



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Βέλτιστη Κατανομή Πόρων και Ανάθεση Χρηστών σε
Ενοποιημένα Κυψελωτά OFDMA/WLAN Δίκτυα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χρήστος Π. Καραθάνος

Επιβλέπων : Συμεών Παπαβασιλείου
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Νοέμβριος 2010



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Βέλτιστη Κατανομή Πόρων και Ανάθεση Χρηστών σε
Ενοποιημένα Κυψελωτά OFDMA/WLAN Δίκτυα**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χρήστος Π. Καραθάνος

Επιβλέπων : Συμεών Παπαβασιλείου

Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 4^η Νοεμβρίου 2010.

.....
Συμεών Παπαβασιλείου
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Μιχαήλ Θεολόγου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ευστάθιος Συκάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Νοέμβριος 2010

.....
Χρήστος Π. Καραθάνος

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

Copyright © Χρήστος Π. Καραθάνος, 2010

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.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με τη βέλτιστη ανάθεση χρηστών και κατανομή πόρων σε ενοποιημένα κυψελωτά OFDMA και τοπικά ασύρματα WLAN δίκτυα ακολουθώντας το πρότυπο 3GPP, το κυρίαρχο όραμα δικτύων 4^{ης} γενιάς. Στόχος της διπλωματικής είναι η μελέτη, ανάλυση και παρουσίαση ενός καινοτόμου τρόπου βέλτιστης ανάθεσης χρηστών σε ετερογενή ασύρματα δίκτυα λαμβάνοντας υπόψη χαρακτηριστικά Ποιότητας της Υπηρεσίας, χρησιμοποιώντας και επεκτείνοντας την μεθοδολογία που παρουσιάζεται στη δημοσίευση των Γ. Αριστομενόπουλο, Τ. Καστρινογιάννη και Συμεών Παπαβασιλείου με τίτλο 'Enabling Efficient QoS-Driven Resource Management in Heterogeneous Wireless Networks via Autonomicity'.

Πιο συγκεκριμένα, θα παρουσιαστεί το μοντέλο ενοποιημένων OFDMA/WLAN δικτύων και ο μηχανισμός βέλτιστης ανάθεσης χρηστών, θα αναλυθεί ο αλγόριθμος κατανομής πόρων σε WLAN δίκτυα, θα μελετηθούν τρόποι κατανομής πόρων σε OFDMA δίκτυα και θα επιλεγεί και τροποποιηθεί ο καταλληλότερος ώστε να χρησιμοποιηθεί με τον υπάρχων μηχανισμό ανάθεσης χρηστών. Το ενοποιημένο σύστημα θα προσομοιωθεί και η απόδοση του θα δοκιμαστεί και συγκριθεί με εναλλακτικούς μηχανισμούς κατανομής χρηστών.

Λέξεις κλειδιά

Ενοποιημένα Ετερογενή δίκτυα, OFDMA, WLAN, ανάθεση πόρων, ανάθεση χρηστών, θεωρία βελτιστοποίησης.

Abstract

This thesis deals with the problem of optimal networks assignment and resource allocation in integrated heterogeneous cellular OFDMA and WLAN networks, in line with 3GPP, the dominant 4th generation networking vision. Scope of this thesis is to study, analyze and present a novel optimal QoS-aware network assignment for heterogeneous wireless networks, exploiting and extending the methodology presented in the paper of G. Aristomenopoulos, T. Kastrinogiannis and S. Papavassiliou entitled as 'Enabling Efficient QoS-Driven Resource Management in Heterogeneous Wireless Networks via Autonomicity.

Specifically, an integrated OFDMA/WLAN system model and the optimal network assignment scheme will be presented, an optimal resource allocation mechanism for WLAN will be analyzed, ways of optimal allocating resources in OFDMA cellular system will be studied, and the most appropriate algorithm will be selected and modified accordingly in order to map with the existing optimal network assignment scheme. The unified integrated system will be simulated and its efficacy and efficiency will be tested and compared with alternative network selection schemes.

Key words

Integrated Heterogeneous networks, OFDMA, WLAN, resource allocation, network assignment, optimization theory, network utility maximization.

Αφιερώνεται στους γονείς μου.

Ευχαριστήριο σημείωμα

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον διδάκτορα Τιμόθεο Καστρινογιάννη και τον υποψήφιο διδάκτορα Γιώργο Αριστομενόπουλο που με βοήθησαν στη περάτωση αυτής της διπλωματικής. Με τον Τιμόθεο συνεργαστήκαμε από την αρχή της διπλωματικής κατά τη διάρκεια της έρευνας. Η πολύτιμη βοήθεια του και η αμεσότητα στην επικοινωνία έπαιξαν σημαντικό ρόλο στα πρώτα στάδια της διπλωματικής. Συνείσφερε πολλά στη προσπάθειά μου να κατανοήσω το θέμα και αυτό που μου έχει κάνει εντύπωση είναι η βοήθεια, η υπομονή και η διαθεσιμότητα που έδειξε απέναντι στο πρόσωπό μου. Με τον (editor in chief) Γιώργο συνεργαστήκαμε κατά το στάδιο της υλοποίησης, των προσομοιώσεων και της συγγραφής της διπλωματικής. Η βοήθεια του υπήρξε υπερπολύτιμη και μπορώ να πω με βεβαιότητα ότι χωρίς τη συμμετοχή του δε θα μπορούσα με κανένα τρόπο να προχωρήσω τη διπλωματική. Ειδικά θέλω να τον ευχαριστήσω για τις ώρες που μου διέθεσε ώστε να προλάβω να τελειώσω τη διπλωματική πριν αποχωρήσω για να ολοκληρώσω τις στρατιωτικές μου υποχρεώσεις, ώρες που στερήθηκε από τη δική του έρευνα. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω και τον επιβλέποντα καθηγητή μου Συμεών Παπαβασιλείου, ο οποίος εξ αρχής στάθηκε πρόθυμος στην ανάθεση της διπλωματικής αυτής δείχνοντας μου εμπιστοσύνη. Υπήρξε ευγενικός και έδειξε κατανόηση απέναντι μου.

Πέρα από τα παραπάνω πρόσωπα που βοήθησαν για τη περάτωση της διπλωματικής, με την ευκαιρία που μου δίνεται θα ήθελα να ευχαριστήσω και τους ανθρώπους που έπαιξαν σημαντικό ρόλο στη ζωή μου κατά τα φοιτητικά μου χρόνια, πέρα από τους γονείς μου και τα αδέρφια μου. Καταρχήν θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Θανάση και τον Παναγιώτη που είναι καρδιακοί μου φίλοι. Η φιλία αυτή που ξεκίνησε από τα σχολικά μας χρόνια αναπτύχθηκε και κατά τα φοιτητικά μας χρόνια παρόλο που σπουδάσαμε σε διαφορετικές πόλεις. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δημήτρη, τον οποίο θαυμάζω και τον βλέπω ως μία εκδοχή του δικού μου εαυτού (χωρίς να θέλω να υπερηφανεύομαι) εάν ήμουν συνεπείς στις υποχρεώσεις μου. Του εύχομαι τα καλύτερα στο διδακτορικό που κάνει στο πανεπιστήμιο Columbia της Νέας Υόρκης. Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Νίκο που ήταν από τους πρώτους συμφοιτητές που γνώρισα στο Πολυτεχνείο και έχουμε παραμείνει από τότε καρδιακοί φίλοι. Ιδιαίτερη αναφορά θα ήθελα να κάνω στο Χάρη που τον γνώρισα όταν δουλεύαμε μαζί στον ΟΤΕ. Είμαστε από τότε κολλητοί και έχουμε περάσει μαζί πάρα πολλά. Θα μπορούσα να αναφέρω τις ατελείωτες ώρες που περάσαμε μαζί διαβάζοντας καθημερινά στη βιβλιοθήκη δίνοντας κουράγιο ο ένας στον άλλο. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τη Μαρία, που αν και ήρθε στη ζωή μου μετέπειτα από τα προηγούμενα άτομα την έχει αλλάξει ριζικά και έχει δώσει νόημα στη ζωή μου. Ένας λόγος που προσπάθησα σκληρά να ολοκληρώσω τη διπλωματική αυτή σε σύντομο χρονικό διάστημα ήταν ώστε να απαλλαγώ από τις ακαδημαϊκές υποχρεώσεις και να μπορέσουμε πλέον να συνεχίσουμε τη ζωή μας σε διαφορετικό επίπεδο.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή.....	13
1.1	Αναδρομή στην ιστορία των τηλεπικοινωνιών.....	13
1.1.1	Εισαγωγή στις κινητές τηλεπικοινωνίες.....	14
1.1.2	Εισαγωγή στα ασύρματα τοπικά δίκτυα υπολογιστών (WLAN).....	15
1.2	Η έννοια της ενοποίησης δικτύων.....	16
1.3	Στόχος της παρούσας διπλωματικής.....	20
2	Ενοποιημένα Δίκτυα (Joint Networks).....	21
2.1	Ενοποίηση στο επίπεδο IP.....	21
2.1.1	Επέκταση του πρωτοκόλλου IPv4 με το πρωτόκολλο Mobile IP (MIP).....	22
2.1.2	Επέκταση του πρωτοκόλλου IPv6 με το πρωτόκολλο Mobile IPv6 (MIPv6).....	23
2.2	Ενοποίηση στο επίπεδο MAC.....	24
2.2.1	Ενοποίηση δικτύων με διαμοιρασμό της κίνησης.....	24
2.2.2	Ενοποίηση δικτύων με κοινό μηχανισμό επιλογής δικτύου.....	27
2.2.2.1	Ενοποίηση δικτύων με βάση τη ποιότητα των υπηρεσιών (QoS).....	27
2.2.2.2	Ενοποίηση δικτύων με ενοποιημένο έλεγχο αποδοχής συνεδρίας.....	29
2.2.2.3	Ενοποίηση δικτύων με επιλογή δικτύου με βάση συνάρτηση κόστους.....	30
2.2.2.4	Ενοποίηση δικτύων με βάση την θεωρία παιγνίων.....	31
2.2.2.5	Ενοποίηση δικτύων με χρήση της εξελικτικής θεωρίας παιγνίων.....	32
2.3	Ενοποίηση δικτύων με χρήση αυτονομίας των χρηστών.....	33
2.3.1	Αντιμετώπιση κατανομής πόρων στο δίκτυο CDMA.....	34
2.3.2	Αντιμετώπιση κατανομής πόρων στο δίκτυο WLAN.....	35
2.3.3	Επίλυση Προβλήματος Κατανομής Πόρων και Ενοποίηση Δικτύων.....	36
3	Παρουσίαση OFDMA δικτύων.....	39
3.1	Εισαγωγή στη τεχνολογία OFDMA.....	39
3.2	Παρουσίαση της έρευνας ανάθεσης πόρων OFDMA συστημάτων.....	41
3.3	Εισαγωγή σε απλούς αλγόριθμους κατανομής των πόρων ενός OFDMA δικτύου.....	44
3.4	Αλγόριθμοι βασισμένοι στη θεωρία παιγνίων.....	45
3.4.1	Επίλυση ανάθεσης πόρων της άνω ζεύξης OFDMA συστήματος.....	45
3.4.2	Επίλυση ανάθεσης πόρων με εφαρμογή των συνεργατικών παιγνίων.....	46
3.5	Αλγόριθμοι βασισμένοι σε ουρές και στη θεωρία των συστημάτων αναμονής.....	49
3.6	Αλγόριθμοι βασισμένοι στην ελαχιστοποίηση της εκπεμπόμενης συνολικής ισχύος.....	49
3.7	Αλγόριθμοι βασισμένοι στη μεγιστοποίηση του ρυθμού μετάδοσης.....	51
3.8	Οικογένεια αλγορίθμων μεγιστοποίησης με R_{min} ή/και R_{max} , και άλλους περιορισμούς.....	58
4	Παρουσίαση μοντέλου ενοποίησης δικτύων OFDMA/WLAN.....	63
4.1	Εισαγωγή.....	63
4.2	Αναλυτική παρουσίαση κατανομής πόρων στο OFDMA.....	63
4.3	Κατανομή πόρων του συστήματος OFDMA.....	70
4.4	Κατανομή πόρων των δικτύων WLAN.....	72
4.5	Ενοποίηση δικτύων OFDMA/WLAN.....	72
4.6	Εύρεση κατάλληλης μετρικής του συστήματος OFDMA.....	74
4.6.1	Το μοντέλο του συστήματος προσομοίωσης.....	76
4.6.2	Μελέτη της μεταβολής του παράγοντα λ^* σχετικά με τον αριθμό των χρηστών του συστήματος.....	77
4.6.3	Μελέτη της μεταβολής του παράγοντα λ^* σχετικά με την απόσταση των χρηστών από το σταθμό βάσης.....	78

4.6.4	Σύγκριση προτεινόμενων μετρικών του συστήματος OFDMA.....	80
4.6.5	Μελέτη της επιλεγόμενης μετρικής.....	82
4.6.6	Ειδικότερη μελέτη της επιλεγόμενης μετρικής σε σύστημα δύο χρηστών.....	84
5	Αποτελέσματα προσομοιώσεων.....	87
5.1	Αποτελέσματα σύγκρισης των δύο ευριστικών αλγορίθμων ανάθεσης πόρων OFDMA δικτύων.....	87
5.1.1	Σύγκριση των ευριστικών αλγορίθμων σχετικά με τον αριθμό των χρηστών....	87
5.1.2	Σύγκριση των ευριστικών αλγορίθμων σχετικά με την απόσταση των χρηστών	89
5.1.3	Σύγκριση των ευριστικών αλγορίθμων για τυχαίες χωρικά κατανομές των χρηστών.....	90
5.2	Αποτελέσματα προσομοιώσεων ενοποιημένων δικτύων OFDMA/WLAN.....	91
5.2.1	Το μοντέλο του συστήματος προσομοίωσης.....	92
5.2.2	Σύγκριση της προτεινόμενης πολιτικής με την πολιτική επιλογής δικτύου με βάση τη ποιότητα του σήματος.....	93
5.2.3	Σύγκριση της προτεινόμενης πολιτικής με την πολιτική επιλογής δικτύου βάση των QoS των χρηστών.....	98
6	Συμπεράσματα.....	103
7	Βιβλιογραφία.....	105

Πίνακας σχημάτων

Σχήμα 2.1: Περίληψη διαχωρισμού κίνησης σε ισχυρά συνδεδεμένα υποδίκτυα. (πηγή [23]).	26
Σχήμα 2.2: Ασθενώς συνδεδεμένα δίκτυα κινητής/WLAN με βάση τη πλατφόρμα DiffServ. (πηγή [24]).	28
Σχήμα 2.3: Διαδικασία αποδοχής κλήσης σε ασθενώς συνδεδεμένα δίκτυα κινητής/WLAN (πηγή [24]).	29
Σχήμα 2.4: Διάγραμμα συνιστωσών του προτεινόμενου RRM (πηγή [27]).	31
Σχήμα 3.1: Το σύμβολο OFDM στο πεδίο του χρόνου για τρεις φέρουσες.	39
Σχήμα 3.2: Το σύμβολο OFDM στο πεδίο συχνοτήτων για τρεις φέρουσες.	40
Σχήμα 3.3: Παρουσίαση των τριών τύπων συναρτήσεων ευχαρίστησης U_i .	52
Σχήμα 4.1: Συνάρτηση χρησιμοποίησης της υπηρεσίας QoS.	76
Σχήμα 4.2: Μεταβολή του παράγοντα λ^* συστήματος OFDMA 128 καναλιών με τον αριθμό των χρηστών (όλοι σε απόσταση 150m).	77
Σχήμα 4.3: Μεταβολή του παράγοντα λ^* συστήματος OFDMA 64 καναλιών με τον αριθμό των χρηστών (όλοι σε απόσταση 150m).	78
Σχήμα 4.4: Μεταβολή του παράγοντα λ^* συστήματος OFDMA 128 καναλιών σε σχέση με την απόσταση των χρηστών (όλοι οι χρήστες ισαπέχουν από το σταθμό βάσης).	79
Σχήμα 4.5: Μεταβολή του παράγοντα λ^* συστήματος OFDMA 64 καναλιών σε σχέση με την απόσταση των χρηστών (όλοι οι χρήστες ισαπέχουν από το σταθμό βάσης).	79
Σχήμα 4.6: Μεταβολή προτεινόμενων μετρικών ενός χρήστη σε σχέση με την απόστασή του από το σταθμό βάσης.	81
Σχήμα 4.7: Παρουσίαση της μεταβολής της μετρικής ενός χρήστη και του λ^* του συστήματος.	83
Σχήμα 4.8: Παρουσίαση της μεταβολής της μετρικής ενός χρήστη και του λ του συστήματος σε ένα μικρότερο στιγμότυπο.	84
Σχήμα 4.9: Σύγκριση μεταβολής μετρικής χρηστών και λ^* του συστήματος.	85
Σχήμα 5.1: Συνολικός ρυθμός μετάδοσης σε bps της κυψέλης OFDMA 128 καναλιών ανάλογα με τον αριθμό των χρηστών (οι χρήστες σταθεροί στα 150 μέτρα).	88
Σχήμα 5.2: Συνολικός ρυθμός μετάδοσης σε bps της κυψέλης OFDMA 64 καναλιών ανάλογα με τον αριθμό των χρηστών (οι χρήστες σταθεροί στα 150 μέτρα).	89
Σχήμα 5.3: Συνολικός ρυθμός μετάδοσης σε bps της κυψέλης OFDMA 128 καναλιών ανάλογα με την απόσταση των χρηστών (20 ενεργοί χρήστες).	90
Σχήμα 5.4: Τυπική 3GPP διάταξη με μία κυψέλη OFDMA και ένα WLAN.	93
Σχήμα 5.5: Συνάρτηση χρησιμοποίησης $U(R)$.	94
Σχήμα 5.6: Σύγκριση απόδοσης πολιτικών επιλογής για χρήστες στα 50 μέτρα.	95
Σχήμα 5.7: Σύγκριση απόδοσης πολιτικών επιλογής δικτύου με τους περισσότερους χρήστες κοντά στο σύστημα OFDMA.	96
Σχήμα 5.8: Σύγκριση απόδοσης πολιτικών επιλογής δικτύου με τους περισσότερους χρήστες μακριά από το σύστημα OFDMA.	97
Σχήμα 5.9: Σύγκριση απόδοσης πολιτικών επιλογής δικτύου για χρήστες τυχαία κατανομημένους στα [20-120] μέτρα.	98
Σχήμα 5.10: Παρουσίαση συναρτήσεων χρησιμοποίησης για δύο τύπους υπηρεσιών.	99
Σχήμα 5.11: Σύγκριση απόδοσης τριών πολιτικών επιλογής για σταθερούς χρήστες στα 50 και 100 μέτρα.	100
Σχήμα 5.12: Σύγκριση ικανοποίησης χρηστών για διαφορετικές πολιτικές επιλογής δικτύου.	101

Πίνακας Πινάκων

Πίνακας 3.1: Παρουσίαση χρησιμοποιούμενων συμβόλων.....	44
---	----

1 Εισαγωγή

1.1 Αναδρομή στην ιστορία των τηλεπικοινωνιών

Ως τηλεπικοινωνίες ορίζονται οι διάφοροι τρόποι μετάδοσης μηνυμάτων, σε μεγάλες αποστάσεις, με στόχο την επικοινωνία. Οι τηλεπικοινωνίες έκαναν την εμφάνιση τους από τα αρχαία χρόνια, είτε με τη μορφή οπτικών σημάτων (χρήση καπνού, οπτικών τηλεγράφων κτλ) είτε με τη μορφή ακουστικών μηνυμάτων(τυμπάνων, κεράτων). Τρομερή ώθηση στις τηλεπικοινωνίες έδωσε η εισαγωγή του ηλεκτρισμού και των ηλεκτρονικών. Έτσι η αρχή έγινε με το τηλέγραφο το 1830 περίπου και έπειτα ακολούθησε το τηλέφωνο το 1876, όπως και ο τηλετύπος. Επίσης σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη των τηλεπικοινωνιών έπαιξε και η εφεύρεση μέσων ευρυεκπομπής (broadcasting), όπως το ραδιόφωνο το 1901 από τον Γουλιέλμο Μαρκόνι και η τηλεόραση το 1927.

