταξη γίνεται πυκνότερη, αφού χρησιμοποιούν διαφορετικούς τύπους κυψελών και τεχνολογιών πρόσβασης. Η συνέργεια αυτή οδηγεί στη δημιουργία ετερογενών δικτύων στα οποία έχει στραφεί η επιστημονική έρευνα.

Για τους παραπάνω λόγους στη διπλωματική εργασία προσομοιώθηκαν αλγόριθμοι ανάθεσης ραδιοπόρων σε MIMO-OFDMA πολυκυψελωτό δίκτυο τόσο μεμονωμένου (WiMAX) όσο και ετερογενούς (WiMAX-WiFi) δικτύου.

Λέξεις Κλειδιά

Κυψελωτά δίκτυα,4G,ετερογενή δίκτυα, OFDMA,MIMO,RRM,MSNR,ομοδιαυλικές παρεμβολές

ABSTRACT

Modern multicellular wireless 4G, LTE networks and future to come 5th generation networks need access to new spectrum territories (licensed or not). The already limited spectrum requires more efficient management. As a conclusion the more efficient management of our recourses is essential.

Furthermore, multicellular networks suffer from co-channel interference. To confront these interferences, it is crucial to improve its efficiency. For this reason, a modulation and multiple access scheme has to be adopted. OFDMA is one of such tecniques that increase the network capacity and it can be combined with MIMO and massive MIMO multiple antenna tecniques. Massive MIMO systems contribute to further capacity increase using spatial multiplexing.

Due to the increasing number of users of the wireless networks cellular architecture becomes denser, using different types of cells and access tecniques. This cooperation leads the scientific research in heterogenous networks.

For all the reasons spotted above in this thesis radio recources management algorithms are simulated in MIMO-OFDMA multicellular network, standalone (WiMAX) and heterogenous (WiMAX-WiFi).

A historical retrospect of the wireless network is presented in section 1

The key features of the MIMO-OFDMA system is described in section 2.

The radio recourses management tecniques that are presented in contemporary bibliography are depicted in section 3.

The simulators of standalone and heterogenous networks are described and a presentation of the results is made in sections 4 and 5.

The outcome of the research is summarising in section 6 and suggestions for future study and research are made.

Keywords

Cellular networks,4G,Hetnet, OFDMA,MIMO,RRM,MSNR,Co-Channel Interference

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την καθηγήτρια μου κα Δήμητρα Κακλαμάνη, γιατί με την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα σύγχρονο και ενδιαφέρον θέμα.

Επίσης, ένα μεγάλο ευχαριστώ στη δρ κα Μαρία Σεϊμένη για την αμέριστη βοήθεια και το χρόνο που διέθεσε καθ΄ όλη τη διάρκεια της εργασίας αυτής.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για τη συνεχή υποστήριξη όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου.

Πίνακας περιεχομένων

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	10
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	16
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΝΤΟΜΕΥΣΕΩΝ	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΓΕΝΕΕΣ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ	21
1.1 ΔΙΚΤΥΑ ΠΡΩΤΗΣ ΓΕΝΙΑΣ	21
1.2 Δικτύα δεύτερης γενιάς 2G-2.7G	22
1.3 ΔΙΚΤΥΑ ΤΡΙΤΗΣ ΓΕΝΙΑΣ 3G-3.75G	22
1.4 Δικτύα τεταρτής γενιάς 4G	23
1.5 Δικτύα 4G+(LTE advanced)	24
1.6 Δικτύα πεμπτής γενιάς 5G	24
1.7 TA KYPIOTEPA IEEE STANDARDS	26
1.8 ΚΙΝΗΤΡΟ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ MASSIVE MIMO-OFDMA	29
2.1 H TEXNIKH OFDM/ OFDMA	29
2.1.1 Η τεχνική OFDM	29
2.1.2 Η RF αλυσίδα του OFDM πομποδέκτη	31
2.1.2.1 Κωδικοποίηση ραδιοδιαύλου	31
2.1.2.2 Διαμόρφωση συμβόλου	31
2.1.2.3 Διαμόρφωση OFDM	31
2.1.2.4 Κυκλικό Πρόθεμα	32
2.1.2.5 Λόγος Μέγιστης-προς-Μέσης Ισχύος σε συστήματα με πολλαπλές φέρουσ	ες
συχνότητες	33
2.1.2.6 Η έννοια του διαφορισμού στο ασύρματο μέσο διάδοσης	34
2.1.2.7 Αποδιαμόρφωση OFDM	35
2.1.2.8 Αξιολόγηση OFDM αποδιαμόρφωσης	35
2.1.3 Η RF αλυσίδα του OFDMA πομποδέκτη	36
2.1.4 Σύγκριση τεχνικών πρόσβασης με διαίρεση συχνότητας	37
2.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ MASSIVE MIMO	38
2.2.1 Χωρητικότητα massive MIMO	38
2.2.2 O massive MIMO ραδιοδίαυλος	39
2.2.4 Αξιολόγηση massive ΜΙΜΟ ραδιοδιαύλου	41

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΤΕΧΝΙΚΕΣ RRM ΓΙΑ OFDMA ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ	43
3.2 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΝΑΘΕΣΗΣ ΠΟΡΩΝ ΣΕ OFDM ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ	44
3.3 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΝΑΘΕΣΗΣ ΠΟΡΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ MU-OFDMA	44
3.4 ΠΑΙΓΝΙΟΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΝΑΘΕΣΗΣ ΠΟΡΩΝ ΣΕ OFDMA ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ	45
3.5 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΝΑΘΕΣΗΣ ΠΟΡΩΝ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ 4G	45
3.5.1 Τεχνικές ανάθεσης πόρων σε πολυκυψελωτά δίκτυα (Multicellular Ntws)	46
3.5.1.1 Frequency Reuse-based Schemes (Στατική προσέγγιση)	46
3.5.1.2 Cell Coordination Schemes (Δυναμική Προσέγγιση)	49
3.5.1.3 RRM με τεχνικές μετριασμού παρεμβολών (IMTs)	49
3.5.2 Τεχνικές ανάθεσης πόρων σε γνωστικά δίκτυα (Cognitive Ntws)	51
3.5.3ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΝΑΘΕΣΗΣ ΠΟΡΩΝ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΜΕΤΑΓΩΓΗΣ (RELAY NTWS)	51
3.5.4 Τεχνικές ανάθεσης πόρων σε ετερογενή δίκτυα (HetNets)	52
3.6 Τεχνικές αναθέσης πορών με γνώση της κατάστασης του	
ΡΑΔΙΟΔΙΑΥΛΟΥ(CSI)	53
3.7 Προτεινομένες RRM τεχνικές	53
3.7.1 Βελτιωμένη τεχνική επαναχρησιμοποίησης συχνότητας (FFR)	54
3.7.2 Τεχνική απόδοσης καναλιών ελάχιστης επαναχρησιμοποίησης (RAJSS)	55
3.7.3Τεχνική απόδοσης καναλιών με εικονική κατάτμιση της επιφάνειας των	
κυψελών(BAJSS)	55
3.7.4 Τεχνική απόδοσης καναλιών με μεγιστοποίηση του σηματοθορυβικού	
λόγου(MSNR)	57
3.7.5 Αλγοριθμική πολυπλοκότητα προτεινόμενων τεχνικών	57
3.7.5 Δείκτης Δικαιοσύνης [Fairness Index]	58
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ ΠΡΟΣΟΜΕΙΩΣΗΣ ΔΙΚΤΥΟΥ WIMAX	59
4.1 Αρχιτεκτονική του προσομειώτη	59
4.2 Εισόδος χρήστη στο δικτύο και επιλογή εξύπηρετητή σταθμού βάσης	63
4.3 Αναθέση υποκαναλιών στους χρήστες	64
4.4 ΑΝΑΘΕΣΗ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΙΣΧΥΟΣ	64
4.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΔΙΚΤΥΟΥ WIMAX	65
4.6 Σύνοψη κεφαλαίου	94
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΕΤΕΡΟΓΕΝΟΥΣ ΔΙΚΤΥΟΥ	95
5.1 Αρχιτεκτονική του προσομοιώτη	95
5.2 Αποτελέσματα προσομοιώσεων ετερογενούς δικτύου	98
5.4 Σύνοψη κεφαλαίου	108
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ	109
6.1ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	109
6.2 Μελλοντική Εργασια	109
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ	111

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1-1	:	Εξέλιξη ασυρμάτων τεχνολογιών.	22
Εικόνα 2-1	:	Φάσμα OFDM και διάστημα διαχωρισμού των	31
		υποκαναλιών.	
Εικόνα 2-2	:	Η Αποδοτικότερη αξιοποίηση του φάσματος στην OFDM.	31
Εικόνα 2-3	:	Κυκλικό πρόθεμα και διάρκεια συμβόλου	33
Εικόνα 2-4	:	Διαμοιρασμός πόρων συχνότητας στις OFDM και OFDMA.	37
Εικόνα 2-5	:	Το Resource Block των LTE δικτύων.	38
Εικόνα 2-6	:	Η υπεροχή της TDD έναντι της FDD σε	40
		συστήματα μεγάλης κλίμακας.	
Εικόνα 2-7	:	Ανω ζεύξη στις massive MIMO.	41
Εικόνα 2-8	:	Κάτω ζεύξη στις massive MIMO.	41
Εικόνα 3-1	:	Τεχνικές ανάθεσης ραδιοπόρων.	44
Εικόνα 3-2(α	ı):	Τεχνική Reuse-1.	48
Εικόνα 3-2(β	5):	Τεχνική Reuse-3.	48
Εικόνα 3-3(α	ı):	Τεχνική SFR	49
Εικόνα 3-3(β	5):	Τεχνική PFR	49
Εικόνα 3-4	:	Ανάθεση ραδιοπόρων με τον σειριακό αλγόοιθμο	51
Εικόνα 3-5	:	Ανάθεση ραδιοπόρων με τον αλγόριθμο Random.	51
Εικόνα 3-6	:	Βελτιωμένη FFR για 4 τύπους κυψελών.	55
Εικόνα 3-7	:	Κατανομή του φάσματος στις κυψέλες με την τεχνική RAJSS.	56
Εικόνα 3-8	:	Κατανομή του φάσματος στις κυψέλες με την τεχνική BAJSS.	57
Εικόνα 4-1	:	Κυψελική διάταξη WiMAX δικτύου.	61
Εικόνα 4-2	:	Δομή MC προσομείωσης WiMAX δικτύου.	63
Εικόνα 4-3	:	Χωρητικότητα WiMAX σενάριο 1.1 (tier=1 Mt=2 PF=5%)	68

Εικόνα 4-4	:	Χωρητικότητα WiMAX σενάριο 2.1 (tier=1 Mt=2 PF=15%)	68
Εικόνα 4-5	:	Χωρητικότητα WiMAX σενάριο 3.1 (tier=1 Mt=2 PF=30%)	69
Εικόνα 4-6	:	Χωρητικότητα WiMAX σενάριο 1.2 (tier=1 Mt=25 PF=5%)	69
Εικόνα 4-7	:	Χωρητικότητα WiMAX σενάριο 2.2 (tier=1 Mt=25 PF=15%)	70
Εικόνα 4-8	:	Χωρητικότητα WiMAX σενάριο 3.2 (tier=1 Mt=25 PF=30%)	70
Εικόνα 4-9	:	Χωρητικότητα WiMAX σενάριο 1.3 (tier=1 Mt=50 PF=5%)	70
Εικόνα 4-10	:	Χωρητικότητα WiMAX σενάριο 2.3 (tier=1 Mt=50 PF=15%)	71
Εικόνα 4-11	:	Χωρητικότητα WiMAX σενάριο 3.3 (tier=1 Mt=50 PF=30%)	71
Εικόνα 4-12	:	Συνολική Μέση Ισχύς WiMAX σενάριο 1.1 (tier=1 Mt=2 PF=5%)	72
Εικόνα 4-13	:	Συνολική Μέση Ισχύς WiMAX σενάριο 2.1 (tier=1 Mt=2 PF=15%)	72
Εικόνα 4-14	:	Συνολική Μέση Ισχύς WiMAX σενάριο 3.1 (tier=1 Mt=2 PF=30%)	72
Εικόνα 4-15	:	Συνολική Μέση Ισχύς WiMAX σενάριο 1.2 (tier=1 Mt=25 PF=5%)	73
Εικόνα 4-16	:	Συνολική Μέση Ισχύς WiMAX σενάριο 2.2 (tier=1 Mt=25 PF=15%)	73
Εικόνα 4-17	:	Συνολική Μέση Ισχύς WiMAX σενάριο 3.2	73

(tier=1 Mt=25 PF=30%)

Εικόνα 4-18	:	Συνολική Μέση Ισχύς WiMAX σενάριο 1.3 (tier=1 Mt=50 PF=5%)	74
Εικόνα 4-19	:	Συνολική Μέση Ισχύς WiMAX σενάριο 2.3 (tier=1 Mt=50 PF=15%)	74
Εικόνα 4-20	:	Συνολική Μέση Ισχύς WiMAX σενάριο 3.3 (tier=1 Mt=50 PF=30%)	74
Εικόνα 4-21	:	Μέση Ισχύς ανα τερματικό WiMAX σενάριο 1.1(tier=1 Mt=2 PF=5%)	75
Εικόνα 4-22	:	Μέση Ισχύς ανα τερματικό WiMAX σενάριο 2.1(tier=1 Mt=2 PF=15%)	75
Εικόνα 4-23	:	Μέση Ισχύς ανα τερματικό WiMAX σενάριο 3.1(tier=1 Mt=2 PF=30%)	76
Εικόνα 4-24	:	Μέση Ισχύς ανα τερματικό WiMAX σενάριο 1.2(tier=1 Mt=25 PF=5%)	76
Εικόνα 4-25	:	Μέση Ισχύς ανα τερματικό WiMAX σενάριο 2.2(tier=1 Mt=25 PF=15%)	77
Εικόνα 4-26	:	Μέση Ισχύς ανα τερματικό WiMAX σενάριο 3.2(tier=1 Mt=25 PF=30%)	77
Εικόνα 4-27	:	Μέση Ισχύς ανα τερματικό WiMAX σενάριο 1.3(tier=1 Mt=25 PF=5%)	78
Εικόνα 4-28	:	Μέση Ισχύς ανα τερματικό WiMAX σενάριο 2.3(tier=1 Mt=25 PF=15%)	78
Εικόνα 4-29	:	Μέση Ισχύς ανα τερματικό WiMAX σενάριο 3.3(tier=1 Mt=25 PF=30%)	78
Εικόνα 4-30	:	Μέση Ισχύς ανα τερματικό WiMAX σενάριο 4.1(tier=2 Mt=25 PF=5%)	79
Εικόνα 4-31	:	Μέση Ισχύς ανα τερματικό WiMAX σενάριο 5.1(tier=2 Mt=25 PF=15%)	80
Εικόνα 4-32	:	Μέση Ισχύς ανα τερματικό WiMAX σενάριο 6.1(tier=2 Mt=25 PF=30%)	80
Εικόνα4-33	:	Χωρητικότητα WiMAX με χρήση του MSNR(tier=2 Mt=2,25,50 PF=5%) <td>81</td>	81
Εικόνα4-34	:	Χωρητικότητα WiMAX με χρήση του MSNR(tier=2 Mt=2,25,50 PF=15%)	81
Εικόνα4-35	:	Χωρητικότητα WiMAX με χρήση του MSNR(tier=2 Mt=2,25,50 PF=30%)	82

Εικόνα 4-36	:	Συνολική Μέση Ισχύς WiMAX σενάριο 4.2(tier=2 Mt=25 PF=5%)	83
Εικόνα 4-37	:	Συνολική Μέση Ισχύς WiMAX σενάριο 5.2(tier=2 Mt=50 PF=15%)	83
Εικόνα 4-38	:	Συνολική Μέση Ισχύς WiMAX σενάριο 6.1(tier=2 Mt=2 PF=30%)	84
Εικόνα 4-39	:	Συνολική Μέση Ισχύς WiMAX σενάριο 6.2(tier=2 Mt=25 PF=30%)	84
Εικόνα4-40	:	Συνολική Μέση Ισχύς WiMAX σενάριο 6.3(tier=2 Mt=50 PF=30%)	85
Εικόνα4-41	:	Μέση Ισχύς ανα τερματικό WiMAX σενάριο 4.2(tier=2 Mt=25 PF=5%)	85
Εικόνα4-42	:	Μέση Ισχύς ανα τερματικό WiMAX σενάριο 5.2(tier=2 Mt=25 PF=15%)	86
Εικόνα4-43	:	Μέση Ισχύς ανα τερματικό WiMAX σενάριο 6.2(tier=2 Mt=25 PF=30%)	86
Εικόνα4-44	:	Χωρητικότητα WiMAX 500MC (tier=1 Mt=25 PF=5%)	87
Εικόνα4-45	:	Χωρητικότητα WiMAX 500MC (tier=1 Mt=2 PF=15%)	87
Εικόνα4-46	:	Χωρητικότητα WiMAX 500MC (tier=1 Mt=25 PF=15%)	88
Εικόνα4-47	:	Χωρητικότητα WiMAX 500MC (tier=1 Mt=50 PF=30%)	88
Εικόνα4-48	:	Χωρητικότητα WiMAX 500MC (tier-2 Mt-50 PE-5%)	88
Εικόνα4-49	:	Χωρητικότητα WiMAX 500MC (tier=2 Mt=50 PF=15%)	89
Εικόνα4-50	:	Χωρητικότητα WiMAX 500MC (tier=2 Mt=25 PF=30%)	89
Εικόνα4-51	:	Συνολική Μέση Ισχύς WiMAX 500MC (tier=1 Mt=25 PF=5%)	89
Εικόνα4-52	:	Συνολική Μέση Ισχύς WiMAX 500MC (tier=1 Mt=2 PF=15%)	90
Εικόνα4-53	:	Συνολική Μέση Ισχύς WiMAX 500MC (tier=1 Mt=25 PF=15%)	90

Εικόνα4-54	:	Συνολική Μέση Ισχύς WiMAX 500MC (tier=1 Mt=50 PF=30%)	90
Εικόνα4-55	:	(tier=2 Mt=50 PT=50%) Συνολική Μέση Ισχύς WiMAX 500MC (tier=2 Mt=50 PE=5%)	91
Εικόνα4-56	:	Συνολική Μέση Ισχύς WiMAX 500MC (tier=2 Mt=50 PF=15%)	91
Εικόνα4-57	:	Συνολική Μέση Ισχύς WiMAX 500MC (tier=2 Mt=25 PF=30%)	91
Εικόνα4-58	:	Μέση Ισχύς ανα τερματικό WiMAX 500MC(tier=1 Mt=25 PF=5%)	92
Εικόνα4-59	:	Μέση Ισχύς ανα τερματικό WiMAX 500MC(tier=1 Mt=2 PF=15%)	92
Εικόνα4-60	:	Μέση Ισχύς ανα τερματικό WiMAX 500MC(tier=1 Mt=25 PF=15%)	93
Εικόνα4-61	:	Μέση Ισχύς ανα τερματικό WiMAX 500MC(tier=1 Mt=50 PF=30%)	93
Εικόνα4-62	:	Μέση Ισχύς ανα τερματικό WiMAX 500MC(tier=2 Mt=50 PF=5%)	93
Εικόνα4-63	:	Μέση Ισχύς ανα τερματικό WiMAX 500MC(tier=2 Mt=50 PF=15%)	94
Εικόνα4-64	:	Μέση Ισχύς ανα τερματικό WiMAX 500MC(tier=2 Mt=25 PF=30%)	94
Εικόνα 5-1	:	Κυψελική διάταξη ετερογενούς δικτύου	96
Εικόνα 5-2	:	Δομή ΜC προσομοίωσης ετερογενούς δικτύου	98
Εικόνα 5-3	:	Χωρητικότητα ετερογενούς δικτύου σενάριο 1	100
Εικόνα 5-4	:	Χωρητικότητα ετερογενούς δικτύου σενάριο 2	100
Εικόνα 5-5	:	Χωρητικότητα ετερογενούς δικτύου σενάριο 3	101
Εικόνα 5-6	:	Συνολική μέση Ισχύς ετερογενούς δικτύου σενάριο l	101
Εικόνα 5-7	:	Συνολική μέση Ισχύς ετερογενούς δικτύου σενάριο 2	102
Εικόνα 5- 8	:	Συνολική μέση Ισχύς ετερογενούς δικτύου σενάριο 3	102
Εικόνα 5-9	:	Μέση Ισχύς ετερογενούς δικτύου ανα τερματικό σενάριο 1	103

Εικόνα 5-10 :	Μέση Ισχύς ετερογενούς δικτύου ανα τερματικό σενάριο 2	103
Εικόνα 5-11 :	Μέση Ισχύς ετερογενούς δικτύου ανα τερματικό σενάοιο 3	104
Εικόνα 5-12 :	Χωρητικότητα ετερογενούς δικτύου σενάριο 4	104
Εικόνα 5-13 :	Χωρητικότητα ετερογενούς δικτύου σενάριο 5	105
Εικόνα 5-14 :	Χωρητικότητα ετερογενούς δικτύου σενάριο 6	105
Εικόνα 5-15 :	Συνολική μέση Ισχύς ετερογενούς δικτύου σενάριο 4	106
Εικόνα 5-16 :	Συνολική μέση Ισχύς ετερογενούς δικτύου σενάριο 5	106
Εικόνα 5- 17 :	Συνολική μέση Ισχύς ετερογενούς δικτύου σενάριο 6	107
Εικόνα 5-18 :	Μέση Ισχύς ετερογενούς δικτύου ανα τερματικό σενάριο 4	107
Εικόνα 5-19 :	Μέση Ισχύς ετερογενούς δικτύου ανα τερματικό σενάριο 5	108
Εικόνα 5-20 :	Μέση Ισχύς ετερογενούς δικτύου ανα τερματικό σενάριο 6	108

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1-1:	Τα κυριότερα ΙΕΕΕ πρότυπα(IEEE standards)ασυρμάτων δικτύων	27		
Πίνακας 2-1: Πίνακας 2-2:	λπεξεργασία σήματος κατα την άνω ζεύξη στις massive MIMO 4 Επεξεργασία σήματος κατα την κάτω ζεύξη στις massive 4 ΜΙΜΟ			
Πίνακας 3-1:	Αλγοριθμική πολυπλοκότητα RRM τεχνικών	59		
Πίνακας 4-1:	Παράμετροι δικτύου WiMAX	62		
Πίνακας 4-2:	Σενάρια προσομοιώσεωνWiMAX	67		
Πίνακας 4-3:	Υπολογισμός PFI WiMAX			
Πίνακας 5-1:	Παράμετροι ετερογενούς δικτύου			
Πίνακας 5-2:	Σενάρια προσομοιώσεων ετερογενούς δικτύου	99		
Πίνακας 5-3:	Σύγκριση μεμονομένου και ετερογενούς δικτύου	109		

Κατάλογος συντομεύσεων

3GPP	3rd Generation Partnership Project
5GPP	5G Public Private Partnership
AF	Amplify-and-Forward
AMC	Adaptive Modulation Coding
AMPS	Advanced Mobile Phone System
ARQ	Automatic Repeat Request
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BAJSS	Block Anti-Jamming Subcarrier Scavenging strategy

BDMA	Beam Division Multiple Access
BER	Bit Error Rate
BS	Base Station
CCI	Co-Channel Interference
CDMA	Code Division Multiple Access
CF	Compress-and-Forward
CN	Cognitive Networks
СР	Cyclic Prefix
CSI	Channel State Information
DF	Decode-and-Forward
EDGE	Enhanced Date rates for GSM Evolution
FDD	FDD
FDMA	FDMA
FBMC	Filter Bank Multi-Carrier
FEC	Forward Error Correction
FFR	Fractional Frequency Reuse
FFT	Fast Fourier Transform
FRF	FRF
GSM	GSM
GPRS	GPRS
GPS	GPS
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
HSUPA	High Speed Uplink Packet Access

HetNets	Heterogeneous Networks
IAT	Interference Avoidance Technique
ICI	Intra-Cell Interference
IDFT	Inverse Discrete Fourier Transform
IFR	Intelligent Frequency Reuse
IMT	Interference Mitigation Technique
ISI	Inter-Symbol Interference
ITU	International Telecommunication Union
JDC	Japanese Digital Cellular
LDPC	Low Density Parity Check
LTE	Long Term Evolution
MBWA	Mobile Broadband Wireless Access
MAC	Media Access Control
MMS	Multimedia Messanging Service
MMSE	Mean Square Error
M-QAM	M - Quadrature Amplitude Modulation
MSNR	Maximum Signal to Noise Ratio
MT	MobileTerminal
MUD	Multi User Detector
MU-MIMO/OFDMA	Multiple User MIMO/OFDMA
NBS	Nash Bargain Solution
NFV	Network Function Virtualisation
NMT	Nordic Mobile Telephone

NNT	Nippon Telephone and Telegraph		
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing		
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access		
PAPR	Peak to Average Power Ratio		
PDC	Personal Digital Cellular		
PFR	Partial Frequency Reuse		
PIC	Parallel Interference Cancellation		
QoS	Quality of Service		
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying		
RAJSS	Regional Anti-Jamming Scavenging Strategy		
RB	Resource Block		
RF	Radio Frequency		
RTMI	Radio Telefono Mobile Integrato		
RNC	Radio Network Controller		
RRM	Radio Resources Management		
SDN	Software Define Network		
SFR	Soft Frequency Reuse		
SIC	Serial Interference Cancellation		
SIMO	Single Input Multiple Output		
SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio		
SNR	Signal to Noise Ratio		
SVD	Singular-Value Decomposition		
SMS	Short Messaging Service		

TACS	Total Access Communication System
TDD	Time Division Duplex
TDMA	Time Division Multiple Access
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
WF	Water Filling
WiFi	Wireless Fidelity
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WMAN	Wireless Metropolitan Area Network
WLAN	Wireless Local Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network
WRAN	Wireless Regional Area Network

Κεφάλαιο 1: Τεχνολογικές γενεές ασύρματων δικτύων

Τα ασύρματα δίκτυα βρίσκονται τα τελευταία χρόνια στο επίκεντρο του ερευνητικού και επιχειρματικού ενδιαφέροντος,καθώς οι ασύρματες επικοινωνίες αποτελούν το πιο γρήγορα αναπτυσσόμενο τμήμα της βιομηχανίας των επικοινωνιών. Είναι λοιπόν σκόπιμο στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας να γίνει αναφορά στην εξέλιξη των τεχνολογιών ασυρμάτων δικτύων, οι οποίες χονδρικά καλύπτουν μια δεκαετία, δίνοντας έμφαση στις πιο σύγχρονες (4G,LTE advanced,5G). Εν συνεχεία, αναλύονται συνοπτικά τα χαρακτηριστικά των κυριότερων ΙΕΕΕ προτύπων ασυρμάτων δικτύων, ενώ τέλος, καταγράφονται τα κίνητρα που οδήγησαν στην εκπόνηση της διπλωματικής. Στην εικόνα 1-1 βλέπουμε συγκεντρωτικά την εξέλιξη των τεχνολογικών γενεών και των αντίστοιχων τεχνολογιών και προτύπων όπως αυτά θα αναφερθούν στην πορεία του κεφαλαίου.



Εικόνα 1-1: Εξέλιξη ασυρμάτων τεχνολογιών [1].

1.1 Δίκτυα πρώτης γενιάς

Η πρώτη γενιά ασύρματων δικτύων κινητής επικοινωνίας λειτούργησε για πρώτη φορά το 1979 στην Ιαπωνία από την NTT (Nippon Telephone and Telegraph), ήταν αναλογικού σήματος και εξυπηρετούσε μόνο φωνητικές κλήσεις. Δυο χρόνια αργότερα επεκτάθηκε η λειτουργία και στην Ευρώπη με κυριότερα συστήματα το NMT (Nordic Mobile Telephone) και το TACS (Total Access Communication System) [1]. Η Ιταλία χρησιμοποιούσε αντίστοιχα το RTMI (Radio Telefono Mobile Integrato), η Γαλλία το radio Com 2000. Η Δυτική Γερμανία, η Πορτογαλία και η Νότιος Αφρική χρησιμοποιούσαν το πρότυπο C-450, ενώ οι κινητές επικοινωνίες στις Η.Π.Α. βασίστηκαν (1982) στο AMPS (Advanced Mobile Phone System) [2].

Τα παραπάνω συστήματα είναι γνωστά ως σχήματα διπλής διαίρεσης συχνότητας (frequency division duplex scheme, FDD), καθώς χρησιμοποιούν δυο

κανάλια: (α) το ευθείας μετάδοσης, που χρησιμοποιείται για μετάδοση σημάτων από το σταθμό βάσης προς τα κινητά τερματικά, (β) το αντίστροφο κανάλι, το οποίο χρησιμοποιείται για μετάδοση σημάτων από τα κινητά τερματικά προς στο σταθμό βάσης. Επίσης, βασίζονται στην πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση συχνότητας (Frequency Division Multiple Access, FDMA). Ωστόσο, ο βασικός λόγος που εγκαταλείφθηκαν τα παραπάνω συστήματα είναι ότι δεν επέτρεπαν τη διεκπεραίωση διεθνών φωνητικών κλήσεων, την εφαρμογή μεθόδων κρυπτογράφησης, οπότε ήταν εύκολη η υποκλοπή τους, και δεν παρουσίαζαν ατρωσία στις ηλεκτρομαγνητικές (H/M) παρεμβολές, οι οποίες επηρεάζουν την ποιότητα των κλήσεων [2].

1.2 Δίκτυα δεύτερης γενιάς 2G-2.7G

Η δεύτερη γενιά κινητής επικοινωνίας ξεκίνησε το 1991 στη Φινλανδία από τη Radiolinja με τη χρήση του προτύπου GSM (Global System for Mobile Communications) [3]. Το πρότυπο GSM επεκτάθηκε στην υπόλοιπη Ευρώπη και χρησιμοποιήθηκε συνολικά σε πάνω από 212 χώρες. Η Ιαπωνία χρησιμοποιούσε το πρότυπο PDC (Personal Digital Cellular) ή JDC (Japanese Digital Cellular), ενώ σε μεγάλο μέρος της Ασίας, στην Αυστραλία και στη Κεντρική και Νότια Αμερική χρησιμοποιήθηκε το πρότυπο IS-95. Στις Η.Π.Α. και στον Καναδά χρησιμοποιήθηκε το πρότυπο iDEN [2].

Τα συστήματα δεύτερης γενιάς, ανάλογα με τον τύπο πολλαπλής πρόσβασης που χρησιμοποιείτο, διακρίνονταν σε TDMA (Time Division Multiple Access) και σε CDMA (Code Division Multiple Access) [2]. Τα βασικά της πλεονεκτήματα ήταν ότι πέραν των φωνητικών κλήσεων υποστήριζαν την αποστολή και λήψη γραπτών μηνυμάτων (Short Messaging Service, SMS), καθώς και μηνυμάτων πολυμέσων (Multimedia Messanging Service, MMS). Τόσο οι φωνητικές κλήσεις, όσο και τα μηνύματα ήταν ψηφιακά κρυπτογραφημένα, πράγμα που παρείχε μεγαλύτερη προστασία έναντι των υποκλοπών. Πρόσθετα, επέτρεπε καλύτερη εκμετάλλευση του διαθέσιμου εύρους ζώνης (bandwidth), αφού αξιοποιούσε τις δυνατότητες της ψηφιακής τεχνολογίας. Τέλος, σε αντίθεση με την πρώτης γενιάς κινητή επικοινωνία, διευκόλυνε την περιαγωγή (roaming) διεθνών κλήσεων [2].

Στη συνέχεια, η ανάπτυξη τεχνολογιών μεταγωγής πακέτου οδήγησε στα δίκτυα 2.5 G -μια μεταβατική τεχνολογία μεταξύ της 2ης και 3ης γενιάς. Τα δίκτυα αυτής της γενιάς χρησιμοποίησαν συστήματα που ονομάστηκαν GPRS (General Packet Radio Service), τα οποία υποστήριζαν πρωτόκολλα ασύρματων εφαρμογών όπως MMS, επικοινωνία μέσω e-mail και πρόσβαση στον παγκόσμιο ιστό (World Wide Wireless Web) [2].

Στις αρχές του 2003 στις Η.Π.Α. τα δίκτυα GSM εξελίχθηκαν στα δίκτυα EDGE (Enhanced Data Rates for GSM Evolution) από τη Cingular (2.7G). Ο βασικός λόγος αυτής της επέκτασης ήταν η εισαγωγή της 8PSK κωδικοποίησης, η οποία επέτρεπε πολύ ταχύτερη μεταφορά δεδομένων. Επίσης, η τεχνολογία EDGE μπορούσε να εφαρμοστεί δίχως τη χρήση πρόσθετου υλικού ή λογισμικού από τους χρήστες των τεχνολογιών της GPRS [4].

1.3 Δίκτυα τρίτης γενιάς 3G-3.75G

Τα δίκτυα τρίτης γενιάς άρχισαν να λειτουργούν το 1998, ενώ η εμπορική τους εκμετάλλευση ξεκίνησε στη Νότιο Κορέα (2002) από την SK Telecom με το δίκτυο

1xEV-DO που ήταν βασισμένο στη τεχνική πολλαπλής πρόσβασης CDMA. Αυτά τα δίκτυα αναπτύχθηκαν λόγω της προσπάθειας της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunication Union, ITU) να δημιουργήσει ένα διεθνές δίκτυο που να λειτουργεί σε εύρος συχνοτήτων 2000 MHZ. Το πρότυπο που δημιουργήθηκε ονομάστηκε IMT 2000 (International Mobile Telephone) [2], ενώ τα πιο γνωστά δίκτυα είναι το CDMA2000, το WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access) και το UMTS (Universal Mobile Telephone Service) [4]. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα αυτής της γενιάς ήταν η βελτιωμένη ροή δεδομένων, ήχου και video σε υψηλότερες ταχύτητες, η παροχή υπηρεσίας πλοήγησης GPS.

Στη συνέχεια τέθηκαν σε λειτουργία τα δίκτυα 3.5G HSDPA (High Speed Downlink Packet Access), τα οποία αποτελούν μια ελαφρώς βελτιωμένη εκδοχή των δικτύων τρίτης γενιάς UMTS. Η τεχνολογία αυτή υποστήριζε υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης πακέτων δεδομένων (μέχρι 8-10 Mbps και 20 Mbps για συστήματα πολλαπλών εισόδων και εξόδων (Multiple Input Multiple Output, MIMO). Στην ίδια γενιά ανήκουν και τα συμπληρωματικά δίκτυα των HSDPA, γνωστά ως δίκτυα 3.75G HSUPA (High Speed Uplink Packet Access), τα οποία βελτίωσαν τις υπηρεσίες email, καθώς και το real time person to person gaming [2].

1.4 Δικτυα τέταρτης γενιάς 4G

Το πρώτο δοκιμαστικό 4G δίκτυο κατασκευάστηκε στην Ιαπωνία το 2005, αποτελεί επέκταση της 3G τεχνολογίας, προσφέρει μεγαλύτερο εύρος ζώνης και υποστηρίζει περισσότερες υπηρεσίες. Ο λόγος ανάπτυξης των νέων δικτύων οφείλεται στην ανάγκη πρόσβασης όλων τν χρηστών κινητής τηλεφωνίας στο διαδίκτυο μέσω μιας κοινής πλατφόρμας (εν προκειμένω την πλατφόρμα IP), κάτι που δεν παρείχαν τα υφιστάμενα δίκτυα (π.χ. 3G). Η συγκεκριμένη πλατφόρμα προσέφερε ακόμη μεγαλύτερη ασφάλεια και υψηλότερες ταχύτητες ροής δεδομένων (100 Mbps- 1Gbps), βασίζεται στην τεχνική πολλαπλής πρόσβασης με ορθογωνική διαίρεση συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA) και υιοθετεί τεχνολογίες MIMO.

Οι κυριότερες βελτιώσεις αυτών των δικτύων σε σχέση με τα προγενέστερα αφορούν στις πολύ μεγαλύτερες ταχύτητες πρόσβασης στο internet, στη δυνατότητα υποστήριξης τηλεδιάσκεψης μέσω video για πολλούς χρήστες, στις υπηρεσίες τηλεϊατρικής, στην τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας, κατά παραγγελία video και videogames (video and videogames on demand) [2].

Τα κυριότερα δίκτυα που αναπτύχθηκαν για εμπορική εκμετάλλευση με σκοπό να καλύψουν τις προϋποθέσεις που θέτει η ITU για τα δίκτυα τέταρτης γενιάς είναι το WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) και το LTE (Long Term Evolution). Παρ΄όλα αυτά η πρώτη έκδοση του WiMAX και το LTE δεν κατάφεραν να εκπληρώσουν το σκοπό τους, αφού αδυνατούσαν να επιτύχουν ρυθμό μετάδοσης δεδομένων > 1 Gb/s. Για το λόγο αυτόν αναφέρονται συχνά ως δίκτυο 3.9G. Αυτό οδήγησε στο σχεδιασμό των δικτύων LTE Advanced και Mobile WiMAX Release 2.

1.5 Δίκτυα 4G+(LTE advanced)

Τα Δίκτυα LTE advanced σχεδιάστηκαν ώστε να καλύψουν τις αδυναμίες των LTE πληρώντας τις προϋποθέσεις που τέθηκαν από την ITU για τα δίκτυα 4G στα τέλη του 2009 και προτυποποιήθηκαν το 2011 στην 10 έκδοση της 3GPP [5].

Τα κύρια χαρακτηριστικά τους είναι:

- Αυξημένες ταχύτητες αιχμής 3Gbps στην κάτω ζεύξη και 1.5Gbps στην άνω.
- Βελτιωμένη φασματική απόδοση 30bps/Hz
- Αυξημένος αριθμός ταυτόχρονα ενεργών χρήστων
- Καλύτερη κάλυψη στα όρια των κυψελών(cell edges)

Για να επιτευχθούν τα παραπάνω γίνεται χρήση νέων τεχνολογιών όπως ενισχυμένης χρήσης κεραιών MIMO (8X8 στην κάτω ζεύξη και 4X4 στην άνω) και κόμβων μεταγωγής (relay nodes).Οι κόμβοι μεταγωγής είναι σταθμοί βάσης χαμηλής ισχύος εγκατεστημένοι στις απομακρυσμένες περιοχές των κυψελών και σε hotspots, ενισχύουν τη χωρητικότητα, διευρύνουν την περιοχή κάλυψης, δεν απαιτούν τη χρήση οπτικών ινών, ενώ υποστηρίζουν τεχνικές συνάθροισης (carrier aggregation) όπου η πληροφορία διανέμεται σε έως και 5 φέροντα συνιστώσες (component carriers) προκειμένου να βελτιωθεί η χωρητικότητα του δικτύου. Ως εκ τούτου, η βελτιωμένη χωρητικότητα και κάλυψη των LTE Advanced συνεπάγεται τη δικαιότερη εξυπηρέτηση των χρηστών, καθώς και την εκμετάλλευση φάσματος >100 MHz υποστηρίζοντας πολύ μεγάλους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Πρόσθετα, πολύ σημαντική είναι και η δυνατότητα που προσφέρουν τα συγκεκριμένα δίκτυα και αφορά στην αξιοποίηση των ετερογενών δικτύων [6].

Πολλές εταιρίες κινητών επικοινωνιών παγκοσμίως (π.χ. ΕΕ, Ericsson, Vodaphone, Swisscom) υποστηρίζουν την λειτουργία δικτύων τεχνολογίας LTE Advanced, τα οποία αναφέρουν ως 4G+ και υποστηρίζουν ταχύτητες από 1,5 έως 3 Mbps [7], [8],[9],[10].

1.6 Δίκτυα πέμπτης γενιάς 5G

Η επόμενη γενιά ασύρματων δικτύων αναμένεται να έχει εμπορική εφαρμογή μέχρι το 2020. Η πρώτη προσπάθεια να οριστούν και να αναπτυχθούν ξεκίνησε το 2012 με το project της Ευρωπαϊκής Ένωσης MENTIS, το 2013 οι εταιρείες Huawei, Samsung και NSN ξεκίνησαν τις πρώτες εργαστηριακές δοκιμές, ενώ το 2014 στη Βαρκελώνη παρουσιάστηκε το project 5G PPP (5G Public Private Partnership).

Τα δίκτυα πέμπτης γενιάς θα πρέπει να είναι σε θέση να εξυπηρετήσουν τον εκθετικά αυξανόμενο αριθμό των χρηστών και να ικανοποιούν απαιτήσεις μεγαλύτερης κλίμακας:

- 1000 φορές μεγαλύτερο εύρος ζώνης,
- εκατονταπλάσιος αριθμός συνδεδεμένων χρηστών,
- 99,9% διαθεσιμότητας,
- εξυπηρέτηση 1000 φορές μεγαλύτερου όγκου δεδομένων ανά περιοχή,
- 10 ως 100 φορές μεγαλύτερος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων,
- βελτίωση κατά 10 φορές του χρόνου εκφόρτισης των μπαταριών για χαμηλής κατανάλωσης συσκευών μαζικών επικοινωνιών (Massive Machine Communication, MMC),

- 5 φορές μειωμένος λανθάνων χρόνος End-to-End (E2E). Ιδανικά 1ms.
- Ταχύτητα κάτω ζεύξης (downlink) > 1Gbps[3],[11].

Λόγω των αυξημένων απαιτήσεων, μελετώνται τεχνικές αποδοτικής διαχείρισης του διαθέσιμου φάσματος (αύξηση χωρητικότητας δικτύου) εστιάζοντας σε καταλληλότερες συχνότητες (6GHz-300GHZ), ενώ επιδιώκεται και η βελτίωση της ευφυίας των δικτύων αυτών. Παράλληλα, επειδή θα υποστηρίζεται η επαναχρησιμοποίηση φάσματος (frequency reuse) ακόμη και σε πολυπληθυσμιακά σενάρια (multiple terminals), τα δίκτυα νέας γενιάς θα πρέπει να είναι σε θέση να διαχειριστούν τις ομοκαναλικές παρεμβολές (Co-Channel Interference, CCI), οι οποίες θα είναι περισσότερο έντονες. Επομένως, κρίνεται αναγκαία η δημιουργία ενός ενιαίου πρότυπο για όλες τις χώρες, στο οποίο θα μπορούν να συμμορφωθούν εύκολα όλοι οι πάροχοι κινητής τηλεφωνίας παγκοσμίως. Στα πλαίσια αυτής της προτυποποίησης αναμένεται να χρησιμοποιηθούν αναμεταδότες από πυκνά κατανεμημένες κυψέλες και ευφυή ραδιοσυστήματα καθώς και τεχνολογίες πολλαπλής πρόσβασης, όπως BDMA (Beam Division Multiple Access) και FBMC (Filter Bank Multi-Carrier) [4],[11].

Προκειμένου να εξυπηρετηθεί ο μεγάλος αριθμός των χρηστών η αρχιτεκτονική των δικτύων χρειάζεται αλλαγές, αφού σε ποσοστό 80% οι χρήστες συνδέονται με το δίκτυο ενώ βρίσκονται εντός κτηρίων και μόνον το 20% όταν βρίσκονται σε εξωτερικό περιβάλλον. Όλοι, όμως, τελικά εξυπηρετούνται από έναν εξωτερικό σταθμό βάσης στο κέντρο κάθε κυψέλης, πράγμα που σημαίνει ότι αφού το σήμα περνάει μέσα από τοίχο αυξάνονται οι απώλειες και επηρεάζονται αρνητικά η ενεργειακή και φασματική απόδοση καθώς και ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων (data rate). Για το λόγο αυτό είναι αναγκαίο να χρησιμοποιηθούν συστήματα κεραιών Massive MIMO [4],[3].

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθούν ορισμένες τεχνολογίες που αναπτύσσονται ως αυτόνομες εμπορικές υπηρεσίες, αλλά αναμένεται να χρησιμοποιηθούν κυρίως στα δίκτυα πέμπτης γενιάς:

Network Function Virtualisation (NFV)

Πρόκειται για μια αρχιτεκτονική δικτύου που επιτρέπει το διαχωρισμό του υλικού από το λογισμικό. Σκοπός της χρήσης τεχνολογιών virtualisation είναι η ελάφρυνση του υλικού των συσκευών που χρησιμοποιούνται, αφού επιβαρύνεται συνεχώς λόγω τον αυξανόμενων αναγκών των χρηστών. Έτσι servers μεγάλου φόρτου (High Volume Servers), διακόπτες καθώς και αποθηκευτικός χώρος μπορούν να αντικατασταθούν με εικονικούς αποθηκευμένους σε μεγάλα κέντρα δεδομένων (data centers) [2],[12],[11].

Software Define Network (SDN)

Αποτελούν επέκταση των NFV όπου οι παράμετροι που αφορούν την τοπολογία ενός δικτύου θα μπορούν να ρυθμιστούν μέσω του software [2],[12],[11].

Ετερογενή Δίκτυα (Heterogeneous Networks -Hetnet)

Τα ετερογενή δίκτυα αποτελούν μια διάταξη πολυκυψελωτών δικτύων που συνδυάζουν διαφορετικούς τύπους κυψελών (μάκρο, πίκο, φέμπτο) και τεχνολογιών πρόσβασης(2G, 3G, 4G). Εμφανίζουν μεγάλη ευελιξία ,αφού προσαρμόζονται στην τοπολογία της περιοχής που καλύπτουν [11].

1.7 Τα κυριότερα IEEE standards

Τα ασύρματα δίκτυα έχουν προτυποποιηθεί σύμφωνα με την οικογένεια προτύπων ΙΕΕΕ 802.Τα σημαντικότερα εξ΄αυτών είναι:

- IEEE802.15 (Ασύρματα Προσωπικά Δίκτυα, WPAN): Σε αυτά ανήκουν τα ZigBee και Bluetooth, έχουν εμβέλεια περίπου 10m, χαρακτηρίζονται απο χαμηλό κόστος και μικρή κατανάλωση ισχύος.
- IEEE802.11 (Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα, WLAN): Στην κατηγορία αυτή ανήκει το Wi-Fi. Αποτελούν μια από τις πιο διαδεδομένες και γρήγορα εμπορικά αναπτυσσόμενες κατηγορίες δικτύων. Η εμβέλεια τους κυμαίνεται από 50m μέχρι 150m, ανάλογα την εγκατάσταση. Συνήθως χρησιμοποιούνται για σύνδεση κινητών τερματικών (Laptop, Smartphones, Tablets) σε hotspot σε αεροδρόμια, ξενοδοχεία, καφέ, ενώ αποτελούν αξιόπιστη λύση για μόνιμες οικιακές εγκαταστασεις ασύρματων δικτύων καθώς και σε γραφεία
- ΙΕΕΕ802.16 (Ασύρματα Μητροπολιτικά Δίκτυα WMAN): Στην κατηγορία αυτή ανήκει το WiMAX. Η εμβέλειά τους κυμαίνεται στα 4-10km και επιτυγχάνουν υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης σε μεγάλες αποστάσεις. Συνήθως, χρησιμοποιούνται ως δίκτυα κορμού (backhaul).
- ΙΕΕΕ802.20 (Ασύρματα Δίκτυα Ευρείας Περιοχής, WWAN): Έχουν εμβέλεια περίπου 35km και υιοθετούν τεχνικές πολυπλεξίας όπως οι OFDM και HC-SDMA.
- **ΙΕΕΕ802.22** (Ασύρματα Περιφερειακά Δίκτυα, WRAN): Χρησιμοποιοούνται σε αγροτικές περιοχές με ελάχιστους χρήστες και έχουν εμβέλεια 30-100km.

ΠΡΟΤΥΠΟ ΙΕΕΕ	ΕΜΠΟΡΙΚΗ ΟΝΟΜΑΣΙΑ	EYPOΣ ΣYXNOTHTΩ (Ghz)	TAXYTHTA N (Mbps)	ΤΕΧΝΙΚΗ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ/ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ
802.11a (802.11b/802.11g /802.11n)	Wi-Fi	5 (2.4/2.4 /2.4 ή 5)	54 (11/54 /600)	CSMA-CA/ OFDM (CCK/DSSS, CCK, OFDM /OFDM
802.15.1	Bluetooth	2.4	1/3	TDD/ 8DPSK, DQPSK
802.15.4	ZigBee	2.4	250	CSMA-CA/ BPSK, OQPSK, ASK, DSSS
802.16 (802.16a/802.16e)	WiMAX (10-66 (2-11/<6)	32-134 (70/75)	OFDMA/ OFDM
802.20	MBWA	<3.5	1/0.3	HC-SDMA/ OFDM

Στον Πίνακα 1-1 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα κύρια τεχνικά χαρακτηριστικά των προαναφερθέντων προτύπων.[14],[15],[16],[17]

Πίνακας 1-1: Τα κυριότερα ΙΕΕΕ πρότυπα (ΙΕΕΕ standards) ασυρμάτων δικτύων.

1.8 Κίνητρο της διπλωματικής

Το διαθέσιμο φάσμα, καθώς και η εκπεμπόμενη ισχύς αποτελούν τους βασικούς πόρους ενός συστήματος ασύρματων επικοινωνιών. Συνεπώς, είναι σημαντικό να αξιοποιούνται αποδοτικά και να μην σπαταλώνται άσκοπα. Όμως οι σύγχρονες τεχνολογίες δικτύων έχουν καταλάβει το μεγαλύτερο μέρος του διαθέσιμου φάσματος αλόγιστα, συνεπώς είναι απαραίτητη η διερεύνηση τεχνικών δικαιότερης κατανομής του. Πέρα απο την κατανομή του διαθέσιμου φάσματος σημαντική είναι και η δίκαιη και αποδοτικότερη κατανομή των υποφορέων στα τερματικά, καθώς η χρήση τεχνικών επαναχρησιμοποίησης συχνότητας μπορεί να προκαλέσει ομοδιαυλικές παρεμβολές ανάμεσα στα τερματικά γειτονικών κυψελών. Αυτό συμβαίνει όταν ο συντελεστής επαναχρησιμοποίησης είναι 1 και αυξάνει η πιθανότητα τα τερματικά να εκπέμψουν στον ίδιο υποφορέα με συνέπεια να απορριφθούν από το σύστημα

Όσον αφορά στην ισχύ, στο σύγχρονο τηλεπικοινωνιακό περιβάλλον εξαιτίας της απρόβλεπτης συμπεριφοράς του ασύρματου διαύλου, φαινόμενα όπως η σκέδαση η ανάκλαση, η διάθλαση και οι διαλείψεις επηρεάζουν το προφίλ ισχύος των προς μετάδοση σημάτων, ενώ παρατηρούνται και έντονες παρεμβολές από τα γειτονικά δίκτυα, λόγω μη συνεργατικότητας μεταξύ των. Πρόσθετα, οι ευφυείς φορητές συσκευές (smartphones, tablets) καταναλώνουν αρκετή ισχύ, αφού ακόμα και όταν δεν στέλνουν ή λαμβάνουν πληροφορίες αναζητούν λιγότερο θορυβώδη κανάλια και βρίσκονται σε αναμονή για λήψη δεδομένων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας. Έτσι, καθίσταται απαραίτητη και η σοφή αξιοποίηση της εκπεμπόμενης ισχύος (αύξηση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας του κινητού τερματικού, έκθεση τελικού χρήστη σε Η/Μ πεδίο μειωμένης έντασης), οπότε το ερευνητικό ενδιαφέρον εστιάζεται σε σχετικές τεχνικές ανάθεσης ισχύος.

Εκτός από την αποδοτική αξιοποίηση των πόρων,σημαντική είναι και η αντιμετώπιση των διαλείψεων και η μείωση τον παρεμβολών από τις οποίες υποφέρει ο ασύρματος δίαυλος, όπως προαναφέρθηκε. Στα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα παρουσιάζεται αύξηση των ομοδιαυλικών παρεμβολών, λόγω της χρήσης των ευφυών φορητών συσκευών και της εφαρμογής της τεχνικής επαναχρησιμοποίησης συχνότητας.

Για την αντιμετώπιση/εξομαλύνση όλων των παραπάνω, καθίσταται απαραίτητη η χρήση ανάλογων τεχνικών. Ως εκ τούτου, την τελευταία δεκαετία η επιστημονική κοινότητα και ο επιχειρηματικός κόσμος στρέφουν τις προσπάθειες στην Πολλαπλή Πρόσβαση με Διαίρεση Συχνότητας (π.χ. OFDMA, BDMA, FBMC). Η τεχνική αυτή διαιρεί το διαθέσιμο εύρος σε στενότερου εύρους υποφορείς με αποτέλεσμα την εξομάλυνση των έντονων διαλείψεων. Επίσης στρέφονται και στα συστήματα κεραιών massive MIMO που βοηθούν στην μείωση τον ομοδιαυλικών παρεμβολών, ενώ βελτιώνει την απόδοση της εκπεμπόμενης ενέργειας και την φασματικη απόδοση.

Λαμβάνοντας υπόψιν τα προαναφερθέντα, τα οποία αποτελούν και το βασικό κίνητρο της παρούσας προσπάθειας, στα πλαίσια της διπλωματικής διερευνόνται κατόπιν εκτενούς μελέτης της σχετικής βιβλιογραφίας δίκαιες τεχνικές αξιοποίησης πόρων (εν προκειμένω υποφορείς OFDM, ισχύς ανά υποφορέα OFDM) με και χωρίς γνώση καναλιού. Προς την ίδια κατεύθυνση, μελετώνται και τεχνικές που αφορούν σε ετερογενή δίκτυα, τα οποία έχουν ως κοινό δομικό τους συστατικό το σχήμα OFDMA. Παράλληλα, επειδή η αύξηση της δικτυακής χωρητικότητας και η βελτίωση της ρυθμαπόδοσης είναι ουσιαστικές απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιήσουν οι τεχνολογίες 5G συνδυαστικά με την εξομάλυνση Η/Μ παρεμβολών, στο βασικό άξονα της διπλωματικής συμπεριλαμβάνεται και η ενσωμάτωση της massive MIMO τοπολογίας.

Κεφάλαιο 2: Συστήματα Massive MIMO-OFDMA

Μια από τις σημαντικότερες τεχνικές πολυπλεξίας και διαμόρφωσης είναι η πολυπλεξία ορθογωνικής διαίρεσης συχνότητας (OFDM). Χρησιμοποιείται αρκετά στα ασύρματα πολυκυψελωτά δίκτυα των νεότερων τεχνολογικών γενεών ασυρμάτων δικτύων (4G,LTE,LTE advanced), καθώς και στα πρότυπα 802.11 (WiFi), 802.15.1 802.16(Wimax), (Bluetooth), 802.15.3.a, 802.22(WRAN). Αφού αξιοποιεί αποτελεσματικά το διαθέσιμο φάσμα, υποστηρίζει μεγάλη χωρητικότητα δεδομένων και διαθέτει αντοχή στις παρεμβολές λόγω φαινομένων πολλαπλών διαδρομών. Η τεχνική OFDM αναμένεται να συνδιαστεί με τα συστήματα massive ΜΙΜΟ(αναφέρονται στην βιβλιογραφία και ως Very Large MIMO, Hyper MIMO, Full Dimension MIMO, Large Scale Antenna Systems[18]) στα δίκτυα 5G στοχεύοντας στην αύξηση της ρυθμαπόδοσης με εκμετάλευση του περιορισμένου διαθέσιμου φάσματος [19]. Αποτελούν ένα από τα σημαντικότερα νεα πεδία έρευνας στον τομέα των τηλεπικοινωνιών και βασίζονται στον γεγονός ότι, όσο περισσότερες κεραίες περιλαμβάνουν οι πομποδέκτες σε ένα σύστημα ασύρματης μετάδοσης, τόσους περισσότερους βαθμούς ελευθερίας θα έχει το κανάλι διάδοσης, αυξάνοντας έτσι τον ρυθμό και την αξιοπιστία της μετάδοσης [20].