Οι τηλεπικοινωνίες βασισμένες στον ηλεκτρισμό χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: στις ενσύρματες και τις ασύρματες. Οι ενσύρματες επικοινωνίες βασίζονται στην ύπαρξη δικτύων καλωδίων συνδεδεμένων μεταξύ τους για την ανταλλαγή σημάτων, ενώ οι ασύρματες χρησιμοποιούν ως μέσο διάδοσης το χώρο (είτε είναι αέρας είτε νερό). Από την αρχή των τηλεπικοινωνιών οι ενσύρματες είχαν κερδίσει σημαντικό έδαφος στις προσωπικές επικοινωνίες με την έλευση του τηλεφώνου, ενώ οι ασύρματες καθιερώθηκαν στα μέσα ευρυεκπομπής (broadcasting) όπως το ραδιόφωνο και η τηλεόραση. Στη σημερινή εποχή ενσύρματες επικοινωνίες αποτελούν μεταξύ άλλων η σταθερή τηλεφωνία (και κατ' επέκταση οι επικοινωνίες που βασίζονται στο δίκτυο αυτό, όπως είναι η τεχνολογία ADSL) και τα ενσύρματα δίκτυα υπολογιστών, ενώ ασύρματες επικοινωνίες αποτελούν η κινητή τηλεφωνία, οι δορυφορικές επικοινωνίες και τα ασύρματα δίκτυα υπολογιστών. Στη συνέχεια θα ασχοληθούμε αποκλειστικά με τις ασύρματες επικοινωνίες.

Στη σημερινή εποχή καταλυτικό ρόλο στην ανάπτυξη των επικοινωνιών έπαιξε η έλευση του διαδικτύου (internet). Στη δεκαετία του '60 διάφοροι ερευνητές άρχισαν να μελετούν την μεταγωγή πακέτων (packet switching) ως εναλλακτικό της μεταγωγής κυκλώματος (circuit switching) που είχε καθιερωθεί με την υπάρχουσα τηλεφωνία για τη διασύνδεση υπολογιστών με στόχο τη προαγωγή της έρευνας. Έτσι το 1969 ξεκίνησε το ARPANET που στη συνέχεια το διαδέχθηκε το διαδίκτυο (internet) με την εισαγωγή του πρωτοκόλλου TCP/IP το 1981. Βέβαια το διαδίκτυο καθιερώθηκε στη καθημερινή ζωή από τις αρχές του 21ου αιώνα, και σήμερα έχει γίνει αναπόσπαστο κομμάτι τόσο της επαγγελματικής όσο και της προσωπικής ζωής των ανθρώπων. Επίσης σημαντικό ρόλο στις προσωπικές επικοινωνίες έχει και η κινητή τηλεφωνία που ομοίως με το διαδίκτυο καθιερώθηκε στα τέλη της δεκαετίας του '90. Οι πρώτες προσπάθειες εμπορικής κινητής τηλεφωνίας ξεκίνησαν από τα τέλη της δεκαετίας του '70 και έχουμε φτάσει σήμερα στη τρίτη γενιά των κινητών κυψελωτών επικοινωνιών. Οι κινητές τηλεπικοινωνίες έφεραν την ικανότητα επικοινωνίας οποιαδήποτε στιγμή σε οποιονδήποτε τόπο, και η αμεσότητα στην επικοινωνία που προσφέρουν έχουν καθιερώσει τα κινητά τόσο για επαγγελματικούς όσο και για κοινωνικούς λόγους. Στη παρούσα διπλωματική θα ασχοληθούμε τόσο με τα δίκτυα κινητών επικοινωνιών όσο και με τα ασύρματα τοπικά δίκτυα υπολογιστών που παρέχουν πρόσβαση στο διαδίκτυο [1].

1.1.1 Εισαγωγή στις κινητές τηλεπικοινωνίες

Αρχικά τα πρώτα συστήματα κινητών επικοινωνιών αναπτύχθηκαν στις ΗΠΑ από το 1934 για το συντονισμό των αστυνομικών δυνάμεων. Με τη πάροδο των χρόνων αναπτύχθηκαν και η ζήτηση έγινε ασφυκτική αναλογικά με το διαθέσιμο φάσμα οπότε το 1968 προτάθηκαν τα κυψελωτά συστήματα, για την επαναχρησιμοποίηση των διαύλων και επομένως της αύξησης της χωρητικότητας των δικτύων, τα οποία και τέθηκαν σε εφαρμογή στα τέλη της δεκαετίας του '70. Το πρώτο παγκοσμίως κυψελωτό σύστημα υλοποιήθηκε το 1979 στην Ιαπωνία και ακολούθησαν το πρώτο ευρωπαϊκό κυψελωτό το 1981 και το πρώτο αμερικάνικο το 1983. αυτά αποτελούσαν τα κυψελωτά συστήματα 1ης γενιάς.

Τα κυψελωτά συστήματα 2ης γενιάς εμφανίστηκαν στην Ευρώπη το 1992 (η σχεδίαση τους ξεκίνησε το 1982) με το πλέον επιτυχημένο κυψελωτό σύστημα GSM (Global System for Mobile communications)[2]. Τα 2ης γενιάς συστήματα βασίζονται εξολοκλήρου σε ψηφιακές τεχνικές που υπερτερούν των αναλογικών σε πολλούς τομείς (αυξημένη ανοσία στο θόρυβο, δυνατότητα επεξεργασίας του σήματος, δυνατότητα κρυπτογράφησης, ευελιξία στην επέκταση των δικτύων κτλ). Έπειτα ακολούθησαν τα συστήματα 2.5G τα οποία βασίζονταν στα υπάρχοντα συστήματα 2ης γενιάς αλλά υποστήριζαν και τεχνολογίες μεταγωγής πακέτου, εξασφαλίζοντας μια ομαλή μετάβαση στα συστήματα 3ης γενιάς.

Τα κυψελωτά συστήματα 3ης γενιάς έχουν ως χαρακτηριστικό την υποστήριξη εφαρμογών πολυμέσων καθώς και τη δυνατότητα πρόσβασης σε πληροφορίες και υπηρεσίες από το διαδίκτυο με υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης (ξεκίνησαν από 2Mbps και πλέον υποστηρίζονται θεωρητικά έως 7.2Mbps). Τα συστήματα 3ης γενιάς συνυπάρχουν με τα 2ης γενιάς, και πρόσφατα έχουν βελτιωθεί με τη τεχνολογία Πρόσβασης Πακέτων Υψηλής Ταχύτητας (High Speed Packet Access, HSPA) η οποία έφερε ταχύτητες έως 7.2Mbps [3].

Το επόμενο βήμα στις κινητές τηλεπικοινωνίες είναι η μετάβαση στη 4η γενιά. Η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunication Union, ITU) [4,5] με τον τομέα ITU-R (ITU Radiocommunication Sector) όρισε ως στόχο των συστημάτων 4ης γενιάς μέγιστο ρυθμό μετάδοσης της τάξης των 100Mbps για χρήστες υψηλής κινητικότητας και περίπου 1Gbps για χρήστες χαμηλής κινητικότητας. Επίσης να τονιστεί ότι τα δίκτυα 4ης γενιάς αναμένεται να είναι βασισμένα αποκλειστικά σε IP (all-IP), όπου θα παρέχονται υπηρεσίες όπως IP τηλεφωνία, υπέρ-ευρυζωνική πρόσβαση στο διαδίκτυο (ultra-broadband internet access) και πολυμεσικές υπηρεσίες. Εξάλλου τα δίκτυα 4ης γενιάς υπονοούν συνένωση κυψελωτών δικτύων με τα τοπικά ασύρματα δίκτυα. Αναφέρεται ο στόχος του 3GPP (3rd Generation Partnership Project) [6] για την συνένωση κυψελωτών OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) δικτύων με τα δίκτυα WiMax καθώς και ο στόχος του 3GPP2 (3rd Generation Partnership Project 2) [7] για συνένωση των κυψελωτών CDMA και των ασυρμάτων τοπικών δικτύων WLANs. Το κυρίαρχο πρότυπο όμως είναι το LTE Advanced [8,9] του 3GPP, που αναμένεται να καθιερωθεί σταδιακά από το 2011. Να σημειωθεί ότι το πρότυπο του 3GPP2 UMB εγκαταλείφθηκε ευνοώντας το πρότυπο LTE.

Το πρότυπο LTE-Advanced έχει υιοθετήσει τη τεχνική Πολλαπλής Πρόσβασης με Ορθογώνια Διαίρεση Συχνοτήτων (Orthogonal Frequency Division Multiple Access,

OFDMA) στη θέση της τεχνικής Πολλαπλής Πρόσβασης με Διαίρεση Κώδικα (Code Division Multiple Access, CDMA) των προηγούμενων συστημάτων. Περιληπτικά η τεχνική OFDMA χωρίζει το διαθέσιμο φάσμα σε μικρότερα υποκανάλια μικρότερου εύρους και επομένως μικρότερου ρυθμού μετάδοσης. Σε αυτή τη τεχνολογία τα υποκανάλια μοιράζονται στους χρήστες προς μετάδοση των πληροφοριών τους. Δεδομένου ότι τα υποκανάλια έχουν μικρότερο εύρος ζώνης, είναι πιο 'ανθεκτικά' απέναντι στη χρονική απόκριση του διαύλου και επομένως αντιμετωπίζουν την ενδοσυμβολική παρεμβολή καλύτερα από άλλες τεχνικές. Ένα επίσης σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι αξιοποιεί καλύτερα το διαθέσιμο φάσμα, καθώς ένα υποκανάλι που μπορεί να έχει μικρό κέρδος για ένα χρήστη λόγω της πολυδιαδρομικής μετάδοσης, μπορεί για ένα άλλο χρήστη να έχει μεγαλύτερο κέρδος. Αναθέτοντας λοιπόν τα υποκανάλια στους χρήστες που έχουν το καλύτερο κέρδος μπορεί να αξιοποιηθεί καλύτερα το διαθέσιμο φάσμα.

1.1.2 Εισαγωγή στα ασύρματα τοπικά δίκτυα υπολογιστών (WLAN)

Ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο υπολογιστών (Wireless Local Area Network, WLAN) επιτρέπει την σύνδεση υπολογιστών σε συγκεκριμένη περιοχή κάλυψης. Ένα από τα πλεονεκτήματά του είναι η ευκολία εγκατάστασης του καθώς και ότι δε χρειάζεται εγκατάσταση καλωδιακής σύνδεσης. Είναι πλέον πολύ δημοφιλής τρόπος σύνδεσης υπολογιστών πολύ μικρών δικτύων όπως τα οικιακά δίκτυα, δίκτυα μικρών επιχειρήσεων και χώρους συνάθροισης (καφετέριες κτλ). Επίσης μπορεί να δρα συμπληρωματικά σε διάφορα ενσύρματα τοπικά δίκτυα (LANs).

Το πρώτο ασύρματο τοπικό δίκτυο δημιουργήθηκε το 1970 με την ονομασία ALOHAnet, και σκοπός ήταν η σύνδεση των υπολογιστών του πανεπιστημίου της Χαβάη που βρίσκονταν σε διαφορετικά νησιά. Έκτοτε υπήρξε αρκετή δραστηριότητα για την εμπορική διαθεσιμότητά του και μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του '90 υπήρχαν αρκετές διαφορετικές προτάσεις, οπότε και το IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers)[10] ανακοίνωσε τη πρώτη συνάντηση αναφορικά με τα δίκτυα WLAN (IEEE Workshop on Wireless LANs) το 1991.

Έτσι το IEEE καθιέρωσε το πρωτόκολλο IEEE 802.11[11] καθορίζοντας τα πρότυπα των WLANs στις μάντες συχνοτήτων 2,4 , 3,6 και 5 Ghz. Τα πρώτα χρόνια της ύπαρξης των ασυρμάτων δικτύων το απαραίτητο υλικό ήταν ακριβό οπότε και η ασύρματη σύνδεση χρησιμοποιούνταν μόνο σε περιπτώσεις που η ενσύρματη σύνδεση ήταν αδύνατη ή ασύμφορη. Με τη πάροδο των χρόνων όμως οι τιμές των ηλεκτρονικών έπεσαν τόσο πολύ, ώστε πλέον η ύπαρξη καρτών ασυρμάτου δικτύου είναι ο κανόνας στους φορητούς υπολογιστές. Με τις σημερινές συνθήκες η ευκολία εγκατάστασης ενός ασυρμάτου δικτύου καθώς και η διευκόλυνση της κινητικότητας των χρηστών που παρέχει (με τους φορητούς υπολογιστές) το καθιστούν ως πρώτη επιλογή εγκατάστασης τοπικού δικτύου έναντι του ενσύρματου [12].

1.2 Η έννοια της ενοποίησης δικτύων

Τα τελευταία χρόνια (από τα τέλη της δεκαετίας του '90) το διαδίκτυο γνώρισε μεγάλη άνθιση και πλέον άρχισε να απευθύνεται στο μέσο άνθρωπο, παρέχοντας του υπηρεσίες που διευκολύνουν τη ζωή του (ηλεκτρονικό ταχυδρομείο, αγορές προϊόντων μέσω διαδικτύου, πολυμεσικό ψυχαγωγικό περιεχόμενο, υπηρεσίες κοινωνικής δικτύωσης κτλ). Οι μεγάλες επενδύσεις από εταιρίες και κράτη έφεραν υψηλές ταχύτητες σε κάθε σπίτι και επιχείρηση κυρίως με τη καθιέρωση της DSL (Digital subscriber line) [13]. Πλέον το διαδίκτυο έχει μπει για τα καλά σε όλους τους τομείς της ζωής μας και η πρόσβαση σε αυτό θεωρείται αυτονόητη.

Όμως η εποχή μας χαρακτηρίστηκε και από μία άλλη τεχνολογία. Αυτή των κινητών τηλεπικοινωνιών. Όπως και το διαδίκτυο, έτσι και τα κινητά μπήκαν οριστικά στις ζωές μας στα τέλη της δεκαετίας του '90. Στην αρχή παρείχαν μόνο τηλεφωνία και τη δυνατότητα αποστολής γραπτών μηνυμάτων. Σύντομα με το πέρασμα των χρόνων τα κόστη κάθε υπηρεσίας μειώθηκαν και η διείσδυση των κινητών έφτασε σχεδόν στο σύνολο του πληθυσμού των αναπτυγμένων και αναπτυσσόμενων χωρών.

Το επόμενο βήμα στη κινητή τηλεπικοινωνία, όπως το οραματίστηκαν επιστήμονες και εταιρίες, ήταν η πρόσβαση των κινητών στο διαδίκτυο ώστε να υπάρχει πλέον μια παγκόσμια επικοινωνία με οδηγό το διαδίκτυο. Έτσι δεν άργησαν να καθιερωθούν υπηρεσίες πρόσβασης στο διαδίκτυο και στα κινητά, με χαμηλότερες όμως ταχύτητες από αυτές των συνηθισμένων παρόχων υπηρεσιών διαδικτύου (DSL κτλ). Όπως όμως και κάθε τεχνολογία, σταδιακά εξελίσσεται για την αύξηση της ταχύτητας πρόσβασης στο διαδίκτυο.

Αντίστοιχα όμως και οι πάροχοι υπηρεσιών πρόσβασης διαδικτύου εξελίχθηκαν και οι ταχύτητες αυξήθηκαν αισθητά (από 512kbps στα 8 και 24Mbps που είναι οι συνηθισμένες τωρινές τιμές). Ταυτόχρονα, με δεδομένη την άνθηση του διαδικτύου και των υπηρεσιών που προσφέρει, οι χρήστες έγιναν όλο και πιο απαιτητικοί αναζητώντας τρόπους να τρέχουν γρήγορα και φτηνά υπηρεσίες στις κινητές συσκευές. Αναζητήθηκε λοιπόν από τους παρόχους ένας εφικτός τρόπος παροχής νέων υπηρεσιών σε συνδυασμό με την αύξηση του κέρδους τους. Οπότε έγινε επιτακτική η ανάγκη αναζήτησης συμπληρωματικών των κυψελωτών δικτύων ως προς τις ιδιότητες τους, δηλαδή να είναι ικανά να προσφέρουν αποτελεσματικά υπηρεσίες δεδομένων.

Σε αυτή τη πραγματικότητα θα μπορούσαμε να πούμε ότι τα δίκτυα κινητής και οι παροχείς διαδικτύου δρουν σχεδόν ανταγωνιστικά με σκοπό να αυξήσουν τον αριθμό των πελατών τους εις βάρος του άλλου δικτύου. Αυτό δεν είναι απαραίτητα ευνοϊκό για το χρήστη, οπότε και πολλοί επιστήμονες και ερευνητές επιδιώκουν, με βάση τις συσκευές που έχουν διεπαφές και με τα δύο δίκτυα, να καταφέρουν τη συνεργασία των δικτύων αυτών. Εξάλλου κάτι τέτοιο απαιτείται και από την αγορά καθώς οι χρήστες ενδιαφέρονται μόνο για τη σύνδεσή τους με το διαδίκτυο και την ύπαρξη των υπηρεσιών της κινητής τηλεφωνίας (τηλεφωνία, SMS κτλ) ασχέτως με το δίκτυο που θα τους παρέχει τις υπηρεσίες αυτές. Δηλαδή οι χρήστες τελικά ενδιαφέρονται για το τελικό προϊόν-υπηρεσίες (και τη τιμή του) και όχι τόσο πως θα επιτευχθεί αυτό.

Με αυτό το σκεπτικό και με βάση -όπως είπαμε- τις συσκευές με διεπαφές και με τα

δύο δίκτυα, οι ερευνητές έχουν οραματιστεί ένα ενοποιημένο δίκτυο, όπου ο καθένας θα χρησιμοποιεί τα δίκτυα αυτά ανάλογα με τις ανάγκες του και τις δυνατότητες κάθε δικτύου. Η ενοποίηση θα γίνει και στο επίπεδο των υπηρεσιών και για να επιτευχθεί αυτό στόχος είναι όλες οι υπηρεσίες να γίνονται με βάση το πρωτόκολλο IP (τηλεφωνία IP, IPTV κτλ). Πολλοί τρόποι έχουν προταθεί για τον τρόπο της επίτευξης της ενοποίησης. Αναφορικά ένας τρόπος είναι ο διαμοιρασμός της κίνησης δεδομένων κάθε υπηρεσίας ανάλογα με τις δυνατότητες των υπαρχόντων δικτύων στην εμβέλεια του χρήστη. Ένας άλλος τρόπος είναι η μεταπομπή (handoff) κάθε χρήστη στο κατάλληλο δίκτυο με βάση τις υπηρεσίες που ζητά και ανάλογα το φορτίο και τις δυνατότητες κάθε δικτύου. Επίσης εναλλακτικός τρόπος είναι ο διαμοιρασμός των χρηστών ανάλογα με τις υπηρεσίες που αιτείται, πχ για τηλεφωνία στο δίκτυο κινητής τηλεπικοινωνίας, για μεταφορά δεδομένων όπως πλοήγηση στο διαδίκτυο στο ασύρματο δίκτυο τοπικής πρόσβασης εάν είναι στην εμβέλεια του χρήστη.

Πέρα από τη δυνατότητα που προσφέρεται από πολλές συσκευές της σύνδεσης στα δύο διαφορετικά δίκτυα υπάρχουν πολλοί λόγοι που οδήγησαν τους ερευνητές στην ιδέα της ενοποίησης των δικτύων. Ένας από αυτούς είναι η σημερινή κυριαρχία του διαδικτύου που έχει καταφέρει να συγκεντρώσει και να ενώσει όλα τα προϋπάρχοντα δίκτυα υπολογιστών σε ένα κοινό δίκτυο με πληθώρα υπηρεσιών και πληροφοριών. Έτσι είναι αυτονόητο λοιπά δίκτυα να επιδιώκουν την ενοποίηση τους με το διαδίκτυο, ώστε να γίνουν πιο ανταγωνιστικά, καθώς θα ενσωματώνουν και υπηρεσίες διαδικτύου. Για αυτό το λόγο και βλέποντας την αλματώδη ανάπτυξη του διαδικτύου, οι εταιρίες κινητής τηλεφωνίας αντί να προσπαθήσουν να το ανταγωνιστούν επιδίωξαν να το εντάξουν στις προσφερόμενες υπηρεσίες τους.