2.1 Η τεχνική OFDM/ OFDMA

Σε αυτό το κεφάλαιο αρχικά αναλύεται ο OFDM(2.1.1) πομποδέκτης. Επίσης, αναφέρεται ο λόγος μέγιστης προς μέση ισχύ σε συστήματα με πολλαπλές φέρουσες συχνότητες (2.1.2.5) και εισάγεται η έννοια του διαφορισμού σε ασύρματο μέσο διάδοσης (2.1.2.6). Τέλος, καταγράφονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της OFDM (2.1.2.8). Στην υποενότητα 2.1.3 παρουσιάζεται η τεχνική πολλαπλής πρόσβασης με ορθογωνική διαίρεση συχνότητας OFDMA, ενώ στην 2.1.4 γίνεται μια επιφανειακή σύγκριση των τεχνικών πρόσβασης με διαίρεση συχνότητας (OFDM, BDMA, FBMC).

2.1.1 Η τεχνική OFDM

Η OFDM όπως κάθε τεχνική διαμόρφωσης με πολλαπλές φέρουσες χωρίζει την ροή των προς μετάδοση bits (data stream) σε παράλληλες υποροές με χρήση μετατροπέα σειριακού σε παράλληλο (S/P). Οι ροές αυτές αποτελούν τα σύμβολα της OFDM (OFDM symbol), τα οποία διαμορφώνονται χωριστά γύρω από διαφορετική φέρουσα συχνότητα fn.(subcarrier frequency) Συνεπώς κάθε κανάλι διαιρείται σε πολλά υποκανάλια και κάθε σύμβολο συσχετίζεται με ένα υποκανάλι. Τα υποκανάλια αυτά διαμορφώνονται χωριστά και έπειτα αθροίζονται για να δημιουργήσουν το μεταδιδόμενο σήμα.

Αν και κάθε υποκανάλι εισέρχεται στην περιοχή συχνοτήτων του γειτονικού του,δεν προκαλείται διακαναλική παρεμβολή λόγω της ορθογωνιότητας των γειτονικών υποφορέων (Εικόνα 2-1, 2-2). Απαραίτητη προϋπόθεση για την διατήρηση της ορθογωνιότητας είναι η απόσταση των διαδοχικών μεγίστων (διάστημα διαχωρισμού των υποκαναλιών) Δf να είναι αντιστρόφως ανάλογη της διάρκειας συμβόλου. Επίσης, για να μειωθούν περαιτέρω οι συνέπειες των διαλείψεων, θα πρέπει ο ραδιοδίαυλος να είναι χρονικά αμετάβλητος κατά τη

διάρκεια μετάδοσης ενός OFDM συμβόλου προκειμένου κάθε υποφορέας να είναι επίπεδος ως προς τις διαλείψεις. Για να ισχύει αυτό θα πρέπει η διάρκεια συμβόλου να είναι μικρότερη του χρόνου συνοχής:

$$T_{s} < (\Delta_{t)c} \tag{2-1}$$

ενώ το εύρος ζώνης κάθε υποφορέα θα πρέπει να είναι μικρότερο του εύρους ζώνης συνοχής:

$$\mathbf{B}_{s} < (\Delta_{f)c} \tag{2-2}$$

Εφόσον πληρούνται οι Εξ. (2-1) και (2-2), είναι εφικτό να μειωθεί η πολυπλοκότητα σχεδιασμού του δέκτη αποδιαμόρφωσης υποφορέων. Το σήμα που θα προκύψει κατά την αποδιαμόρφωση ολοκληρώνεται στην διάρκεια περιόδου ενός συμβόλου ώστε να ανακτηθεί η πληροφορία του φέροντος. Επίπλέον σημαντική απαίτηση για την OFDM είναι και η γραμμικότητα στα συστήματα εκπομπής και λήψης. Η απουσία γραμμικότητας επηρεάζει την ορθογωνιότητα και δημιουργεί ανεπιθύμητες παρεμβολές [21],[22],[23].



Εικόνα 2-1: Σύμβολο OFDM και διάστημα διαχωρισμού των υποκαναλιών.[24]



Εικόνα 2-2: Η Αποδοτικότερη αξιοποίηση του φάσματος στην OFDM.[25]

2.1.2 Η RF αλυσίδα του OFDM πομποδέκτη

Στο σημείο αυτό πρέπει να δωθεί ιδιαίτερη έμφαση στις σημαντικότερες βαθμίδες του συστήματος εκπομπής και λήψης της OFDM (κωδικοποίηση ραδιοδίαυλου, διαμόρφωση συμβόλου, εισαγωγή κυκλικού προθέματος, διαμόρφωση αποδιαμόρφωση)

2.1.2.1 Κωδικοποίηση ραδιοδιαύλου

Κωδικοποίηση ραδιοδίαυλου σε ένα ψηφιακό τηλεπικοινωνιακό σύστημα είναι η εισαγωγή πλεονάζουσας πληροφορίας στην ροή δεδομένων, η οποία χρησιμοποιείται στον δέκτη κατά την αποδιαμόρφωση για να διορθώνει σφάλματα που προκύπτουν κατα την μετάδοση. Στην OFDM γίνεται χρήση μηχανισμών προληπτικής διόρθωσης σφαλμάτων (Forward error correction, FEC) σε συνδιασμό με διεμπλοκή συχνότητας ή/και χρόνου.

Ο ρόλος της διεμπλοκής στην OFDM είναι να απλωθούν τα σφάλματα στην ροή των bits ώστε να μην υπάρχει υψηλή συγκέντρωση σφαλμάτων και να διορθωθούν πιο εύκολα από τον αποκωδικοποιητή.

Συνήθως χρησιμοποιούνται συνελικτικοί κώδικες σε συνδιασμό με κωδικοποίηση Reed-Solomon. Ανάμεσα στα 2 στρώματα της κωδικοποίησης γίνεται πρόσθετη διεμπλοκή. Οι κώδικες Reed-Solomon επιλέγονται για την εξωτερική κωδικοποίηση, αφού οι συνελικτικοί κώδικες Vitterbi κατά την εσωτερική προκαλούν ριπές σφαλμάτων όταν η συγκέντρωση σφάλματων είναι υψηλή. Οι Reed-Solomon κώδικες είναι κατάλληλοι για την διόρθωση τέτοιου τύπου σφαλμάτων.

Τα νεώτερα συστήματα που βασίζονται στην OFDM, χρησιμοποιούν κώδικες LDPC(Low Density Parity Check) και Turbo οι οποιοί αποδίδουν στα όρια του θεωρήματος Shannon για δίαυλο AWGN (Additive White Gaussian Noise) [21].

2.1.2.2 Διαμόρφωση συμβόλου

Η ακολουθία από bits της εισόδου της OFDM διαμορφώνεται σε σύμβολα μέσω γραμμικών ψηφιακών τεχνικών διαμόρφωσης. Στις τεχνικές αυτές η ακολουθία εισόδου αντιστοιχίζεται σε σύμβολα του διαγράμματος αστερισμού. Οι διαμορφώσεις υψηλής τάξης (εκπομπή περισσότερων bits/σύμβολο), είναι λιγότερο αξιόπιστες, αφού τα σημεία του αστερισμού απέχουν μικρότερες αποστάσεις. Οπότε η πιθανότητα ανάκτησης λανθασμένου ψηφίου αυξάνεται. Συνήθως επιλέγονται οι τεχνικές QPSK και M-QAM(16-QAM,64-QAM,128-QAM,256-QAM) [23].

2.1.2.3 Διαμόρφωση OFDM

Μετά την διαμόρφωση συμβόλου η σειριακή ακολουθία από μιγαδικά σύμβολα, που έχει δημιουργηθεί, διέρχεται από έναν μετατροπέα σειριακό σε παράλληλο,οπότε προκύπτει μια παράλληλη ακολουθία Ν συμβόλων χ[0], χ[1],...,χ[N+1] στο πεδίο της συχνότητας τα οποία αντιστοιχούν στα σύμβολα προς μετάδοση σε κάθε υποκανάλι.Στην ουσία η ακολουθία χ[n] είναι προϊόν δειγματοληψίας Ν σημείων ενός σήματος X[t] συνεχούς χρόνου.

Για τον λόγο αυτόν εφαρμόζουμε αντίστροφο μετασχηματισμό Φουριέ (IFFT) Συνεπώς :

$$\chi[n] = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{i=0}^{N-1} X[i] e^{\frac{j2\pi n i}{N}} 0 \le n \le N+1$$
(2-1)

Η ακολουθία που προκύπτει αντιστοιχεί στα χρονικά δείγματα του σήματος. Το δεξί μέρος της ισότητας εκφράζει το χρονικό δείγμα που αντιστοιχεί σε άθροισμα συμβόλων που έχουν διαμορφωθεί σε ένα υποκανάλι $e^{\frac{j2\pi i}{T_s}}$, όπου T_s η διάρκεια συμβόλου και i=0,...,N-1. Ο αριθμός N εκφράζει τον αριθμό των υποφερόντων,τα οποία πρέπει να απέχουν μεταξύ τους απόσταση 1/T_s. Στην συνέχεια σε κάθε σύμβολο προστίθεται το κυκλικό πρόθεμα. Τα χρονικά δείγματα \tilde{x} [-μ],..., \tilde{x} [-N+1] που δημιουργούνται όπως περιγράφεται παρακάτω διέρχονται από παράλληλο σε σειριακό μετατροπέα και μετατροπέα D/A(ψηφιακό σε αναλογικό) οπότε προκύπτει το σήμα βασικής ζώνης \tilde{x} (t) της OFDM που μεταφέρεται γύρω από συχνότητα f₀ με άνω μετατροπή συχνότητας [23].

2.1.2.4 Κυκλικό Πρόθεμα

Έστω δίαυλος διακριτού χρόνου και x[n] μια είσοδος μήκους N. Το κυκλικό πρόθεμα(CP) ορίζεται ως {x[N-μ].....x[N-1]}και αποτελείται από τις μ τελευταίες τιμές της ακολουθίας χ[n]. Για κάθε ακολουθία εισόδου μήκους N αυτές οι μ τελευταίες τιμές εισάγονται στην αρχή. Οπότε παράγεται μια νέα ακολουθία $\tilde{x}[n], -\mu \le n \le N+1$ μήκους N+μ όπου $\tilde{x}[-\mu], ..., \tilde{x}[-N+1] = x[N-\mu], \ldots, x[N-1], x[0], \ldots, x[N-1].$ Συνεπώς $\tilde{x}[n-k] = x[n-k]_N$ για $-\mu \le n - k \le N - 1$.



Τελευταία μ δείγματα προστίθενται στην αρχη

Εικόνα 2-3: Κυκλικό πρόθεμα και διάρκεια συμβόλου.

Θεωρώντας είσοδο $\tilde{x}[n]$ και κρουστική απόκριση καναλιού h[n] τότε η έξοδος y[n], $0 \leq n \leq N-1$ του καναλιού είναι:

$\mathbf{y}[\mathbf{n}] = \mathbf{x}[\mathbf{n}] * \mathbf{h}[\mathbf{n}]$	
$= \sum_{k=0}^{\mu-1} h[k] \tilde{\mathbf{x}}[n-k]$	
$= \sum_{k=0}^{\mu-1} h[k] x[n-k]_{N}$	
$= x[n] \otimes h[n]$	(2-2)

οπότε εισάγοντας ένα κυκλικό πρόθεμα στην είσοδο του καναλιού,η γραμμική συνέλιξη που σχετίζεται με την y[n] γίνεται κυκλική για 0≤n≤N-1. Αν πάρουμε τον ευθύ διακριτό μετασχηματισμό Φουριέ της εξόδου του καναλιού υπό την απουσία θορύβου προκύπτει:

$$Y[t] = DFT\{y[n] = x[n] \otimes h[n]\} = X[t]H[t], 0 \le t \le N - 1$$
(2-3)

Οπότε η ακολουθία εισόδου x[n] 0≤n≤N-1 μπορεί να ανακτηθεί από την y[n] για h[n] γνωστό, μέσω του αντίστροφου διακριτού μετασχηματισμού Φουριέ:

$$x[n] = IDFT\{Y[t]/H[t]\} = IDFT\{DFT\{y[n]\}/DFT\{h[n]\}\}$$
(2-4)

Αφού η y[n] έχει μήκος N+μ τα πρώτα μ δείγματα δεν χρειάζονται για να ανακτηθεί η χ[n] λόγω του πλεονασμού που εισάγει το κυκλικό πρόθεμα.

Αν υποθέσουμε ότι η χ[n] διαιρείται σε μπλοκ δεδομένων μήκους N με κυκλικό πρόθεμα σε κάθε μπλοκ,τότε τα πρώτα μ δείγματα της y[n] φθείρονται λόγο διασυμβολικής παρεμβολής που οφείλεται στα τελευταία μ δείγματα της χ[n] του προηγούμενου μπλόκ.Το κυκλικό πρόθεμα χρησιμοποιειται για την εξάλειψη της διασυμβολικής παρεμβολής αφού τα πρώτα μ ψηφία που προκαλούν την διασυμβολική παρεμβολή μπορούν να αγνοηθούν χώρις απώλεια της πληροφορίας της αρχικής ακολουθίας. Σε συνεχή χρόνο αυτό ισοδυναμεί με χρήση χρονικών διαστημάτων φύλλαξης T_m (χρόνος καθυστέρησης διάδοσης) ανάμεσα στα μπλοκ χρονικής διάρκειας NT_s.

Δυο μειονεκτήματα της χρήσης κυκλικού προθέματος είναι:

- υπάρχει μια επιβάρυνση Ν/μ που οδηγεί σε μείωση του ρυθμού μετάδοσης κατά Ν/(Ν+μ), αφού σε κάθε μπλόκ εισάγονται μ ψηφια.
- Σπαταλάται η ισχύς που εκπέμπεται κατά την αποστολή του κυκλικού προθέματος, αφού τα μ ψηφία αποτελούν πλεονάζουσα πληροφορία.

Στην OFDM η είσοδος διαιρείται σε μπλοκ δεδομένων μεγέθους Ν που αποτελούν τα σύμβολα της OFDM. Σε κάθε σύμβολο προστίθεται ένα κυκλικό πρόθεμα ώστε να προκαλέσει την κυκλική συνέλιξη της εισόδου με την κρουστική απόκριση του καναλιού. Τα δείγματα της εξόδου που επηρρεάζονται από την διασυμβολική παρεμβολή μεταξύ των συμβόλων της OFDM στον δέκτη απομακρύνονται. Τα υπόλοιπα δείγματα ανακτώνται με χρήση διακριτού μετασχηματισμού Φουριέ [23].

2.1.2.5 Λόγος Μέγιστης-προς-Μέσης Ισχύος σε συστήματα με πολλαπλές φέρουσες συχνότητες

Ο λόγος μέγιστης προς μέση ισχύ PARP(Peak to Average Power Ratio) για ένα σήμα συνεχούς/διακριτού χρόνου ορίζεται ως:

PARP
$$(\chi) = \frac{\max|X(t)|^2}{E[X(t)]^2} / = \frac{\max|X[n]|^2}{E[|X[n]|]^2}$$
 (2-5)

όπου Ε[.], είναι η μέση τιμή.

Όταν ο PARP είναι χαμηλός τότε οι ενισχυτές ισχύος του πομπού λειτουργούν αποδοτικά στη γραμμική περιοχή. Η γραμμική λειτουργία είναι απαραίτητη για την αποφυγή παραμορφώσεων, οπότε θέλουμε η μέγιστη τιμή της ισχύος να μην αποκλίνει πολύ απο την μέση .Συνήθως εξετάζουμε την πιθανότητα ο PAR να ξεπερνά ένα κατώφλι. Οπότε:

$$p(PAR \ge P_0) = 1 - (1 - e^{-P_0})_N$$
 (2-6)

Θεωρώντας N υποφορείς που προκύπτουν από την έξοδο της βαθμίδας και αποτελούν τυχαίες μεταβλητές X_n (όπου $0 \le n \le N-1$) που ακολουθούν κατανομή Gauss, τότε:

$$E[|X[n]|]^{2} = \left[\frac{1}{\sqrt{N}}E|\chi_{0+}\chi_{1+}\chi_{2+}\dots+\chi_{N+1}|^{2}\right] = \frac{E|\chi_{0}^{2}|+E|\chi_{1}^{2}|+E|\chi_{2}^{2}|+\dots+E|\chi_{N+1}|}{N} = 1 (2-7)$$

Ιδανικά η μέγιστη τιμή εμφανίζεται όταν τα σήματα αθροίστουν συνεκτικά οπότε:

$$\left[\frac{1}{\sqrt{N}}E|\chi_{0+}\chi_{1+}\chi_{2+}\dots+\chi_{N+1}|\right]^2 = |N/\sqrt{N}|^2 = N$$
(2-8)

Το οποίο στην πράξη δεν είναι πολύ πιθανό ,οπότε η μέγιστη τιμή είναι αρκέτα dB μικρότερη του N, γενικά ο PARP αυξάνει γραμμικά με την αύξηση των υποφερόντων N. Οπότε προκύπτει ένα σημαντικό tradeoff ,καθώς από τη μια θέλουμε μεγάλο αριθμό υποφερόντων και από την άλλη χαμηλό PARP.Για την μείωση του PARP,χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές όπως clipping, μη γραμμικη παραμόρφωση στους ενισχυτές ισχύος και ειδικές τεχνικες κωδικοποίησης [23].

2.1.2.6 Η έννοια του διαφορισμού στο ασύρματο μέσο διάδοσης

Στα συστήματα ασύρματων επικοινωνιών το σήμα λόγω των σκεδάσεων ακολουθεί πολλαπλές διαδρομές διάδοσης με αποτέλεσμα τα αντίγραφά του να υποστούν διαφορετικές αποσβέσεις, ολισθήσεις φάσης, καθυστερήσεις και παραμορφώσεις. Έτσι, στον δέκτη είναι πιθανό να εμφανιστούν ανεπιθύμητες παρεμβολές, που υποβαθμίζουν το σήμα εξαιτίας των πολύοδων διαλείψεων στον δίαυλο [26]. Μια κατηγορία παρεμβολών λόγω πολύοδων διαλείψεων είναι οι διακαναλικές [23].

Όταν το εύρος ζώνης του σήματος είναι μεγάλο συγκριτικά με το εύρος ζώνης συνοχής, τότε τα διάφορα φέροντα θα υποστούν διαφορετικού βαθμού διαλείψεις όταν απέχουν απόσταση μεγαλύτερη από το εύρος ζώνης συνοχής. Σε αυτή την περίπτωση το κανάλι είναι επιλεκτικό ως προς την συχνότητα.

Εάν η διάρκεια συμβόλου του σήματος είναι αρκετά μικρότερη από τον χρόνο συνοχής, τότε ο δίαυλος θεωρείται αργών διαλείψεων. Σε αντίθετη περίπτωση ο δίαυλος υποφέρει από γρήγορες διαλείψεις. Στην πρώτη περίπτωση υπάρχουν διάφορες τεχνικές ώστε να εκτιμηθεί το κανάλι. Ενώ ένα κανάλι με γρήγορες διαλείψεις είναι αρκετά δύσκολο να υπολογισθεί.

Για την αντιμετώπιση των παραπάνω φαινομένων χρησιμοποιούνται τεχνικές διαφορισμού, όπου αποστέλουμε αντίγραφα του σήματος μέσα από πολλά κανάλια. Η γενική ιδέα είναι ότι κάποια από τα αντίγραφα θα υποστούν βαθιές διαλείψεις, ενώ ένας αριθμός αντίγραφων θα φτάσει στον δέκτη αναλλοίωτος, οπότε αυξάνουμε τις πιθανότητες να εξασφαλίσουμε αρκετή ενέργεια, ώστε να μεταδοθεί το σωστό σύμβολο. Όταν ο διαφορισμός αφορά στην συχνότητα, το σήμα διαμορφώνεται σε φέροντα που απέχουν μεταξύ τους απόσταση τουλάχιστον ίση με το εύρος ζώνης συνοχής. Στην περίπτωση που έχουμε διαφορισμό χρόνου το σήμα μεταδίδεται σε χρονοσχισμές(slots) με χρονική απόσταση μεγαλύτερη ή ίση του χρόνου συνοχής.

Σημαντική τεχνική διαφορισμού αποτελεί επίσης ο διαφορισμός ως προς το χώρο. Ο διαφορισμός ως προς το χώρο μπορεί να είναι είτε διαφορισμός ως προς τον δέκτη, όταν το σήμα από τον πομπό φτάνει σε περισσότερους από έναν δέκτες με

χρήση αρχιτεκτονικής SIMO (Single Input Multiple Output), είτε ως προς τον πομπό με χρήση MISO (Multiple Input Single Output). Στη δεύτερη, το ίδιο σήμα μεταδίδεται απο πολλούς πομπούς σε ένα δέκτη. Η τεχνική αυτή βελτιώνει την αξιοπιστία της μετάδοσης. Η βελτίωση μπορεί να μετρηθεί με το κέρδος διαφορισμού (diversity gain) που ορίζεται ως το γινόμενο του αριθμού των πομπών επί τους δέκτες (N_T*N_R). [26]

Σε MIMO(multiple input multiple output) συστήματα χρησιμοποιείται τοπική πολυπλεξία(spatial multiplexing),όπου διαφορετικές ροές δεδομένων πολυπλέκονται στου εκπομπούς και μεταδίδονται σε διαφορετικά κανάλια(spatial channels).Είναι αμοιβαίως αποκλειόμενη με τον διαφορισμό ως προς τον χώρο.Ο διαφορισμός ως προς τον χώρο αυξάνει την αξιοπιστία του συστήματος ενώ η χωρική πολυπλεξία αυξάνει τους ρυθμού μετάδοσης,προκύπτει έτσι ένα trade-off μεταξύ των δυο. [27]

Τέλος υπάρχουν τεχνικές διαφορισμού ως προς την πόλωση, την κατεύθυνση και τις κεραίες

Η OFDM χρησιμοποιεί κατα κύριο λόγο διαφορισμό στο πεδίο της συχνότητας σε συνδιασμό με διαφορισμό ως προς τον χρόνο.[28]

2.1.2.7 Αποδιαμόρφωση OFDM

Το σήμα που λαμβάνει ο δέκτης είναι της μορφής $y[t] = \tilde{x}(t) * h(t) + v(t)$, όπου v(t) είναι ο προσθετικός θόρυβος. Αφού μετατραπεί σε σήμα βασικής ζώνης με κάτω μετατροπή συχνότητας, και περάσει από βαθυπερατό φίλτρο ώστε να αποκόψουμε τις υψίσυχνες συνιστώσες, διέρχεται από A/D (αναλογικό σε ψηφιακό) μετατροπέα ώστε να δειγματοληφθεί. Οπότε μετά την δειγματοληψία έχουμε:

$$y[n] = \tilde{x}[n] * h[n] + v[n], \quad -\mu \le n \le N - 1.$$
(2-6)

Τα πρώτα μ σύμβολα που αποτελούν το κυκλικό πρόθεμα αφαιρούνται. Στη συνέχεια τα Ν δείγματα που προκύπτουν διέρχονται από σειριακό σε παράλληλο μετατροπέα και με εφαρμογή μετασχηματισμού Φουριέ (FFT) προκύπτει:

 $Y[t] = DFT\{y[n] = x[n] \otimes h[n]\} = X[t]H[t], 0 \le t \le N - 1.$ (2-7)

Στη συνέχεια γίνεται μετατρόπη της εξόδου του FFT από παράλληλο σε σειριακό μετατροπέα και αποδιαμόρφωση συμβόλου ώστε να ανακτηθεί η πληροφορία [23].

2.1.2.8 Αξιολόγηση OFDM αποδιαμόρφωσης

Από την ανάλυση που έγινε στα προηγούμενα γίνεται φανερό πως η OFDM εμφανίζει σημαντικά πλεονεκτήματα τα οποία είναι:

- Ανοσία στις επιλεκτικές διαλήψεις
- Αντοχή στις παρεμβολές
- Μείωση τις διασυμβολικής παρεμβολής (ISI)
- Υψηλή Φασματική απόδοση
- Αποδοτική υλοποίηση γρήγορου μετασχηματισμού Φουριέ (FFT)
- Αντοχή σε φαινόμενα στενής ζώνης
- Απλούστερη εξίσωση καναλιού [21], [22].

Από την άλλη εμφανίζει σημαντικά μειονεκτήματα καθώς έχει:

Υψηλό λόγο μέγιστης προς μέση ισχύ

- Ευαισθησία σε μετατοπίσεις της συχνότητας του καναλιού.
- Μείωση της απόδοσης του ρυθμού μετάδοσης λόγω κυκλικού προθέματος
- Αύξηση καταναλισκόμενης ισχύος λόγω κυκλικού προθέματος και αυξημένου PARP
- Ευαισθησία σε ολίσθηση Doppler [21], [22].

Για αυτούς τους λόγους στα επόμενα δίνεται έμφαση κυρίως σε αποδοτικές τεχνικές διαμοιρασμού του φάσματος και μείωσης της ισχύος.

2.1.3 Η RF αλυσίδα του OFDMA πομποδέκτη

Τα πλεονεκτήματα της OFDM που αναφέρθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους οδήγησαν στην χρήση της σε συστήματα πολλαπλής πρόσβασης. Έτσι σύγχρονα ασύρματα δίκτυα όπως WiMAX, WRAN, LTE χρησιμοποιούν την πολλαπλή πρόσβαση με ορθογωνική διαίρεση συχνότητας OFDMA ως τεχνική πρόσβασης.

Στην OFDMA γίνεται διαμοιρασμός των διαθέσιμων πόρων τόσο στο πεδίο του χρόνου (ομάδες συμβόλων OFDM) όσο και στο πεδίο της συχνότητας (υποσύνολα υποκαναλιών).

Στο πεδίο της συχνότητας η OFDMA διαιρεί το κανάλι σε υποκανάλια με ορθογωνική διαίρεση συχνότητας. Στο πεδίο του χρόνου, σε κάθε χρήστη διατίθενται χρονοσχισμές που αποτελούνται από OFDM σύμβολα σε σειρά. Σε αντίθεση όμως με την OFDM, δεν αποδίδονται σε έναν χρήστη το σύνολο των υποκαναλιών (Εικόνα 2-4) σε μια χρονοσχισμή, παρα μόνο ένα μέρος τους. Το μικρότερο σύνολο από υποκανάλια που μπορούν να δοθούν σε ένα χρήστη ονομάζεται Resource Block (RB) που αποτελεί την δομική μονάδα του πλαισίου της OFDMA (Εικόνα 2-4). Το σύστημα αποφασίζει πόσα RB θα αποδοθούν σε ένα χρήστη. Έτσι επιτυγχάνεται η πολλαπλή πρόσβαση [29].

Στην Εικόνα 2-5 βλέπουμε το RB της OFDMA σε δίκτυα LTE. Κάθε slot αποτελείται απο 7 σύμβολα ενώ σε κάθε σύμβολο αντιστοιχούν 12 υποκανάλια [30].



Εικόνα 2-4: Διαμοιρασμός πόρων συχνότητας στις OFDM και OFDMA.[31]


Εικόνα 2-5: Το Resource Block των LTE δικτύων.

2.1.4 Σύγκριση τεχνικών πρόσβασης με διαίρεση συχνότητας

Υπάρχουν αρκετές εναλακτικές της OFDM τεχνικές πρόσβασης που θα μπορούσαν να χρησιμοποιήθουν στα δίκτυα 5G.Οι κυριότερες είναι η FBMC στην οποία ένα σύνολο παράλληλων συμβόλων μεταδίδεται μέσω μιας τράπεζας διαμορφωμένων φίλτρων(filter bank)[32],[33] και η BDMA όπου ο σταθμός βάσης εκπέμπει το σήμα σε μια ορθογώνια δέσμη, η οποία διαιρείται στον χώρο ώστε να φτάσει στα τερματικά[34].Είναι λοιπόν σκόπιμο να γίνει σύγκριση ανάμεσα στις εν λόγω τεχνικές και την OFDM με βάση τη βιβλιογραφία. Η FBMC έχει μεγαλύτερη πολυπλοκότητα από την OFDM λόγω της χρήσης της τράπεζας φίλτρων. Χρησιμοποιεί όμως αποδοτικότερα το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Τέλος έχει καλύτερη φασματική απόδοση, αφού λόγω τον φίλτρων δεν υπάρχουν επικάλυψεις μεταξύ των φασμάτων των γειτονικών υποκαναλιών, και έτσι αποτελεί καλύτερη επιλογή για χρήση σε γνωστικά δίκτυα[34],[35].Στα ΜΙΜΟ συστήματα η χρήση της FBMC δημιουργεί αρκετούς περιορισμούς. Έτσι προτιμάται η OFDM[34]. Από την άλλη πλευρά η BDMA είναι μια νέα τεγνική που αναπτύγθηκε ώστε να αξιοποιηθεί στα δίκτυα τελευταίας γενιάς. Αντιμετωπίζει αποδοτικότερα το ζήτημα του PARP που προκύπτει στην OFDM,εμφανίζει μεγαλύτερη χωρητικότητα,αξιοποιεί βέλτιστα τους πόρους συχνότητας και χρόνου ενώ έχει μελετηθεί και η χρήση της σε ΜΙΜΟ συστήματα[36],[37].

2.2: Συστήματα Massive MIMO

Τα συστήματα αυτά αποτελούνται από συστοιχίες εκατοντάδων κεραιών, που εξυπηρετούν μερικές δεκάδες χρηστών και χρησιμοποιούν χωρική πολυπλεξία σε συνδυασμό με TDD. Η χωρική πολυπλεξία (Spatial Multiplexing) επιτρέπει σε διαφορετικές ροές δεδομένων να εκπέμπονται προς διαφορετικούς χρήστες στην ίδια χρονική θυρίδα και να χρησιμοποιούν ίδιες συχνότητες (επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων-frequency reuse) [19]. Ο αριθμός των χρηστών που μπορούν να εξυπηρετηθούν ταυτόχρονα περιορίζεται από την αδυναμία να υπολογισθεί η κατάσταση του καναλιού (Channel State Information, CSI) για απεριόριστο αριθμό τερματικών [20]. Στο Κεφάλαιο 2.2.1 γίνεται συνοπτική παρουσίαση του massive MIMO ραδιοδιαύλου, ενώ στο 2.2.2 γίνεται αναφορά στα πλεονεκτήματα τους έναντι των συμβατικών ως προς την χωρητικότητα. Τέλος, στο 2.2.3 αξιολογείται ο ραδιοδίαυλος.

2.2.1 Χωρητικότητα massive MIMO

Στα συμβατικά point-to-point MIMO με M_t κεραίες εκπομπού και M_r κεραίες δέκτη, κάθε χρήστης εξυπηρετείται σε ξεχωριστά χρονικά μπλοκ με χρήση πολυπλεξίας διαίρεσης χρόνου ή/και συχνότητας. Αν θεωρήσουμε ικανοποιητικά υψηλό SNR, n φασματική απόδοση (bits/second/Hz) με ρ τον αναμενόμενο SNR προσεγγίζεται ως:

$$C \approx \min(M_t M_r) \log_2(\rho),$$
όπου $\rho >> 1$ (2-8)

Ενώ αν θεωρήσουμε Η= $\begin{pmatrix} h_{1,1} & \cdots & h_{1,Mt} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{Mr,1} & \cdots & h_{Mr,Mt} \end{pmatrix}$ την απόκριση του καναλιού, με

χρήση του θεωρήματος Shannon προκύπτει για την χωρητικότητα:

C=log₂det(
$$I_{MrXMt} + \frac{\rho}{Mt} HH^{H}$$
) (2-9)

Τα Massive MIMO, αντίθετα, έχουν την ιδιαιτερότητα να μην λειτουργούν στο πλήρες όριο Shannon, αλλά να το προσεγγίζουν. Έτσι, παρουσιάζουν ιδιώτητες κλιμάκωσης κλιμακώνουν παρά την αύξηση του μεγέθους του συστήματος. Η διαφοροποίησή τους ως προς το θεωρητικό όριο Shannon έγκειται στα 3 παρακάτω χαρακτηριστικά:

- 1. Μόνο ο σταθμός βάσης γνωρίζει το CSI της κάτω ζεύξης.
- 2. Η αύξηση των σταθμών βάσης είναι πολλαπλάσια της αύξησης των χρηστών
- Χρησιμοποιεί γραμμική προ-κωδικοποίηση στην πολυπλεξία κάτω ζεύξης και γραμμική αποκωδικοποίηση στην αποπολυπλεξία άνω ζεύξης [19].

Έτσι, η χωρητικότητα εκφράζεται ως κάτω όριο και εξαρτάται από τον αλγόριθμο προ-κωδικοποίησης που χρησιμοποιείται. Για παράδειγμα, κατά την τεχνική Zero Forcing η χωρητικότητα εκφράζεται ως:

$$C > Mrlog_2(1 + \frac{MtX\rho}{Mr(1+\rho)}) (2-10)$$

2.2.2 O massive MIMO ραδιοδίαυλος

Στα massive MIMO είναι αρκετά σημαντική η μέτρηση του καναλιού. Για την εκτίμηση του καναλιού (CSI) μετριέται η απόκριση συχνότητας κάθε καναλιού μετάδοσης. Μετά τη μέτρηση του καναλιού πρέπει να αξιοποιηθεί το CSI άμεσα, πριν η κίνηση κάποιου χρήστη επηρεάσει την απόκριση του καναλιού. Συνήθως εφαρμόζεται διπλεξία διαίρεσης χρόνου (TDD). Η TDD υπερτερεί της διπλεξίας διαίρεσης συχνότητας (FDD) στα μεγάλης κλίμακας συστήματα(εικόνα 2-6), αφού απαιτεί χρόνο $t_u \ge M_r$ για την αποστολή κάθε ορθογώνιας ακολουθίας πιλότου από τους χρήστες. Η FDD, αντίθετα, χρειάζεται επιπλέον χρόνο $2t_d \ge 2M_t$ για αποστολή ορθογώνιων ακολουθιών από τους σταθμούς βάσης κατά την κάτω ζεύξη που πρέπει στην συνέχεια να εκπεμφθούν από τους χρήστες (t_d+t_d). Συνολικά, απαιτείται χρόνος $2t_d+t_u \ge 2M_t+M_r$ για την FDD, μεγαλύτερος από το $t_u \ge M_r$ της TDD. Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε ότι με την TDD μπορεί να εξυπηρετηθεί σύστημα πολύ μεγαλύτερων διαστάσεων από ότι με την FDD [19].



Εικόνα 2-6: Η υπεροχή της TDD έναντι της FDD σε συστήματα μεγάλης κλίμακας.[19]

Αφού υπολογισθεί το CSI ως σύνολο των συναρτήσεων μεταφοράς $(h_{i,j})$ για όλα τα κανάλια που σχηματίζονται ανάμεσα σε κάθε κεραία $(1...M_r)$ και τερματικό

(1...M_t) παράγεται η απόκριση του καναλιού: H= $\begin{pmatrix} h_{1,1} & \cdots & h_{1,Mt} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{Mr,1} & \cdots & h_{Mr,Mt} \end{pmatrix}$. Όταν οι

χρήστες (τερματικά) αποστέλουν τα δεδομένα τους σε μορφή συμβόλων κατά την άνω ζεύξη σχηματίζονται από κάθε κεραία οι είσοδοι του πίνακα ανίχνευσης, ο οποίος υπολογίζει το σήμα με χρήση κάποιου αλγορίθμου συνήθως γραμμικού (Εικόνα 2.7).

Παρακάτω βλέπουμε το τρόπο υπολογισμού για τους αλγορίθμους MR(maximum ratio) και ZF(zero forcing) [38].

MR	ZF
S=H ^H Y	$\mathbf{S} = (\mathbf{H}^{\mathbf{H}}\mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^{\mathbf{H}}\mathbf{Y}$

Πίνακας 2-1: Επεξεργασία σήματος κατα την άνω ζεύξη στις massive MIMO.



Εικόνα 2-7: Ανω ζεύξη στις massive MIMO.

Αντίστοιχα στην κάτω ζεύξη για την προκωδικοποίηση (Εικόνα 2.7) συμβολίζοντας με * τον συζυγή και Τ τον ανάστροφο προκύπτει:

MR	ZF
X=H*S	$X = H^* (H^T H^*)^{-1} S$

Πίνακας 2-2: Επεξεργασία σήματος κατα την κάτω ζεύξη στα massive MIMO.



Εικόνα 2-8: Κάτω ζεύξη στις massive MIMO.

2.2.4 Αξιολόγηση massive MIMO ραδιοδιαύλου

Οι massive MIMO εμφανίζουν αρκετά πλεονεκτήματα αλλά και μια σειρά απο περιορισμούς που αποτελούν αντικείμενο έρευνας στον τομέα των ασύρματων δικτύων 5G. Παρακάτω αναφέρονται τα σημαντικότερα εξ αυτών.

Πλεονεκτήματα

- Βελτίωση χωρητικότητας ως 10 φορές λόγω της τοπικής πολυπλεξίας.
- Βελτίωση απόδοσης ακτινοβολούμενης ενέργειας ως 100 φορές αφού λόγω του μεγάλου αριθμού κεραιών η ενέργεια συγκεντρώνεται σε μικρότερες περιοχές του χώρου.
- Μεγαλύτερη ευρωστία ως προς τις παρεμβολές ακούσιες και σκόπιμες (jamming).
- Μειωμένη καθυστέρηση του χρόνου απόκρισης. Καθώς το σήμα μεταδίδεται από το σταθμό βάσης προς το τερματικό, ακολουθεί πολλαπλές διαδρομές, λόγω φαινόμενων σκέδασης, ανάκλασης και περίθλασης. Όταν το σήμα φτάσει τελικά στο τερματικό προκάλει παρεμβόλες που μειώνουν σημαντικά την λαμβανόμενη ισχύ και το τερματικο πέφτει σε βαθιές διαλείψεις.Οι διαλείψεις αυτές προκαλούν αύξηση της καθυστέρησης του χρόνου απόκρισης (latency), αφού για να ληφθούν δεδομένα από το τερματικό πρέπει πρώτα να σταθεροποιηθεί η κατάσταση του καναλιού. Στα συστήματα Massive MIMO οι βαθιές διαλείψεις μπορεί να αντιμετωπισθούν μέσω του σχηματισμού δέσμης από τα εκπεμπόμενα σήματα ενός μεγάλου αριθμού κεραιών, οπότε η καθυστέρηση στο χρόνο απόκρισης μειώνεται.
- Απλοποίηση του το MAC στρώματος αφού λόγω της τεχνικής OFDM σε κάθε τερματικό μπορεί να ανατεθεί πλήρως το εύρος ζώνης.
- Εύκολη κλιμάκωση (scalability).
- Μειωμένο κόστος υλοποίησης αφού οι ακριβοί υπερ-γραμμικοί ενισχυτές των 50W, αντικαθίστανται από χιλιάδες φθηνότερους με ισχύ εξόδου της τάξης των mW

Περιορισμοί

- Πιθανή αυξηση κόστους λόγω μεγάλου αριθμού (A/D και D/A) μετατροπέων, καθώς πρέπει να σχεδιαστούν εκατοντάδες RF αλυσίδες.
- Αυξημένη εσωτερική κατανάλωση ισχύος για τον υπολογισμό του σήματος βασικής ζώνης.
- Ανάγκη για περισσότερο ρεαλιστικά μοντέλα χαρακτηρισμού του καναλιού.
- Μόλυνση σήματος πιλότου (pilot contamination). Όταν η συστοιχία που εξυπηρετεί τα τερματικά συσχετίζει το σήμα πιλότο με την αντίστοιχη ακολουθία που σχετίζεται με ένα τερματικό τότε στην εκτίμηση καναλιού που θα προκύψει παρεμβάλλεται και ένας γραμμικός συνδυασμός από κανάλια άλλων τερματικών που αντιστοιχούν στην ίδια ακολουθία. Έτσι, προκύπτουν παρεμβολές στην άνω και κάτω ζεύξη. Το φαινόμενο αυτό αναφέρεται συχνά στην Βιβλιογραφία ως μόλυνση σήματος πιλότου. Προκύπτει λόγω της επαναχρησιμοποίησης του σήματος πιλότου και είναι εντονότερο στα massive MIMO από ότι στα συμβατικά.
- Καλιμπράρισμα βαθμονόμησης (resiprosal calibration). Στα massive MIMO το καλιμπράρισμα βαθμονόμησης είναι πολύ σημαντικό καθώς εκεί βασίζει την λειτουργία της η TDD που συνήθως χρησιμοποιούν. Το υλικό των σταθμών βάσης και οι εκπομποί των τερματικών δεν είναι πάντα βαθμονομημένο μεταξύ άνω και κάτω ζεύξης και αυτό θα μπορούσε να αποτελέσει σημαντικό

περιοριστικό παράγοντα. Στην πράξη υπάρχουν αρκετές δοκιμασμένες λύσεις για το καλιμπράρισμα, σχετική αναφορά υπάρχει στην [39].

Κεφάλαιο 3: Τεχνικές RRM για OFDMA συστήματα

Για να πληρούνται οι προδιαγραφές τον σύγχρονων ασυρμάτων (4G,LTE) καθώς και των πολυαναμενομενων 5G δικτύων που περιγράφονται στο πρώτο κεφάλαιο της διπλωματικής(1.4-1.6),είναι απαραίτητη η αποδοτική αξιοποίηση του διαθέσιμου ραδιοφάσματος.Τα παραπάνω δίκτυα καθώτι κυψελωτά υποφέρουν επίσης από έντονες ομοδιαυλικές παρεμβολές που πρέπει να εξομαλυνθούν.Γίνεται έτσι προφανής η σημασία των τεχνικών διαχείρισης ραδιοπόρων(RRM-Radio Resources Management Techniques).Οι τεχνικές αυτές στοχεύουν:

- Στην αύξηση του throughput
- Στην ελαχιστοποίηση της εκπεμπόμενης ισχύος και του latency.
- Στην βελτιστοποίηση του QoS και της φασματικής απόδοσης

Τα περισσότερα όμως από τα παραπάνω είναι αμοιβαίως αποκλειώμενα, οπότε οι τεχνικές επικεντρώνονται σε μερικά εξ΄αυτών. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αρχικά(3.2-3.5) μια ανασκόπηση των σημαντικότερων τεχνικών (εικόνα 3.1) βάσει της βιβλιογραφίας. Στην 3.6 αναφέρονται τεχνικές που χρησιμοποιούν το κανάλι. Τέλος παρουσιάζονται ορισμένες προτεινόμενες τεχνικές (3.7.1-3.7.4), που μελετώνται ως προς την πολυπλοκότητα (3.7.5) και αναλύεται ο δείκτης δικαιοσύνης (3.7.6).



Εικόνα 3-1: Τεχνικές ανάθεσης ραδιοπόρων(Η διάκριση των τεχνικών καθώς και η δομη του κεφαλαίου είναι βασισμένη στην διδακτορική διατριβή [1]).

3.2 Τεχνικές ανάθεσης πόρων σε OFDM συστήματα

Τα δίκτυα αυτά κάνουν χρήση των τεχνικών link adaption. Οι τεχνικές link adaption κατανέμουν τους διαθέσιμους πόρους με στόχο την αύξηση της ρυθμαπόδοσης με παράλληλο έλεγχο της ισχύος(adaptive modulation and coding-ACM,adaptive power control-PC) [40],[41] .Επίσης η απόδοση τους βελτιώνεται με τεχνικές κωδικοποιήσης για μείωση των σφαλμάτων.Οι συνηθέστερες είναι η ARQ στην οποία, σε περιπτωση εντοπισμού σφαλματος, ο δέκτης ζητά την επανεκπομπή του ελλατωματικού πακέτου δεδομένων και η FEC, όπου γινεται προσπάθεια διόρθωσης του σφάλματος [41]. Σε κανάλια με βαθιές διαλήψεις και διαλήψεις Rayleigh γίνεται χρήση της LDPC(low-density parity-check)[42] ενώ στα MIMO OFDM χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τα σχήματα Alamouti και SVD (singular-value decomposition)[43],[44].

Μια αρκετά σημαντική τεχνική link adaption είναι η water filling. Στην τεχνική αυτή στα κανάλια με τον μεγαλύτερο SNR ανατίθενται περισσότερα bits πληροφορίας (ανώτερη τάξη συμβόλου). Τα bits(bt_s) που θα ανατέθουν υπολογίζονται από το όριο Shannon[45]:

$$bt_{s} = mod(log_{2}(1 + \frac{SNRs}{SNRnorm + NoiseMargin(dB)}))$$
(3-1)

SNRs ο σηματοθορυβικός λόγος του sth υποφορέα,SNRnorm η διαφορά της πραγματικής με την θεωρητική τιμή και Noise Margin το περιθώριο θορύβου για το ελάχιστο BER[46].

Τέλος στο [47] προτείνεται μια τεχνική με στοιχεία του επαναληπτικού water filling σε γνωστικό OFDM δίκτυο με μικρότερη πολυπλοκότητα από τον κλασικό επαναληπτικό water filling.

3.3 Τεχνικές ανάθεσης πόρων για την MU-OFDMA

Σε συστήματα με πολλούς χρήστες,είναι δύσκολο για ένα χρήστη να γνωρίζει την κατάσταση του καναλιού (CSI) των υπολοίπων. Τα συστηματα αυτά είναι πολυκυψελωτά, οπότε κάθε αλλαγή σχετική με την ανάθεση καναλιών και τον έλεγχο της ισχύος θα επηρεάσει τις γειτονικές κυψέλες, αφού ενδέχεται να αυξήσει τις ομοκαναλικές παρεμβολές. Τέλος ο όγκος των δεδομένων που διακινούνται είναι αρκέτα μεγάλος.Οι παραπάνω παράγοντες κάνουν αρκέτα πολύπλοκο των διαμοιρασμό πόρων σε πολυχρηστικά συστήματα OFDMA(MU-OFDMA).Οι πιο σημαντικές τεγνικές σε OFDMA δίκτυα είναι οι κατανεμημένες και οι συγκεντρωμένες, ενώ μια δέυτερη διάκριση γίνεται ανάμεσα στις προσαρμοσμένου περιθωρίου (margin adaptive) και προσαρμοσμενου ρυθμού(rate adaptive) .Στις συγκεντρωμένες τεχνικές[48] οι πόροι ανατίθενται από τον σταθμό βάσης που γνωρίζει τις ανάγκες των τερματικών. Αντίθετα, στις κατανεμημένες τεχνικές[49] τα κινητά τερματικά μόνα τους προσπαθούν να διασφαλίσουν ένα επίπεδο QoS,είναι πιο αποδοτικές από τις πρώτες, όμως χρησιμοποιούν το κανάλι ανάδρασης το οποίο επιβαρύνει σύστημα. Όσον τεγνικές το αφορά τις προσαρμοσμένου περιθωρίου, στοχεύουν στην ελαχιστοποίηση της συνολικής ισχύος, υπό τους περιορισμούς του σταθερού ρυθμού μετάδοσης και BER[50]. Από την άλλη, οι προσαρμοσμένου ρυθμού έχουν στόχο την επιλογή κατάλληλου ρυθμού μετάδοσης για την επίτευξη του απαιτούμενου QoS.[51]

3.4 Παιγνιοθεωρητικές τεχνικές ανάθεσης πόρων σε OFDMA συστήματα

Μια διαφορετική προσέγγιση για την δίκαιη κατανομή του φάσματος και της ισχύος στα OFDMA συστήματα αποτελούν οι αλγόριθμοι διαχείρησης πόρων που βασίζονται στην θεωρία παιγνίων.Τα τερματικά αποτελούν τους παίχτες ενός παιγνίου με στόγο την εύρεση της βέλτιστης κατά pareto λύσης, ώστε να εξασφαλίζονται για κάθε τερματικό τα προδιαγραφόμενα επίπεδα QoS, για την δικτύου. `Οι εύρυθμη λειτουργία του λύσεις μπορεί είναι να συνεργατικές(cooperative), όπου τα τερματικά συντονίζουν εκ τον προτέρων τις κινήσεις τους, ή μη συνεργατικές(non cooperative), όπου τα τερματικά ανταγωνίζονται με σκοπό την μεγιστοποίηση της φασματικής τους απόδοσης και την ελαχιστοποιήση της καταναλισκομένης ισχύος τους υπό περιορισμένους πόρους.

Στο [52] παρουσιάζεται μια μη συνεργατική προσέγγιση, όπου τερματικά χωρίς μεταξύ τους παρεμβολές ανταγωνίζονται για πρόσβαση στους περιορίσμενους πόρους του δικτύου. Στο [48] έχουμε έναν εικονικό διαιτητή που εμποδίζει τα τερματικά να χρησιμοποιούν το ίδιο κανάλι και μειώνει τους ρυθμούς μετάδοσης τους, όταν οι ομοδιαυλικές παρεμβολές και οι ρυθμοί μετάδοσης ξεπερνούν ένα προκαθορισμένο επίπεδο.

Παραδείγμα συνεργατικού παιγνίου αποτελεί το [49] όπου γίνεται χρήση της NBS(Nash bargain solution) σε συνδυασμό με την Hungarian. Σκοπός του παιγνίου είναι η μεγιστοποίηση του ρυθμού μετάδοσης του συνολικού συστήματος με τους περιορισμούς του ελάχιστου απαιτούμενου ρυθμού μετάδοσης και της μέγιστης εκπεμπόμενης ισχύος κάθε τερματικού.Η πολυπλοκότητα του αλγορίθμου είναι O(K² log₂N +K⁴) με N τον αριθμό τον υποφορέων και K τον χρηστών.Στην ίδια κατηγορία ανήκουν και τα παίγνια στα οποία οι πόροι δημοπρατούνται(Auction Games)[53],[54].

3.5 Τεχνικές ανάθεσης πόρων σε δίκτυα 4G

Στην παράγραφο 3.5(3.5.1-3.5.4) παρουσιάζονται οι τεχνικές ανάθεσης πόρων σχετικές με τα δίκτυα τέταρτης γενιάς που συναντώνται στην βιβλιογραφία. Αρχικά γίνεται αναλυτική περιγραφή των τεχνικών που αφορούν στα πολυκυψελωτά δίκτυα(multicellular networks) ενώ στην συνέχεια στις τεχνικές που σχετίζονται με γνωστικά δίκτυα (cognitive networks), δίκτυα μεταγωγής (relay networks) και ετερογενή δίκτυα (HetNets).

3.5.1 Τεχνικές ανάθεσης πόρων σε πολυκυψελωτά δίκτυα (Multicellular Ntws)

Στην παράγραφο αυτή περιγράφονται οι τεχνικές που έχουν σχεδιαστεί για πολυκυψελωτά δίκτυα.Οι τεχνικές για αυτά τα δίκτυα μπορεί να είναι είτε τεχνικές αποφυγής παρεμβολών (IATs, Interference Avoidance Techniques) ή τεχνικές μετριασμού παρεμβολών(IMTs, interference Mitigation Techniques).

Στις IATs ανοίκουν οι τεχνικές επαναχρησιμοποίησης συχνότητας(Frequency Reuse).Σε αυτές συγκαταλέγονται οι κλασικές reuse-1,reuse-3 καθώς και τα μοντέλα κλασματικής επαναχρησιμοποίησης συχνότητας FFR(Fractional Frequency Reuse).Πέρα από τις Frequency Reuse τεχνικές στην κατηγορία των IATs συμπεριλαμβάνονται και οι τεχνικές διακυψελικού συντονισμου(centralized,semi-centralized,Coordinated-Distributed,Autonomous-Distributed).

IMTs τεχνικές αποτελούν οι τεχνικές τυχαιοποίησης παρεμβολών(interference randomization), ακύρωσης παρεμβολών(Interference Cancellation) και προσαρμογής δέσμης (adaptive beamforming).

3.5.1.1 Frequency Reuse-based Schemes (Στατική προσέγγιση)

Η χρήση τεχνικών FFR για την διαχείριση Ισχύος και Φάσματος στοχεύουν στην βελτίστοποίηση της Φασματικής απόδοσης και του SINR. Κάθε κυψέλη διαιρείται σε μια εσωτερική(inner subregion) και μια εξωτερική περιοχή(cell edge subregion).Η διαίρεση γίνεται βάσει κυψελικής ακτίνας ή SINR,όμως υπάρχει πιθανότητα τερματικά να αντιστοιχισθούν σε λάθος υποπεριοχή.Τέλος στις τεχνικές αυτές πάντα γίνεται προσπάθεια εκτίμησης του λόγου επαναχρησιμοποίησης συχνότητας FRF.

Οι πιο κλασικές τεχνικές επαναχρησιμοποίησης συχνότητας είναι οι Reuse-Ν,στοχέυουν στην αύξηση του SINR και την μείωση των CCI. Στην περίπτωση που κάθε χρήστης μπορεί να επαναχρησιμοποιήσει το διαθέσιμο φάσμα χωρίς κανένα περιορισμό ως προς την πρόσβαση σε πόρους συχνότητας και ανάθεσης ισχύος ,η τεχνική ονομάζεται Reuse-1(Εικόνα 3-2α). Αυξάνει τις ομοδιαυλικές και τις διακυψελικές παρεμβολές (ICI,Iinter-Cell Interference), αφού οι σταθμοί βάσης εκπέμπουν πολύ υψηλά επίπεδα ισχύος για να εξυπηρετήσουν τα τερματικά που βρίσκονται στα όρια των κυψελών.Στον αντίποδα των Reuse-1 τεχνικών βρίσκονται οι Reuse-3,που διαιρούν το φάσμα σε 3 ορθογώνιες υποπεριοχές. Κάθε υποπεριοχή αντιστοιχεί σε διαφορετικές κυψέλες. Οι Reuse-3 (Εικόνα 3-2β) αντιμετωπίζουν αποτελεσματικά τις παρεμβολές, όμως εμφανίζουν μειωμένη φασματική απόδοση, οπότε και χωρητικότητα [55].



Εικόνα 3-2:(α)Τεχνική Reuse-1,(β)Τεχνική Reuse-3

Για τους παραπάνω λόγους αναπτύχθηκαν τεχνικές στις οποίες οι τιμές του ενεργού FRF(FRFeff) είναι μεταξύ 1 και 3.Τα τερματικά της εσωτερικής περιοχής έχουν πρόσβαση σε όλο το υποφάσμα που τους αντιστοιχεί γεωγραφικά.Τα τερματικά στο όριο των κυψελών έχουν πρόσβαση στο 1/Ν του υποφάσματος. Παραδείγματα τέτοιων τεχνικών είνα οι SFR(Εικόνα 3-3α) και οι PFR(Εικόνα 3-3β).

Στις SFR οι υποπεριοχές του φάσματος των cell edges, που αντιστοιχούν σε γειτονικούς σταθμούς βάσης, είναι ορθογώνιες μεταξύ τους. Στις PFR στα inner regions ανατίθενται τα υποκανάλια που έχουν ανατεθεί στα cell edges των γειτονικών τους κυψελών. Η συνολική μεταδιδόμενη ισχύς είναι σταθερή με τα cell edge regions να λαμβάνουν υψηλότερα επίπεδα ισχύος από τα inner. Μέρος του φάσματος μένει αχρησιμοποίητο για την ισχύ ισχύουν τα ίδια με τις SFR.O FFReff υπολογίζεται ως:

FRFeff = bw/(bwin+bwout/3) > 1 (3-2)

Όπου bw το συνολικό φάσμα, bwin το υποφάσμα των inner subregions και bwout των cell edge subregions[55].



Εικόνα 3-3:(α)Τεχνική SFR,(β)Τεχνική PFR

Μια άλλη κατηγορία τεχνικών είναι οι έξυπνες τεχνικές επαναχρησιμοποίησης συχνότητας (Inteligence Frequency Reuse,IFR),αναπτύχθηκαν ώστε να καλύψουν τις όλο και αυξανόμενες απαιτήσεις σε QoS των σύγχρονων δικτύων.Εμφανίζουν μειωμένες ομοδιαυλικές παρεμβόλες,βελτιωμένη φασματική απόδοση και αυξημένη χωρητικότητα σε σχέση με τις προηγούμενες τεχνικές.Μια τέτοια τεχνική προτείνεται στο [56].