Πιο ειδικά η ενοποίηση των ασυρμάτων τοπικών δικτύων (WLANs) και των δικτύων κινητών τηλεπικοινωνιών επιδιώκεται και λόγω της ίδιας της δομής των δικτύων. Τα δίκτυα κινητών τηλεπικοινωνιών χαρακτηρίζονται από τη παγκόσμια κάλυψή τους, και συνήθως η κάλυψη τους αγγίζει πάνω από το 99% των κατοίκων όπου υπάρχουν. Εξάλλου αυτός ήταν και ο πρωταρχικός στόχος (και απαίτηση των κυβερνήσεων), τα δίκτυα κινητής τηλεπικοινωνίας να καλύπτουν το σύνολο του πληθυσμού. Φυσικά λόγω της αρχικής υπηρεσίας μετάδοσης μόνο φωνής και απλών μηνυμάτων, τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας δεν ενδιαφέρθηκαν ιδιαίτερα για υποστήριξη υψηλών ρυθμών μετάδοσης. Αυτό έγινε όταν αναγνωρίστηκε η ανάγκη επέκτασης των υπηρεσιών τους και σε υπηρεσίες μεταφοράς δεδομένων και σύνδεσης με το διαδίκτυο. Έτσι ακόμη και σήμερα τα δίκτυα κινητής τηλεπικοινωνίας μπορούν να προσφέρουν στη καλύτερη των περιπτώσεων ταχύτητες ως τα 7,2Mbps (σε σύγκριση με τα 24Mbps μια γραμμής ADSL), αν και γίνεται συνεχώς βελτίωση ώστε οι ταχύτητες να ανταγωνίζονται αυτές των ασυρμάτων τοπικών δικτύων (παράδειγμα αποτελεί το πρότυπο LTE, Long Term evolution).

Από την άλλη πλευρά τα δίκτυα ασύρματης τοπικής σύνδεσης (WLAN) αναπτύχθηκαν με σκοπό τη διασύνδεση υπολογιστών σε τοπικά δίκτυα. Έτσι από την αρχή τους βασίζονταν στη μεταγωγή πακέτων δεδομένων (σε αντίθεση με τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας) και είχαν σα σκοπό το μέγιστο δυνατό ρυθμό μετάδοσης. Σε αυτό βοήθησε και το γεγονός ότι είχε σα σκοπό να συνδέσει υπολογιστές που βρίσκονταν πολύ κοντά (στο ίδιο ή σε γειτονικά κτήρια), οπότε προοριζόνταν σε εμβέλεια μερικών δεκάδων μέτρων. Επίσης η υποστήριξη του IEEE έχει φέρει τη προτυποποίηση που απαιτείται ώστε σαν πρωτόκολλο να ωριμάσει και να συντονίσει τις διάφορες εταιρίες που δραστηριοποιούνται

στο χώρο.

Αποτέλεσμα είναι να υπάρχουν δύο δίκτυα με συμπληρωματικές ιδιότητες. Από τη μία το δίκτυο των κινητών τηλεπικοινωνιών προσφέρει ευρεία κάλυψη με ικανοποιητικές ταχύτητες. Από την άλλη τα ασύρματα τοπικά δίκτυα προσφέρουν κάλυψη σε μικρή περιοχή (ακτίνας μερικών δεκάδων μέτρων) αλλά με μεγαλύτερη ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων. Αυτή η συμπληρωματικότητα τους οδήγησε τους ερευνητές στη προσπάθεια ενοποίησης τους.

Βεβαίως η ενοποίηση αυτή δεν είναι εύκολο να επιτευχθεί για πολλούς λόγους. Ένας λόγος είναι οι διαφορετικές ιδιότητες των δικτύων. Τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας έχουν αναπτυχθεί ξεχωριστά από τα ασύρματα τοπικά δίκτυα. Έτσι η ενοποίηση τους είναι ένα δύσκολο θέμα ως προς τις ιδιότητες κάθε δικτύου. Δηλαδή είναι δύσκολο να περιγραφεί απόλυτα σε ποιο δίκτυο είναι βέλτιστο να εισέλθει κάποιος χρήστης, όπως επίσης δύσκολο είναι να βρεθεί από τη μεριά του δικτύου ποιους χρήστες να δεχθεί και ποιους όχι. Έτσι έχουν προταθεί πολλές παραμετροποιήσεις για να βρεθεί η βέλτιστη κατανομή, μελετώντας τις ιδιότητες των χρηστών και των δικτύων. Για παράδειγμα μία πρόταση είναι η επιλογή δικτύου να γίνεται με βάση τη ταχύτητα με την οποία κινείται ο κάθε χρήστης, την υπηρεσία που αιτείται, τις συνθήκες καναλιού που αντιμετωπίζει σε κάθε δίκτυο κ.ο.κ. Παραμετροποιήσεις μπορεί να υπάρχουν και για το δίκτυο, όπως π.χ. ο αριθμός των πόρων που διαθέτει, ο συνωστισμός των χρηστών στο δίκτυο αυτό κ.ο.κ. Βέβαια όλες αυτές οι προτάσεις δημιουργούν πολιτικές ανάθεσης χρηστών, οι οποίες μπορεί να αποδίδουν, αλλά δεν βασίζονται σε ένα τελείως ενοποιημένο δίκτυο, το οποίο θα περιγράφει με τις ίδιες αρχές και τα δύο συστήματα. Αυτό αποτελεί ακόμα πεδίο έρευνας.

Μια άλλη τεχνική δυσκολία ενοποίησης των δικτύων είναι η υπάρχουσα δομή των δικτύων. Τα δίκτυα κινητών τηλεπικοινωνιών ελέγχονται από εταιρίες, ενώ τα υπάρχοντα τοπικά ασύρματα δίκτυα υπάρχουν σε σπίτια και επιχειρήσεις, ανήκουν δηλαδή σε ιδιώτες. Επομένως η άμεση ενοποίηση αυτών των δικτύων δεν είναι εφικτή, καθώς δεν υπάρχει ενιαίος μηχανισμός ταυτοποίησης των χρηστών ώστε να μπορέσει να υπάρξει και η ανάλογη χρέωση των προσφερόμενων υπηρεσιών. Με τις δεδομένες συνθήκες η λύση θα ήταν οι εταιρίες κινητής τηλεφωνίας να συνάπτουν συμφωνίες με ιδιώτες οι οποίοι θα επιτρέπουν στους πελάτες της κινητής να χρησιμοποιούν πόρους του ασύρματου τοπικού δικτύου. Βεβαίως κάτι τέτοιο είναι αρκετά δύσκολο καθώς τα ασύρματα τοπικά δίκτυα καταλαμβάνουν μικρό χώρο επομένως θα έπρεπε η εταιρία να συνάψει εκατοντάδες συμφωνίες με ιδιώτες που δημιουργούν οικονομοτεχνικά προβλήματα. Μια άλλη λύση θα ήταν η εγκατάσταση σημείων ασύρματης πρόσβασης WLAN των ίδιων των εταιριών, αλλά κάτι τέτοιο απαιτεί περαιτέρω εγκατάσταση εξοπλισμού από τις εταιρίες και υπάρχει επίσης και το πρόβλημα ότι ακόμη και εάν επέτρεπαν τους χρήστες να συνδεθούν μέσω WLAN τελικά η κίνηση αυτή θα περνούσε από το κορμό της (backbone network) οδηγώντας στην υπερφόρτιση των δικτύων αφού δεν είναι σχεδιασμένα για τέτοιο φορτίο κίνησης. Επομένως διαφαίνεται η δυσκολία ενοποίησης των υπαρχόντων δικτύων. Μια λύση πιο εφικτή είναι οι εταιρίες κινητής να υπογράψουν συμφωνίες με τους παρόχους υπηρεσιών πρόσβασης στο διαδίκτυο και να γίνει η εγκατάσταση δικών τους ασυρμάτων τοπικών δικτύων (hotspots) που θα συνδέονται στο δικτυακό κορμό (backbone network) των πάροχων. Έτσι θα μπορούσαν οι εταιρίες να μοιραστούν τους μηχανισμούς ταυτοποίησης και να λυθεί το πρόβλημα. Ήδη πολλές εταιρίες κινητών τηλεπικοινωνιών συνάπτουν συμφωνίες με εταιρίες παρόχων για τη κοινή χρέωση των υπηρεσιών τους στους πελάτες.

Από τα παραπάνω διαφαίνεται και μία πρόσθετη δυσκολία. Η ανάγκη έρευνας της επιστημονικής και επιχειρηματικής κοινότητας ως προς τους δυνατούς τρόπους υλοποίησης και η ανάγκη επενδύσεων των εταιριών σε λογισμικό και τεχνικό εξοπλισμό που θα μπορεί να συνδυαστεί με τον υπάρχοντα εξοπλισμό και θα διαχειρίζεται, ανάμεσα σε άλλα, τα προβλήματα μετάβασης των χρηστών από το ένα δίκτυο στο άλλο δηλαδή τη κάθετη μεταπομπή (vertical handoff), τη ταυτοποίηση των χρηστών που μόλις εισέρχονται στο σύστημα (user login) κοκ.

Σε περίπτωση που αντιμετωπιστούν αυτές οι δυσκολίες τα ενοποιημένα δίκτυα μπορούν να προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα. Το κύριο πλεονέκτημα όπως έχει αναφερθεί είναι η συμπληρωματικότητα των δικτύων. Το δίκτυο της κινητής τηλεπικοινωνίας μπορεί να προσφέρει σύνδεση στο διαδίκτυο σε περιοχές που δε καλύπτονται από πρόσβαση στο διαδίκτυο μέσω ασυρμάτων τοπικών δικτύων. Επίσης μπορεί να αναλάβει φορτίο κίνησης δεδομένων με σκοπό να απαλλάξει από το συνωστισμό (και συνεπώς τη μείωση της ποιότητας των προσφερόμενων υπηρεσιών) ασύρματα δίκτυα που καλύπτουν πολυσύχναστες περιοχές. Τα ίδια μπορούν να προσφέρουν και τα δίκτυα ασύρματης τοπικής πρόσβασης (WLANs). Δηλαδή μπορούν να εγκατασταθούν σε πολυσύχναστες περιοχές με αποτέλεσμα να προσφέρουν αφενός υπηρεσίες που απαιτούν υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης από αυτούς που προσφέρουν τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας και αφετέρου να τραβούν μέρος της κίνησης με σκοπό την αποφόρτιση του δικτύου κινητής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το φορτίο να μοιραστεί καταλλήλως σε κάθε δίκτυο και να συμβεί έτσι η λεγόμενη ισορροπία φορτίου (load balancing).

Πέρα από την ισορροπία φορτίου τα ενοποιημένα δίκτυα μπορούν να προσφέρουν όλες τις σύγχρονες υπηρεσίες διαδικτύου σε ένα μόνο τερματικό. Δηλαδή με το τερματικό αυτό ο χρήστης θα μπορεί να έχει πρόσβαση είτε σε τηλεφωνία (μέσω του δικτύου κινητής η μέσω της υπηρεσίας VoIP), είτε σε πολυμεσικό περιεχόμενο (βίντεο, ήχος, IPTV και άλλες πολυμεσικές υπηρεσίες), είτε απευθείας πρόσβαση στο διαδίκτυο, όπως επίσης και τη δυνατότητα κατεβάσματος (downloading) δεδομένων. Έτσι θα επιτευχθεί η νέα τάση των χρηστών να απολαμβάνουν όλες τις διαθέσιμες υπηρεσίες ανεξάρτητα του δικτύου με το οποίο είναι συνδεδεμένοι και ανεξάρτητα του τερματικού. Επομένως με την ενοποίηση των δικτύων θα επιτευχθεί και η ενοποίηση των υπηρεσιών, απλοποιώντας έτσι τη ζωή των χρηστών. Πλέον ο χρήστης θα μπορεί να απολαμβάνει τις ίδιες υπηρεσίες από οποιοδήποτε τερματικό και εάν συνδεθεί (ηλεκτρονικό ταχυδρομείο, τηλεφωνία κτλ). Όχημα για την εξέλιξη αυτή αποτελεί και η τάση η 4η γενιά των κινητών δικτύων να στηρίζεται αποκλειστικά στο πρωτόκολλο IP (all-IP), ώστε από το IP επίπεδο και πιο πάνω να μην έχει διαφορά το δίκτυο με το οποίο τελικά συνδέεται ο χρήστης.

Συνοψίζοντας η ενοποίηση δικτύων είναι μια πολύ ελκυστική ιδέα τόσο από τους ερευνητές όσο και από τις εταιρίες και τους πελάτες. Εντατική έρευνα συνεχίζεται μέχρι και σήμερα για την εύρεση όσο το δυνατόν πιο αποδοτικού τρόπου συνδυασμού των δικτύων αυτών. Έχουν προταθεί πολλοί τρόποι και η έρευνα επικεντρώνεται στη 4η γενιά της κινητής τηλεφωνίας με την υιοθέτηση του πρωτοκόλλου IP για να διευκολύνει την ενοποίηση. Η ενοποίηση προήλθε σαν ιδέα από τη παρατήρηση ότι οι χρήστες κινητών και υπολογιστών έχουν πλέον πρόσβαση και σε τοπικά ασύρματα δίκτυα και προφανώς στο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας, ενώ πολλές συσκευές προσφέρουν πλέον διεπαφές και για τα δύο δίκτυα (όπως πχ τα smartphones ή οι φορητοί υπολογιστές με την απόκτηση USB διεπαφής για τη σύνδεσή τους με το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας. Επομένως στόχος είναι πια

η εύρεση τρόπου ενοποίησης ώστε οι χρήστες να απολαμβάνουν τα πλεονεκτήματα κάθε δικτύου (καθολική κάλυψη του δικτύου κινητής τηλεπικοινωνίας, υψηλές ταχύτητες των τοπικών ασυρμάτων δικτύων) και τα δίκτυα να αλληλοκαλύπτουν τις αδυναμίες καθενός δικτύου (χαμηλές ταχύτητες των δικτύων κινητής τηλεφωνίας, τοπικά περιορισμένη κάλυψη των τοπικών ασυρμάτων δικτύων).

Από τα παραπάνω προκύπτει η χρησιμότητα της ενοποίησης των δικτύων για τη παροχή βελτιωμένων υπηρεσιών στους χρήστες. Αποτελεί κλειδί για τη παροχή ενιαίων υπηρεσιών (ενωμένων μέσω του διαδικτύου) ανεξαρτήτως του μέσου πρόσβασης σε αυτό. Είναι βέβαιο ότι η ενοποίηση των δικτύων της κινητής τηλεπικοινωνιών με τα ασύρματα τοπικά δίκτυα θα βοηθήσει στη μεγαλύτερη διείσδυση του διαδικτύου στις καθημερινές δραστηριότητες των ανθρώπων.

1.3 Στόχος της παρούσας διπλωματικής

Με τη παρούσα διπλωματική επιδιώκεται η εύρεσης τρόπου διασύνδεσης των δικτύων κινητών τηλεπικοινωνιών βασισμένα σε OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access) με τα ασύρματα τοπικά δίκτυα WLAN (Wireless Local Area Network). Τα ασύρματα τοπικά δίκτυα έχουν αυξημένη παρουσία τα τελευταία χρόνια και οι συσκευές με διεπαφές και για τα δίκτυα κινητών και για τα δίκτυα ασυρμάτων τοπικών δικτύων είναι πλέον οικονομικά συμφέρουσες. Όλα αυτά σε συνδυασμό με την εισαγωγή της τεχνολογίας OFDMA στη 4η γενιά κινητών κυψελών που θα βασίζεται επίσης αποκλειστικά στο πρωτόκολλο IP, κρίνει αναγκαία τη προσπάθεια αποδοτικής ενοποίησης των δικτύων αυτών.

Η διπλωματική αυτή στοχεύει στην επέκταση δημοσίευσης από τους Γ. Αριστομενόπουλο, Τ. Καστρινογιάννη και Σ. Παπαβασιλείου [14]. Σε αυτή τη δημοσίευση παρουσιάστηκε μια μεθοδολογία βέλτιστης ανάθεσης χρηστών και διαμοιρασμού πόρων σε ένα ετερογενές ενοποιημένο σύστημα CDMA/WLAN, με βάση κοινή συνάρτηση χρησιμοποίησης που περιγράφει την ευχαρίστηση των χρηστών ανάλογα με τους πόρους που τους διατίθεται από κάθε δίκτυο. Η λύση του προβλήματος έγινε με τη χρήση της θεωρίας βελτιστοποίησης. Η διπλωματική αυτή επεκτείνει λοιπόν τη δημοσίευση, με την εισαγωγή ενός νέου τύπου δικτύου, το OFDMA, που όπως έχει αναφερθεί θα αντικαταστήσει τα συστήματα κυψελών CDMA στη 4η γενιά των συστημάτων κινητών τηλεπικοινωνιών σύμφωνα με το πρότυπο LTE-Advanced.

Επομένως με τη παρούσα διπλωματική επιχειρείται η κατανόηση της παραπάνω δημοσίευσης, η αναζήτηση και κατανόηση αλγορίθμων κατανομής πόρων των OFDMA δικτύων, η εύρεση αλγορίθμου που θα είναι προσαρμόσιμος με τον αλγόριθμο κατανομής πόρων στα ασύρματα τοπικά δίκτυα που υιοθετήθηκε στη δημοσίευση και τελικά η ενοποίηση των αλγορίθμων και η εξαγωγή συμπερασμάτων όσον αφορά την απόδοση των συνδεδεμένων ετερογενών συστημάτων.

2 Ενοποιημένα Δίκτυα (Joint Networks)

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο στη σημερινή εποχή οι ασύρματες επικοινωνίες (wireless communications) έχουν γνωρίσει σημαντική ανάπτυξη κυρίως λόγω του κόστους επικοινωνίας που ολοένα και μειώνεται καθώς και της ευκολίας εγκατάστασης τους και συντήρησής τους. Αντίθετα, οι αυξανόμενες απαιτήσεις των καταναλωτών για επικοινωνία και η έλλειψη απεριόριστου φάσματος απαιτούν την δημιουργία ενοποιημένων συστημάτων που θα είναι ικανά να παράσχουν υπηρεσίες πολλών ειδών (φωνή, δεδομένα, βίντεο κτλ).

Στη διάρκεια των ετών προτάθηκαν και πέρασαν σε εμπορική διαθεσιμότητα αρκετά πρότυπα ασυρμάτων επικοινωνιών τα οποία στόχευαν σε διαφορετικές υπηρεσίες. Έτσι τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας στόχευαν κυρίως στη παροχή υπηρεσιών τηλεφωνίας, ενώ τα ασύρματα δίκτυα υπολογιστών στόχευαν στη παροχή μεταφοράς δεδομένων. Να σημειωθεί ότι τα επικρατέστερα στη σημερινή εποχή ασύρματα δίκτυα υπολογιστών είναι το ευρέως διαδεδομένο πρότυπο wireless LAN (WLAN) βασισμένο στο πρότυπο 802.11 το IEEE και το όχι και τόσο διαδεδομένο στην ελληνική αγορά WiMAX (ονομαζόμενο επίσημα από το IEEE Wireless MAN και είναι βασισμένο στο πρότυπο 802.16).

Όμως τα δίκτυα αυτά παρόλο που συνυπάρχουν στον ίδιο χώρο είναι μεταξύ τους 'ξένα' υπό την έννοια ότι δεν υπάρχει μεταξύ τους επικοινωνία και διαμοιρασμός χρηστών. Όμως η συμπληρωματικότητα των δικτύων, όπως έχει αναφερθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο, καθιστά την ιδέα της κοινής χρησιμοποίησης τους δελεαστική. Προς αυτό το σκοπό υπάρχουν πολλές δημοσιεύσεις ερευνητών με προτεινόμενους τρόπους υλοποίησης της κοινής χρήσης των δικτύων. Βάση όλων των ερευνών αποτελεί η ιδέα ενός τερματικού με δυνατότητα σύνδεσης στα διαφορετικά αυτά δίκτυα. Παρακάτω θα παραθέσουμε βασικές προτάσεις ενοποίησης των δικτύων κινητής τηλεφωνίας με τα ασύρματα τοπικά δίκτυα.

Μέχρι στιγμής οι τρόποι ενοποίησης που έχουν προταθεί είναι στο επίπεδο IP (Internet Protocol) και στο επίπεδο MAC (Medium Access Control). Η κάθε πρόταση συνοδεύεται από τα πλεονεκτήματά της και τα μειονεκτήματά της. Στα παρακάτω υποκεφάλαια θα παρουσιάσουμε συνοπτικά κάποιες από τις προτάσεις ενοποίησης, το σκεπτικό πίσω από αυτές, πως υλοποιούνται, τι πλεονεκτήματα προσφέρουν και ποιες είναι οι αδυναμίες τους.