Η ιδανική θεώρηση των εξαγωνικών κυψελών δεν ισχύει στην πραγματικότητα. Λόγω απωλειών διάδοσης και της σκίασης οι κυψέλες έχουν σχήμα αμοιβάδας, οπότε οι παραπάνω τεχνικές δεν είναι αποδοτικές σε ετερογενή δίκτυα. Μελέτη τεχνικής επαναχρησιμοποίησης συχνότητας σε ρεαλιστικό περιβάλον αποτελεί η [57].

Τέλος, οι στατικές τεχνικές δεν είναι αποδοτικές σε πολυσύχναστα δίκτυα (αεροδρόμια, χώρους εστίασης κ.λ.π), όπου η απαίτηση για βελτίωση των παρεχόμενων υπηρεσιών και οι ομοδιαυλικές παρεμβολές είναι έντονες, καθώς δεν λαμβάνουν υπ'όψιν την κινητικότητα και την κατανομή των τερματικών. Έτσι προτείνονται τεχνικές FFR με δυναμική ανάθεση υποφορέων υπό σταθερή ανάθεση

ισχύος[58] και το αντίστροφο[59].Οι δυναμικές τεχνικές ανάθεσης ραδιοπόρων που συναντώνται στην βιβλιογραφία περιγράφονται στην επόμενη παράγραφο.

3.5.1.2 Cell Coordination Schemes (Δυναμική Προσέγγιση)

Για την κάλυψη των αδυναμιών των στατικών τεχνικών, που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, αναπτύχθηκαν οι συντονισμένες τεχνικές. Οι συντονισμένες τεχνικές διακρίνονται ανάλογα με τον αλγόριθμο ανάθεσης ισχύος (δυαδικός, κατανεμειμένος), την κεντρική οντότητα (RNC,MTs,BSs) που δημιουργεί την λίστα επιθυμιών (wish list) και τον παράγοντα προς βελτιστοποίηση (ισχύς,ρυθμαπόδοση,παρεμβολές).

Στις συγκεντρωμένες τεχνικές (centralized), ένας RNC (Radio Network Controller) αποτέλει την κεντρική οντότητα που με γνώση του CSI κάθε τερματικού ενημερώνει του σταθμούς βάσης για την ανάθεση πόρων [59].

Στην περίπτωση που η κεντρική οντότητα αναθέτει τους πόρους στους σταθμούς βάσης (BSs), οι οποίοι τους διαμοιράζουν στα τερματικά, αντί για απευθείας ανάθεση στα MTs οι τεχνικές ονομάζονται ημι-κατανεμειμένες(semi-distributed,sd)[55].

Οι ημι-κατανεμειμένες τεχνικές όμως σε δίκτυα με υψηλή κινητικότητα δεν είναι αποδοτικές. Επίσης, υπάρχει μεγάλη συμφόρηση στην κεντρική οντότητα αφού συγκεντρώνει όλη την πληροφορία σχετικά με τις παρεμβολές. Έτσι προέκυψαν οι συντονισμένες-κατανεμημένες(coordinated distributed, cd) τεχνικές. Ο συντονισμός γίνεται σε επίπεδο σταθμών βάσης μέσω της διεπαφής X2[60], ώστε σε περίπτωση γρήγορων διαλείψεων να αποφεύγονται οι καθυστερήσεις. Η παρουσία κεντρικής οντότητας είναι μη αναγκαία, ενώ μπορούν να συνδιαστουν με τεχνικές SFR[61].

Άξιες αναφοράς είναι, επίσης, οι αυτόνομες-κατανεμειμένες(autonomous distributed, ad) τεχνικές. Στις τεχνικές αυτες κάθε σταθμός βάσης αναθέτει αυτόνομα τους πόρους χωρίς να απαιτείται συντονισμός μεταξύ τους. Η ανάθεση γίνεται με βάση την πληροφοριά που λαμβάνουν οι BSs από τα MTs. Έχουν μειωμένη πολυπλοκότητα και μικρότερες καθυστερήσεις αφού οι σταθμοί βάσης δεν ανταλλάσουν πληροφορία με σκοπό τον συντονισμό.[62]

3.5.1.3 RRM με τεχνικές μετριασμού παρεμβολών (IMTs)

Ο απλούστερος RRM αλγόριθμος ανάθεσης ραδιοπόρων είναι ο σειριακός. Εκεί κάθε ένας από τους n χρήστές δεσμεύει τα πρώτα Sn υποκανάλια απο ενα σύνολο C του bth σταθμού βάσης [63].Στην εικόνα 3-4 απεικονίζεται αυτή η τεχνική για 3 γειτονικούς σταθμούς βάσης που εξυπηρετούν ένα τερματικό ο καθένας. Ο αλγόριθμος είναι ο ακόλουθος:

$$C \leftarrow C_b(1:Sn)$$
$$C_b \leftarrow C_b \setminus C \qquad (3-3)$$



Εικόνα 3-4: Ανάθεση ραδιοπόρων με τον σειριακό αλγόριθμο.

Δεν χαρακτηρίζεται ως ευφυής αφού δεν αντιμετωπίζει τις ομοδιαυλικές παρεμβολές. Έτσι αναπτύχθηκαν οι τεχνικές τυχαιοποίησης παρεμβολών (interference randomization ή Pseudo-Random Permutation ή Random), οι οποίες προσπαθούν να αποσυσχετίσουν παρεμβολες τύπου CCI και ISI[63]. Η ανάθεση υποκαναλιών γίνεται ψευδοτυχαία με τον ακόλουθο τρόπο:

> $C_b \leftarrow randsample(S_n, C_b)$ $C_b \leftarrow C_b \setminus C$ (3-4)

Σχηματικά η ανάθεση υποφόρεων για 3 γειτονικούς σταθμούς βάσης που εξυπηρετούν ενα τερματικό ο καθένας με ψευδοτυχαίο τρόπο φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 3-5: Ανάθεση ραδιοπόρων με τον αλγόριθμο Random.

Σε συστήματα πολλαπλής πρόσβασης το σήμα λήψης χάνει την ορθογωνιότητα του σε περίπτωση έντονων διακυμάνσεων στο πεδίο του χρόνου,οπότε το σήμα πρέπει να ανακτηθεί.Όμως σε μη συγχρονισμένο δίαυλο η διαδικασία ανάκτησης μπορεί να προκαλέσει ομοδιαυλικές παρεμβολών (CCI). Για την αντιμετώπιση αυτών των φαινόμενων χρησιμοποιούνται τεχνικές ακύρωσης παρεμβολών(Interference cancellation), οι οποίες με την βοήθεια ανιχνευτών πολλαπλών χρηστών (MUD) ανιχνεύουν τα λαμβανόμενα σήματα με το μικρότερο μέσο τετραγωνικό σφάλμα(MMSE), ώστε να ανακτήθουν ορθά. Διακρίνονται σε σειριακές(SIC-Successive Interference Cancelation) και παράλληλες(PIC-Parallel Interference Cancellation). Οι SIC σε κάθε βήμα ανιχνεύουν το ισχυρότερο από τα εκπεμπόμενα σήματα. Μετά την εκτίμηση του σήματος, το κάθε σήμα επανακατασκευάζεται και μεταδίδεται χωρίς παρεμβολές. Η διαδικασία συνεχίζεται για όλους τους χρήστες. Στις PIC ανιχνεύονται όλοι οι χρήστες ταυτόχρονα,γίνεται εκτίμηση των σημάτων και ακυρώνεται μέρος των παρεμβολών. Οι σειριακές υπερέχουν ως προς την χωρητικότητα,όμως οι παράλληλες απόδιδουν καλύτερα όταν οι χρήστες εξυπηρετούνται με την ίδια ισχύ. Λόγω κόστους της υποδόμης του δέκτη αυτές οι τεχνικές είναι ασύμφορες για πρακτικές εφαρμογές[64].

Όσον αφορά τις τεγνικές διαμόρφωσης δέσμης(beamforming), βασίζονται στη συγκέντρωση της δέσμης της κεραίας σε σημείο πρόσπτωσης, που μεγιστοποιεί το επιθυμητό σήμα. Αποτελούνται απο τις τεχνικές προσαρμοστικής δέσμης(adaptive beamforming), οι οποίες ενισχύουν το σήμα σε συγκεκριμένες κατευθύνσεις, ώστε να μετριάσουν τις παρεμβολές, και τις τεχνικές μεταγωγής δέσμης(switched beamforming). Οι τεχνικές μεταγωγής δέσμης κατευθύνουν τους λοβούς σε προκαθορισμένες κατευθύνσεις. Τέλος οι τεχνικές τυχαίας διαμόρφωσης δ έσμης(random beamforming),που εισάγουν διαλήψεις τυγαία σε 3 διαστάσεις(χώρος,χρόνος,συχνότητα),προτιμώνται στα MU-OFDMA συστήματα.

3.5.2 Τεχνικές ανάθεσης πόρων σε γνωστικά δίκτυα (Cognitive Ntws)

Τα δίκτυα αυτά αποτελούν μια πιθανή λυση για την βελτίωση της φασματικής απόδοσης των ασυρμάτων δικτύων με παράλληλη αξιοποίηση των μη αδειοδοτήμενων περιοχων του ραδιοφάσματος.Το βασικό χαρακτηριστικό αυτών των δικτύων είναι ότι οι χρήστες (τερματικά) χωρίζονται σε πρωτεύοντες και δευτερεύοντες. Οι πρωτευοντες χρήστες, που αποτελούν τους αδειοδοτημένους κατόχους του ραδιοφάσματος, έχουν πρωτεραιότητα στην προσβασή σε πόρους.Οι δευτερεύοντες χρησιμοποιούν τμήματα του φάσματος των πρωτευόντων υπό την προϋπόθεση ότι η εκπεμπόμενη ισχύς τους δεν δημιουργεί στο πρωτεύον δίκτυο παρεμβολές και το απαιτούμενο QoS τους παραμένει σταθερό.Τα δίκτυα CN έχουν στοχαστικό χαρακτήρα και για να πετύχουν τους απαιτούμενους ρυθμούς μετάδοσης χρειάζονται αποτελεσματικές τεχνικές ανάθεσης πόρων με έλεγχο της ισχύος όπως στο [65].Αλλες τεχνικές με χρήση του γινομένου εύρους ζώνης-ισχύος περιγράφονται στο [66] ,ένω τα [67],[68] αναφέρουν τεχνικές ανάθεσης σε γνωστικά δίκτυα που κάνουν χρήση OFDMA.

3.5.3Τεχνικές ανάθεσης πόρων σε δίκτυα μεταγωγής (Relay Ntws)

Η όλο και αυξανόμενη χωρητικότητα των συμβατικών ασυρμάτων δικτύων επιφορτίζει τους σταθμούς βάσης και είναι ασύμφορη από άποψη κόστους.Γιαυτό τον λόγο προτιμώνται συχνά τα δίκτυα κόμβων μεταγωγής που βελτιώνουν την κάλυψη στις απομακρυσμένες περιοχές με παράλληλη μείωση του κόστους και αποσυμφόρηση των σταθμών βάσης. Στα δίκτυα αυτά το σήμα μέσω των κόμβων μεταγωγής επαναπροωθείται προς τους χρήστες που βρίσκονται στις απομακρυσμένες περιοχες των κυψελών[69]. Η απλούστερη από τις τεχνικές επαναπροώθησης είναι η AF(amplify-and forward), όπου το σήμα εκπέμπεται προς τον κόμβο μεταγωγής σε μια χρονική θυρίδα και στην επόμενη ο κόμβος μεταγωγής το ενισχύει πριν την επανεκπομπή του. Ένα παράδειγμα μελέτης για αλγορίθμους διαχείρησης φάσματος σε δίκτυα τέτοιου τύπου βασισμένα στην OFDMA αποτελεί το [70]. 'Αλλες τεχνικές είναι η DF(decode-and-forward), όπου το σήμα κωδικοποιείται στο κόμβο μεταγωγής και αποστέλλεται, μια μελέτη τεχνικής ανάθεσης ισχύος είναι η [71]. Τέλος, συχνά συναντάμε και την τεχνική CF(compress-and-forward) όπου το σήμα συμπιέζεται και μετά προωθείται[72].

3.5.4 Τεχνικές ανάθεσης πόρων σε ετερογενή δίκτυα (HetNets)

Τα ετερογενή Δίκτυα αποτελούν μια διάταξη πολυκυψελωτών δικτύων που περιλαμβάνουν διαφορούς τύπους κυψελών με διαφορετικά επίπεδα εκπομπής ισχύος (μάκρο,πίκο,φέμπτο,κόμβων μεταγωγής). Συνδυάζουν τεχνολογίες (2G,3G,4G) και πρωτόκολα πρόσβασης(WiFi,WiMax,κεφάλαιο 1.8). Έχουν πρωτυποποιηθεί από την 3GPP στην στοίβα LTEa ως μια λύση για τις αυξανόμενες ανάγκες των ασυρμάτων δικτύων σε χωρητικότητα,κάλυψη σε απομακρυσμένες περιοχές των κυψελών και αποδοτική εκμετάλλευση των διαθέσιμων ραδιοπόρων. Εμφανίζουν μεγάλη ευελιξία, αφού προσαρμόζονται στην τοπολογία της περιοχής που καλύπτουν[73].Τα συνδυαζόμενα δίκτυα δεν είναι πάντα συμβατά και απαιτείται κατάλληλη επεξεργασία, ώστε να μπορέσουν να λειτουργήσουν σαν εννιαίο δίκτυο.Αρχικά, για την αποτελεσματική αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων πρέπει να μετριαστούν οι διάφορες παρεμβολές (διασυμβολική,ομοκαναλική).Σχετικές τεχνικές εκμετάλλευσης του ραδιοφάσματος παρουσιάζονται στο[74].

Χαρακτηριστικό παράδειγμα ετερογενούς δικτύου είναι αυτό που προκύπτει από το συνδυασμό των προτύπων WiFi και WiMAX. Χρησιμοποιείται αρκέτα στην πραξη, καθώς συνδυάζει την εύκολη και χαμηλού κοστους εγκατάσταση του WiFi για επιμέρους μικρότερες γεωγραφικές περιόχες με την μεγαλύτερη ακτίνα κάλυψης, τις μεγαλύτερες ταχύτητες και ρυθμούς μετάδοσης και το υψηλότερο QoS του WiMAX [75]. Έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές σύγκλισης που εκμεταλεύονται τις ομοιότητες των δύο προτύπων. Για παραδειγμα στο[76] προτείνεται μια 'γέφυρα' σύγκλισης ενώ τα OFDM κανάλια διαμοιράζονται σειριακά. Στο [77] προτείνεται ένας αλγόριθμος για την διαχείρηση των πόρων σε ένα τέτοιο δίκτυο με χρήση ασάφους ελέγχου(fuzzy control). Ένας ασαφής εξυπηρετητής(fuzzy server) επιλέγει ποιό δίκτυο και ποιός σταθμος θα εξυπηρετήσει καθε τερματικό με βάση το SNR του τερματικού. Εξίσου αποδοτικοί είναι και οι αλγόριθμοι που βασίζονται στην θεωρία παιγνιών, στο [78] παρουσιάζεται ένας δίκαιος αλγόριθμος ανάθεσης συχνοτήτων με χρήση ενός 'παιχνιδιού χρεωκοπίας'.

3.6 Τεχνικές ανάθεσης πόρων με γνώση της κατάστασης του ραδιοδιαύλου(CSI).

Οι αλγόριθμοι που κάνουν χρήση του καναλιού ανάδρασης στοχεύουν στην ελαχιστοποίηση της εκπεμπόμενης ισχύος ή στην βελτιστοποίηση του ρυθμού μετάδοσης.

Σχετικά με τις τεχνικές ελαχιστοποίησης ισχύος, ένας από τους πρώτους αλγοριθμούς που προτάθηκαν παρουσιάζεται στο [79].Ο αλγόριθμος αυτός δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε πολυκυψελώτα δίκτυα, οπότε δεν λαμβάνει υπ'όψιν τις ομοδιαυλικές παρεμβολές. Με την εξέλιξη των ασύρματων δικτύων μελετήθηκαν τεχνικές για βελτίωση του QoS και την αντιμετώπιση ομοδιαυλικών παρεμβολών.Στο [80] παρουσιάζεται τεχνική εφαρμόσιμη σε OFDMA κυψελωτά δίκτυα.Η τεχνική αυτή χρησιμοποιεί προσαρμοστική διαμόρφωση και προσπαθεί να αντιμετωπίσει τις παρεμβολές και διαλήψεις.Στοχεύει στην ικανοποίηση των απαιτήσεων των χρηστών σε QoS εκφραζόμενες ως προς το BER.

Εξίσου σημαντικές είναι οι τεχνικές που επικεντρώνονται στην βελτιστοποίηση του ρυθμού μετάδοσης.Στην [81] προτείνεται αλγόριθμος ελέγχου της ισχύος που αποσκοπεί στην αύξηση της χωρητικότητας οπότε και του ρυθμού μετάδοσης.Η τεχνική χωρίζεται σε 2 στάδια.Στο πρώτο στάδιο στάδιο εφαρμόζεται ο αλγόριθμος maxmin για τον υπολογισμό του SNR για κάθε χρήστη με άγνωστο την ισχύ,υπό τον περιορισμό μιας ελάχιστης απαιτούμενης χωρητικότητας.Στη συνέχεια στο δεύτερο στάδιο ανάλογα την ρυθμαπόδοση επιλέγεται το κατάλληλο σχήμα διαμόρφωσης.Στο [82] συνυπολογίζεται με χρήση πιθανοτήτων(outage probability) και η κινητικότητα των χρηστών.

Στην πράξη είναι αρκετά δύσκολο να έχουμε πλήρη γνώση του ραδιοδιαύλου, έτσι μελετήθηκαν περισσότερο ρεαλιστικά σενάρια με μερική γνώση του καναλιού[83],[84].

Σε αυτήν την κατεύθυνση στην παρούσα διπλωματική προτείνεται η χρήση του αλγορίθμου MSNR(3.7.4) ο οποίος εκμεταλεύεται το κανάλι ανάδρασης,σε MU-MIMO-OFDMA πολυκυψελωτό δίκτυο.

3.7 Προτεινόμενες RRM τεχνικές

Στην παράγραφο αυτή προτείνονται ορισμένες τεχνικές οι οποίες έχουν μελετηθεί. Αρχικά αναφέρονται τεχνικές επαναχρησιμοποίησης συχνότητας που δεν απαιτούν γνώση του καναλιού, οπότε υπερέχουν ως προς την πολυπλοκότητα. Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο αλγόριθμος MSNR που απαιτεί γνώση του καναλιού ανάδρασης.Ο εν λόγω αλγόριθμος προσομειώνεται στα πλαίσια της διπλωματικής τόσο σε δίκτυο WiMAX(κεφάλαιο 4) όσο και σε WiFi-WiMAX ετερογενές δίκτυο(κεφάλαιο 5). Οι παραπάνω αλγόριθμοι συγκρίνονται ως προς την πολυπλοκότητα. Παράλληλα εισάγεται η έννοια του δείκτη δικαιοσύνης.

3.7.1 Βελτιωμένη τεχνική επαναχρησιμοποίησης συχνότητας (FFR)

Σε αυτή την τεχνική [85] οι κυψέλες χωρίζονται σε inner και cell edge subregions.Στις inner ανατίθεται το ίδιο υποσύνολο υποκαναλιών.Στις cell edges αντιστοιχίζεται κλάσμα των υπολοίπων υποκαναλιών.Τα υποσύνολα των cell edges είναι αμοιβαίως ορθογώνια.Τα παραπάνω συμβαίνουν και στις κλασικές FFR.Η διαφορά έγκειται στην ανάθεση ισχύος.Το επίπεδο ίσχυος με το οποίο εκπέμπονται τα υποκανάλια καθορίζεται δυναμικά και διαφέρει από κυψέλη σε κυψέλη.Αν υποτεθεί ότι οι εσωτερικές υποπεριοχές λαμβάνουν π.χ. τα υποκανάλια 1-64(1° υποσύνολο υποκαναλιών) σε επίπεδα ισχύος p1,p3,p5,p8 κ.λ.π.,οι εξωτερικές λαμβάνουν τα επόμενα υποσύνολα(κλάσμα) π.χ 2°, 3°, 4°,5° (αντιστοιχεί στα υποκανάλια π.χ 65-80,81-96,97-112, κ.λ.π).Κάθε κλάσμα βρίσκεται σε διαφορετικό επίπεδο ισχύος.Η αντιστοίχιση υποκαναλιών και ισχύος στις υποπεριοχές του χώρου με χρήση της βελτιωμένης FFR γίνεται (εικόνα 3-5) βάσει της παρακάτω σχέσης:

```
\begin{split} &K_1 = K_2 = K_3 \\ &K_{1, \text{ cell } 1} = \{ SB_1(P_1, R_{in}), SB_2(P_2, Rc) \} \\ &K_{1, \text{ cell } 2} = \{ SB_1(P_3, R_{in}), SB_2(P_4, Rc) \} \\ &K_{1, \text{ cell } 3} = \{ SB_1(P_5, R_{in}), SB_2(P_6, R_c) \} \ (3-5). \\ &K_{1, \text{ cell } 4} = \{ SB_1(P_8, R_{in}), SB_2(P_7, R_c) \} \end{split}
```

Όπου K_i οι κυψελικοί τομείς, P_j τα επίπεδα ισχύος, SB_l τα υποσύνολα υποφορέων και R_{in} , R_c τη υποπεριοχή του χώρου(inner,cell edge).Στην συνέχεια γίνεται η ανάθεση τους σειριακά(εξ.3-2).



Εικόνα 3-6: Βελτιωμένη FFR για 4 τύπους κυψελών.[85]

3.7.2 Τεχνική απόδοσης καναλιών ελάχιστης επαναχρησιμοποίησης (RAJSS)

Στην Τεχνική RAJSS[86] αρχικά η κυψελική περιοχή διαιρείται εικονικά σε 2 ομόκεντρες υποπεριοχές με βάση μια προκαθορίσμενη απόσταση PD (Εικόνα 3-3). Οι χρήστες που βρίσκονται στην εσωτερική περιοχή αιτούνται πόρους ψευδοτυχαία.Οι χρήστες που απέχουν απόσταση εως και CD από το νεο χρήστη θεωρούνται παρεμβολείς(CJ).Οι εξωτερικοί χρήστες δεσμεύουν τους πόρους που δεν χρησιμοποιούνται από παρεμβολείς.Στην περίπτωση, όμως, που δεν υπάρχουν άλλα διαθέσιμα κανάλια τοτε δεσμεύει κάποιο από αυτά.Ο αλγόριθμος είναι ο ακόλουθος:

If
$$C_b \cap C_{cj}^* = \emptyset$$

 $C_b \leftarrow C_b$
 $C \leftarrow Randsample (S_n, C_b)$
 $C_b \leftarrow C_b \setminus C$ (3-7)
else
 $C_b \leftarrow C_b \cap C_{cj}^*$
 $U_n \leftarrow Randsample (S_n, C_b)$
 $C_b \leftarrow C_b / U_n$

Όπου n οι χρήστες, b οι σταθμοί βάσης και C_{cj}* τα υποκανάλια που δεν επαναχρησιμοποιούνται από τους γειτονικούς σταθμούς βάσης.

Η τεχνική αυτή υπερέχει των προηγούμενων ως προς το BER, το throughput και την δικαιοσύνη, όμως έχει μεγαλύτερη πολυπλοκότητα.



Εικόνα 3-7: Κατανομή του φάσματος στις κυψέλες με την τεχνική RAJSS. [86]

3.7.3Τεχνική απόδοσης καναλιών με εικονική κατάτμιση της επιφάνειας των κυψελών(BAJSS)

Η τεχνική BAJSS διαιρεί τις εξάπλευρες κυψέλες σε i εικονικές γεωγραφικές υποπεριοχές,ίδιας έκτασης(G_i blocks). Στη συνέχεια τα διαθέσιμα υποκανάλια ομαδοποιούνται σε Fi υποσύνολα και αντιστοιχίζονται στις G_i. Ακολούθως στο nth κινητό τερματικό του bth σταθμού βάσης ανατίθενται Sn υποκανάλια του Fi υποσυνόλου, που αντιστοιχεί στην G_{b,n} υποπεριοχή, στην οποία ανήκει το τερματικό. Αν όλα τα υποκανάλια της G_{b,n} υποπεριοχής είναι δεσμευμένα τότε στο τερματικό ανατίθεται υποσύνολο από το μπλοκ G_{b,k} που απέχει μεγαλύτερη απόσταση από το ομότιμο του(εικόνα 3-9). Η ανάθεση υποκαναλιών με την BAJSS περιγράφεται απο τον αλγόριθμο :

 $\label{eq:cn} \begin{array}{l} \text{if } \text{length}(FG_{b,n}) \neq 0 \\ C_n \leftarrow \text{randsample } (S_n, FG_{b,n}) \\ FG_{b,n} \leftarrow FG_{b,n} \setminus C \\ C_b \leftarrow C_b \setminus C \\ \text{elseif length } (FG_{b,n}) = 0 \\ C \leftarrow \text{randsample } (S_n, FG_{b,k}) \\ FG_{b,k} \leftarrow FG_{b,k} \setminus C \\ C_b \leftarrow C_b \setminus C \end{array} \tag{3-8}$

else

 $C \leftarrow randsample (C, S_n)$

$$C \leftarrow C \setminus C_n$$

end



Εικόνα 3-8: Κατανομή του φάσματος στις κυψέλες με την τεχνική BAJSS. [86]

3.7.4 Τεχνική απόδοσης καναλιών με μεγιστοποίηση του σηματοθορυβικού λόγου(MSNR)

Σε αντίθεση με τις προηγούμενες προτεινόμενες τεχνικές ο MSNR απαιτεί γνώση του καναλιού ανάδρασης. Στη τεχνική αυτή, αφού εντοπισθούν τα διαθέσιμα υποκανάλια του σταθμού βάσης ο οποίος εξυπηρετεί το νεοεισελθόν τερματίκο, υπολογίζεται ο σηματοθορυβικός τους λόγος(SNR). Προκειμένου να υπολογισθεί ο SNR για όλα τα υποκανάλια, πρέπει να είναι γνωστή η απόκριση επίπεδων διαλείψεων. Στη συνέχεια τα υποκανάλια ταξινομούνται βάσει SNR και αυτά με τις υψηλότερες τιμές ανατίθενται στο τερματικό.Ο αλγόριθμος είναι ο εξής:

$$i \leftarrow 0$$

for 1:S:|C_b|
$$i \leftarrow i+1$$

SNR_{n,s} =[m'*Ht'*w']*[w*Ht*m]
SNR_{n,k} \leftarrow SNR_{n,s}
end (3-9)
SNR_n \leftarrow sort(SNR_n)
C_b \leftarrow C^{SNR}_b
C_n \leftarrow C_b{(|C_b|-S_n+1):|C_b|}
C_b \leftarrow C_b \ C_n

Ο ΄ συμβολίζει τον αναστροφοσυζυγή πίνακα, Ηt είναι η απόκριση επίπεδων διαλήψεων,m το ιδιοδιάνυσμα που περιέχει την μέγιστη ιδιοτιμή του πίνακα Ht'*Ht, και w=(Ht*m)' το βάρος του κεραιοστοιχείου εκπομπής.