2.1 Ενοποίηση στο επίπεδο IP

Η ενοποίηση στο επίπεδο IP συμβαδίζει με τη σύγχρονη τάση όλα τα υπάρχοντα δίκτυα να ενωθούν με το διαδίκτυο για τη δημιουργία ενός ενιαίου παγκόσμιου δικτύου επικοινωνίας. Αυτό διαφαίνεται, όπως έχει αναφερθεί, και από τις προτάσεις ώστε η 4η γενιά κυψελωτών κινητών επικοινωνιών να βασίζεται στο πρωτόκολλο IP (all-IP). Η ενοποίηση στο επίπεδο IP προτάθηκε καθώς θα προσφέρει διαφάνεια (transparecy) στο διαδίκτυο. Όλες οι υπηρεσίες διαδικτύου κατ' αυτόν το τρόπο θα μπορούν να επικοινωνούν απρόσκοπτα με οποιοδήποτε τερματικό ή δίκτυο βάσει της διεύθυνσης IP που του αντιστοιχεί και ανεξαρτήτως της υλοποίησης των κατωτέρων του IP στρωμάτων. Το πλεονέκτημα σε αυτό το τρόπο είναι ότι το πρωτόκολλο IP έχει φτάσει σε ένα βαθμό

ωριμότητας που του δίνει τη δυνατότητα εισαγωγής διαφόρων υπηρεσιών (QoS) με μεγάλη ευκολία. Επίσης το διαδίκτυο έχει φανεί ότι προσαρμόζεται καλύτερα στις ολοένα και αυξανόμενες απαιτήσεις των χρηστών, απ' ότι άλλα δίκτυα, όπως το δίκτυο κινητών τηλεπικοινωνιών, οι δορυφορικές επικοινωνίες κτλ. Παρακάτω παραθέτουμε πρωτόκολλα που προτάθηκαν ώστε να ενισχύσουν το πρωτόκολλο IP προς τη κατεύθυνση ενοποίησης όλων των δικτύων στο επίπεδο IP.

2.1.1 Επέκταση του πρωτοκόλλου IPv4 με το πρωτόκολλο Mobile IP (MIP)

Το πρωτόκολλο Mobile IP (MIP) είναι ένα πρωτόκολλο της Ομάδα Έργου Μηχανίκευσης Διαδικτύου (Internet Engineering Task Force, IETF) [15] που σχεδιάστηκε ώστε να υπάρχει η δυνατότητα στους χρήστες κινητών συσκευών μετακίνησης σε διαφορετικά δίκτυα, διατηρώντας παράλληλα μία μόνιμη διεύθυνση IP. Το πρώτο κείμενο που περιγράφει και επιτρέπει την κινητικότητα στο επίπεδο IP είναι στο RFC 2002 [16]. Έπειτα αναφέρθηκε ρητά στο RFC 3220 [17] τον Ιανουάριο του 2002 και άλλαξε στο RFC 3344 [18]. Τέλος ανανεώθηκε με το RFC 4721 [19]. Για το καινούργιο πρωτόκολλο IPv6, η αντίστοιχη υλοποίηση Mobile IPv6 περιγράφεται στο RFC 3775 [20].

Το πρωτόκολλο αυτό επιτρέπει τη δρομολόγηση των IP δεδομενογραμμάτων (datagrams) ανεξαρτήτως της τοποθεσίας του χρήστη. Κάθε κινητό τερματικό αναγνωρίζεται από την πάτρια διεύθυνση (home address) ασχέτως της τρέχουσας θέσης του στο διαδίκτυο. Όταν ο χρήστης είναι μακριά από τη πάτρια διεύθυνση, του ανατίθεται μία διεύθυνση φροντίδας (care-of address) με την οποία αναγνωρίζεται η τρέχουσα θέση του. Έπειτα αυτή η διεύθυνση χρησιμοποιείται για να συνδεθεί μέσω τούνελ (tunnel) στο πάτριο πράκτορα (home agent). Το πρωτόκολλο Mobile IP καθορίζει πώς το κινητό τερματικό καταχωρίζεται στο πάτριο πράκτορα και πως αυτός δρομολογεί τα δεδομενογράμματα στο κινητό τερματικό μέσω του τούνελ αυτού.

Το πρωτόκολλο αυτό παρέχει ένα αποδοτικό, κλιμακοθετήσιμο (scalable) μηχανισμό για τη περιαγωγή του χρήστη στο διαδίκτυο. Με το MIP, τα τερματικά, μπορούν να αλλάξουν το σημείο προσάρτησης (point-of-attachment) τους στο διαδίκτυο χωρίς να χρειαστεί να αλλάξουν τη πάτρια IP διεύθυνσή τους (home IP address). Αυτό τους επιτρέπει να διατηρούν το στρώμα μεταφοράς (και υψηλότερα στρώματα), κατά τη διάρκεια της περιαγωγής τους. Η κινητικότητα των χρηστών πραγματοποιείται χωρίς την ανάγκη διάδοσης διαδρομών του ξένιου δικτύου (host-specific routes).

Το πρωτόκολλο αυτό βρίσκει εφαρμογή τόσο σε ενσύρματα όσο και σε ασύρματα περιβάλλοντα όπου οι χρήστες πρέπει να χρησιμοποιούν τις κινητές συσκευές τους μεταξύ πολλαπλών LAN υποδικτύων. Παράδειγμα αποτελούν περιβάλλοντα όπου υπάρχουν επικαλυπτόμενα ασύρματα δίκτυα, όπως WLAN, WiMAX και DVB [21]. Προς το παρόν δεν απαιτείται η ύπαρξη του πρωτοκόλλου για τη περιαγωγή χρηστών ανάμεσα σε κυψέλες κινητής τηλεπικοινωνίας, καθώς τα συστήματα αυτά έχουν δικά τους συστήματα μεταπομπής σε επίπεδο στρώματος ζεύξης δεδομένων (data link layer handover). Όμως χρησιμοποιείται συχνά για τη δυνατότητα κινητικότητας των χρηστών σε διαφορετικούς τομείς κόμβων εξυπηρέτησης πακέτων δεδομένων (Packet Data Serving Node domains), π.χ σε διαφορετικούς παρόχους. Επιτρέπει συνεπώς την κάθετη μεταπομπή (vertical handoff) μεταξύ διαφορετικών δικτύων, γεγονός άκρως απαραίτητο για το όραμα των ενοποιημένων

ετερογενών δικτύων.

Το πρωτόκολλο MIP λειτουργεί ως εξής. Κάθε κινητό τερματικό μπορεί να έχει δύο διευθύνσεις, μία μόνιμη πάτρια διεύθυνση (permanent home address) και μια διεύθυνση φροντίδας (care-of-address, CoA) η οποία σχετίζεται με το δίκτυο όπου βρίσκεται το τερματικό. Δύο οντότητες αποτελούν την εφαρμογή του MIP:

1. Ο πάτριος πράκτορας (home agent), όπου αποθηκεύονται πληροφορίες σχετικά με κινητά τερματικά που η μόνιμη πάτρια διεύθυνση (permanent home address) βρίσκεται στο δίκτυο του πάτριου πράκτορα.
2. Ο ξένος πράκτορας (foreign agent), όπου αποθηκεύονται πληροφορίες σχετικά με κινητά τερματικά που επισκέπτονται το δίκτυο. Αυτοί ανακοινώνουν την care-of address που χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο MIP.

Ένα τερματικό που θέλει να επικοινωνήσει με το κινητό τερματικό χρησιμοποιεί τη μόνιμη πάτρια διεύθυνση (permanent home address) σαν τη διεύθυνση παραλήπτη (destination address) των πακέτων που στέλνει. Επειδή η πάτρια διεύθυνση ανήκει στο δίκτυο συσχετισμένο με το πάτριο πράκτορα, οι συνηθισμένοι μηχανισμοί δρομολόγησης, προωθούν τα πακέτα στο πάτριο πράκτορα. Έπειτα ο πάτριος πράκτορας επαναπροωθεί αυτά τα πακέτα στο ξένο πράκτορα μέσω ενός τούνελ IP όπου το δεδομένογράμμα ενθυλακώνεται με μια καινούργια IP επικεφαλίδα (IP header) χρησιμοποιώντας τη διεύθυνση φροντίδας (care-of address).

Όταν το κινητό τερματικό στέλνει πακέτα, τα στέλνει απευθείας στο άλλο τερματικό μέσω του ξένου πράκτορα, χωρίς να στέλνει τα πακέτα στο πάτριο πράκτορα, χρησιμοποιώντας τη μόνιμη πάτρια διεύθυνση του παραλήπτη. Αυτή η μέθοδος είναι γνωστή σα τριγωνική δρομολόγηση (triangular routing). Εάν χρειαστεί ο ξένος πράκτορας μπορεί να υλοποιήσει αντίστροφη σηράγωση (reverse tunneling) και να προωθήσει τα πακέτα στο πάτριο πράκτορα (home agent), όπου αυτός με τη σειρά του θα τα προωθήσει στο παραλήπτη.

Το πρωτόκολλο Mobile IP ορίζει τα ακόλουθα:

- Μια διαδικασία πιστοποιημένης εγγραφής (authenticated registration procedure), στην οποία το κινητό τερματικό ενημερώνει το πάτριο πράκτορα (home agent) την διεύθυνση φροντίδας (care-of address) που του αντιστοιχεί.
- Μία επέκταση του (ICMP Router Discovery), η οποία επιτρέπει τα κινητά τερματικά να ανακαλύπτει τους υποψήφιους πάτριους και ξένους πράκτορες (home, foreign agents)
- Κανόνες δρομολόγησης πακέτων από και προς τα κινητά τερματικά, περιλαμβανομένου του καθορισμού ενός υποχρεωτικού μηχανισμού συράγωσης και διαφόρων προαιρετικών μηχανισμών συράγωσης.

2.1.2 Επέκταση του πρωτοκόλλου IPv6 με το πρωτόκολλο Mobile IPv6 (MIPv6)

Φυσικά η έρευνα συνεχίζεται για την υποστήριξη κινητότητας των τερματικών σε επίπεδο IP, και για το καινούργιας γενιάς IPv6. Βελτιώσεις έχουν προταθεί όπως το Mobile IPv6 και το Hierarchical Mobile IPv6 (HMIPv6). Στόχος τους είναι η βελτιστοποίηση των κινητών τηλεπικοινωνιών κάνοντας τη διαδικασία πιο ασφαλή και αποδοτική.

Οι αλλαγές που προτείνουν για την τροποποίηση του IPv6 για το Mobile IPv6 είναι:

- Ένα σύνολο επιλογών κινητότητας που περιλαμβάνονται στα μηνύματα κινητότητας (mobility messages)
- Μια καινούργια επιλογή πάτριας διεύθυνσης (home address) για την επικεφαλίδα Επιλογών Προορισμού (Destination Options header)
- Μια καινούργια επικεφαλίδα δρομολόγησης τύπου 2 (Type 2 Routing header)
- Καινούργιο πρωτόκολλο μηνυμάτων ελέγχου διαδικτύου (Internet Control Message Protocol ICMPv6), ώστε να ανακαλύπτεται το σύνολο των πάτριων πρακτόρων (home agents) και να αποκτείται το πρόθεμα της οικίας ζεύξης.
- Αλλαγές στα μηνύματα και στις επιλογές ανακάλυψης δρομολογητών (router discovery messages and options) και επιπρόσθετες επιλογές ανακάλυψης γειτόνων (Neighbor Discovery options)

Επίσης αξίζει να αναφερθεί ότι και έρευνες γίνονται ώστε να υπάρξει η δυνατότητα κινητότητας ολόκληρων υποδικτύων με υποστήριξη από το πρωτόκολλο MIPv6. Ένα παράδειγμα αποτελεί η Κινητότητα Δικτύων (Network Mobility NEMO). Για το σκοπό αυτό υπάρχει το Πρωτόκολλο Βασικής Υποστήριξης Κινητότητας Δικτύων (Network Mobility Basic Support Protocol), το οποίο υποστηρίζει τη κινητότητα ολόκληρων Κινητών Δικτύων και τη πρόσδεσή τους σε διαφορετικά σημεία του Διαδικτύου. Το πρωτόκολλο αυτό είναι επέκταση του MIPv6 και υποστηρίζει συνέχεια της συνεδρίας (session continuity) για κάθε κόμβο του Κινητού Δικτύου καθώς το δίκτυο κινείται [22].

2.2 Ενοποίηση στο επίπεδο MAC

Πολλές έρευνες έχουν γίνει για την ενοποίηση των διαφορετικών δικτύων σε χαμηλότερο επίπεδο από το επίπεδο IP. Οι προσπάθειες επικεντρώνονται στο επίπεδο MAC (Medium Access Control), ώστε να επιτευχθεί καλύτερη αξιοποίηση των πόρων κάθε δικτύου. Πάνω σε αυτό το σκοπό οι ερευνητές έχουν προτείνει πολλούς δυνατούς τρόπους. Παρακάτω αναφέρουμε περιληπτικά κάποιες προσεγγίσεις των ερευνητών που είναι ενδεικτικές.

2.2.1 Ενοποίηση δικτύων με διαμοιρασμό της κίνησης

Η ερευνητική ομάδα του J.Luo στη δημοσίευση [23], παρουσιάζουν τη πρόταση τους σχετικά με το κοινό διαχειρισμό των πόρων (joint radio resource management). Με στόχο τη βελτιστοποίηση της χρήσης των (περιορισμένων) πόρων κάθε δικτύου, προτείνουν ένα κοινό μηχανισμό προγραμματισμού (joint scheduling mechanism), σκοπός του οποίου είναι να επιτρέπει το διαμοιρασμό της κίνησης κάθε χρήστη σε ισχυρά συνδεδεμένα¹ (tightly coupled) δίκτυα ασύρματης πρόσβασης σε συνδυασμό με μία προσέγγιση πολυεστίασης των χρηστών στα (διαφορετικού τύπου) ασύρματα δίκτυα (radio multihoming

¹ Ως ισχυρά συνδεδεμένα ορίζονται τα δίκτυα τα οποία μοιράζονται το ίδιο δίκτυο πυρήνα (core network) και είναι διασυνδεδεμένα μεταξύ τους. Αντίστοιχα ως ασθενώς συνδεδεμένα (loose coupling) ορίζονται τα δίκτυα που χρειάζονται πυλαίο κόμβο (gateway node) για να συντονίζονται τα εμπλεκόμενα υποδίκτυα.

approach).

Ο διαμοιρασμός της κίνησης λαμβάνουν υπόψη τους περιορισμούς και τα πλεονεκτήματα κάθε εμπλεκόμενου δικτύου. Για παράδειγμα ας θεωρήσουμε μια μετάδοση οπτικοακουστικού περιεχομένου (video). Η κίνηση αυτή μπορεί να χωριστεί σε βασικό στρώμα (base layer) και σε στρώματα βελτίωσης (enhancement layers). Έτσι η κίνηση που παρέχει το βασικό στρώμα μπορεί να μεταδίδεται από το δίκτυο 3G, και τα υπόλοιπα από τα ασύρματα δίκτυα WLAN εάν υπάρχουν. Με αυτό το τρόπο ένας χρήστης μπορεί να εξασφαλίσει υπηρεσία ελάχιστης ποιότητας (θεωρούμε ότι πάντα καλύπτεται από δίκτυο 3G) και ταυτόχρονα να απολαμβάνει βελτιωμένη ποιότητα εάν βρίσκεται υπό τη κάλυψη άλλων δικτύων.

Τρία σημεία καλύπτονται από τη πολυεστίαση (radio multihoming):

- Προτεραιοποίηση (prioritization) και διαμοιρασμός (splitting) της κίνησης. Η εισερχόμενη κίνηση διαμοιράζεται σε δύο (ή περισσότερα) υπορρέυματα (substreams). Οι σημαντικότερες πληροφορίες διαδίδονται μέσω αξιόπιστης ασύρματης ζεύξης (συνήθως χαμηλού ρυθμού) και οι υπόλοιπες από τα υπόλοιπα παρόντα δίκτυα.
- Συγχρονισμός (Synchronization). Τα πακέτα που ανήκουν σε κάθε υπόρρευμα ενώνονται στην αρχική κίνηση (original traffic) στο τερματικό δέκτη, σύμφωνα με το προτεινόμενο στη μελέτη σχήμα συγχρονισμού.
- Διαχείριση καταχωρητών (buffers). Το τρέμουλο φάσης (jitter) και η μέση καθυστέρηση ελέγχονται από το μέγεθος του καταχωρητή και τη εκάστοτε προσέγγιση συγχρονισμού. Το κάθε δίκτυο στο οποίο ανήκει το τερματικό καθορίζει την ισχύ και το μέγεθος του καταχωρητή ανάλογα με το είδος του χρήστη και τη ποιότητα του δικτύου που απολαμβάνει. Οι διάφοροι μέθοδοι συγχρονισμού αντιμετωπίζουν κυρίως τη μέση καθυστέρηση και οι καταχωρητές το τρέμουλο φάσης (jitter).

Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1 ας υποθέσουμε ότι ένα τερματικό αιτείται μια κλιμακοθετούμενη (scalable) υπηρεσία οπτικοακουστικού περιεχομένου. Για να είναι δυνατή η ύπαρξη ταυτόχρονων υπορρευμάτων δεδομένων η ακόλουθη διαδικασία πρέπει να ακολουθηθεί:

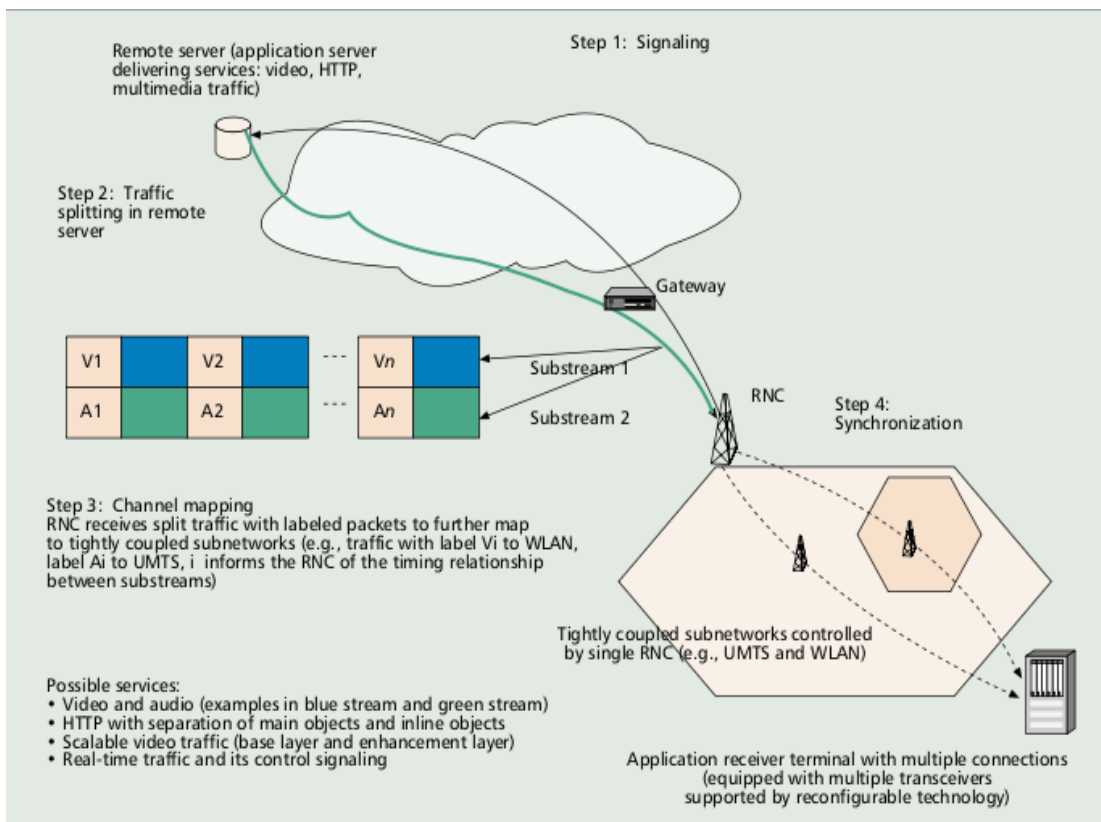
Βήμα 1: Το σύστημα δέχεται την αίτηση ενός κινητού τερματικού (Mobile Terminal MT) με πολλαπλή πρόσβαση σε διαφορετικά υποδίκτυα ισχυρώς συνδεδεμένα. Αφού γίνει εκτίμηση των διαθέσιμων πόρων κάθε υποδικτύου, το σύστημα αιτείται του απομακρυσμένου εξυπηρετητή το διαμοιρασμό της κίνησης ανάλογα με το μέσο ρυθμό κάθε υποδικτύου που είναι διαθέσιμο στο χρήστη.

Βήμα 2: Η κίνηση διαμοιράζεται από τον εξυπηρετητή σύμφωνα με τις υποδείξεις του συστήματος και δέχονται ετικέτες (labels) σχετικά με τη χρονική σχέση των υπορρευμάτων, και στέλνεται σε αυτό.

Βήμα 3: Το σύστημα αναθέτει τα υπορρέυματα που δημιουργήθηκαν στα αντίστοιχα υποδίκτυα, όπου και φτάνουν τελικά στο δέκτη. Η διαδικασία αυτή μπορεί να εφαρμοστεί σε:

- Υπορρεύματα εικόνας και ήχου
- Ιστοσελίδες με διαχωρισμό των κυρίων αντικειμένων (main objects) και των inline αντικειμένων.
- Κλιμακοθετούμενη κίνηση οπτικοακουστικού περιεχομένου(base and enhancement layers)
- Κίνηση πραγματικού χρόνου (Real-time) και σηματοδοσίας ελέγχου.

Βήμα 4: Ο μηχανισμός συγχρονισμού είναι κρίσιμης σημασίας ώστε να αντιμετωπιστούν τα φαινόμενα διαφορετικής καθυστέρησης, των διαφορετικών τύπων ασύρματων δικτύων πρόσβασης που οφείλονται μεταξύ άλλων σε διαφορετικούς μηχανισμούς Αίτησης Αυτόματης Επανάληψης (Automatic Repeat reQuest ARQ) λόγω διαφορετικής ποιότητας των δικτύων.



Σχήμα 2.1: Περίληψη διαχωρισμού κίνησης σε ισχυρά συνδεδεμένα υποδίκτυα. (πηγή [23]).

Το μειονέκτημα είναι ότι ο μηχανισμός αυτός κοινής αξιοποίησης των διαφόρων ασυρμάτων δικτύων πρόσβασης στηρίζεται σε ένα αυστηρό μηχανισμό συγχρονισμού, η αποτυχία του οποίου οδηγεί σε υποβάθμιση των υπηρεσιών και της αξιοποίησης του συνόλου των δικτύων. Επίσης μπορεί να είναι ιδιαίτερα δύσκολη η υλοποίηση του συγχρονισμού αυτού σε πραγματικές συνθήκες.

2.2.2 Ενοποίηση δικτύων με κοινό μηχανισμό επιλογής δικτύου

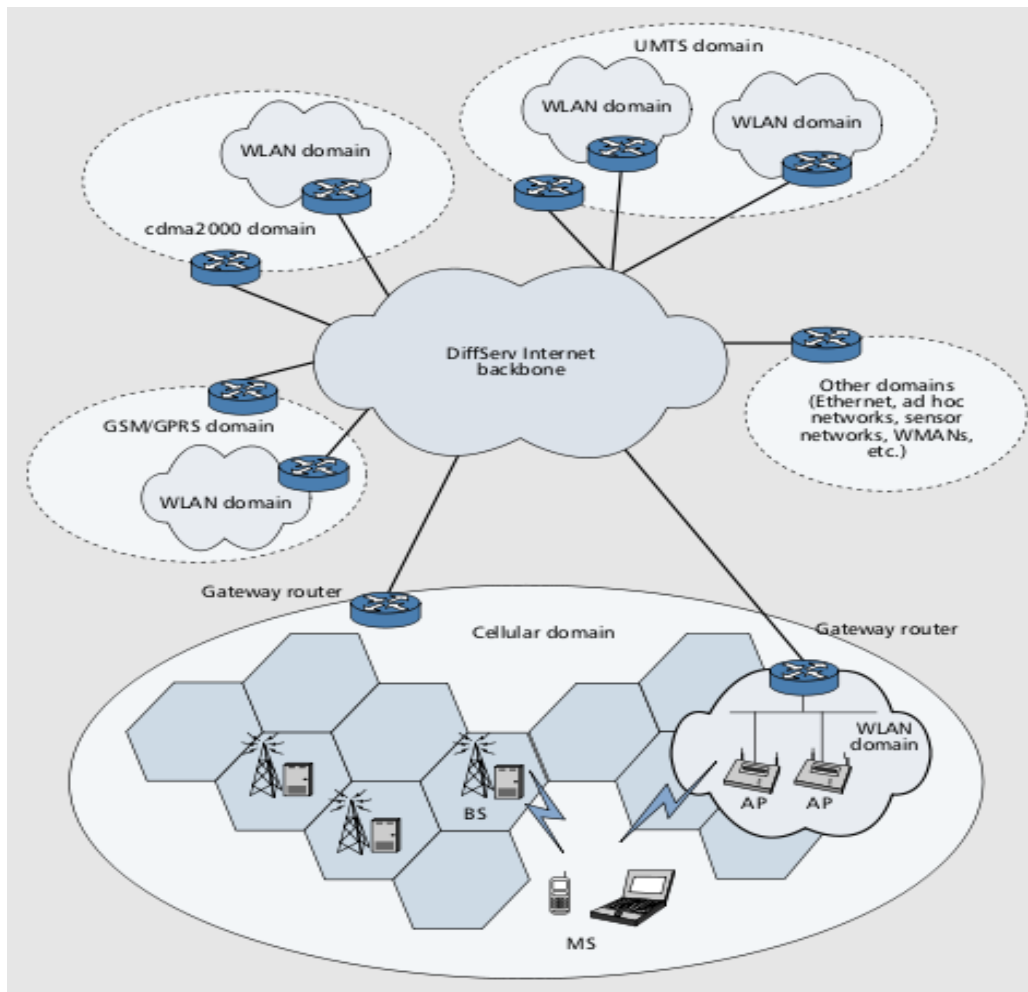
Οι περισσότερες προσπάθειες ενοποίησης έχουν γίνει στη βάση ενός κοινού μηχανισμού επιλογής δικτύου. Δηλαδή επιδιώκουν την δημιουργία πολιτικών ανάθεσης βάσει των οποίων η ανάθεση των χρηστών θα γίνεται κατά βέλτιστο τρόπο σύμφωνα με τις ιδιότητες και ικανότητες κάθε δικτύου καθώς και τις απαιτήσεις που έχει ο κάθε χρήστης. Πολλές προσπάθειες έχουν γίνει ως προς την εύρεση των στοιχείων που θα χαρακτηρίζουν τόσο το χρήστη (QoS που αιτείται, ποιότητα του σήματος που λαμβάνει από κάθε δίκτυο, σχετική ταχύτητα του από τους σταθμούς βάσης κτλ) όσο και το κάθε δίκτυο (εύρος φάσματος που διαθέτει, ισχύς, συνωστισμός χρηστών) και την επίδραση που έχουν ως προς τη βέλτιστη επιλογή δικτύου. Παρακάτω αναφέρονται κάποιες προτάσεις ερευνητών.

2.2.2.1 Ενοποίηση δικτύων με βάση τη ποιότητα των υπηρεσιών (QoS)

Τα δίκτυα κινητής τηλεπικοινωνίας και τα ασύρματα τοπικά δίκτυα σχεδιάστηκαν ώστε να εξυπηρετούν διαφορετικού τύπου υπηρεσίες (QoS). Η κινητή τηλεφωνία σχεδιάστηκε με σκοπό τη παροχή υπηρεσιών τηλεφωνίας. Δηλαδή στόχος είναι η παροχή στο χρήστη μικρού ρυθμού μετάδοσης (της τάξης των kbps) αλλά με αυστηρές απαιτήσεις στη καθυστέρηση (delay) και στη μεταβολή του ρυθμού μετάδοσης, απαραίτητο για τη μετάδοση ποιοτικών υπηρεσιών ηχητικών δεδομένων. Από την άλλη τα δίκτυα WLAN σχεδιάστηκαν έχοντας κατά νου δίκτυα υπολογιστών και την εξυπηρέτηση εκρηκτικής κίνησης δεδομένων (bursty data traffic) υψηλού ρυθμού μετάδοσης με μεγάλη ανεκτικότητα στη καθυστέρηση (delay), και τη μεταβολή του ρυθμού μετάδοσης.

Έτσι στη δημοσίευση [24], οι ερευνητές εισάγουν μία αρχιτεκτονική βασισμένη στις διαφοροποιημένες υπηρεσίες (Differentiated Services DiffServ) και στην ασθενή διασύνδεση (loose coupling) μεταξύ του δικτύου κινητής τηλεπικοινωνίας και του δικτύου WLAN. Ένα σχεδιάγραμμα της λειτουργίας φαίνεται στο σχήμα 2.2.

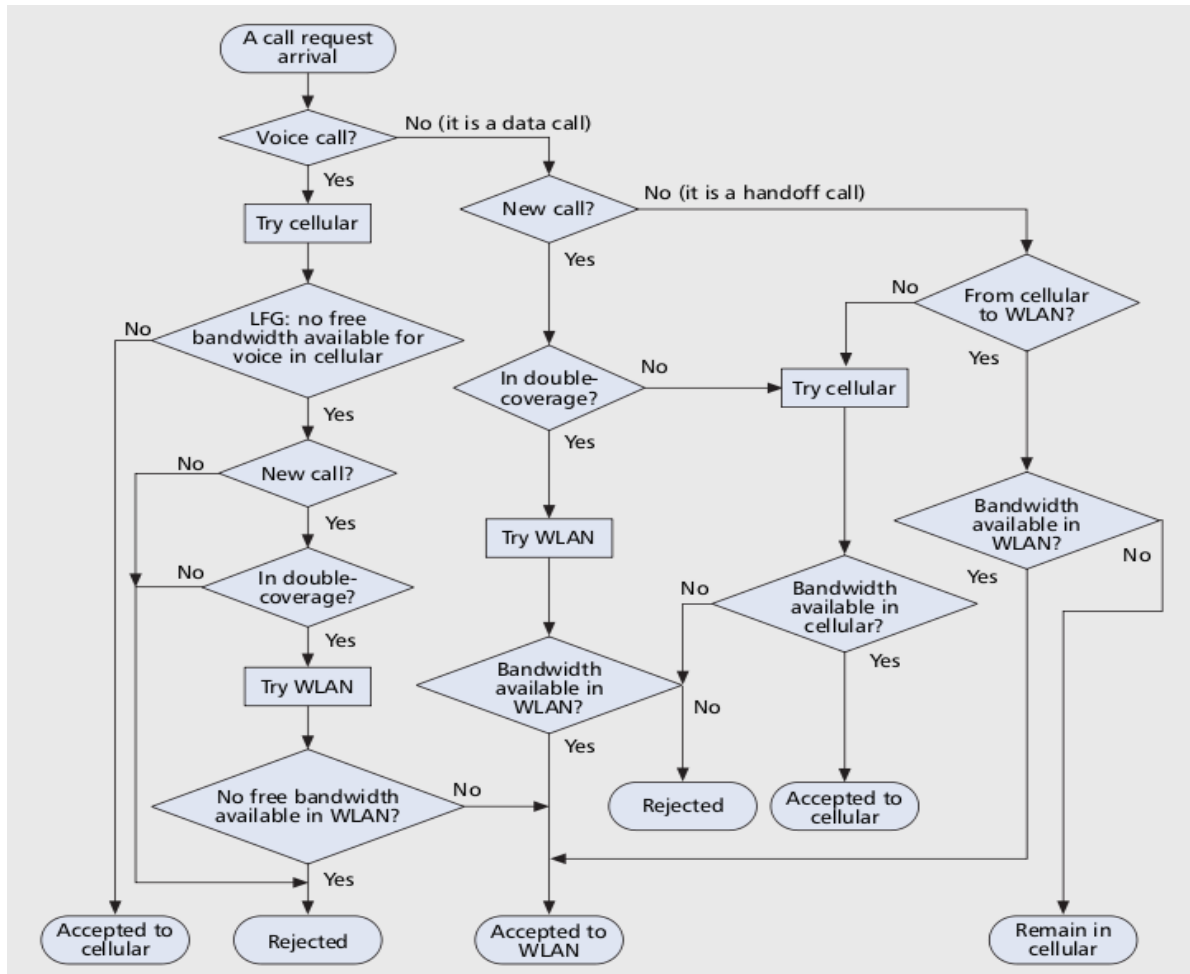
Παρατηρούμε ότι ο λόγος επιλογής της ασθενούς διασύνδεσης είναι το γεγονός ότι το δίκτυο πυρήνα (core network) της κινητής τηλεφωνίας δύσκολα θα μπορούσε να υποστηρίξει και τα δεδομένα των δικτύων WLAN που προορίζονται έτσι και αλλιώς για το Διαδίκτυο. Εξάλλου η στήριξη στην αρχιτεκτονική μιας ραχοκοκαλιάς DiffServ (DiffServ backbone) στο Διαδίκτυο (σε IP επίπεδο) παρουσιάζει ισχυρές βάσεις διασύνδεσης των δικτύων.



Σχήμα 2.2: Ασθενώς συνδεδεμένα δίκτυα κινητής/WLAN με βάση τη πλατφόρμα DiffServ.(πηγή [24])

Οι ερευνητές πρότειναν ένα αλγόριθμο ελέγχου αποδοχής κλήσης (call admission control) με στόχο την εξυπηρέτηση των διαφόρων τύπων υπηρεσιών. Έτσι αιτήσεις τηλεφωνίας προωθούνται κυρίως στο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας και εάν δεν υπάρχουν διαθέσιμοι πόροι η κλήση κατευθύνεται στο δίκτυο WLAN εάν είναι διαθέσιμο. Ομοίως οι αιτήσεις μεταφοράς δεδομένων κατευθύνονται στο δίκτυο WLAN εάν είναι διαθέσιμο, εκτός και εάν δεν υπάρχουν διαθέσιμοι πόροι οπότε και κατευθύνεται στο δίκτυο κινητής. Ο αλγόριθμος φαίνεται στο σχήμα 2.3.

Όπως παρατηρούμε στόχος είναι η κατεύθυνση κάθε υπηρεσίας (είτε αυτή είναι τηλεφωνία είτε μεταφορά δεδομένων) στο κατάλληλο δίκτυο, εκτός και εάν αυτό το δίκτυο είναι κατελημμένο και δεν διαθέτει τους απαραίτητους πόρους, οπότε ο χρήστης κατευθύνεται στο εναλλακτικό δίκτυο.



Σχήμα 2.3: Διαδικασία αποδοχής κλήσης σε ασθενώς συνδεδεμένα δίκτυα κινητής/WLAN (πηγή [24]).

2.2.2.2 Ενοποίηση δικτύων με ενοποιημένο έλεγχο αποδοχής συνεδρίας

Πέρα από τις έρευνες για την ενοποιημένη διαχείριση πόρων (joint radio resource management JRRM), έρευνα έχει γίνει και στη βελτιστοποίηση του Ενοποιημένου Ελέγχου Αποδοχής Συνεδρίας (Joint Session Admission Control JSAC), κομμάτι καθοριστικό για τη βελτιστοποίηση των ενοποιημένων δικτύων. Αυτό το θέμα ερευνούν οι F. Yu και V. Krishnamurthy στη δημοσίευση [25]. Στόχος είναι η μεγιστοποίηση του προσόδων (έσοδα, καθώς στη μελέτη σκοπό έχουν την οικονομική μεγιστοποίηση του κέρδους του συστήματος) του συνολικού συστήματος, ικανοποιώντας παράλληλα κάποιους QoS περιορισμούς για τις διάφορες υπηρεσίες. Τα χαρακτηριστικά του JSAC είναι:

- Μπορεί βέλτιστα να ελέγχει την είσοδο ή μη των χρηστών και σε ποιο δίκτυο, και να ελέγχει τη κάθετη μεταπομπή (vertical handoff) ανάμεσα στο δίκτυο CDMA και WLAN.

- Μπορεί να υπολογίζει τα διαφορετικά πρόσδοδα (revenue) κάθε δικτύου, ώστε να υπολογίζει τα συνολικά πρόσδοδα..
- Εισάγεται η έννοια του ενεργού εύρους ζώνης (effective bandwidth) ώστε να υπάρχει μία ενοποιημένη μέτρηση της χρήσης των πόρων (unified radio resource usage).
- Στο στρώμα δικτύου (network layer) του ενοποιημένου συστήματος οι περιορισμοί σχετικά με τη QoS είναι η πιθανότητα αποκλεισμού της συνεδρίας (blocking probability of sessions).

Αυτό το πρόβλημα λοιπόν μοντελοποιείται ως μια διαδικασία αποφάσεων ήμι-Markov (semi-Markov decision process SMDP) και αποφάσεις παίρνονται κάθε φορά που γίνεται είσοδος καινούργιου χρήστη στο σύστημα, ή όταν γίνεται οριζόντια μεταπομπή (vertical handover).

Παρατηρούμε λοιπόν ότι σε αντίθεση με τη προηγούμενη προσέγγιση(2.2.1) εδώ δε γίνεται καταμερισμός των απαιτήσεων των χρηστών στα δύο (ή και περισσότερα) δίκτυα με τέτοιο τρόπο ώστε τα δίκτυα, από κοινού, να συνεργάζονται και να προσφέρουν στο χρήστη πόρους. Σε αυτή τη περίπτωση στόχος των ενοποιημένων δικτύων είναι να βρουν το κατάλληλο δίκτυο για κάθε χρήστη (τη δεδομένη στιγμή) με το οποίο θα είναι συνδεδεμένος. Ο χρήστης αλλάζει δίκτυο μόνο όταν θα είναι βέλτιστο για το συνολικό οικονομικό κέρδος του δικτύου κοκ.

2.2.2.3 Ενοποίηση δικτύων με επιλογή δικτύου με βάση συνάρτηση κόστους

Ένας άλλος τρόπος ενοποίησης που προτείνεται από τους W. Shen και Q. Zeng στη δημοσίευσή τους [26] βασίζεται στην επιλογή δικτύου με βάση μία συνάρτηση κόστους (Cost-Function-Based Network Selection). Το σημείο αναφοράς είναι η απόδοση του συστήματος, που φαίνεται από τη πιθανότητα αποκλεισμού (blocking probability) και τη πιθανότητα αναγκαστικού τερματισμού (forced termination probability) των οριζόντιων και κάθετων μεταπομπών.

Όταν ένας χρήστης μπορεί να έχει πρόσβαση σε παραπάνω από ένα δίκτυα καθορίζεται μία συνάρτηση κόστους που εξαρτάται (με βάρη) από τη κανονικοποιημένη χρησιμοποίηση (normalized utilization) και το κανονικοποιημένο κέρδος καναλιού:

$$C_i = w_g \cdot G_i + w_s \cdot S_i \quad (2.1)$$

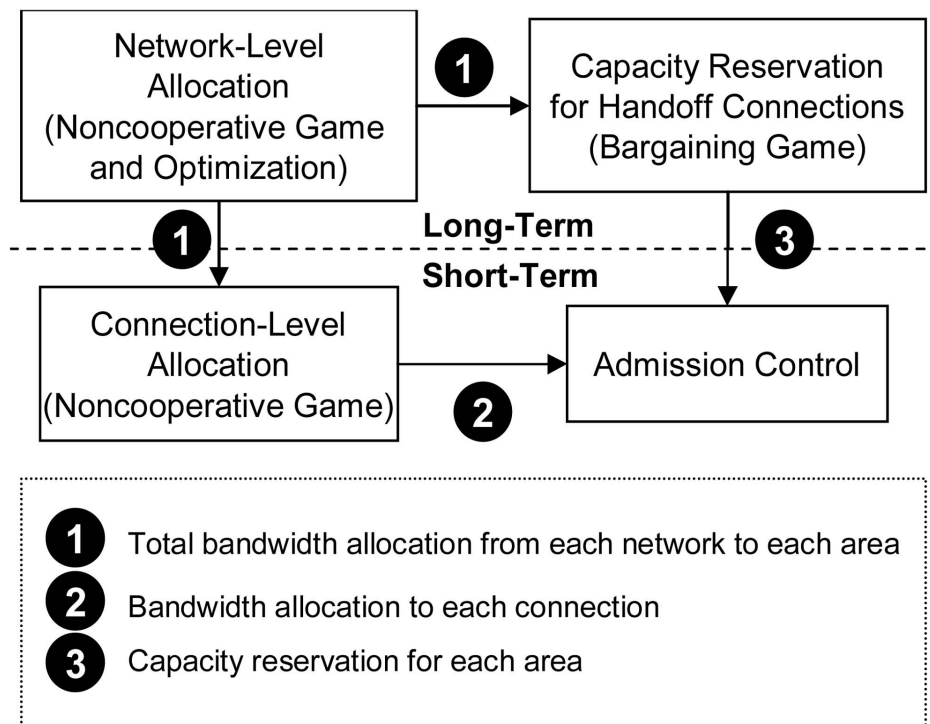
όπου w_g και w_s είναι τα βάρη με άθροισμα τη μονάδα και G_i είναι η κανονικοποιημένη χρησιμοποίηση του δικτύου (λόγος των διαθέσιμων πόρων προς τους συνολικούς πόρους), ενώ το S_i είναι η σχετική λαμβανόμενη ποιότητα του σήματος (relative received signal strength). Η σχέση αυτή μπορεί να επεκταθεί και από άλλους παράγοντες όπως η κοστολόγηση των πόρων.