3.7.5 Αλγοριθμική πολυπλοκότητα προτεινόμενων τεχνικών

Η αλγοριθμική πολυπλοκότητα των τεχνικών ανάθεσης ραδιοπόρων,εξαρτάται κυρίως από το μέγεθος του δικτύου,το πλήθος των κυψελών και των ανατιθέμενων υποκαναλιών,των ομόκεντρων περιογών ανά κυψέλη ,τη γρήση ή όγι του καναλιού ανάδρασης. Στη σειριακή τεχνική(Sequential) πρέπει να σαρωθούν τα πρώτα S_n υποκανάλια πριν ανατεθούν στον nth που εξυπηρετείται από τον σταθμό βάσης bth.Συνέπως η πολυπλοκότητα είναι της τάξης του O(S_n).Στην Random πρέπει να σαρωθούν όλα τα διαθέσιμα |Cb| υποκανάλια του σταθμού βάσης b για την ανάθεση S_n υποκαναλιών οπότε η πολυπλοκότητα είναι $O(|C_b|*S_n)$. Στη βελτιωμένη FFR πρέπει να σαρωθεί το σύνολο των υποκαναλιών της φασματικής υποπεριοχής στην οποία ανήκει το τερματικό άρα έχει πολυπλοκότητα $O\{(|C_b|/2)*S_n)\}$. Σχετικά με την τεχνική RAJSS συμβολίζουμε με J_b τους παρεμβολείς(Jammers) του bth σταθμού βάσης και Cci* τα υποκανάλια που δεν έγουν επαναγρησιμοποιηθεί από τους γειτονικούς σταθμούς βάσης. Η πολυπλοκότητα που προκύπτει για την ανάθεση Sn υποκαναλιών είναι $O\{(J_b + 1)^* | C_{cj}^* | s_n\}$. Ο αλγόριθμος BAJSS στη χειρότερη περίπτωση απαιτεί την σάρωση των J τετραγώνων των γειτονικών κυψελών της τρέχουσας κυψέλης και των $|C_b|$ υποκανάλιών του b^{th} σταθμού βάσης. Οπότε για την ανάθεση S_n υποκαναλιών

η πολυπλοκότητα είναι: O{[(J_b +1)*length(F)+| C_b]]* S_n)}.Τέλος, στον MSNR για την ανάθεση ενός υποκαναλιού S πρέπει να εντοπισθούν αρχικά όλα τα διαθέσιμα $|C_b|$ υποκανάλια. Στη συνέχεια το S πρέπει να συγκριθεί με τα τα ταξινομημένα υποκανάλια. Για την ανάθεση S_n υποκαναλιών προκύπτει O{sum(1:|C_b|)*S_n)}. Συνοπτικά οι πολυπλοκότητες των προτεινόμενων αλγορίθμων συγκεντρώνονται στον πίνακα 3-1.

ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ RRM	ΠΟΛΥΠΛΟΚΟΤΗΤΑ
Sequential	O(S _n)
Random	$O(C_b * S_n)$
Βελτιωμένη FFR	$O\{(C_b /2) * S_n)\}$
RAJSS	$O\{(J_b + 1)^* C_{cj}^* * S_n)\}$
BAJSS	$O\{[(J_b + 1)*length(f)+ C_b]*S_n)\}$
MSNR	$O\{sum(1: C_b)*S_n)\}$

Πίνακας 3-1: Αλγοριθμική πολυπλοκότητα RRM τεχνικών

3.7.5 Δείκτης Δικαιοσύνης [Fairness Index]

Η κατανομή πόρων σε πολλούς χρήστες είναι σημαντικό να χαρακτηρίζεται από δικαιοσύνη. Η δικαιοσύνη σε ένα ασύρματο δίκτυο μπορεί να μετρηθεί μέσω του δείκτη δικαιοσύνης(FI-Fairness Index). Ο γενικός ορισμός αυτού του δείκτη σύμφωνα με την μελέτη του Raj Jain(88),(89) είναι:

J (X1, X2...Xn) =
$$\frac{|\Sigma X_i|^2}{\sum_{i=1}^n Xi^2}$$
 (3-9)

Όπου n οι χρήστες και Xi οι πόροι που κατανέμονται στον i χρήστη.

Η ανάθεση πόρων θεωρείται απόλυτα δίκαιη όταν J=1 και άδικη για J=0. Ισχύει

$$0 \le J \le 1 \tag{3-10}$$

Κεφάλαιο 4: Πλατφόρμα προσομείωσης δικτύου WiMAX

Στα προηγούμενα κεφάλαια έγιναν σαφή τα πλεονεκτήματα της τεγνικής διαμόρφωσης OFDMA σε συνδυασμό με την τεχνολογια massive MIMO (κεφάλαιο 2) καθώς και η χρήση τους σε ετερογενή δίκτυα (παράγραφος 3.5.4). Έμφαση δόθηκε, επίσης, στην αναγκαία αποδοτική διαχείριση του ραδιοφάσματος μέσω κατάλληλων αλγορίθμων (κεφάλαιο 3). Για τη μελέτη όλων των παραπάνω, αλλά και γενικότερα για τη μελέτη της επίδρασης της εφαρμογης νέων τεχνολογιών και αλγορίθμων στα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα γίνεται γρήση προσομειωτών. Οι προσομοιωτές είναι είτε επιπέδου ζεύξης (link level)[90] ή επιπέδου συστήματος (system level)[91]. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής προσομοιώθηκε σε περιβάλον matlab ενα δίκτυο τεχνολογίας WiMAX. Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζεται η πλατφόρμα του Standalone WiMAX δικτύου. Στο δίκτυο αυτό μελετήθηκαν ορισμένοι εκ των αλγορίθμων ανάθεσης πόρων που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στις επόμενες παραγράφους αναλύεται ο κώδικας του προσομοιωτή και επεξηγείται η διαδικασία προσομοίωσεις με κατάλληλα διαγράμματα ροής. των αποτελεσμάτων και των Τέλος, γίνεται καταγραφή σγετικών συμπερασμάτων.

4.1 Αρχιτεκτονική του προσομειωτή

Το πολυκυψελωτό δίκτυο, που κατασκευάστηκε, αποτελείται από 1 ή 2 δακτυλίους (tiers) που αναπτύσσονται πέριξ της κεντρικής κυψέλης,συνεπώς από 7 ή 19 κυψέλες σε σχήμα κανονικού εξαγώνου. Κάθε κυψέλη έχει ακτίνα R=1Km διαιρείται σε 3 τομείς των 120° έκαστος.Οι σταθμοί βάσης(BS's) τοποθετούνται στο κέντρο κάθε εξαγώνου(εικόνα 4-1), η αρίθμηση των κυψελών είναι κατα σύμβαση και δεν επηρεάζει την διαδικασία των προσομειώσεων).



Εικόνα 4-1: Κυψελική διάταξη WiMAX δικτύου.

Η κεραία κάθε σταθμού βάσης είναι κατευθυντική τριών δεσμών. Ο κύριος λοβός της κεραίας κατευθύνεται επί της διχοτόμου κάθε τομέα (60°,120°,300°). Το διάγραμμα ακτινοβολίας κάθε κεραίας ορίζεται μέσω της σχέσης:

$$f(\varphi) = G_{bs} - \min\left[12(\frac{\varphi - \varphi_{\kappa}}{\varphi_{3dB}}, Amax)^2\right] \quad (4-1)$$

όπου G_{bs} το κέρδος της κεραίας του BS(14dBi), φ_{3dB} το έυρος ημίσεος ισχύος και Amax η μέγιστη απόσβεση της κεραίας (20dB). Το δίκτυο χρησιμοποιεί τεχνολογία MIMO ώστε να υποστηρίζει πολυχρηστικότητα. Για την πολλαπλή πρόσβαση γίνεται χρήση της τεχνικής OFDMA. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονισθεί ότι η σχετική θέση των κινητών τερματικών (χρήστες) που εισέρχονται στο δίκτυο δεν μεταβάλεται κάτα την διάρκεια των προσομοιώσεων. Στον ημιστατικό αυτόν προσομοιωστή ολοκληρώθηκαν μια σειρά από σενάρια. Κάθε σενάριο αποτελείται από 300 Monte Carlo προσομοιώσεις. Μετά το πέρας κάθε MC οι πόροι αποδεσμεύονται με σκοπό την επανεκχώριση τους σε νέους χρήστες δίνοντας δυναμικό χαρακτήρα στο δίκτυο, ούτως ώστε να γίνουν ρεαλιστικές οι προσομειώσεις. Πριν την έναρξη κάθε σεναρίου ρυθμίζονται οι παράγοντες tiers, υποκανάλια ανά χρήστη, πλήθος κεραιών εκπομπής, αλγόριθμος ανάθεσης υποκαναλιών και η μέγιστη πιθανότητα αποκλεισμού που επεξηγείται παρακάτω. Στον πίνακα 4-1

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	TIMH		
Ακτίνα κυψέλης(R)	1km		
Αριθμός δακτυλίων(tiers)	1-2		
Υψος σταθμού βάσης(BS)/κινητού	30m/15m		
τερμάτικου(MT)			
Κεντρική συχνότητα λειτουργείας	2,5GHz		
Συνολικο εύρος ζώνης λειτουργείας	10MHz		
Εύρος ζώνης φέροντος	156,25KHz		
Τεχνική διαμόρφωσης	QPSK		
Τεχνική πολλαπλής πρόσβασης	OFDMA		
Υποκανάλια ανα BS	64		
Υποκανάλια ανα ΜΤ	2 3 4		
Πλήθος κεραιών εκπομπής/λήψης(Mr/Mt)	2/2 2/25 2/50		
Μοντέλο διάδοσης	Okomura-Hata		
	(εκθέτης απωλειών 3,5)		
Διάγραμμα ακτινοβολίας	Broadside Gain=14dBi		
	Front-to-back ratio=20dBi		
	Εύρος ημίσεως ισχύος(3dB)=70°		
Τυπική απόκλιση σκίασης	8 dB		
SNR	9,6 dB		
Μέγιστη ισχύς ανα BS/MT	43dBm/30dBm		
Επίπεδο θερμικού θορύβου	-104dBm		
Πιθανότητα αποκλεισμού	5% 15% 30%		
Πλήθος MC προσομοιώσεων	300 500		

παρουσιάζεται το σύνολο των παραμέτρων του WiMAX δικτύου για κάθε σενάριο που προσομοιώθηκε.

Πίνακας 4-1: Παράμετροι δικτύου WiMAX

Το πρώτο στάδιο κάθε προσομοίωσης είναι η είσοδος νέων χρηστών και η επιλογή του σταθμού βάσης που θα τους εξυπηρετήσει. Στη συνέγεια, αφού ο γρήστης γίνεται δεκτός από το σύστημα υπολογίζονται οι συνολικές του απώλειες ως προς τον σταθμό βάσης που τον εξυπηρετεί. Το επόμενο στάδιο είναι η ανάθεση υποκαναλιών στον χρήστη με βάση τον προς μελέτη αλγόριθμο και τέλος η ανάθεση ισχύος. Σε περίπτωση που η υπολογιζόμενη προς ανάθεση ισχύς ξεπεράσει το 1W, η είναι μικρότερη απο 0 που είναι αδύνατο σε πραγματικές συνθήκες ,ο χρήστης αφαιρείται από το δίκτυο και οι αφαιρούμενοι χρήστες (remove counter) αυξάνονται κατα 1. Σε κάθε προσπάθεια εισόδου νέου χρήστη μετρώνται οι συνολικές προσπάθειες για σύνδεση χρηστών στο δίκτυο(ΣΠ,trials) αλλα και οι οι αφαιρούμενοι χρήστες (AX,remove_counter) ώστε να υπολογίζεται η πιθανότητα αποκλεισμού(ΠΑ, Probability_Failure)που ορίζεται ως $\Pi A = \frac{AX}{\Sigma \Pi}$. Όταν ισχύει $\frac{AX}{\Sigma \Pi} \ge \Pi A_{\text{max}}$ όπου ΠΑ_{max} η προκαθορισμένη μέγιστη πιθανότητα αποκλεισμού η MC ολοκληρώνεται. Τα μεγέθη που εξάγονται απο τον προσομοιωτή είναι η μέση χωρητικότητα του δικτύου,η μέση ισχύς που καταναλώνει και η μέση ισχύς ανά χρήστη. Παρακάτω(εικόνα 4-2) βλέπουμε το διάγραμμα ροής της λειτουργείας του προσομοιωτή για κάθε MC .Τα διάφορα στάδια της MC περιγράφονται αναλυτικά στις επόμενες παραγράφους.



Εικόνα4-2: Δομή ΜC προσομοίωσης WiMAX δικτύου.

4.2 Είσοδος χρήστη στο δίκτυο και επιλογή εξυπηρετητή σταθμού βάσης

Η είσοδος νεων χρηστών (κινητών τερματικών MTs) γίνεται σειριακά. Οι συντεταγμένες κάθε νεοεισελθέντος MT είναι τυχαίες μεταβλητές που ακολουθούν την κανονική κατανομή (συνάρτηση rand) και περιορίζονται από τα γεωγραφικά όρια του δικτύου. Συνεπώς προγραμματιστικά ισχύει:

 $\begin{array}{ll} xmin = -(1 + 2*tiers) *R + R/2; xmax = -xmin; & (4-2) \\ ymin = -(1 + 2*tiers) *R*(sqrt (3)/2); ymax = -ymin; (4-3) \\ X = xmin + (xmax-xmin) *rand; & (4-4) \\ Y = ymin + (ymax-ymin) *rand; & (4-5) \end{array}$

Όπου xmin, xmax, ymin, ymax τα κάτω και άνω όρια των συντεταγμένων των MT's X,Y οι συντεταγμένες τους, tiers ο αριθμός των δακτυλίων,R η ακτίνα της κυψέλης. Σε κάθε προσπάθεια εισόδου νέου MT οι δοκιμές(trials) αυξάνονται κατα 1. Για να εξυπηρετηθεί το κάθε νέο MT από το δίκτυο υπολογίζονται αρχικά οι απώλειες του λόγω διάδοσης(Pathlosses) ως προς όλους τους BS's.Κατώπιν τον ακόλουθων παραδοχών :

- Κεντρική συχνότητα λειτουργείας=2.5GHz,
- Υψος σταθμού βάσης(BS)=30m
- Υψος κινητού τερμάτικου(MT)=15m

και με χρήση του μοντέλου Okomura-Hata με εκθέτη απωλειών 3,5

προκύπτει: PathLosses=10^((137.4 + 35.2*log10(distance))/10) (4-6) Όπου distance η ευκλείδια απόσταση του MT απο τον BS. Στην συνέχεια οι PathLosses αθροίζονται με της απώλειες λόγω σκίασης(shadowing).Η σκίαση ακολουθεί την κανονική κατανομή και έχει τυπική απόκλιση σ=8dB συνεπώς σε περιβάλον matlab υπολογίζεται ως εξής: shadowing=8*randn(1.BSs); (4-7)

Από τα παραπάνω αθροίσματα (Pathlosses+shadowing) εντοπίζεται το ελάχιστο και συγκρίνεται με το κατώφλι των 133,4dB (όριο της ευαισθησίας του δέκτη).Σε περίπτωση που το ελάχιστο άθροισμα δεν υπερβαίνει αυτό το όριο τότε το MT ανατίθεται προς εξυπηρέτηση στον αντίστοιχο BS. Σε αντίθετη περίπτωση το MT απορρίπτεται από το σύστημα και προσπαθεί να εισέλθει το επόμενο MT,η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι να επιτευχθεί σύνδεση στο δίκτυο .Σε περίπτωση συνεχόμενων αποτυχημένων προσπαθειών ο προσομοιωτής μετρά μόνο την πρώτη από τις δοκιμές(trials). Μετά την ανάθεση του MT σε BS,υπολογίζονται οι συνολικές απώλειες του χρήστη ώστε να ληφθούν υπ'όψην στον έλεγχο της ισχύος που αποτελεί επόμενο στάδιο της προσομοίωσης.Στις συνολικές απώλειες πρέπει να συμπεριληφθεί και ο συντελεστής γωνιακής εξασθένησης του BS (ATTENUATION) οπότε υπολογίζεται ο τομέας στον οποίο ανήκει το MT με την διαδικασία της τομεοποίησης(SECTORIZATION).Με κέρδος κεραιών Gain_MT=0dBi για τα MTs και Gain_BS=14dBi για τους BSs έχουμε τελικά :

TOTALLOSSES(dB) = Pathlosses+shadowing +ATTENUATION-Gain_BS-Gain_MT) (4-8) Στον προσομειώτη οι τιμες μετρούνται σε Watt συνεπώς: TOTAL_LOSSES_per_MT=(LOSSES*ATTENUATION)/(Gain_BS* Gain_MT) (4-9) Όπου LOSSES= Pathlosses+shadowing Στην επόμενη παράγραφο περιγράφεται η ανάθεση υποκαναλιών στα MTs.

4.3 Ανάθεση υποκαναλιών στους χρήστες

Μετά την είσοδο κάθε νέου χρήστη στο δίκτυο και την επιλογή του σταθμού βάσης γίνεται ανάθεση υποκαναλιών στα MT's με βάση τον αλγόριθμο που έχει επιλέγει. Oι αλγόριθμοι που μελετήθηκαν είναι 01 SEQUENTIAL(3.5.1.3), RANDOM(3.5.1.3) και MSNR(3.7.4). Το πλήθος τον υποκαναλιών που δεσμεύει κάθε ΜΤ καθορίζεται κατα την παραμετροποίηση πριν την έναρξη των MC. Σε κάθε σταθμό βάσης αντιστοιχούν 64 υποκανάλια ενώ σε κάθε ΜΤ ανατίθενται 2,3 ή 4 υποκανάλια ανάλογα το σενάριο. Σε περίπτωση που το πλήθος τον υποκαναλιών τα οποία αιτείται το MT είναι μεγαλύτερο απο το πλήθος εναπομείνοντων προς διάθεση υποκαναλιών του BS τότε το MT αφαιρείται από το δίκτυο και ο μετρητής remove_counter αυξάνει κατα 1.

4.4 Ανάθεση και έλεγχος ισχύος

Τα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα υποφέρουν από ομοδιαυλικές παρεμβολές. Ο μετριασμός και η καταστολή αυτών των παρεμβολών είναι σημαντικός για την αύξηση της χωρητικότητας και την βελτίωση της απόδοσης τους. Βασικός παράγοντας για την αντιμετώπιση τον ομοδιαυλικών παρεμβολών είναι ο έλεγχος της εκπεμπόμενης ισχύος προς τα τερματικά και κυρίως τα τερματικά που εξυπηρετούνται απο σταθμούς βάσης γειτονικών κυψελών.Στον προσομοιωτη που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική η ανάθεση ισχύος γίνεται επιλύοντας το ακόλουθο γραμμικό σύστημα, ώστε να συνυπολογίζονται οι συνολικές απώλειες ανά ΜΤ και τα ομοδιαυλικά τερματικά (τερματικά που εκπέμπουν στο ίδιο υποκανάλι).

$$\mathrm{SNR}_{n,s} = \frac{\frac{P_{n,s}}{TL_{n,k}}}{\sum_{\substack{n=1\\n\neq n'}}^{N} \frac{P_{n,s}}{TL_{n',i}} + I} = P_{n,s} = \mathrm{SNR}_{n,s} * (\sum_{\substack{n=1\\n\neq n'}}^{N} P_{n',s} \frac{TL_{n,k}}{TL_{n',i}} + I * TL_{n,k})$$
(4-10)

Όπου s τα υποκανάλια που ανατίθενται στο n_{th} MT ,n' τα ομοδιαυλικά τερματικά,k και i οι τομείς στους οποίους ανήκουν τα n και n'.

Μετά την ανάθεση ισχύος ελέγχεται αν η υπολογισμένη εκπεμπόμενη ισχύς προς το MT είναι μεγαλύτερη απο 0 και μικρότερη απο 1W.Av το MT δεν πληρεί κάποιον από αυτούς τους 2 περιορισμούς αφαιρείται από το δίκτυο, ο μετρητής remove_counter αυξάνει κατα 1,οι σχετικοί πίνακες του προσομοιωτή ανανεώνονται και προσπαθεί να εισέλθει το επόμενο MT.

4.5 Αποτελέσματα προσομοιώσεων δικτύου WiMAX

Τα σέναρια των προσομοιώσεων, που εκτελέσθηκαν στο μεμονωμένο δίκτυο με σκοπό τη μελέτη της χωρητικότητας και της κατανάλωσης ισχύος του δικτύου, συγκεντρώνονται στο παρακάτω πίνακα (4-2). Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα με μορφή γραφημάτων, ώστε να συγκριθούν οι τεχνικές ανάθεσης υποκαναλιών που μελετήθηκαν ως προς την καταλληλότητα τους στην αντιμετώπιση ομοδιαυλικών παρεμβολών. Τέλος, υπολογίζεται ο δείκτης δικαιοσύνης ισχύος PFI με χρήση της σχέσης:

$$PFI = \frac{(\sum_{i=1}^{n} Pi)^2}{N * \sum_{i=1}^{n} Pi^2} \quad (4-11)$$

Όπου Ρί η ισχύς καθενός απο τους Ν χρήστες.

Η πλατφόρμα έχει δείκτη δικαιόσυνης ίσο με 1 για τους πόρους συχνότητας, αφού στην έναρξη κάθε MC θεωρούμε ότι στους εξυπηρετούμενους χρήστες ανατίθεται ο ίδιος αριθμός υποκαναλιών.

Σενά ριο Tiers	Πιθανότη τα αποκλεισ μού	Αλγόριθμος ανάθεσης	Υποκανά λια ανα χρήστη	Mr/ Mt	
1.1 1	5%	SEQUENTI AL RANDOM MSNR	2 3 4	2/2	
1.2 1	5%	SEQUENTI AL RANDOM MSNR	2 3 4	2/25	
1.3 1	5%	SEQUENTI AL RANDOM MSNR	2 3 4	2/50	
2.1 1	15%	SEQUENTI AL RANDOM MSNR	2 3 4	2/2	
2.2 1	15%	SEQUENTI AL RANDOM MSNR	2 3 4	2/25	
2.3	15%	SEQUENTI AL RANDOM MSNR	2 3 4	2/50	
3.1	30%	SEQUENTI	2 3 4	2/2	

1	-	AL RANDOM MSNR	-		
3.2 1	30%	SEQUENTI AL RANDOM MSNR	2 3	3 4	2/25
3.3 1	30%	SEQUENTI AL RANDOM MSNR	2 3	3 4	2/50
4.1 2	5%	SEQUENTI AL RANDOM MSNR	2 3	3 4	2/2
4.2 2	5%	SEQUENTI AL RANDOM MSNR	2 3	3 4	2/25
4.3 2	5%	SEQUENTI AL RANDOM MSNR	2 3	3 4	2/50
5.1 2	15%	SEQUENTI AL RANDOM MSNR	2 3	3 4	2/2
5.2 2	15%	SEQUENTI AL RANDOM MSNR	2 3	3 4	2/25
5.3 2	15%	SEQUENTI AL RANDOM MSNR	2 3	3 4	2/50
6.1 2	30%	SEQUENTI AL RANDOM MSNR	2 3	3 4	2/2
6.2 2	30%	SEQUENTI AL RANDOM MSNR	2 3	3 4	2/25
6.3 2	30%	SEQUENTI AL RANDOM MSNR	2 3	3 4	2/50

Πίνακας 4-2: Σενάρια προσομοιώσεων WiMAX

Αρχικά, συγκεντρώνονται τα σχετικά με την χωρητικότητα αποτελέσματα. Για 300MC,1 tier, 2 MT και πιθανότητα αποκλεισμού 5%, 15%, 30%. Παρατηρείται (εικόνες 4-3,4-4,4-5) ότι με την αύξηση των υποκαναλιών ανά χρήστη μειώνεται η χωρητικότητα γιατί αυξάνονται οι ομοδιαυλικές παρεμβολές, αφού είναι πιθανότερο οι χρήστες να έχουν πρόσβαση σε κοινά κανάλια,με αποτέλεσμα να απορρίπτονται περισσότεροι χρήστες.Με την αύξηση της πιθανότητας αποκλεισμού αυξάνεται η χωρητικότητα, καθώς εξ'ορισμού επιτρέπει μεγαλύτερο remove_counter, οπότε εκτελούνται περισσότερες αποτυχημένες προσπάθειες μέχρι την λήξη της MC το οποίο τείνει να αυξήσει τον αριθμό τον χρηστών στο σύνολο τους καθώς αυξάνεται ο

χρόνος των προσομοιώσεων. Από πλευράς αλγορίθμων ο σειριακός υστερεί αφού τα πρώτα τερματικά κάθε σταθμού βάσης εκπέμπουν στα ίδια υποκανάλια. Αυτό αυξάνει τις ομοδιαυλικές παρεμβόλες με αποτέλεσμα τη μείωση της χωρητικότητας. Ο RANDOM ανταγωνίζεται τον MSNR με τον πρώτο να υπερισχύει για 3 υποκανάλια ανά χρήστη. Απο την άλλη πλευρά ο MSNR έχει σταθερά μεγαλύτερη χωρητικότητα για 4 υποκανάλια ανά χρήστη.

Ακολούθως αυξάνεται ο αριθμός των κεραιών εκπομπής (MT). Ώστε να μελετηθεί η επίδραση που θα έχει αυτό στην απόδοση του MSNR.Οι άλλοι 2 αλγόριθμοι δεν κάνουν χρήση του καναλιού, οπότε δεν επηρεάζονται. Με την αύξηση των κεραιών εκπομπής σε 25 (εικόνες 4-6,4-7,4-8) παρατηρείται μια μίκρη μείωση της χωρητικότητας του δικτύου όταν γίνεται χρήση του MSNR.Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να υπερτερεί πλέον ο RANDOM του MSNR και για 2 υποκανάλια ανά χρήστη ο MSNR εξακολουθεί να έχει καλύτερη απόδοση.

Στην συνέχεια αυξήθηκε και άλλο ο αριθμός των κεραιών εκπομπής σε 50

(εικόνες 4-9,4-10,4-11).Η περαιτέρω αύξηση των κεραιών εκπομπής αυξάνει τη χωρητικότητα στην περίπτωση του MSNR για πιθανότητα 15% και 2 υποκανάλια ανά χρήστη.



Eικόνα4-3:Χωρητικότητα WiMAX σενάριο 1.1(tier=1 Mt=2 PF=5%) PF 15% Tier 1 Mt 2



Εικόνα4-4:Χωρητικότητα WiMAX σενάριο 2.1(tier=1 Mt=2 PF=15%)



Εικόνα4-5:Χωρητικότητα WiMAX σενάριο 3.1(tier=1 Mt=2 PF=30%)



Εικόνα4-6:Χωρητικότητα WiMAX σενάριο 1.2(tier=1 Mt=25 PF=5%)



Εικόνα4-7:Χωρητικότητα WiMAX σενάριο 2.2(tier=1 Mt=25 PF=15%)



Εικόνα4-8:Χωρητικότητα WiMAX σενάριο 3.2(tier=1 Mt=25 PF=30%)



Εικόνα4-9:Χωρητικότητα WiMAX σενάριο 1.3(tier=1 Mt=50 PF=5%)



Εικόνα4-10:Χωρητικότητα WiMAX σενάριο 2.3(tier=1 Mt=50 PF=15%)



Εικόνα4-11:Χωρητικότητα WiMAX σενάριο 3.3(tier=1 Mt=50 PF=30%)

Πέραν της χωρητικότητας, μελετήθηκε η μέση συνολική ισχύς του δικτύου (εικόνες 4-12,-4-20) η οποία είναι όπως αναμενόταν ανάλογη της χωρητικότητας.Οι γραφικές παραστάσεις της μέσης Ισχύος για όλα τα παραπάνω σενάρια εμφανίζουν ακριβώς το ίδιο μοτίβο με τη χωρητικότητα.