Με βάση τη παραπάνω σχέση ορίζεται το προτιμώμενο δίκτυο για το χρήστη. Ουσιώδης για αυτή τη σχέση είναι η κανονικοποίηση των τιμών, καθώς τα δίκτυα είναι ανάμοια σε όλα τα μεγέθη. Και αυτό αποτελεί το βασικό μειονέκτημα της μεθόδου, η δυσκολία κανονικοποίησης των διαφόρων μεγεθών που καθορίζουν την επιλογή του

δικτύου.

2.2.2.4 Ενοποίηση δικτύων με βάση την θεωρία παιγνίων

Μια άλλη άποψη πάνω στην ενοποίηση των δικτύων είναι η χρήση της θεωρίας παιγνίων. Αυτό το σκεπτικό στηρίχθηκε στην άποψη ότι τα δίκτυα που καλύπτουν την ίδια περιοχή ανταγωνίζονται ουσιαστικά στην εξυπηρέτηση του πελάτη. Έτσι οι D. Niyato και E. Hossain στη δημοσίευσή τους [27], μοντελοποιούν διάφορες φάσεις της διαδικασίας διαχείρισης πόρων (Radio Resource Management, RRM) με βάση τη θεωρία παιγνίων, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4:



Σχήμα 2.4: Διάγραμμα συνιστωσών του προτεινόμενου RRM (πηγή [27]).

Η ανάθεση πόρων στο επίπεδο δικτύου (Network-Level allocation) έχει ως σκοπό την ανάθεση επαρκών πόρων σε κάθε περιοχή εξυπηρέτησης (service area) κάθε δικτύου, ώστε κάθε περιοχή εξυπηρέτησης να μην επηρεάζεται από ξαφνικές διακυμάνσεις της κίνησης σε άλλες περιοχές εξυπηρέτησης. Γι αυτό το σκοπό καταστρώνεται ένα μη-συνεργατικό παίγνιο (noncooperative game) με παίκτες όλα τα δίκτυα. Έτσι βρίσκεται το σημείο ισορροπίας κατά Nash (Nash equilibrium), με χρήση της μεθόδου συναρτήσεων βέλτιστης απόκρισης (best response function).

Η διαδικασία Κράτησης Πόρων για Συνδέσεις Μεταπομπής (Capacity Reservation for Handoff Connections) αντιμετωπίζεται ως ένα παίγνιο διαπραγμάτευσης (bargaining game) στο οποίο οι διάφοροι τύποι σύνδεσης (αίτηση νέας σύνδεσης, αίτηση οριζόντιας και κάθετης μεταπομπής) διαπραγματεύονται για τη κράτηση πόρων αποκλειστικά για κάθε τύπο σύνδεσης. Με βάση αυτά βρίσκεται η βέλτιστη λύση κατά Pareto (Pareto optimality).

Αυτές οι δύο διαδικασίες γίνονται μακροπρόθεσμα με βάση τις μέσες τιμές, και όχι κάθε στιγμή που παρουσιάζεται καινούργιο συμβάν.

Η ανάθεση πόρων στο επίπεδο σύνδεσης (Connection-Level Bandwidth Allocation) γίνεται κάθε φορά που εισέρχεται χρήστης στη περιοχή κάλυψης και απαιτεί σύνδεση είτε καινούργια είτε λόγω μεταπομπής. Αυτή η φάση μοντελοποιείται ως μη-συνεργατικό παίγνιο (noncooperative game) μεταξύ των διαθέσιμων παρόχων όπου ανταγωνίζονται να προσφέρουν πόρους στο χρήστη, και βρίσκεται το σημείο ισορροπίας κατά Nash. Έτσι ο αλγόριθμος ελέγχου αποδοχής (Admission Control Algorithm) έγκειται απλά στον έλεγχο των προσφερόμενων πόρων από τα διάφορα δίκτυα με τους ζητούμενους πόρους από το χρήστη.

2.2.2.5 Ενοποίηση δικτύων με χρήση της εξελικτικής θεωρίας παιγνίων

Οι D. Niyato και E. Hossain σε μια άλλη δημοσίευσή τους [28], μελετάνε την εφαρμογή της εξελικτικής θεωρίας παιγνίων (evolutionary game theory). Το σκεπτικό τους είναι ότι οι χρήστες ανταγωνίζονται στις περιοχές εξυπηρέτησης για τους πόρους των διαθέσιμων δικτύων. Στη μελέτη προτείνουν δύο αλγόριθμους.

Ο πρώτος βασίζεται στην εξέλιξη του πληθυσμού (population evolution) και απαιτεί ένα κεντρικό ελεγκτή (centralized controller) για να συγκεντρώσει, επεξεργαστεί και να προωθήσει πληροφορίες σχετικά με τους χρήστες. Ο δεύτερος βασίζεται στην εξαναγκασμένη μάθηση (reinforcement learning) των χρηστών και προσαρμόζει την απόφαση κάθε χρήστη στις επιλογές του δικτύου ώστε να φτάσει σε σημείο ισορροπίας χωρίς καμία άλλη επίδραση με τους υπόλοιπους χρήστες. Έτσι ο πρώτος αλγόριθμος μελετά το σύστημα από τη σκοπιά του δικτύου (network-centric) και το σύστημα αποφασίζει για την κατανομή των χρηστών στα δίκτυα και ο δεύτερος από τη σκοπιά του χρήστη (user-centric), όπου ο κάθε χρήστης αποφασίζει το δίκτυο με το οποίο θα συνδεθεί. Για το πρώτο αλγόριθμο χρησιμοποιούνται πληροφορίες από όλους τους χρήστες σε κάθε περιοχή κάλυψης, ενώ από το δεύτερο οι χρήστες πληροφορούνται τις επιδόσεις και το κόστος των διαφόρων δικτύων με αλληλεπίδραση. Η γνώση που αποκτάται από την αλληλεπίδραση χρησιμοποιείται για τη βέλτιστη επιλογή δικτύου ανά χρήστη.

Η αντιμετώπιση των ετερογενών δικτύων γίνεται με τη κατηγοριοποίηση των χρηστών (αντίστοιχα με QoS). Σε κάθε κατηγορία ανατίθεται συγκεκριμένος αριθμός διαθέσιμων πόρων και έτσι οι χρήστες σε διαφορετικές περιοχές εξυπηρέτησης ανταγωνίζονται για τους πόρους αυτούς από τα διάφορα διαθέσιμα δίκτυα. Κάθε χρήστης σταδιακά εξελίσσεται (evolves), δηλαδή αλλάζει δίκτυο όταν το παρατηρούμενο κέρδος του είναι μικρότερο από το μέσο κέρδος των χρηστών στην ομάδα του. Με αυτό το σκεπτικό το σύστημα οδηγείται σε ισορροπία όπου κανένας χρήστης (σε κάθε ομάδα) δε θα έχει όφελος να αλλάξει δίκτυο.

Η επιλογή του δικτύου από το χρήστη γίνεται βάση της συνάρτησης χρησιμοποίησης του που εξαρτάται από τους πόρους που έχουν ανατεθεί στο χρήστη αλλά και το κόστος τους ανά σύνδεση. Έτσι με βάση το εξελικτικό παίγνιο καταγράφεται δυναμικά η επιλογή δικτύου των χρηστών και η δυναμική τους, και φαίνεται η προσαρμογή των χρηστών στις επιλογές τους σύμφωνα με τις επιλογές των υπολοίπων μελών της ομάδας τους.

2.3 Ενοποίηση δικτύων με χρήση αυτονομίας των χρηστών

Ιδιαίτερη αναφορά θα έχει ο τρόπος συνδυασμού των ετερογενών δικτύων CDMA και WLAN που παρουσιάστηκε από τους Γ. Αριστομενόπουλο, Τ. Καστρινογιάννη και Σ. Παπαβασιλείου στη δημοσίευση [14], παρόλο που θα μπορούσε να ενταχθεί στην ενοποίηση χρηστών στο επίπεδο MAC. Στη δημοσίευση αυτή επιχειρείται να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της ενοποίησης των δικτύων με βάση την αυτονομία των χρηστών. Οι χρήστες μπορούν αυτόνομα να υπολογίσουν το 'καλύτερο' δίκτυο για αυτούς, με την έννοια ότι θα είναι περισσότερο ευχαριστημένοι με αυτή την επιλογή τους, με βάση, φυσικά, μια συνάρτηση χρησιμοποίησης. Το εργαλείο για να φτάσουν εκεί είναι η εισαγωγή ενός κοινού πλαισίου βασισμένου σε συναρτήσεις χρησιμοποίησης. Έτσι κάθε χρήστης i αντιστοιχίζεται σε μία κατάλληλη συνάρτηση χρησιμοποίησης U_i , που αντιπροσωπεύει την υπηρεσία που αιτείται και δείχνει το βαθμό ευχαρίστησης του σύμφωνα με το ρυθμό μετάδοσης της κατερχόμενης ζεύξης (downlink transmission rate) R_i , δηλαδή έχουμε:

$$U_i(R_i) \forall i \in \{CDMA \text{ ή } WLAN\} \quad (2.2)$$

Το πρώτο βήμα είναι η βέλτιστη κατανομή πόρων σε κάθε δίκτυο, που επιτυγχάνεται με τη μέθοδο της αποσύνθεσης (decomposition), δηλαδή το κυρίως πρόβλημα βελτιστοποίησης κάθε δικτύου αναλύεται σε υποπροβλήματα ανά χρήστη που λύνονται ανεξάρτητα από τα υποπροβλήματα που αναλογούν στους άλλους χρήστες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η λύση να μπορεί να βρεθεί με τη χρήση δύο βρόχων ελέγχου (control loops), ο ένας που αντιστοιχεί στη βάση ελέγχου και ο άλλος σε κάθε χρήστη.

Με αυτό το τρόπο σε κάθε δίκτυο ξεχωριστά υιοθετείται ένας Αυτόνομος Μηχανισμός Διαχείρισης Πόρων (Autonomic Radio Resource Management mechanism ARRM), με στόχο τη βέλτιστη και ανεξάρτητη κατανομή των διαθέσιμων πόρων κάθε κυψέλης στους συνδεδεμένους χρήστες της. Οι μηχανισμοί που υλοποιούνται για να λυθεί ανεξάρτητα το πρόβλημα ανάθεσης πόρων σε κάθε δίκτυο ξεχωριστά βασίζονται στη κατάστρωση προβλήματος μεγιστοποίησης του αθροίσματος των συναρτήσεων χρησιμοποίησης των χρηστών που είναι συνδεδεμένοι στο σύστημα. Η λύση του προβλήματος αυτού γίνεται με τη χρήση των πολλαπλασιαστών Lagrange (Lagrange multipliers). Επειδή στο πρόβλημα που καταστρώνεται υπάρχει ένας μόνο περιορισμός (θα εξηγηθεί παρακάτω) έχουμε μόνο ένα πολλαπλασιαστή Lagrange του οποίου η τιμή στη βέλτιστη λύση συμβολίζεται ως λ^* . Η τιμή αυτή που στην οικονομική θεωρία ονομάζεται shadow price, ισούται με τη αύξηση στη συνάρτηση προς μεγιστοποίηση που επιφέρει η μοναδιαία αύξηση του περιορισμού. Στο σύστημα που μελετάμε η τιμή λ^* , είναι ενδεικτική του συνωστισμού των χρηστών και των διαθέσιμων πόρων κάθε κυψέλης για την οποία καταστρώνεται το πρόβλημα αυτό. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή λ^* , τόσο μεγαλύτερος είναι ο συνωστισμός των χρηστών και επομένως λιγότεροι οι διαθέσιμοι πόροι.

Στο δεύτερο βήμα, και εκμεταλλευόμενοι τις τιμές λ^* που ο μηχανισμός ARRM υπολογίζει, κάθε χρήστης που εισέρχεται στο σύστημα ή αιτείται οριζόντια ή κάθετη μεταπομπή (horizontal or vertical handover) είναι ικανός να διαλέξει το καταλληλότερο δίκτυο, όπως και τη καταλληλότερη κυψέλη από τις διαθέσιμες στην περιοχή του. Αυτό

επιτυγχάνεται από το βρόχο ελέγχου Αυτόνομης Επιλογής Ενοποιημένου Δικτύου (Autonomic JOint Network Selection AJONS control loop) κάθε χρήστη, ο οποίος χρησιμοποιεί ως κριτήρια πληροφορίες διαθέσιμες τοπικά, τη προσδοκώμενη απόδοση των υπηρεσιών που θα του παράσχουν αναλογικά με τη QoS, και τη συνολική χρησιμοποίηση του κάθε δικτύου. Όλα αυτά θα περιγραφούν στις επόμενες σελίδες.

2.3.1 Αντιμετώπιση κατανομής πόρων στο δίκτυο CDMA

Στα συστήματα CDMA η ανάθεση πόρων σύμφωνα με απαιτήσεις QoS (QoS-aware Resource Allocation) γίνεται με τον έλεγχο της ισχύος. Καθώς το CDMA είναι ευαίσθητο από τη φύση του στις παρεμβολές, σημαντικό ρόλο στην απόδοση του συστήματος παίζει ο λόγος της ενέργειας ανά bit προς τη πυκνότητα παρεμβολών κάθε χρήστη $\gamma_i = E_b/I_o, \forall i \in S_{CDMA}$ (S_{CDMA} είναι το σύνολο των χρηστών CDMA). Θεωρώντας $R_{F,i}$ το σταθερό ρυθμό μετάδοσης κατερχόμενη ζεύξης του χρήστη i , G_i το κέρδος καναλιού κάθε χρήστη και με P_i την ισχύ που του ανατίθεται έχουμε για το λόγο γ_i κάθε χρήστη:

$$\gamma_i(\bar{P}) = \frac{W}{R_{F,i}} \frac{G_i P_i}{\theta G_i \sum_{j=1}^N P_j - \theta G_i P_i + I_i} = \frac{W}{R_{F,i}} \frac{P_i}{\theta \sum_{j=1}^N P_j - \theta P_i + A_i} \quad (2.3)$$

όπου το θ είναι ο παράγοντας ορθογωνιότητας, W είναι το εύρος του συστήματος, \bar{P} είναι το διάνυσμα ανάθεσης ισχύος των χρηστών, I_i ορίζει ο θόρυβο και την παρεμβολή, και το $A_i = I_i/G_i$ ορίζει το περιβάλλον ανάμεσα στο χρήστη και το σταθμό βάσης.

Έτσι το πρόβλημα που καλείται να αντιμετωπίσει η κάθε κυψέλη CDMA ορίζεται ως:

$$\begin{aligned} & \max_{\bar{P}} \sum_{i=1}^{N_{CDMA}} U_i(\gamma_i(\bar{P})) \\ & \text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^{N_{CDMA}} P_i \leq P_{max}, \quad 0 \leq P_i \leq P_{max} \quad i \in S_{CDMA} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Ο βρόχος που βρίσκεται στο σταθμό βάσης συνεχώς παρατηρεί το περιβάλλον και τις απαιτήσεις των χρηστών. Έπειτα καταστρώνει το πρόβλημα μεγιστοποίησης, βρίσκει τη λύση λ^* , όπως θα αναφερθεί σε επόμενο υποκεφάλαιο, και τέλος την ανακοινώνει στους εμπλεκόμενους χρήστες.

Ο βρόχος που βρίσκεται στο τερματικό του χρήστη παρατηρεί με τη σειρά του το περιβάλλον και το κέρδος του καναλιού και την απόδοση της υπηρεσίας του. Με αυτά τα δεδομένα υπολογίζει τη τρέχουσα προθυμία του να πληρώσει $\lambda_{i,c}^{max}$ για κάθε κυψέλη c που βρίσκεται στο περιβάλλον του. Έπειτα αλληλεπιδρά με το σταθμό βάσης για να βρεθεί η τιμή ισορροπίας λ^* . Χρησιμοποιώντας αυτήν την τιμή μπορεί πια να υπολογίσει τους πόρους που του αναλογούν.

2.3.2 Αντιμετώπιση κατανομής πόρων στο δίκτυο WLAN

Για την κατανομή πόρων στο WLAN θεωρήθηκε το πρωτότυπο IEEE 802.11e. Το κυρίαρχο πρωτόκολλο ελέγχου πρόσβασης μέσου (media access control MAC) είναι η Βελτιωμένη Διανεμημένη Πρόσβαση Καναλιού (Enhanced Distributed Channel Access EDCA). Το πρωτόκολλο EDCA ελέγχει τη πρόσβαση στο κανάλι με τη χρήση των Συναρτήσεων Πρόσβασης Καναλιού (Channel Access functions, CAFs). Κάθε CAF εκτελεί μία ανεξάρτητη διαδικασία υποχώρησης (backoff process) για να καθορίσει το χρόνο μετάδοσης. Κάθε χρήστης προσπαθεί να μεταδώσει μόνο όταν βλέπει το κανάλι ανενεργό για ένα ελάχιστο διάστημα που λέγεται Διάστημα Διαπλαισιακής Διαιτησίας (Arbitration InterFrame Space AIFS_i). Όταν ο χρήστης δει το κανάλι ανενεργό για διάστημα AIFS_i, τότε παράγει ένα διάστημα υποχώρησης πριν μεταδώσει, που είναι τυχαία κατανεμημένο στο διάστημα (0, CW_i), όπου CW_i είναι το παράθυρο διαμάχης (Contention Window, CW), με σκοπό να μειώσει το ενδεχόμενο σύγκρουσης με πακέτα που μεταδίδουν οι άλλοι χρήστες. Το CW_i αρχικά έχει μια τιμή CW_{min}. Εάν υπάρξει σύγκρουση τότε το CW_i διπλασιάζεται μέχρι μια μέγιστη τιμή CW_{max}. Μετά την επιτυχή μετάδοση ο χρήστης μπορεί να αξιοποιήσει το κανάλι για ένα διάστημα μέχρι τη τιμή που ορίζει η παράμετρος περιορισμού ευκαιρίας μετάδοσης (transmission opportunity limit parameter, TXOPlimit_i).

Το πρωτόκολλο 802.11e επιτρέπει τη παραμετροποίηση των τιμών αυτών ώστε να μεταβάλλεται η απόδοση του κάθε χρήστη. Επομένως το πρόβλημα μεγιστοποίησης που αντιστοιχεί στο δίκτυο WLAN μπορεί να λυθεί με τη παραμετροποίηση μίας η περισσότερων από τις παραμέτρους που αναφέρθηκαν. Το πρόβλημα μεγιστοποίησης είναι της μορφής:

$$\begin{aligned} & \max_R \sum_{j=1}^{N_{WLAN}} U_j(R_j) \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{j=1}^{N_{WLAN}} R_j \leq C_{max}, 0 \leq R_j \leq C_{max}, 0 \leq R_j \leq C_{max}, j \in S_{WLAN} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Έχοντας ως βέλτιστη λύση το διάνυσμα $\mathbf{R}^* = \{R_1^*, \dots, R_i^*, \dots, R_{N_{WLAN}}^*\}$, μπορούμε να προσδιορίσουμε ένα διάνυσμα $\mathbf{CW}^* = \{CW_1^*, \dots, CW_i^*, \dots, CW_{N_{WLAN}}^*\}$ ώστε να ισχύει:

$$\begin{aligned} & CW_j^* : R_j \geq R_j^* \quad \forall j \in S_{WLAN} \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{j=1}^{N_{WLAN}} R_j \leq C_{max}, \\ & 0 \leq R_j \leq C_{max} \quad j \in S_{WLAN} \end{aligned} \quad (2.6)$$

Ο βρόχος που βρίσκεται στο σταθμό βάσης συνεχώς παρατηρεί το περιβάλλον, τις απαιτήσεις των χρηστών και τη μέγιστη χωρητικότητα (effective capacity). Έπειτα καταστρώνει το πρόβλημα μεγιστοποίησης και βρίσκει τη λύση λ^* όπως θα αναφερθεί στο παρακάτω υποκεφάλαιο. Μετά ανακοινώνει τη λύση στους εμπλεκόμενους χρήστες (το ρυθμό μετάδοσης που τους αναλογεί).

Ο βρόχος που βρίσκεται στο τερματικό του χρήστη παρατηρεί με τη σειρά του το περιβάλλον, τη μέγιστη χωρητικότητα και την απόδοση της υπηρεσίας του. Με αυτά τα

δεδομένα υπολογίζει τη τρέχουσα προθυμία του να πληρώσει $\lambda_{i,c}^{max}$ για κάθε κυψέλη που βρίσκεται στο περιβάλλον του. Έπειτα αλληλεπιδρά με το σταθμό βάσης για να βρεθεί η τιμή ισορροπίας λ^* και εάν τελικά επιλεγθεί υπολογίζει τους πόρους που του αναλογούν (ρυθμός μετάδοσης), αλλιώς αιτείται καινούργιας μεταπομπής. Ο τρόπος που υπολογίζονται αυτές οι τιμές περιγράφεται παρακάτω.

2.3.3 Επίλυση Προβλήματος Κατανομής Πόρων και Ενοποίηση Δικτύων

Παρατηρούμε ότι η μορφή των δύο προβλημάτων μεγιστοποίησης ανήκουν στο γενικό πρόβλημα μεγιστοποίησης:

$$\begin{aligned} & \max_{\bar{X}} \sum_{i=1}^N U_i(X_i) \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{i=1}^N X_i \leq X_{max}, \quad 0 \leq X_i \leq X_{max} \quad i=1, \dots, N \end{aligned} \quad (2.7)$$

Η επίλυση τους μπορεί να πραγματοποιηθεί ακολουθώντας την ίδια μεθοδολογία.. Αρχικά ο κάθε χρήστης υπολογίζει τη μέγιστη τιμή ανά μονάδα πόρου που ο χρήστης προθυμοποιείται να πληρώσει λ_i^{max} , σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$\lambda_i^{max} = \min \left\{ \lambda \geq 0 \mid \max_{0 \leq X \leq X_{max}} [U_i(X) - \lambda X] = 0 \right\} \quad (2.8)$$

Κάθε χρήστης μπορεί να υπολογίσει μόνος του τη τιμή λ_i^{max} , ανεξάρτητα από τους άλλους χρήστες.

Ο σταθμός βάσης επιλέγει τους χρήστες με βάση την φθίνουσα σειρά των τιμών λ_i^{max} από το πρώτο χρήστη μέχρι το χρήστη T που ικανοποιεί τη σχέση:

$$T = \operatorname{argmax}_{1 \leq t \leq N} \left\{ \sum_{i=1}^t X_i(\lambda_i^{max}) \leq X_{max} \right\} \quad (2.9)$$

Έπειτα αλληλεπιδρά με τους επιλεγμένους χρήστες και χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο διχοτόμησης (bisection algorithm), βρίσκει την μοναδική τιμή ισορροπίας λ^* (equilibrium price) που ικανοποιεί τη σχέση $\sum_{i=1}^T X_i(\lambda^*) = X_{max}$. Γνωρίζοντας τη τιμή λ^* , οι χρήστες μπορούν να προσδιορίσουν τους πόρους που τους έχουν ανατεθεί.

Τα παραπάνω ισχύουν βραχυπρόθεσμα για κάθε δίκτυο. Μακροπρόθεσμα η ιδέα του μηχανισμού αυτόνομης επιλογής ενοποιημένου δικτύου (Autonomic JOint Network Selection AJONS) στοχεύει στο να επιτρέψει στις αυτόνομες συσκευές να αξιοποιήσουν πληροφορίες των γειτονικών κυψελών, με σκοπό να επιλέξουν δυναμικά εάν θα συνδεθούν και με ποιο δίκτυο και κυψέλη. Για αυτό το λόγο πρέπει να γνωρίζουν τις συνθήκες κάθε κυψέλης (κέρδος καναλιού στη κυψέλη ή χωρητικότητα όπως και ο συνωστισμός χρηστών).

Αυτά μπορούν να χαρακτηριστούν από τη τιμή λ^* κάθε κυψέλης, αλλά για να αντιμετωπιστούν διάφορα βραχυπρόθεσμα φαινόμενα που επηρεάζουν τη τιμή αυτή οι σταθμοί CDMA και WLAN θα πρέπει να καταστρώνουν και να επιλύουν τα προβλήματα (2.4) και (2.5) αντίστοιχα με τέτοιο τρόπο ώστε η τιμή λ_{avg}^* να αντανακλά μακροπρόθεσμα το φορτίο και τις μεταβολές κάθε κυψέλης.

Έτσι οι κυψέλες CDMA καταστρώνουν το πρόβλημα με βάση τις εκθετικά μέσες (exponential average) τιμές των κερδών των χρηστών και αντίστοιχα οι κυψέλες CDMA με βάση τις εκθετικά μέσες τιμές της χωρητικότητας κάθε κυψέλης που δίνονται από τις σχέσεις:

$$\begin{aligned} G_{i,c}(t) &= (1-w)G_{i,c}(t-1) + wG_{i,c}(t) \quad \forall i \in c \text{ when } c \in \{CDMA\} \\ C_{max,c}(t) &= (1-w)C_{max,c}(t-1) + wC_{max,c}(t) \text{ when } c \in \{WLAN\} \end{aligned} \quad (2.10)$$

όπου w είναι παράγοντας εκθετικής εξομάλυνσης (exponential smoothing factor).

Επομένως ο βρόχος στο σταθμό βάσης συγκεντρώνει τα απαραίτητα στοιχεία και καταστρώνει τα προβλήματα (2.4) και (2.5) και με βάση τις παραπάνω τιμές βγαίνουν οι τιμές $\lambda_{avg,c}^*$ κάθε κυψέλης c .

Ο βρόχος στο τερματικό συγκεντρώνει τα απαραίτητα στοιχεία, υπολογίζει το κανονικοποιημένο δείκτη:

$$\hat{\lambda}_{k,c} = \begin{cases} \frac{\lambda_{k,c}^{max} - \lambda_{avg,c}^*}{\lambda_{avg,c}^*} & \text{if } \lambda_{k,c}^{max} \geq \lambda_{avg,c}^* \\ 0 & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (2.11)$$

που μπορεί να ερμηνευτεί ως το κανονικοποιημένο κέρδος ανά μονάδα πόρων του χρήστη k εάν επιλέξει να συνδεθεί με τη κυψέλη c . Έπειτα επιλέγει τη κυψέλη c^* να συνδεθεί σύμφωνα με τη σχέση:

$$c^* = \underset{c \in C}{\operatorname{argmax}} \{ \max_{c \in C-b} \{ e \cdot J_{c,k}(\hat{\lambda}_{k,c}) \}, J_{b,k}(\hat{\lambda}_{k,b}) \} \quad (2.12)$$

όπου το e ($0 \leq e \leq 1$) είναι παράγοντας ευαισθησίας (sensitivity factor) και αντιμετωπίζει το φαινόμενο ring pong στις μεταπομπές των χρηστών, και το J χρησιμοποιείται για να κατηγοριοποιήσει διαφορές παραμέτρους αναφορικά με το τύπο του δικτύου.

Κατά αυτό το τρόπο επιτυγχάνεται η ισορροπία φορτίου στις κυψέλες, καθώς κυψέλες με μεγάλο συνωστισμό θα έχουν μεγάλη τιμή $\lambda_{avg,c}^*$, με αποτέλεσμα να κατευθύνουν τους χρήστες σε κυψέλες με μικρότερη τιμή καθώς έτσι θα έχουν μεγαλύτερο κέρδος.

Ο στόχος της παρούσα διπλωματικής, όπως έχει εξηγηθεί, είναι η επίτευξη αντίστοιχης ενοποίησης των δικτύων OFDMA και WLAN, με παρόμοιο τρόπο που επιτεύχθηκε από τη δημοσίευση που μόλις παρουσιάσαμε. Για αυτό το λόγο κρίνεται αναγκαία η μελέτη των αλγορίθμων κατανομής πόρων στα OFDMA δίκτυα (OFDMA Radio Resource Allocation algorithms) και η εύρεση αλγορίθμου που λύνει το αντίστοιχο πρόβλημα μεγιστοποίησης των OFDMA δικτύων με τη χρήση των πολλαπλασιαστών Lagrange, ώστε να πάρουμε τις αντίστοιχες τιμές των πολλαπλασιαστών Lagrange. Κατ' αυτόν το τρόπο θα μπορούσαμε να παρουσιάσουμε ένα παρόμοιο τρόπο ενοποίησης των δικτύων OFDMA και WLAN και να εξάγουμε συμπεράσματα.

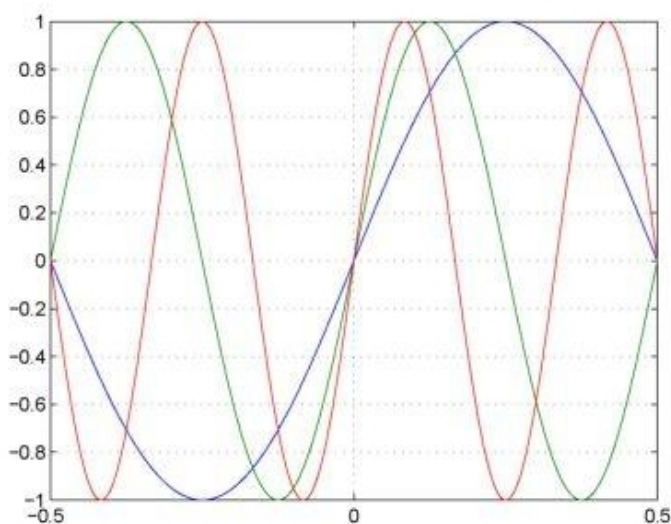
3 Παρουσίαση OFDMA δικτύων

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παραθέσουμε περιληπτικά τις ιδιότητες των συστημάτων OFDMA και τους υπάρχοντες αλγορίθμους ανάθεσης πόρων των συστημάτων αυτών. Έχουν προταθεί αρκετοί με βάση διάφορους στόχους. Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι να αποτελεί μία σύντομη αναφορά με παραπομπές στις αντίστοιχες δημοσιεύσεις.

3.1 Εισαγωγή στη τεχνολογία OFDMA

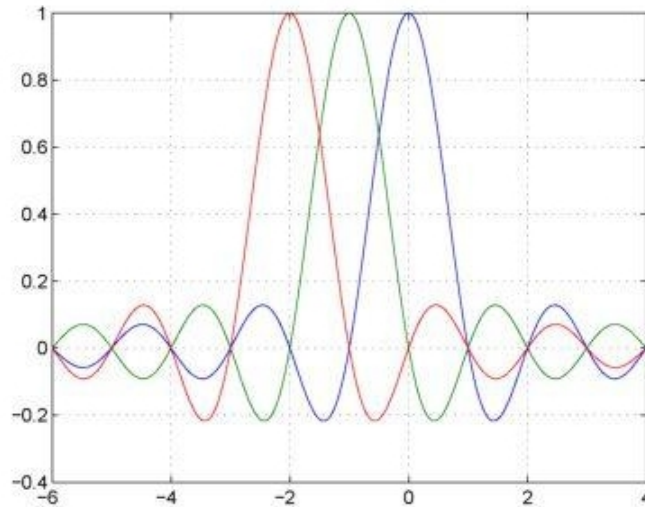
Η τεχνολογία OFDMA όπως έχουμε αναφέρει είναι η τεχνολογία πάνω στην οποία βασίζεται το νέο πρότυπο LTE-Advanced για τη 4η γενιά των κινητών κυψελωτών επικοινωνιών. Αυτό γίνεται καθώς η τεχνολογία OFDMA προσφέρει περισσότερα πλεονεκτήματα -θα αναφερθούν παρακάτω- από τις υπάρχουσες τεχνολογίες Πολλαπλής Πρόσβασης Διαίρεσης Κώδικα (Code Division Multiple Access, CDMA) και Πολλαπλής Πρόσβασης Διαίρεσης Χρόνου (Time Division Multiple Access, TDMA).

Με τη τεχνολογία OFDMA που βασίζεται στη τεχνολογία OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) το διαθέσιμο εύρος ζώνης χωρίζεται σε πολλά μικρότερα υποκανάλια που οι φέρουσες τους είναι ορθογώνιες μεταξύ τους. Με την ορθογωνιότητα μπορούμε να φέρουμε τα υποκανάλια όσο κοντά μας επιτρέπει η διάρκεια του συμβόλου T_s που επιθυμούμε. Κάθε υποκανάλι απέχει από το άλλο απόσταση ίση με το αντίστροφο της διάρκειας του συμβόλου, δηλαδή απόσταση $\Delta f = \frac{1}{T_s}$. Για παράδειγμα εάν έχουμε διάρκεια συμβόλου $T_s = 1 \text{ sec}$ και τρεις φέρουσες $f_1 = 1/T_s$, $f_2 = 2/T_s$, $f_3 = 3/T_s$ προκύπτουν τα παρακάτω σχήματα που δείχνουν το σήμα στο χρόνο:



Σχήμα 3.1: Το σύμβολο OFDM στο πεδίο του χρόνου για τρεις φέρουσες.

και στο φάσμα συχνοτήτων αντίστοιχα:



Σχήμα 3.2: Το σύμβολο OFDM στο πεδίο συχνοτήτων για τρεις φέρουσες.

Στο παραπάνω σχήμα παρατηρούμε τη πολύ καλή χρησιμοποίηση του διαθέσιμου φάσματος.

Ο λόγος για τον οποίο έγινε ο χωρισμός του φάσματος σε μικρότερα υποκανάλια είναι τα πολλά πλεονέκτημα που προσφέρει. Στις αστικές περιοχές υπάρχει το πρόβλημα της πολυδιαδρομικής συμβολής του σήματος, δηλαδή στο τερματικό φτάνει καθυστερημένη εκδοχή του συμβόλου που μεταδόθηκε λόγω ανάκλασης (και σκέδασης) του σε διάφορες επιφάνειες. Εάν αυτή η χρονική καθυστέρηση, που ονομάζεται χρονική διασπορά (Delay Spread) του διαύλου, είναι συγκρίσιμη της διάρκειας του μεταδιδόμενου συμβόλου τότε εισάγεται παρεμβολή στο επόμενο μεταδιδόμενο σύμβολο, τη λεγόμενη ενδοσυμβολική παρεμβολή (Inter-Symbol Interference, ISI). Όταν το διαθέσιμο εύρος ζώνης είναι πολύ μεγάλο τότε η διάρκεια του συμβόλου είναι πολύ μικρή με αποτέλεσμα η ενδοσυμβολική παρεμβολή να καταστρέφει τη ποιότητα του σήματος. Ο διαχωρισμός του διαθέσιμου φάσματος σε υποκανάλια οδηγεί στο διαμοιρασμό μιας κύριας ροής δεδομένων στα μικρότερα υποκανάλια μικρότερου ρυθμού μετάδοσης. Μάλιστα η διάρκεια συμβόλου σε κάθε υποκανάλι γίνεται τόσες φορές μεγαλύτερη όσος είναι ο αριθμός των υποκαναλιών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η διάρκεια συμβόλου πλέον να γίνεται μεγαλύτερη από τη χρονική διασπορά του διαύλου με αποτέλεσμα να εξαλείφεται η ενδοσυμβολική παρεμβολή. Για τη περαιτέρω εξάλειψη της ενδοσυμβολικής παρεμβολής εισάγεται ένα χρονικό διάστημα που καλείται χρόνος φύλαξης (guard time). Ο χρόνος φύλαξης επιλέγεται να είναι μεγαλύτερος από την αναμενόμενη διασπορά της καθυστέρησης λόγω πολυόδευσης ώστε οι συνιστώσες των πολλαπλών διαδρομών ενός συμβόλου να μην παρεμβάλλονται στο επόμενο σύμβολο. Κατ' αυτό το τρόπο η OFDMA αντιμετωπίζει με τρόπο απλό την ενδοσυμβολική παρεμβολή, σε αντίθεση με άλλες τεχνικές όπως η CDMA.

Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι ότι η τεχνική OFDMA μπορεί να εκμεταλλευτεί το συχνοτικό διαφορισμό (frequency diversity) των χρηστών. Ο κάθε χρήστης ανάλογα με το χώρο που βρίσκεται αντιμετωπίζει και διαφορετικό κέρδος για κάθε υποκανάλι. Έτσι σε ένα σύστημα με πολλούς χρήστες υπάρχει το ενδεχόμενο ένα υποκανάλι στο οποίο ένας

χρήστης αντιμετωπίζει έντονα φαινόμενα διάλειψης ένας άλλος χρήστης να έχει υψηλό κέρδος. Επομένως η τεχνική OFDMA δίνει τη δυνατότητα ανάθεσης στους χρήστες μόνο των υποκαναλιών που δεν έχουν έντονα φαινόμενα διάλειψης. Κατ' αυτό το τρόπο το σύστημα OFDMA μπορεί να πετύχει καλύτερο λόγο bits/sec/hertz και καλύτερη απόδοση φάσματος, μεγιστοποιώντας το ρυθμό μετάδοσης που μπορεί να επιτύχει.

Άλλο πλεονέκτημα της τεχνικής OFDMA είναι η δυνατότητα επεκτασιμότητας των συστημάτων OFDMA. Για παράδειγμα στο πρότυπο 802.16e (WiMAX) η επεκτασιμότητα επιτυγχάνεται με τη προσαρμογή του ταχύ μετασχηματισμού Fourier (Fast Fourier Transform, FFT) ανάλογα με το διαθέσιμο εύρος, ενώ η απόσταση των υποκαναλιών ορίζεται σε μια σταθερή τιμή. Κρατώντας σταθερό την απόσταση των υποκαναλιών και τη διάρκεια συμβόλου η βασική μονάδα φυσικού πόρου είναι σταθερή (χρόνος και συχνότητα). Επομένως η επίδραση στα υψηλότερα στρώματα ελαχιστοποιείται με τη κλιμάκωση του διαθέσιμου εύρους. Αυτό έχει και ως αποτέλεσμα την ευελιξία στην ανάπτυξη του συστήματος με μικρές μόνο αλλαγές στη διεπαφή αέρα (air interface). Επίσης να αναφερθεί η καλύτερη απόδοση της OFDMA σε MIMO (Multiple Input Multiple Output) κεραιές σε σχέση με τη τεχνική CDMA.

Τα μειονεκτήματα της τεχνικής OFDMA είναι ότι καθώς η απόσταση των υποκαναλιών είναι πολύ μικρή, η OFDMA είναι ευαίσθητη σε μετατοπίσεις συχνοτήτων (frequency offset) και σε θόρυβο φάσης (phase noise), φαινόμενο που εντείνεται σε κινούμενους χρήστες με την εισαγωγή του φαινομένου Doppler. Όλα αυτά προκαλούν παρεμβολή μεταξύ των υποκαναλιών (inter-carrier interference). Μία άλλη δυσκολία είναι ότι η τεχνική OFDMA παρουσιάζει υψηλό λόγο μέγιστης προς μέση ισχύ του σήματος (Peak to Average Power ratio, PAPR), που οδηγεί σε υψηλές απαιτήσεις του ενισχυτή ισχύος προς μετάδοση του σήματος [29].

Παρόλα τα μειονεκτήματα όμως η τεχνική OFDMA, έχει πλέον καθιερωθεί ως η τεχνική των μελλοντικών συστημάτων. Μέχρι τώρα έχει υιοθετηθεί από το πρότυπο WiMAX (IEEE 802.16) και από το πρότυπο LTE-Advanced όπως έχει αναφερθεί. Οι τρόποι με τους οποίους γίνεται η ανάθεση πόρων ενός OFDMA συστήματος παρουσιάζουν ενδιαφέρον, καθώς σε αντίθεση με τα συστήματα CDMA που γίνεται μόνο ανάθεση ισχύος πλέον κάθε σταθμός βάσης οφείλει να κατανέμει καταλλήλως και τα υποκανάλια. Βέβαια αυτός ο πρόσθετος βαθμός ελευθερίας αν διαχειριστεί σωστά μπορεί να ξεπεράσει τις άλλες τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης. Παρακάτω θα παραθέσουμε τους κυριότερους (κατά το συγγραφέα) αλγορίθμους κατανομής πόρων OFDMA συστημάτων που έχουν προταθεί.