Εικόνα4-12: Συνολική Μέση Ισχύς WiMAX σενάριο 1.1(tier=1 Mt=2 PF=5%)



Εικόνα4-13: Συνολική Μέση Ισχύς WiMAX σενάριο 2.1(tier=1 Mt=2 PF=15%)



Allocated subcarriers per MT Εικόνα4-14:Συνολική Μέση Ισχύς WiMAX σενάριο 3.1(tier=1 Mt=2 PF=30%)



Allocated subcarriers per MT Εικόνα4-15:Συνολική Μέση Ισχύς WiMAX σενάριο 1.2(tier=1 Mt=25 PF=5%)



Allocated subcarriers per MT Εικόνα
4-16: Συνολική Μέση Ισχύς WiMAX σενάριο 2.2(tier=1 Mt=25 PF=15%)



Εικόνα4-17:Συνολική Μέση Ισχύς WiMAX σενάριο 3.2(tier=1 Mt=25 PF=30%)


Εικόνα
4-18:Συνολική Μέση Ισχύς WiMAX σενάριο 2.3
(tier=1 Mt=50 PF=5%)



Εικόνα4-19:Συνολική Μέση Ισχύς WiMAX σενάριο 2.3(tier=1 Mt=50 PF=15%)



Εικόνα4-20:Συνολική Μέση Ισχύς WiMAX σενάριο 3.3(tier=1 Mt=50 PF=30%)

Για την ασφαλέστερη εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικών με την ισχύ που καταναλώνει το δίκτυο υπολογίσθηκε μέσω του προσομοιωτή η ισχύς ανά τερματικό (εικόνες 4-21,-4-29). Γενικά παρατηρείται ότι μεγάλο μέρος της ισχύος εξοικονομείται. Η μέγιστη ισχύς που μπορεί να καταναλώσει κάθε τερματικό είναι το 1W. Εντέλει, όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα σε κανένα σενάριο η καταναλισκόμενη ισχύς δεν ξεπερνά τα 285mW.Το ποσοστο της ισχύος που εξοικονομείται είναι 71,5% ,πράγμα που καθιστά το δίκτυο φιλικό προς το περιβάλον, ενώ το μεγάλο απόθεμα ισχύος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξυπηρέτηση ακόμα περισσότερων τερματικών.



Εικόνα4-21:Μέση Ισχύς ανα τερματικό WiMAX σενάριο 1.1(tier=1 Mt=2 PF=5%)



Εικόνα4-22:Μέση Ισχύς ανα τερματικό WiMAX σενάριο 2.1(tier=1 Mt=2 PF=15%)



Εικόνα4-23:Μέση Ισχύς ανα τερματικό WiMAX σενάριο 3.1(tier=1 Mt=2 PF=30%)



Εικόνα4-24:Μέση Ισχύς ανα τερματικό WiMAX σενάριο 1.2(tier=1 Mt=25 PF=5%)



Εικόνα4-25:Μέση Ισχύς ανα τερματικό WiMAX σενάριο 1.2(tier=1 Mt=25 PF=15%)



Εικόνα4-26: Μέση Ισχύς ανα τερματικό WiMAX σενάριο 1.2(tier=1 Mt=25 PF=30%)



Εικόνα4-27:Μέση Ισχύς ανα τερματικό WiMAX σενάριο 1.3(tier=1 Mt=50 PF=5%)



Εικόνα4-28: Μέση Ισχύς ανα τερματικό WiMAX σενάριο 2.3(tier=1 Mt=50 PF=15%)



Εικόνα4-29: Μέση Ισχύς ανα τερματικό WiMAX σενάριο 3.3(tier=1 Mt=50 PF=30%)

Αφού ολοκληρώθηκαν τα σενάρια για 1 tier ο αριθμός τους αυξήθηκε σε 2.Σχετικά με τη χωρητικότητα, όπως και στα προηγούμενα σενάρια, παρατηρείται αύξηση με την αύξηση της πιθανότητας αποκλεισμού και μείωση με την αύξηση των υποκαναλιών ανά χρήστη. Επίσης ο Σειριακός αλγόριθμος αποδίδει χειρότερα από τους άλλους 2. Οι λόγοι που συμβαίνουν αυτά έγουν αναλυθεί παραπάνω. Αξιον αναφοράς είναι πως η απόδοση του RANDOM βελτιώνεται αισθητά για 2 και 4 υποκανάλια ανά χρήστη με την αύξηση της πιθανότητας αποκλεισμού. Ετσι ενώ για ΠΑ(PF) 5% εμφανίζει την ίδια (2 υποκανάλια εικόνα 4-30) και χειρότερη χωρητικότητα (4 υποκανάλια εικόνα 4-30) απο τον MSNR για ΠΑ 30% (εικόνα 4-32) τον ξεπερνάει. Στην περίπτωση των 3 υποκαναλιών ανά χρήστη για ΠΑ 5% πιο αποδοτικός είναι ο RANDOM, όμως με την αυξησή της σε 15% (εικόνα 4-31) και 30% αποδίδει καλύτερα ο MSNR. Για τα υπόλοιπα σενάρια η χωρητικότητα ακολουθεί το ίδιο μοτίβο γιαυτό και δεν συμπεριλαμβάνονται οι γραφικές παραστάσεις των αποτελεσμάτων. Τέλος, παρουσιάζονται οι γραφίκες παραστάσεις της χωρητικότητας μόνο για τον MSNR, ώστε να μελετηθεί η επίδραση που έχει σε αυτήν η αύξηση του πλήθους των κεραιών εκπομπής. Για μικρή ΠΑ(5%) η γωρητικότητα δεν επηρεάζεται αισθητά από την αύξηση των κεραιών εκπομπής σε 25 και 50. Στην περίπτωση που η ΠΑ αυξηθεί σε 15% εμφανίζεται μια μικρή μείωση της χωρητικότητας για 3 υποκανάλια και Mt=50. Όταν η ΠΑ είναι 30% αυξάνεται η γωρητικότητα όταν οι κεραίες εκπομπής αυξηθούν από 2 σε 25 για 2 υποκανάλια ανά γρήστη. Για 3 υποκανάλια εμφανίζεται μια μικρή μείωση της χωρητικότητας για 25 κεραίες εκπομπής.



Εικόνα4-30:Χωρητικότητα WiMAX σενάριο 4.1(tier=2 Mt=2 PF=5%)



Εικόνα4-31:Χωρητικότητα WiMAX σενάριο 5.1(tier=2 Mt=2 PF=15%)



Εικόνα4-32:Χωρητικότητα WiMAX σενάριο 6.1(tier=2 Mt=2 PF=30%)



Εικόνα4-33:Χωρητικότητα WiMAX με χρήση του MSNR(tier=2 Mt=2,25,50 PF=5%)



Εικόνα4-34:Χωρητικότητα WiMAX με χρήση του MSNR(tier=2 Mt=2,25,50 PF=15%)



Εικόνα4-35:Χωρητικότητα WiMAX με χρήση του MSNR(tier=2 Mt=2,25,50 PF=30%)

Όσον αφορά τη συνολική μέση ισχύ ακολουθεί το ίδιο μοτίβο με την χωρητικότητα. Για πιθανότητα 5% και 15% η αύξηση των κεραιών εκπομπής δεν επηρεάζει την απόδοση του δικτύου. Για αυτόν τον λόγο για αυτές τις τιμές της πιθανότητας αποκλεισμού παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μόνο για Mt=25(εικόνες 4-37,4-38). Σε αυτήν την περίπτωση τα 2 γραφήματα εμφανίζουν το ίδιο μοτίβο για 3 και 4 υποκανάλια ανά χρήστη. Στα 3 υποκανάλια ανά χρήστη ο MSNR καταναλώνει περισσότερη ισχύ από τον Random για ΠΑ 5% με τον Sequential να καταναλώνει την λιγότερη. Αντίθετα στα 4 υποκανάλια Sequential και Random βρίσκονται στα ίδια επίπεδα με τον MSNR να είναι εντελώς ασύμφορος από την άποψη της ισχύος. Για 2 υποκανάλια ανά χρήστη και Mt=2 με την αύξηση της ΠΑ σε 15% και 30% παρατηρείται η όλο και μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας από τον MSNR συγκριτικά με τους άλλους 2. Διατηρώντας σταθερή την ΠΑ στο 30% και αυξάνοντας σταδιακά τις Mts σε 25 (εικόνα 4-40) και 50 (εικόνα 4-41) έχουμε μείωση της ισχύος για 4 υποκανάλια και αύξηση για 2.



Εικόνα4-36: Συνολική Μέση Ισχύς WiMAX σενάριο 4.2(tier=2 Mt=25 PF=5%)



Εικόνα4-37: Συνολική Μέση Ισχύς WiMAX σενάριο 5.2(tier=2 Mt=25 PF=15%)



Εικόνα4-38: Συνολική Μέση Ισχύς WiMAX σενάριο 6.1(tier=2 Mt=2 PF=30%)



Εικόνα4-39: Συνολική Μέση Ισχύς WiMAX σενάριο 6.2(tier=2 Mt=25 PF=30%)



Εικόνα4-40: Συνολική Μέση Ισχύς WiMAX σενάριο 6.3(tier=2 Mt=50 PF=30%)

Η μέση ισχύς ανά τερματικό φαίνεται να μην επηρεάζεται από το πλήθος των Mts καθώς δεν εμφανίζονται διαφορές στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Γι αυτόν το λόγο παρακάτω παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις για Mt=25 (εικόνες 4-41,4-42,4-43).Το δίκτυο εξοικονομεί περίπου το 70% της ισχύος, δεδομένου ότι σε κανένα από τα σενάρια δεν καταναλλώνει περισσότερα από 300mW.



Εικόνα4-41:Μέση Ισχύς ανα τερματικό WiMAX σενάριο 4.2(tier=2 Mt=25 PF=5%)



Εικόνα4-42: Μέση Ισχύς ανα τερματικό WiMAX σενάριο 5.2(tier=2 Mt=25 PF=15%)



Εικόνα4-43: Μέση Ισχύς ανα τερματικό WiMAX σενάριο 6.2(tier=2 Mt=25 PF=30%)

Επειδή οι αλγόριθμοι RANDOM και MSNR εμφανίζουν μεγάλο ανταγωνισμό ως προς την χωρητικότητα για την εξαγωγή συμπερασμάτων εκτελέσθηκαν τα ίδια σενάρια για 500 MCs.H αύξηση των MTs δεν επηρεάζει την χωρητικότητα.Movaδική εξαίρεση η περίπτωση που αυξηθούν από 2 σε 25 για πιθανότητα 15% και 1 tier όπου αυξάνει την χωρητικότητα του δικτύου με χρήση του MSNR.Σε αυτή την περίπτωση ο MSNR υπερτερεί του RANDOM για 4 υποκανάλια ανα χρήστη.Σε όλα τα υπόλοιπα σενάρια υπερέχει ο RANDOM.O λόγος οτι ο MSNR δίνει μεγαλύτερη έμφαση στην ποιότητα των καναλιών που ανατίθενται(μέγιστο SNR) και χαλάει την τυχαιότητα στην οποία βασίζεται ο RANDOM.



Allocated subcarriers per MT Εικόνα4-44:Χωρητικότητα WiMAX 500MC(tier=1 Mt=25 PF=5%)



Εικόνα4-45:Χωρητικότητα WiMAX 500MC(tier=1 Mt=2 PF=15%)



Εικόνα4-46:Χωρητικότητα WiMAX 500MC(tier=1 Mt=25 PF=15%)



Εικόνα4-47:Χωρητικότητα WiMAX 500MC(tier=1 Mt=50 PF=30%)



Εικόνα4-48:Χωρητικότητα WiMAX 500MC(tier=2 Mt=50 PF=5%)







Η μέση ισχύς ακολουθεί όπως ήταν αναμενόμενο την χωρητικότητα.



Εικόνα4-51: Συνολική Μέση Ισχύς WiMAX 500MC(tier=1 Mt=25 PF=5%)



Εικόνα4-52: Συνολική Μέση Ισχύς WiMAX 500MC(tier=1 Mt=2 PF=15%)



Εικόνα4-53: Συνολική Μέση Ισχύς WiMAX 500MC(tier=1 Mt=25 PF=5%)



Εικόνα4-54: Συνολική Μέση Ισχύς WiMAX 500MC(tier=1 Mt=50 PF=30%)



Εικόνα
4-55: Συνολική Μέση Ισχύς WiMAX 500MC(tier=2 Mt=50 PF=5%)



Εικόνα4-56: Συνολική Μέση Ισχύς WiMAX 500MC(tier=2 Mt=50 PF=15%)



Εικόνα4-57: Συνολική Μέση Ισχύς WiMAX 500MC(tier=2 Mt=25 PF=30%)

Τέλος από την μέση ισχύ ανα χρήστη φαίνεται οτι το δίκτυο εξακολούθει να εξικονομεί τα ίδια επίπεδα ισχύος με τα σενάρια των 300MCs.



Εικόνα4-58:Μέση Ισχύς ανα τερματικό WiMAX 500MC(tier=1 Mt=25 PF=5%)



Εικόνα4-59: Μέση Ισχύς ανα τερματικό WiMAX 500MC(tier=1 Mt=2 PF=15%)



Εικόνα4-60:Μέση Ισχύς ανα τερματικό WiMAX 500MC(tier=1 Mt=25 PF=15%)



Εικόνα4-61:Μέση Ισχύς ανα τερματικό WiMAX 500MC(tier=1 Mt=50 PF=30%)



Εικόνα4-62:Μέση Ισχύς ανα τερματικό WiMAX 500MC(tier=2 Mt=50 PF=5%)



Εικόνα4-63:Μέση Ισχύς ανα τερματικό WiMAX 500MC(tier=2 Mt=50 PF=15%)



Εικόνα4-64:Μέση Ισχύς ανα τερματικό WiMAX 500MC(tier=2 Mt=25 PF=30%)

Με χρήση του παρακάτω σεναρίου υπολογίσθηκε ο PFI μέσω της σχέσης (4-11). Τα αποτελέσμα συγκεντρώθηκαν στον ακόλουθο πίνακα. Ξεχωρίζουν ο Sequential για 2 υποκανάλια και ο Random για 4 όπου ο PFI αγγίζει την μονάδα. Γενικά οι 3 αλγόριθμοι είναι σχετικά δίκαιοι αφού έχουν PFI > 0.5355.

MT = 2			MC = 300						
Αλγόριθμος	SEQUENTIAL			RANDOM			MSNR		
Υποκανάλια/χρήστη	2	3	4	2	3	4	2	3	4
PFI	0.9683	0.5900	0.5535	0.5880	0.6375	1	0.5572	0.7768	0.5355

Πίνακας 4-3: Υπολογισμός PFI WiMAX

4.6 Σύνοψη κεφαλαίου

Στο κεφάλαιο 4 περιγράφηκε ο ημιστατικός προσομοιωτής του μεμονωμένου WiMAX δικτύου που κατασκευάστηκε στα πλαίσια της εν λόγω διπλωματικής.Σε αυτόν τον προσομοιώθηκαν οι αλγόριθμοι RANDOM SEQUENTIAL και MSNR και τα αποτελέσματα απεικονίστηκαν σε γραφικές παραστάσεις.Οι τρεις αλγόριθμοι συγκρίθηκαν ως προς την απόδοσή τους σχετικά με τη χωρητικότητα και την κατανάλωση ισχύος του δικτύου και υπολογίστηκε και ο δείκτης δικαιοσύνης της ισχύος τους. Για τη χωρητικότητα βγήκαν τα εξής συμπεράσματα:

- Ο SEQUENTIALεμφανίζει τη χειρότερη απόδοση, αφού αυξάνει τις ομοδιαυλικές παρεμβολές καθώς τα πρώτα τερματικά κάθε σταθμού βάσης εκπέμπουν στα ίδια υποκανάλια.
- Ο MSNR έρχεται δεύτερος στα περισσότερα των σεναρίων. Ο λόγος είναι ότι ο εν λόγω αλγόριθμος δίνει μεγαλύτερο βάρος στην ανάθεση καναλιών με καλύτερο snr,συνεπώς πιο ποιοτικών.
- Η τυχαία φύση του RANDOM εξασφαλίζει μεγαλύτερη χωρητικότητα από τους 2 άλλους αλγορίθμους.

Η κατανάλωση ισχύος ακολουθεί τη χωρητικότητα. Επίσης εξοικονομείται το 70% της Ισχύος αφού η μέση ισχύς ανα χρήστη δεν ξεπερνά τα 300mW ενώ κάθε υποκανάλι μπορεί να καταναλώσει μέχρι 1W

Τέλος, όσον αφορά το δείκτη δικαιοσύνης όλοι οι αλγόριθμοι θεωρούνται δίκαιοι. Εξαιρετίκα αποτελέσματα με PFI σχεδόν μονάδα εμφανίζουν για 2 υποκανάλια και ο Random για 4.

Πέραν από τη σύγκριση των αλγορίθμων ως προς τη χωρητικότητα και την ισχύ μελετήθηκε η επίδραση που είχε στο κανάλι η αύξηση των κεραιοστοιχείων εκπομπής στον αλγόριθμο MSNR.Προσομοιώθηκαν σενάρια με 2,25 και 50 κεραίες εκπομπής καθώς ο MSNR κάνει χρήση του καναλιού(CSI).Παρατηρήθηκε ότι η αύξησή τους από 2 σε 25 αυξάνει τη χωρητικότητα για ΠΑ 30% και 2 tiers όταν ανατίθενται 2 υποκανάλια ανα χρήστη, αυξάνωντας την εκπεμπόμενη ισχύ του δικτύο.

Κεφάλαιο 5: Πλατφόρμα προσομοίωσης ετερογενούς δικτύου

Με βάση το δίκτυο της προηγούμενης ενότητας δημιουργήθηκε ένα ετερογενές δίκτυο τέταρτης γενιάς. Στο ετερογενές δίκτυο το δίκτυο WiMAX(macronet) συνεπικουρείται από ένα μικρότερο WiFi(piconet) δίκτυο. Στην παράγραφο 3.5.4 αναφέρθηκαν τα πλεονεκτήματα της σύγκλισης των 2 αυτών προτύπων. Το δευτερεύον δίκτυο χρησιμοποιεί την τεχνίκη OFDMA για την πολλαπλή πρόσβαση και η λειτουργία του έχει στόχο την αποσυμφόρηση του WiMAX (πρωτεύον δίκτυο). Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται εκτενής αναφορά στον προσομοιωτή και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του ετερογενούς δικτύου.

5.1 Αρχιτεκτονική του προσομοιωτή

Όπως και στο standalone δίκτυο του προηγούμενου κεφαλαίου, το ετερογενές δικτυο αποτελείται απο 1 ή 2 tiers(7 ή 19 κυψέλες). Οι σταθμοί βάσης του WiFi τοποθετούνται σε απόσταση R/2 (όπου R η ακτίνα της κυψέλης) από τους αντίστοιχους του WiMAX(εικόνα 5-1).



Εικόνα 5-1: Κυψελική διάταξη ετερογενούς δικτύου.

Η κεραία κάθε σταθμού βάσης του είναι ομοιοκατευθυντική με ύψος 10m, κέρδος 11dBi και SNR 5dB. Λόγω της ομοιοκατευθυντικότητας κατά τον υπολογισμό των συνολικών απωλειών νεοεισελθόντος MT γίνεται χρήση της (4-9). Όμως το Attenuation θεωρείται σταθερό και αμελητέο. Παρακάτω συγκεντρώνεται το σύνολο των παραμέτρων του ετερογενούς δικτύου(πίνακας 5-1)

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	TIMH
Ακτίνα κυψέλης(R)	1km
Αριθμός δακτυλίων(tiers)	1-2
Υψος σταθμού βάσης(BS macronet)/ (BS	30m/10m/15m
piconet)/κινητού τερμάτικου(MT)	
Κεντρική συχνότητα λειτουργείας	2,5GHz
Συνολικο έυρος ζώνης λειτουργείας	10MHz
Έυρος ζώνης φέροντος	156,25KHz
Τεχνική διαμόρφωσης	QPSK
Τεχνική πολλαπλής πρόσβασης	OFDMA
Υποκανάλια ανα BS	64
Υποκανάλια ανα ΜΤ	2 3
Πλήθος κεραιών εκπομπής/λήψης(Mr/Mt)	2/2 2/25 2/50
Μοντέλο διάδοσης	Okomura-Hata
	(εκθέτης απωλειών 3,5)
Διάγραμμα ακτινοβολίας macronet	Broadside Gain=14dBi
	Front-to-back ratio=20dBi
	Έυρος ημίσεως ισχύος(3dB)=70°
Κέρδος κεραίας piconet	11dBi
Τυπική απόκλιση σκίασης	8 Db
SNR macronet/ piconet	9,6 dB/5 Db
Μέγιστη ισχύς ανα BS/ macronet/ piconet/MT	43dBm/43dBm /30dBm
Επίπεδο θερμικού θορύβου	-104dBm
Πιθανότητα αποκλεισμού	30%
Πλήθος MC προσομοιώσεων	300

Πίνακας 5-1: Παράμετροι ετερογενούς δικτύου

Οι ΜC προσομοιώσεις που εκτελέσθηκαν στο ετερογενές δίκτυο αποτελούνται απο 3 βήματα, αντίστοιχα με το standalone, με μόνη διαφορά ότι στο βήμα 1 αμέσως μετά τον υπολογισμό των απωλειών λόγω διάδοσης (pathlosses) για το MT που αιτείται σύνδεση,εφόσον δεν ξεπερνούν το όριο των 133,4dB, επιλέγεται το υποδίκτυο(WiMAX- macro,WiFi-pico) που θα το εξυπηρετήσει. Στην συνέχεια ανατίθενται πόροι συγνότητας (βημα 2) στον εξυπηρετητή BS (macro-pico). Για την ανάθεση υποκαναλιών στους BSs δεν γίνεται χρήση του σειριακού αλγόριθμου, αφού θεωρήθηκε ασύμφορος για τους λόγους που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 4.4. Τέλος γίνεται υπολογισμός της εκπεμπόμενης ισγύος με επίλυση του γραμμικού συστήματος (4-10) ανάλογα το υποδίκτυο (macro-pico) που εξυπηρετεί το MT και έλεγχος οτι η ισχύει 04P41 W.H MC ολοκληρώνεται όταν ξεπεραστεί η προκαθορισμένη πιθανότητα αποκλεισμού (εικόνα 5-2).



Εικόνα 5-2: Δομή ΜC προσομοίωσης ετερογενούς δικτύου.

5.2 Αποτελέσματα προσομοιώσεων ετερογενούς δικτύου

Στον πίνακα 5-2 είναι συγκεντρωμένα τα σενάρια των προσομοιώσεων που εκτελέσθηκαν στο ετερογενές δίκτυο. Το δίκτυο WiFi έχει SNR 5dB ενώ το WiMAX 9,6dB.

Σενάριο	Tiers	Πιθανότητα Αποκλεισμού	Αλγόριθμος Ανάθεσης WiMAX	Αλγόριθμος ανάθεσης WiFi	Υποκανάλια ανα χρήστη (WiMAX,WiFi)	Mr/Mt
1	1	30%	RANDOM	RANDOM	(2,2),(2,3),(3,2)	2/2
2	1	30%	RANDOM	MSNR	(2,2)	2/2,2/25,2/50
3	1	30%	RANDOM	MSNR	(2,3)	2/2,2/25,2/50
4	2	30%	RANDOM	RANDOM	(2,2),(2,3),(3,2)	2/2
5	2	30%	RANDOM	MSNR	(2,2)	2/2,2/25,2/50
6	2	30%	RANDOM	MSNR	(2,3)	2/2,2/25,2/50

Πίνακας 5-2: Σενάρια προσομοιώσεων ετερογενούς δικτύου

Αρχικά παρουσιάζονται οι γραφικές που αφορούν τη χωρητικότητα για τα σενάρια με1 tier. Στην περίπτωση του σεναρίου 1 (εικόνα 5-3), όπου ο αλγόριθμος ανάθεσης είναι ίδιος (RANDOM) και στα δυο υποδίκτυα, το WiFi εμφανίζει μεγαλύτερη χωρητικότητα για 2 υποκανάλια ανά χρήστη. Αυτό είναι λογικό αφού το WiFi έχει μικρότερο SNR και άρα εμφανίζει μεγαλύτερη ανογή στο θόρυβο και στις παρεμβολές με αποτέλεσμα την εισαγωγή περισσότερων χρηστών. Αξιοσημείωτο επίσης είναι ότι με την αύξηση των υποκαναλιών ανά χρήστη σε ένα απο τα 2 υποδίκτυα και άρα τη μείωση της χωρητικότητας του, μειώνεται η χωρητικότητα και του άλλου. Ετσι φαίνεται η συμπληρωματική λειτουργεία των υποδικτύων WiMAX, WiFi (παράγραφος 3.5.4). Παρατηρείται, επίσης, πως με την χρήση του MSNR στο WiFi και του Random στο WiMAX για 2 υποκανάλια ανά χρήστη αυξάνεται η χωρητικότητα του ετερογενούς δικτύου (σενάριο 2 εικόνα 5-4).Η χωρητικότητα φτάνει τη μέγιστη τιμή της για 25 κεραίες εκπομπής. Αυτή η αύξηση οφείλεται στην αύξηση της χωρητικότητας του WiFi που οδηγεί στην είσοδο περισσότερων χρηστών και στο WiMAX. Ένας αριθμός χρηστών που απορρίπτονταν στο standalone WiMAX δίκτυο με αποτέλεσμα την αύξηση της πιθανότητας αποκλεισμού πλέον εξυπηρετούνται από το WiFi δίνοντας στο WiMAX τον χρόνο να εξυπηρετήσει μεγαλύτερο αριθμό κινητών τερματικών. Στην περίπτωση που αυξηθούν τα υποκανάλια ανά κινητό τερματικό στο WiFi σε 3 (σενάριο3 εικόνα 5-4), πράγμα που οδηγεί στη μείωση της χωρητικότητας του, προκαλείται η μείωση της χωρητικότητας και του WiMAX. Με την αύξηση των κεραιών εκπομπής αυξάνεται η χωρητικότητα στο WiFi. Όμως, η χωρητικότητα του ετερογενούς δικτύου παραμένει μικρότερη συγκριτικά με το σενάριο 2 (εικόνα 5-4). Σε σχέση με την αντίστοιχη περίπτωση του σεναρίου 1 οι χρήστες είναι περισσότεροι, οπότε ο MSNR υπερισχύει του RANDOM ως προς την χωρητικότητα στο δίκτυο WiFi.



Εικόνα 5-3:Χωρητικότητα ετερογενούς δικτύου σενάριο 1



PF=30% WiMAX/WiFi carriers=2/2

Εικόνα 5-4:Χωρητικότητα ετερογενούς δικτύου σενάριο 2



Εικόνα 5-5:Χωρητικότητα ετερογενούς δικτύου σενάριο 3

Στη συνέχεια συγκεντρώνονται οι γραφικές για τη συνολίκη μέση ισχύ στα παραπάνω σενάρια. Γενικά παρατηρείτε ότι το υποδίκτυο WiFi καταναλώνει σημαντικά λιγότερη ισχύ από το WiMAX. Μοναδική εξαίρεση η περίπτωση του σεναρίου 1, όπου ανατίθενται 3 υποκανάλια ανά χρήστη στο δίκτυο WiMAX (εικόνα 5-6 στήλη 3). Σε αυτή την περίπτωση τα 2 υποδίκτυα καταναλλώνουν περί τα 10W με το δίκτυο WiMAX να εξοικονομεί περισσότερη ισχύ. Στα επόμενα 2 σενάρια για 25 κεραίες εκπομπής η καταναλισκώμενη ισχύς του ετερογενούς δικτύου παίρνει την ελάχιστη τιμή της (εικόνες 5-7,5-8).





Σχετίκα με τη μέση ισχύ ανά χρήστη, περισσότερη ισχύς εξοικονομείται στο ετερογενές δίκτυο στην περίπτωση του σεναρίου 1, όπου το WiMAX δέχεται λιγότερους χρήστες. Όταν δηλαδή ανατίθενται 3 υποκανάλια ανά χρήστη, όπου εξοικονομείται 79% της ισχύος (εικόνα 5-9 στήλη 2).







Εικόνα5-10: Μέση Ισχύς ετερογενούς δικτύου ανα τερματικό σενάριο 2



Εικόνα5-11: Μέση Ισχύς ετερογενούς δικτύου ανα τερματικό σενάριο 3

Στην συνέχεια αυξάνεται ο αριθμός των δακτυλίων σε 2.Παρατηρείται και πάλι η συμπληρωματική δράση των 2 δικτύων.Μέγιστη χωρητικότητα εμφανίζεται για 2 κεραίες εκπομπής και 2 υποκανάλια ανα χρήστη όταν χρησιμοποιείται ο MSNR στο WiFi ως αλγόριθμος ανάθεσης.





Εικόνα 5-13:Χωρητικότητα ετερογενούς δικτύου σενάριο 5



Εικόνα 5-14:Χωρητικότητα ετερογενούς δικτύου σενάριο 6

Η ισχύς ακολουθεί την χωρητικότητα.



Εικόνα5-15: Συνολική μέση Ισχύς ετερογενούς δικτύου σενάριο 4



PF=30% tiers=2 WiMAX/WiFi carriers=2/2

Εικόνα5-16:Συνολική μέση Ισχύς ετερογενούς δικτύου σενάριο 5



Εικόνα5-17:Συνολική μέση Ισχύς ετερογενούς δικτύου σενάριο 6

Από την μέση ισχύ ανα χρήστη γίνεται φανερή η μεγάλη εξοικονόμηση ισχύος που αγγίζει το 78%.



Εικόνα5-18: Μέση Ισχύς ετερογενούς δικτύου ανα τερματικό σενάριο 4



Εικόνα5-19: Μέση Ισχύς ετερογενούς δικτύου ανα τερματικό σενάριο 5



Εικόνα5-20: Μέση Ισχύς ετερογενούς δικτύου ανα τερματικό σενάριο 6

5.4 Σύνοψη κεφαλαίου

Στο κεφάλαιο 5 περιγράφηκε ο προσομοιωτής του ετερογενόυς δικτύου που κατασκευάστηκε στην παρούσα εργασία. Το δίκτυο WiMAX συνεπικουρήθηκε από ενα δίκτυο WiFi. Τα αποτελέσματα απεικονίστηκαν σε γραφήματα. Στον παρακάτω πίνακα συγκεντρώνονται οι παρατηρήσεις για τα 2 δίκτυα (standalone-hetnet). Ακολουθεί η σύγκριση τον 2 δικτύων και τα σχετικά συμπεράσματα.

Παρατηρήσεις WiMAX	Παρατηρήσεις Hetnet	Συμπεράσματα	
Ικανοποιητικός αριθμός εξυπηρετούμενων χρηστών.	Μεγάλος αριθμός εξυπηρετούμενων χρηστών.	Η χρήση του WiFi υποδικτύου τριπλασιάζει την συνολική χωρητικότητα	
Μεγαλύτερη χωρητικότητα εμφανίζει ο αλγόριθμος Random.	Μεγαλύτερη χωρητικότητα εμφανίζεται με χρήση του Random στο WiMAX και του MSNR στο WiFi.Όταν είναι μέγιστη η χωρητικότητα και των 2 δικτύων	Φαίνεται η συμπληρωματική λειτουργεία των υποδικτύων WiMAX,WiFi	
Φιλικό προς το περιβάλον,εξοικονομεί το 70% της ισχύος.	Φιλικό προς το περιβάλον,εξοικονομεί το 78% ισχύος.	Το δύκτιο WiFi είναι αρκετά οικονομικό στην κατανάλωση ισχύος	
Καλύτερη ΜΙΜΟ τοπολογία(MSNR αλγόριθμος) για σχετικά μεγάλο αριθμό χρηστών(ΠΑ 30%) είναι οι 25 κεραίες εκπομπής για 2 υποκανάλια ανά χρήστη.	Καλύτερη ΜΙΜΟ τοπολογία(MSNR αλγόριθμος) για σχετικά μεγάλο αριθμό χρηστών(ΠΑ 30%) είναι οι 2 κεραίες εκπομπής για 2 υποκανάλια ανά χρήστη.	Η αυξηση των κεραιών εκπομπής δεν βελτιώνει την χωρητικότητα του WiFi	
Μικρή ανοχή στο θόρυβο.	Μεγαλύτερη ανοχή στον θόρυβο.	Το υποδίκτυο WiFi αποσυμφορεί το WiMAX από θορυβώδεις χρήστες λόγω μικρότερου SNR,δίνοντάς του τη δυνατότητα να εξυπηρετήσει περισσότερους χρήστες.	

Πίνακας 5-3: Σύγκριση μεμονομένου και ετερογενούς δικτύου
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία

6.1Σύνοψη και Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκαν αρχικά τεχνικές διαχείρισης φάσματος και ανάθεσης πόρων που συναντώνται στη σύγχρονη βιβλιογραφία. Οι σημαντικότερες από αυτές τις τεχνικές αφορούν δίκτυα τέταρτης γενιάς (πολυκυψελωτά) και δίκτυα που χρησιμοποιούν την τεχνική OFDMA. Μελετήθηκαν τόσο τεχνικές που δεν απαιτούν τη γνώση του καναλιού όσο και τεχνικές με γνώση της κατάστασης του ραδιοδιαύλου.

Στη συνέχεια τρεις εξ αυτών των τεχνικών προσομοιώθηκαν σε έναν ημιστατικό προσομειωτή OFDMA μεμονωμένου δικτύου WiMAX, καθώς και ενός ετερογενούς δικτύου. Στο ετερογενές δίκτυο ένα μικρότερο δίκτυο WiFi τοποθετείται εντός των κυψελών του δικτύου WiMAX. Επειδή το δίκτυο WiFi εμφανίζει μεγαλύτερη ανοχή στο θόρυβο αποσυμφορεί το δίκτυο WiMAX από θορυβώδεις χρήστες αυξάνοντας τη συνολική χωρητικότητα του δικτύου. Οι τρεις αλγόριθμοι που προσομοιώθηκαν και αξιολογήθηκαν ως προς την απόδοση τους σχετικά με τη χωρητικότητα και την κατανάλωση ισχύος είναι ο Σειριακός (Sequential),ο Ψευδοτυχαίας Ανάθεσης (Random) και ο MSNR. Από αυτούς πιο αποδοτικός υπήρξε ο Random για λόγους που περιγράφονται στο κεφάλαιο 4.5.

Ο αλγόριθμος MSNR απαιτεί γνώση της κατάστασης του καναλιού (CSI) .Για το λόγο αυτόν χρησιμοποιήθηκε στη μελέτη της τεχνικής MIMO. Αφού πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για διαφορετικό αριθμό κεραιοστοιχείων εκπομπής (Mt=2, 25, 50), παρατηρήθηκε ότι η αύξηση των κεραιών εκπομπής δεν επηρεάζει αισθητά τη χωρητικότητα και την ισχύ του δικτύου. Ο λόγος είναι ότι ο αλγόριθμος αυτός εστιάζει στην ποιότητα και όχι στην ποσότητα των καναλιών που ανατίθενται.

Τέλος, υπολογίστηκε μέσω προσομοιώσεων και ο δείκτης δικαιοσύνης του δικτύου WiMAX με την εφαρμογή των παραπάνω αλγορίθμων, PFI.

6.2 Μελλοντική Εργασία

Όπως αναφέρθηκε στην παρούσα εργασία ο προσομοιώτης τόσο του μεμονωμένου όσο και του ετερογενούς δικτύου εμφανίζει εν μέρει στατική συμπεριφορά. Έτσι είναι δύσκολο να εξαχθούν πλήρως ασφαλή συμπεράσματα για περιοχές με μεγάλη ζήτηση και έντονη κινητικότητα. Πρόσθετα τα δίκτυα 5ης γενιάς αναμένεται να έχουν πυκνότερη κυψελική διάταξη για την εξυπηρέτηση του όλο και αυξανόμενου αριθμού των χρήστων [92]. Προτείνεται, λοιπόν, η μεταβόλη των συντεταγμένων των κινητών τερματικών κατά την διάρκεια των Monte Carlo με χρήση κατάλληλης συνάρτησης κατανομής. Επίσης η τοποθέτηση των κεραιοστοιχείων του piconet θα γίνεται δυναμικά, θα συμπεριληφθούν και άλλοι τύποι κυψελών με μικρότερη ισχύ όπως femtocells και κόμβοι μεταγωγής (relay nodes).Ο αριθμός των κυψελών και κόμβων μικρότερης εμβέλειας ανά μακροκυψέλη θα αυξηθεί αφού θα έχουν τον ρόλο ενεργού σημείου πρόσβασης(WiFi hotspots).

Πέρα απο την αρχιτεκτονική του δικτύου θα ήταν άξιο εκτενέστερης μελέτης το θέμα της επιλογής δικτύου και σταθμού βάσης που θα εξυπηρετεί του χρήστες. Μια πιθανη επιλογή είναι η χρήση κάποιου ασαφούς αλγορίθμου(fuzzy), που λαμβάνει υπόψην μια σειρά από παράγοντες όπως ο SNR,η εκπεμπόμενη ισχύς του BS,οι απώλειες του MT κ.λ.π[93].Πρόσθετα οι πόροι των BS μπορούν να ανατίθενται με παιγνιοθεωρητικές μεθόδους ή να δημοπρατούνται (παράγραφος 3.4).

Αντικείμενο έρευνας πρόκειται να αποτελέσει και η εφαρμογή άλλων τεχνικών ανάθεσης ραδιοφάσματος με γνώση του ραδιοδίαυλου (παράγραφος 3.4) πέραν του MSNR. Με τον τρόπο αυτό μπορούν να διερευνηθούν περαιτέρω τα πλεονεκτήματα της massive mimo τεχνολογίας. Τέλος, περισσότερη έμφαση θα δοθεί στην εφαρμογή νέων τεχνικών για την πολλαπλή πρόσβαση αντί της OFDMA όπως η BDMA(παράγραφος 2.1.4).

Βιβλιογραφικές Αναφορές

[1] M. Seimeni, "EMI mitigation through resource management and spatial isolation techniques in OFDMA cellular systems", PhD Dissertation, National Technical University of Athens, November 2016.

[2]Evolution of Mobile Wireless Technology from 0G to 5G. Mohammad Meraj ud in Mir , Dr. Sumit Kumar International Journal of Computer Science and Information Technologies, Vol. 6 (3).

[3]https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_mobile_phone_generations.

[4]A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies AKHIL GUPTA, (Student Member, IEEE), AND RAKESH KUMAR JHA, (Senior Member, IEEE) School of Electronics and Communication Engineering, Shri Mata Vaishno Devi University, Katra 182320.

[5]ANALYSIS Understanding 5G: Perspectives on future technological advancements in mobile December 2014 .GSMA Intelligence.

[6]http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/97-lte-advanced.

[7] https://www.telegeography.com/products/commsupdate/articles/2016/09/26/ericsso n-deploys-ucoms-4g-network-in-yerevan/.

[8]https://www.swisscom.ch/en/residential/mobile/mobile-network/4g-lte.html

 $\label{eq:starses} \end{target} \end{targe$

[10]https://www.vodafone.com.fj/AboutUsMaster/About-Us/Media-Releases/Media-Releases-16/Vodafone-Fiji-Announces-New-4G-LTE-Advanced-Netwo.

[11]https://en.wikipedia.org/wiki/LTE_Advanced.

[12]Network Functions Virtualisation An Introduction, Benefits, Enablers, Challenges & Call for Action Network Functions Virtualisation – Introductory White Paper.

[13]http://www.ieee802.org/15/pub/TG4.html.

[14]Comparative Study on IEEE Standard of WPAN 802.15.1/ 3/ 4 Adhitya Sable

[15]Research Scholar, PG Department of Computer Science and Engineering, S.G.B.A.U, AmravatINTERNATIONAL JOURNAL FOR RESEARCH IN EMERGING SCIENCE AND TECHNOLOGY, VOLUME-1, ISSUE-1, JUN-2014 E-ISSN: 2349-7610 VOLUME-1, ISSUE-1, JUN-2014 COPYRIGHT © 2014 IJREST, ALL RIGHT RESERVED 25.

[16]https://www.tutorialspoint.com/wimax/wimax_standards.htm.

[17]http://www.radio-electronics.com/info/wireless/wi-fi/ieee-802-11-standards-tutorial.php.

[18]https://massivemimo.eu/index.php.

[19].MASSIVE MIMO: AN INTRODUCTION Thomas L. Marzetta.

[20] Opportunities and challenges with very large arrays Fredrik Rusek, Daniel Persson, Buon Kiong Lau, Erik G. Larsson, Thomas L. Marzetta, Ove Edfors, and Fredrik Tufvesson.

[21] https://en.wikipedia.org/wiki/Orthogonal_frequency-division_multiplexing

 $\cite{22}\ty: \cite{22}\ty: \cie{22}\ty: \cite{22}\ty: \cite{22}\ty: \cite{22}\ty: \$

[23]WIRELESS COMMUNICATIONS Andrea Goldsmith Stanford University.

[24] http://www.revolutionwifi.net/revolutionwifi/2015/3/how-ofdm-subcarriers-work.

[25] Performance Enhancement of Raptor Codes Employment in OFDM-System

N. M. El-Gohary, Mohsen A. M. Kassem, F. E. Abed El-Samie, M. M. Fouada

International Journal of Networks and Communications 2016.

[26] Diversity: A Fading Reduction Technique Nitika Sachdeva, Deepak Sharma MMU Mullana India International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering Volume 2, Issue 6, June 2012.

[27] www.radio-electronics.com/info/antennas/mimo/spatial-multiplexing.php.

[28]DIVERSITY TECHNIQUES FOR WIRELESS COMMUNICATION Pravin W. Raut, Dr. S.L. Badjate.

[29]S. Srikanth, V. Kumaran, C. Manikandan, Orthogonal Frequency Division Multiple Access: is it the multiple access system of the future?, AU-KBC Research Center.

[30] http://electronicdesign.com/communications/fundamentals-communications-access-technologies-fdma-tdma-cdma-ofdma-and-sdma#"OFDMA".

[31] http://www.conniq.com/WiMAX/fdm-ofdm-ofdma-ofdma-02.htm.

[32] https://en.wikipedia.org/wiki/Filter_bank.

[33] OFDM Versus Filter Bank Multicarrier Behrouz Farhang-Boroujeny.

[34] AN OVERVIEW OF MASSIVE MIMO SYSTEM IN 5G Sk. Saddam Hussain, Shaik Mohammed Yaseen and Koushik Barman.

[35] A Review on FBMC: An Efficient Multicarrier Modulation System International Journal of Computer Applications (0975 – 8887) Volume 98– No.17, July 2014.

[36]Key Concepts of 5th Generation Mobile Technology H. Magri, N. Abghour, M. Ouzzif.

[37] Beam Division Multiple Access Transmission for Massive MIMO Communications Chen Sun, Student Member, IEEE, Xiqi Gao, Fellow, IEEE, Shi Jin, Member, IEEE, Michail Matthaiou, Senior Member, IEEE, Zhi Ding, Fellow, IEEE, Chengshan Xiao, Fellow, IEEE.

[38]Massive MIMO for Next Generation Wireless Systems Erik G. Larsson, ISY, Linköping University, SwedenOve Edfors and Fredrik Tufvesson, Lund University, Sweden Thomas L. Marzetta, Bell Labs, Alcatel-Lucent, United States.

[39]http://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/massive-mimo-and-beamforming-the-signal-processing-behind-the-5g-buzzwords.html.

[40] Throughput fairness and efficiency of link adaptation techniques in wireless networks M.H. Ahmed H. Yanikomeroglu, Faculty of Engineering, Memorial University of Newfoundland, St. John's, Canada 2 Broadband Communication and Wireless Systems (BCWS) Centre, Department of Systems and Computer Engineering, Carleton University, Ottawa, Canada.

[41] LTE:Der Mobilfunk der Zukunft Channel Coding and Link Adaptation Shahram Zarei Seminar.

[42]Low-Density Parity-Check Codes Robert G.Gallager 1963.

[43] ldpc codes for flat rayleigh fading channels with channel side information Yibo Jiang Alexei Ashikhmin Naresh Sharma.

[44] LDPC Coded OFDM with Alamouti/SVD Diversity Technique Jeongseok Ha Apurva N. Mody Joon H. Sung John R. Barry Steven W. McLaughlin Gordon L. Stüber. [45] P. Chow, J. Cioffi, J. Bingham, "A practical discrete multitone transceiver loading algorithm for data transmission over spectrally shaped channels", IEEE Trans. Commun., vol. 43, no. 1995, pp. 773–775, 1995.

[46] G.D. Forney Jr. and M. V. Eyuboglu. Combined Equalization and Coding Using Precoding. IEEE Communications Magazine, vol. 29, no. 12, pp. 25-34, December 1991.

[47] 2012 International Conference on Systems and Informatics (ICSAI 2012) An Efficient Water-Filling Algorithm for Power Allocation in OFDM-Based Cognitive Radio Systems Qilin Qi, Andrew Minturn, and Yao qing (Lamar) Yang Department of Computer and Electronics Engineering, University of Nebraska-Lincoln, NE, USA.

[48] IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS, VOL. 25, NO. 6, AUGUST 2007 1079 Non-Cooperative Resource Competition Game by Virtual Referee in Multi-Cell OFDMA Networks Zhu Han, Zhu Ji, and K. J. Ray Liu.

[49] 1366 IEEE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS, VOL. 53, NO. 8, AUGUST 2005 Fair Multiuser Channel Allocation for OFDMA Networks Using Nash Bargaining Solutions and Coalitions Zhu Han, Member, IEEE, Zhu (James) Ji, and K. J. Ray Liu, Fellow, IEEE.

[50] Distributed Margin Adaptive Resource Allocation in MIMO OFDMA Networks Mylene Pischella, Member, IEEE, and Jean-Claude Belfiore, Member, IEEE.

[51] Rate Adaptation Algorithms for IEEE 802.11 Networks: A Survey and Comparison.

[52] Power Allocation Based on Power Efficiency in Uplink OFDMA Systems: A Game Theoretic Approach Dixiong Yu, Dan Wu, Yueming Cai and Wei Zhong Institute of Communications Engineering, PLAUST.

[53] A Distributed Resource Control for Fairness in OFDMA Systems: English-Auction Game with Imperfect Information Wonjong Noh Department of Mathematics, University of California, Irvine, CA, USA.

[54] 5. Efficient and Fair Resource Allocation Scheme for OFDMA Networks Based on Auction Game Seyed Mohamad Alavi Chi Zhou Wan Wang Gen Department of Electrical and Computer Engineering,Illinois Institute of Technology, Chicago, IL, USA School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai, China.

[55] Enhancing Cell-Edge Performance: A Downlink Dynamic Interference Avoidance Scheme with Inter-Cell Coordination Mahmudur Rahman, Student Member, IEEE, and Halim Yanikomeroglu, Member, IEEE. [56] K. T. Kim and S. K. Oh, "An Incremental Frequency Reuse Scheme for an OFDMA Cellular System and Its Performance", in Proc. IEEE Vehicular Technology Conf. VTC Spring 2008., pp. 1504-1508, 2008.

[57] European project IST-2000-28088, http://momentum.zib.de, 2005.

[58] A. L. Stolyar and H. Viswanathan, "Self-Organizing Dynamic Fractional Frequency Reuse in OFDMA Systems", IEEE 27th Conf. Computer Commun., pp. 691-699 April 2008.

[59] K. Son, S. Chong, and G. de Veciana, "Dynamic association for load balancing and interference avoidance in multi-cell networks", IEEE Trans.Wireless Commun., vol. 8, no. 8, pp. 3566–3576, Jul. 2009.

[60] 3rd Generation Partnership Project Technical Specification Group Radio Access Network Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) X2 general aspects and principles (Release 8).

[61] A. Triki and L. Nuaymi, "Intercell Interference Coordination Algorithms in OFDMA Wireless Systems", in Proc. IEEE 73rd Vehicular Technology Conf. (VTC Spring)., pp. 1-6, 2011.

[62] A. L. Stolyar and H. Viswanathan, "Self-Organizing Dynamic Fractional Frequency Reuse in OFDMA Systems", IEEE 27th Conf. Computer Commun., pp. 691-699 April 2008.

[63] Subcarrier Allocation Algorithms for multicellular OFDMA networks without Channel State Information I.N. Stiakogiannakis*, D.A. Zarbouti*, G.V. Tsoulos[†], D.I. Kaklamani*

*School of Electrical and Computer Engineering, National Technical University of Athens, istiak@esd.ntua.gr †Department of Telecommunication Science and Technology, University of Peloponnese.

[64] J. Andrews, "Interference cancellation for cellular systems: a contemporary overview", Wireless Communications, IEEE, vo. 12, no. 2, pp. 19-20, April 2005.

[65] IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS AND TUTORIALS 1 Robust Power Control and Beamforming in Cognitive Radio Networks: A Survey Yongjun Xu, Student Member, IEEE, Xiaohui Zhao, Member, IEEE, and Ying-Chang Liang, Fellow, IEEE.

[66] IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS, VOL. 31,
NO. 3, MARCH 2013 451 Multiuser Resource Allocation Optimization Using
Bandwidth-Power Product in Cognitive Radio Networks Yahia Tachwali, Member,
IEEE, Brandon F. Lo, Member, IEEE, Ian F. Akyildiz, Fellow, IEEE, and Ramon
Agust'1, Member, IEEE.

[67] Optimization of OFDMA-Based Cellular Cognitive Radio Networks Yao Ma, Senior Member, IEEE, Dong In Kim, Senior Member, IEEE, and Zhiqiang Wu, Member, IEEE.

[68] IEEE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS, VOL. 61, NO. 2, FEBRUARY 2013 507 Service-Outage Capacity Maximization in Cognitive Radio for Parallel Fading Channels Athipat Limmanee, Student Member, IEEE, Subhrakanti Dey, Senior Member, IEEE, and Jamie S. Evans, Member, IEEE.

[69] Opportunities and Challenges in OFDMA-Based Cellular Relay Networks:

A Radio Resource Management Perspective Mohamed Salem, Student Member, IEEE, Abdulkareem Adinoyi, Member, IEEE, Halim Yanikomeroglu, Member, IEEE, and David Falconer, Life Fellow, IEEE.

[70]Fairness-Aware Energy-Efficient Resource Allocation for AF Cooperative OFDMA Networks Ebrahim Bedeer, Member, IEEE, Abdulaziz Alorainy, Student Member, IEEE, Md. Jahangir Hossain, Member, IEEE, Osama Amin, Senior Member, IEEE, and Mohamed-Slim Alouini, Fellow, IEEE.

[71] JOURNAL OF COMMUNICATIONS AND NETWORKS, VOL. 16, NO. 5, OCTOBER 2014 559 Power Allocation Framework for OFDMA-based Decode-and-Forward Cellular Relay Networks Yalda Farazmand and Attahiru S. Alfa.

[72]https://www.researchgate.net/publication/257489420_A_survey_and_tutorial_of_ wireless_relay_network_protocols_based_on_network_coding.

[73] http://www.3gpp.org/hetnet.

[74] Symbol Synchronization for OFDM based Heterogeneous Network in the Presence of Co-channel Interference Xuan Gu School of Electronic and Electrical Engineering University of Leeds Leeds, UK Li Zhang School of Electronic and Electrical Engineering University of Leeds Leeds, UK.

[75] An Incisive SWOT Analysis of Wi-Fi, Wireless Mesh, WiMAX and Mobile WiMAX Technologies 2009 International Conference on Education Technology and Computer C. Ravichandiran Dr. V. Vaithiyanathan.

[76] WiMAX-WiFi Convergence with OFDM Bridge Ali Al-Sherbaz, Chris Adams & Sabah Jassim*Applied Computing Department, University of Buckingham UK – MK181EG.

[77] An intelligent resource management scheme for heterogeneous WiFi and WiMAX multi-hop relay networks Chenn-Jung Huang , Kai-Wen Hu, I-Fan Chen, You-Jia Chen, Hong-Xin Chen

[78] A Cooperative Game Framework for Bandwidth Allocation in 4G Heterogeneous Wireless Networks Dusit Niyato and Ekram Hossain Dept. of Elect. and Comp. Engg., University of Manitoba Winnipeg, MB R3T 5V6, Canada.

[79] Multiuser OFDM with Adaptive Subcarrier, Bit, and Power Allocation Cheong Yui Wong, Roger S. Cheng, *Member, IEEE*, Khaled Ben Letaief, *Senior Member, IEEE*, and Ross D. Murch, *Senior Member, IEEE*.

[80] Radio Resource Allocation for Cellular Networks Based on OFDMA with QoS Guarantees Slawomir Pietrzyk and Gerard J.M. Janssen.

[81] Power Control, Adaptive Modulation and Subchannel Allocation for Multiuser Downlink OFDM Min-Kuan Chang[†] and C.-C. Jay Kuo[‡] Department of Electrical Engineering, National Chung-Hsing University, Tai-Chung, Taiwan[†] Department of Electrical Engineering, University of Southern California, Los Angeles, CA, USA[‡].

[82] J. Zhang, K.B. Letaief, 'Multiuser Adaptive Subcarrier and Bit Allocation with Adaptive Cell Selection for OFDM Systems', IEEE Trans. Wireless Commun. Vol.3, no. 5 2004.

[83] Awad, M., K., Mahinthan, V., Mehrjoo, M., Shen, X., Mark, J., W., "Downlink Resource Allocation for OFDMA-based Multiservice Networks with Imperfect CSI", Department of Electrical & Computer Engineering, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, N2L 3G1, Canada 2009.

[84] Chang, Z., Ristaniemi, T., "Resource Allocation for Cooperative Relay-assisted OFDMA Networks with Imperfect CSI", Department of Mathematical Information Technology, University of Jyvaskyla, P.O.Box 35, FIN-40014 Jyväskylä, Finland.

[85] On the Performance Evaluation of Two Novel Fractional Frequency Reuse Approaches for OFDMA Multi-User Multi-Cellular Networks Maria A. Seimeni (1), Georgios I. Tsivgoulis (1), Panagiotis K. Gkonis (1), Dimitra I. Kaklamani (1), Iakovos S. Venieris (1) and Christos A. Papavassiliou (2)
(1) National Technical University of Athens, School of Electrical and Computer Engineering, 9 Heroon Polytechneioy str, Zografou, Athens, Greece
(Email: mseimeni@icbnet.ntua.gr, gtsivgou@icbnet.ece.ntua.gr, pgkonis@esd.ntua.gr, dkaklam@mail.ntua.gr, venieris@cs.ntua.gr)
(2) Electrical and Electronic Engineering, Imperial College, South Kensington Campus, London SW7 2AZ, England
(Email: c.papavas@imperial.ac.uk)

[86] On BER evaluation of a Regional Anti-Jamming Subcarrier Strategy for MIMO-OFDMA Systems Maria A. Seimeni1, Panagiotis K. Gkonis1, Dimitra I. Kaklamani1, Iakovos S. Venieris1 and Christos A. Papavasiliou2
1National Technical University of Athens, School of Electrical and Computer Engineering,9 Heroon Polytechneioy str, Zografou, Athens, Greece

2Electrical and Electronic Engineering, Imperial College, South Kensington Campus, London SW7 2AZ, Englande-mails: mseimeni@icbnet.ntua.gr, pgkonis@esd.ntua.gr, dkaklam@mail.ntua.gr, venieris@cs.ntua.gr, c.papavas@imperial.ac.uk

[88] R. Jain, D. Chiu, and W. Hawe, "A Quantitative Measure Of Fairness And Discrimination For Resource Allocation In Shared Computer Systems", DEC Research Report TR-301, September 1984.

[89] https://en.wikipedia.org/wiki/Fairness_measure

[90] J. C. Ikuno, M. Wrulich and M. Rupp, "Performance and modelling of LTE H-ARQ", Proceedings ITG International Workshop on Smart Antennas (WSA), Berlin, Germany, February 2009.

[91] C. Shupping, L. Huibinu, Z. Dong and K. Asimakis, "Generalized scheduler providing multimedia services over HSDPA", Proceedings IEEE International Conference of Multimedia and Expo, pp. 972-930, 2007.

[92] Next Generation 5G Wireless Networks: A Comprehensive Survey Mamta Agiwal, Abhishek Roy, and Navrati Saxena IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS, VOL. 18, NO. 3, THIRD QUARTER 2016.

[93] Fuzzy and Utility Based Network Selection for Heterogeneous Networks in High-Speed Railway Xiaoyun Yan, Ping Dong, Tao Zheng, and Hongke Zhang Beijing Jiaotong University, Beijing, China.