3.2 Παρουσίαση της έρευνας ανάθεσης πόρων OFDMA συστημάτων

Το σύνολο της βιβλιογραφίας που ερευνήθηκε για το σκοπό της παρούσας διπλωματικής προέρχεται από μελέτες (papers) που έχουν δημοσιευθεί στον IEEE. Το IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) είναι από τους μεγαλύτερους οργανισμούς (μη κερδοσκοπικός) για τη προώθηση τεχνολογίας βασισμένης γενικότερα στον ηλεκτρισμό. Είναι πηγή πλούσιας έρευνας πάνω στο αντικείμενο σπουδών ενός Ηλεκτρολόγου Μηχανικού και Μηχανικού Ηλεκτρονικών Υπολογιστών.

Ένας από τους στόχους της παρούσας διπλωματικής ήταν να ευρεθούν οι διάφορες

τεχνικές και μέθοδοι με τις οποίες οι διάφοροι ερευνητές ανά το κόσμο, έχουν αντιμετωπίσει το πρόβλημα της ανάθεσης πόρων σε OFDMA δίκτυα. Πιο συγκεκριμένα η έρευνα επικεντρώθηκε στις μελέτες που αφορούν την **κατανομή των πόρων μέσα σε μία κυψέλη ενός OFDMA δικτύου**, παραλείποντας τις όποιες επιπτώσεις ή/και επιδράσεις θα είχε σε γειτονικές κυψέλες.

Είναι γνωστό ότι σε διάφορες υλοποιήσεις δικτύων (πχ 802.16 ή όπως είναι πιο γνωστό με την εμπορική του ονομασία WiMax), ενώ προκαθορίζονται σαφώς τα περισσότερα στοιχεία του (από το φυσικό στρώμα (physical layer) μέχρι και τα υψηλότερα στρώματα (layers) του σχετικού μοντέλου OSI), η κατανομή των πόρων αφήνεται ανοικτή για έρευνα και υλοποίηση. Προφανώς αυτό έγινε για να προσελκύσει τις ιδέες διάφορων ερευνητών, καθώς η βέλτιστη κατανομή των πόρων είναι ύψιστης σημασίας για την επιβιωσιμότητα της OFDMA, έναντι ανταγωνιστικών τεχνικών που έχουν καθιερωθεί σε άλλα συστήματα (CDMA).

Όπως είναι γνωστό το συνολικό φάσμα ενός OFDMA συστήματος διασπάται σε πολλά (δεκάδες ή εκατοντάδες) υποκανάλια (πιο κάτω οι όροι κανάλια και υποκανάλια θα είναι ταυτόσημοι) που μπορούν να διαμοιραστούν στους χρήστες κάθε κυψέλης. Έτσι, σε αντίθεση με τα CDMA συστήματα, η κατανομή των πόρων ενός OFDMA συστήματος έχει δύο 'βαθμούς ελευθερίας'. Αυτά είναι ο αριθμός των υποκαναλιών (subchannels) που θα χρησιμοποιεί ο κάθε χρήστης σε συγκεκριμένα διαστήματα και η ισχύς που θα κατανέμεται σε κάθε υποκανάλι (subchannel). Αντίστοιχα στα CDMA συστήματα γίνεται απλώς η κατανομή ισχύος σε κάθε χρήστη τη δεδομένη στιγμή.

Επομένως όλες οι μελέτες που συγκεντρώσαμε δίνουν (τις δικές τους) απαντήσεις στο θέμα της σωστής (βέλτιστης) κατανομής των δύο αυτών πόρων. Κάτι τέτοιο είναι ουσιώδες καθώς το πλεονέκτημα της OFDMA, δηλαδή οι δύο, πλέον, βαθμοί ελευθερίας δίνουν αρκετά περιθώρια για αποδοτική (efficient) χρησιμοποίηση των πόρων. Φυσικά, όπως θα δούμε, και διαισθητικά αντιλαμβανόμαστε, αυτό είναι σίγουρα πιο δύσκολο να επιτευχθεί, σε σύγκριση με τον ένα 'βαθμό ελευθερίας' της CDMA (την ισχύ).

Από την έρευνα που προέκυψε φάνηκε ότι πέρα από το τρόπο αντιμετώπισης του προβλήματος βέλτιστης κατανομής των πόρων (φάσμα, ισχύς), υπάρχουν δύο 'σχολές':

1. Η πρώτη βασίζεται στη **μεγιστοποίηση** του ρυθμού μετάδοσης (rate) ή κάποιας συνάρτησης χρησιμοποίησης του ρυθμού μετάδοσης, με κάποιο όριο στη μέγιστη συνολική ισχύ της κυψέλης και στο μέγιστο φάσμα που είναι διαθέσιμο.
2. Η δεύτερη βασίζεται στην **ελαχιστοποίηση** της συνολικής εκπεμπόμενης ισχύς της κυψέλης δεδομένου κάποιων ελάχιστων απαιτήσεων από τους χρήστες ως προς τον αριθμό μετάδοσης (rate) και γενικότερα της ποιότητας της υπηρεσίας που παρέχεται (Quality of Service, αλλιώς γνωστό και ως QoS).

Πάντως όλες οι μελέτες κάνουν χρήση της θεωρίας βελτιστοποίησης (**optimization theory**). Το γενικό σχέδιο αντιμετώπισης του προβλήματος κατανομής πόρων είναι η κατάστρωση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης, δεδομένων κάποιων συνθηκών ισχύος και φάσματος που πρέπει να ικανοποιούνται στη κυψέλη. Αυτά είναι:

1. Η συνολική εκπεμπόμενη ισχύς από τη κυψέλη να μη ξεπερνά κάποια προκαθορισμένη μέγιστη τιμή ισχύος (P_{total})

2. Κάθε υποκανάλι (sub-channel) να μοιράζεται σε ένα μόνο χρήστη. Και ο συνολικός αριθμός των υποκαναλιών να μη ξεπερνά το διαθέσιμο συνολικό φάσμα.

Για να αντιληφθεί ο αναγνώστης καλύτερα τα προβλήματα που αντιμετωπίζονται στα OFDMA δίκτυα με τη θεωρία της βελτιστοποίησης, αναφορά πρέπει να γίνει στη δημοσίευση των K. Seong, M. Mohseni, και J. M. Cioffi [30], όπου γίνεται περιληπτική αντιμετώπιση των προβλημάτων σταθμισμένης μεγιστοποίησης ρυθμού μετάδοσης (weighted sum-rate maximization) και σταθμισμένης ελαχιστοποίησης συνολικά εκπεμπόμενης ισχύος (weighted sum power minimization).

Αξίζει να αναφερθεί ότι πέρα από τη χρήση της θεωρίας βελτιστοποίησης συχνή αναφορά και χρήση γίνεται στη θεωρία παιγνίων (game theory) και σε οικονομικές αρχές, και στις ιδέες που προκύπτουν από αυτές όπως σημείο ισορροπίας κατά Nash (Nash equilibrium point) και βελτιστοποίηση κατά Pareto (Pareto optimality).

Φυσικά για να γίνει περισσότερο κατανοητή η περίληψη θα υιοθετήσουμε ένα κοινό τυπολόγιο και κοινές μεταβλητές, κάτι που στις περισσότερες μελέτες δεν πραγματοποιείται, αλλά αναμενόμενο είναι οι τύποι και οι μεταβλητές να είναι παρόμοιοι.

Οι τύποι και οι μεταβλητές που υιοθετούμε είναι της δημοσίευσης (paper) στην οποία θα βασιστεί μετέπειτα αυτή η διπλωματική για υλοποίηση του κύριου αλγορίθμου της (εκτός και εάν αναφέρεται ρητά κάτι διαφορετικό).

Θεωρούμε μία κυψέλη OFDMA με K χρήστες (το i θα συμβολίζει το κάθε χρήστη), και N υποκανάλια (subchannels) (το j θα συμβολίζει το κάθε κανάλι). Με r (ή και R) συμβολίζεται ο ρυθμός μετάδοσης (rate). Με w συμβολίζεται το ειδικό βάρος που έχει ο κάθε χρήστης ανάλογα με το είδος της υπηρεσίας που ζητά ή ανάλογα με τη συνάρτηση χρησιμοποίησης του. Με e_{ij} συμβολίζεται ο ειδικός σηματοθορυβικός λόγος SINR (Signal to Interference plus Noise Ratio) του χρήστη i στο υποκανάλι j ανά μονάδα ισχύος. Η ισχύς που ανατίθεται στο χρήστη i στο υποκανάλι j είναι p_{ij} , ενώ η συνολική ισχύς P . Το κλάσμα κάθε χρονοθυρίδας (timeslot) κατά το οποίο το υποκανάλι j ανατίθεται στο χρήστη i συμβολίζεται x_{ij} (φυσικά $x_{ij} \leq 1$). Επίσης υπάρχει και το s_{ij} που συμβολίζει ένα άνω όριο στο SNIR στο κανάλι j για το χρήστη i . Συγκεντρωτικά σε ένα πίνακα έχουμε:

Σύμβολο	Σημασία
U_i	Η συνάρτηση χρησιμοποίησης κάθε χρήστη i .
K	Ο αριθμός των χρηστών του συστήματος.
N	Ο αριθμός των υποκαναλιών του συστήματος.
$r_{ij} (R_{ij})$	Ο ρυθμός μετάδοσης του χρήστη i στο υποκανάλι j .
w_i	Το ειδικό βάρος κάθε χρήστη (ανάλογα με την υπηρεσία που αιτείται).
e_{ij}	Ο λόγος SINR που 'βλέπει' ο χρήστης i στο κανάλι j .
p_{ij}	Η ισχύς που ανατίθεται στο χρήστη i στο υποκανάλι j .
x_{ij}	Το κλάσμα κάθε χρονοθυρίδας κατά το οποίο το υποκανάλι j ανατίθεται στο χρήστη i . ($0 \leq x_{ij} \leq 1$).
s_{ij}	Άνω όριο του λόγου SNIR στο κανάλι j για το χρήστη i .
η_i	Αποδοτικότητα ισχύος του χρήστη i .
α_f	Δείκτης δικαιοσύνης (fairness index).
τ	Παράγοντας κόστους (pricing factor).

Πίνακας 3.1: Παρουσίαση χρησιμοποιούμενων συμβόλων.

3.3 Εισαγωγή σε απλούς αλγόριθμους κατανομής των πόρων ενός OFDMA δικτύου

Μία πρώτη εισαγωγή στους αλγορίθμους κατανομής πόρων ενός OFDMA συστήματος φαίνεται από τη δημοσίευση [31]. Βέβαια μπορεί να αναφέρεται σε περιβάλλον με πολλούς σταθμούς βάσης, σε αντίθεση με τη διπλωματική που μελετά μόνο συστήματα μίας κυψέλης, παρόλα αυτά, μπορεί κανείς να βγάλει συμπεράσματα. Οι αλγόριθμοι πέρα από τον τελευταίο δε κάνουν καμία αναφορά σε προσαρμοστική διαμόρφωση (adaptive modulation), και θεωρούν την ύπαρξη μίας μόνο διαμόρφωσης. Αυτοί οι αλγόριθμοι έχουν κυρίως εφαρμογή όταν δεν είναι δυνατή η τροφοδότηση των τιμών της κατάστασης των καναλιών κάθε χρήστη.

Ο πρώτος αλγόριθμος ονομάζεται σειριακός (sequential) και απλώς ο κάθε χρήστης όταν μπαίνει στη κυψέλη παίρνει σειριακά τα διαθέσιμα κανάλια που απαιτεί.

Ο δεύτερος αλγόριθμος ονομάζεται συντονισμένος (coordinated), ο οποίος χωρίζει τις κυψέλες σε δύο ομάδες και η πρώτη ομάδα αναθέτει κανάλια από την αρχή της λίστας των διαθέσιμων καναλιών και η δεύτερη ομάδα αναθέτει κανάλια από το τέλος της λίστας.

Ο τρίτος αλγόριθμος ονομάζεται τυχαίος (random), και αναθέτει κανάλια με τυχαία σειρά με σκοπό να επιτύχουν μια μέση τιμή παρεμβολής ανάμεσα στις κυψέλες.

Ο τέταρτος ονομάζεται τυχαίος-συντονισμένος (random-coordinated), και χωρίζει

το χώρο κάθε κυψέλης σε εσωτερικό και εξωτερικό. Χωρίζει τη λίστα των καναλιών στα δυο. Στο πρώτο χώρο γίνεται τυχαία κατανομή των καναλιών από το ένα κομμάτι της λίστας. Στο δεύτερο γίνεται συντονισμένη κατανομή σύμφωνα με το δεύτερο αλγόριθμο.

Ο τελευταίος αλγόριθμος χρησιμοποιεί προσαρμοστική διαμόρφωση (adaptive modulation). Χρησιμοποιεί ένα κανονικοποιημένο κέρδος καναλιού (normalized channel gain), και σε κάθε χρήστη του ανατίθεται από τα διαθέσιμα κανάλια αυτό που του παρουσιάζει το μεγαλύτερο κέρδος.

Φυσικά όπως είναι αντιληπτό αυτοί οι αλγόριθμοι δε μπορούν να αξιοποιήσουν πλήρως το σύστημα OFDMA, καθώς είναι ιδιαίτερα απλοί και δε χρησιμοποιούν όλους τους βαθμούς ελευθερίας που τους παρέχει το σύστημα, όπως η κατανομή της ισχύος.

3.4 Αλγόριθμοι βασισμένοι στη θεωρία παιγνίων

Ένας τρόπος που κάποιοι μελετητές αντιμετωπίζουν το πρόβλημα, είναι με τη χρήση της θεωρίας παιγνίων. Χρησιμοποιώντας διάφορα θεωρήματα αυτής (πχ σημείο ισορροπίας κατά Nash) αντιμετωπίζουν ευρηματικά το πρόβλημα της κατανομής πόρων στα OFDMA συστήματα.

3.4.1 Επίλυση ανάθεσης πόρων της άνω ζεύξης OFDMA συστήματος

Στην δημοσίευσή [32], οι μελετητές αυτοί χρησιμοποιούν τη θεωρία παιγνίων για να αντιμετωπίσουν το πρόβλημα ανάθεσης πόρων της άνω ζεύξης (uplink) των OFDMA συστημάτων. Υιοθετούν την έννοια της αποδοτικότητας ισχύος (power efficiency) και βασίζονται τη συνάρτηση χρησιμοποίησης (utility function) πάνω σε αυτή. Στόχος είναι να πετύχουν το καλύτερο δυνατό ρυθμό για τους χρήστες με αποδοτικό όμως τρόπο όσον αφορά την ισχύ. Η αποδοτικότητα ισχύος ορίζεται ως:

$$\eta_i = \sum_{j=1}^{L(i)} \frac{\log(1 + e_{ij} p_{ij})}{(p_{ij})^{1/2}} \quad (3.1)$$

Όπου $L(i)$ είναι ο αριθμός των καναλιών που έχουν ανατεθεί σε κάθε χρήστη.

Για να συνεργαστούν όλοι οι χρήστες και να μη μονοπωλούν τους πόρους εισάγεται η έννοια του παράγοντα κόστους (pricing factor), ώστε για κάθε πόρο που καταναλώνουν να πρέπει να πληρώσουν ένα τίμημα. Τελικά το πρόβλημα έχει τη μορφή:

$$\begin{aligned} u_i &= \underset{p}{\operatorname{argmax}} \sum_j x_{ij} \eta_{ij} - \tau e_{ij} p_{ij} \\ \text{s.t.} \quad & \sum_j p_{ij} - p_{i, \max} \leq 0 \quad \forall i \\ & r_{ij}, p_{ij} \geq 0, \quad \forall i, j \\ & \sum_i x_{ij} \leq 1 \end{aligned} \quad (3.2)$$

Για να βρεθεί το σημείο ισορροπίας κατά Nash, οι συγγραφείς προτείνουν ένα αλγόριθμο σύμφωνα με τον οποίο:

1. Ο χρήστης, με σειρά, επιλέγει ένα κανάλι (που δεν έχει δοθεί σε κανένα) με μία σχέση μεγιστοποίησης.
2. Έπειτα ο χρήστης, σύμφωνα με τα κανάλια που του έχουν δοθεί, κάνει κατανομή της ισχύος στα κανάλια αυτά, σύμφωνα με μία άλλη σχέση μεγιστοποίησης της συνάρτησης χρησιμοποίησης.
3. Έπειτα γίνεται επανάληψη των βημάτων 1 και 2, μέχρι όλα τα κανάλια να δοθούν στους χρήστες. Όταν γίνει αυτό γίνεται πάλι μία κατανομή της ισχύος σύμφωνα με το βήμα 2.

Για τις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκε σύστημα Wi-Max με 16 χρήστες και 128 κανάλια.

3.4.2 Επίλυση ανάθεσης πόρων με εφαρμογή των συνεργατικών παιγνίων

Στη δημοσίευσή [33], οι συγγραφείς επιδιώκουν να λύσουν το πρόβλημα κατανομής των πόρων (κανάλια και ισχύς) ενός συστήματος OFDMA με τη χρήση της θεωρίας παιγνίων. Πιο συγκεκριμένα μοντελοποιούν το πρόβλημα ως ένα συνεργατικό παιχνίδι (cooperative game). Χρησιμοποιούν από τη θεωρία παιγνίων δύο λύσεις, ανάλογα με το εάν θεωρήσουν μόνο ελάχιστο ή και μέγιστο ρυθμό μετάδοσης R :

1. **Nash Bargaining Solutions.** Με βάση αυτή τη θεωρία καταστρώνουν ένα παιχνίδι που έχει συνάρτηση χρησιμοποίησης $U_i = R_i - R_i^{min}$ για κάθε χρήστη i :

$$\begin{aligned} & \max_R \prod_{i=1}^K U_i \\ & s.t \sum_{i=1}^K R_i \leq R^{total} \\ & R_i \geq R_i^{min} \quad \forall i \end{aligned} \quad (3.3)$$

όπου R^{total} είναι ο μέγιστος θεωρητικά ρυθμός μετάδοσης, εάν θεωρήσουμε ότι όλα τα κανάλια παρουσιάζουν το μέγιστο σηματοθορυβικό λόγο SNR που παρατηρείται. Για το πρόβλημα αυτό προκύπτει αναλυτική λύση R_i για κάθε χρήστη.

2. **Raiffa -Kalai -Smorodinsky Bargaining Solutions.** Στη περίπτωση αυτή εκτός από R^{min} έχουμε και R^{max} , τα οποία αφού κανονικοποιούνται με τιμές 0 και 1 αντίστοιχα, έχουμε πλέον την εξής συνάρτηση προς μεγιστοποίηση $U_i = R_i + \frac{1}{K-1} \sum_{k \neq i} (1 - R_k)$ και έχουμε το πρόβλημα:

$$\begin{aligned}
 & \max_{\mathbf{R}} \prod_{i=1}^K U_i \\
 & s.t \sum_{i=1}^K R_i \leq R^{total} \\
 & 0 \leq R_i \leq 1
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

Για το οποίο επίσης προκύπτει αναλυτική λύση R_i .

Για να βρεθεί η λύση της ανάθεσης πόρων έχοντας το διάνυσμα \mathbf{R} από τις παραπάνω λύσεις προκύπτει το πρόβλημα:

$$\begin{aligned}
 R_i^* & \geq \sum_{j=1}^N \frac{B}{N} \log(1 + x_{ij} \bar{P} e_{ij}) \\
 s.t \quad & \sum_{i=1}^K x_{ij} \leq 1 \\
 & x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

όπου θεωρείται ισοκατανομή ισχύος $\bar{P} = \frac{P^{max}}{N}$. Για τη λύση αυτού του προβλήματος οι συγγραφείς παραθέτουν αλγόριθμο μειωμένης πολυπλοκότητας.

Έχοντας την ανάθεση των καναλιών από τη λύση του παραπάνω προβλήματος, για τη κατανομή της ισχύος καταστρώνεται το παρακάτω πρόβλημα:

$$\begin{aligned}
 R_i^* & \geq \sum_{j=1}^N \frac{B}{N} \log(1 + x_{ij} \bar{P} e_{ij}) \\
 s.t \quad & \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^N p_{ij} \leq P^{max}
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

Δεδομένου του διανύσματος \mathbf{R}^* , από τη λύση των (3.3) ή (3.4), και της ανάθεσης των καναλιών από το πρόβλημα (3.5) οι συγγραφείς προτείνουν και ένα δεύτερο αλγόριθμο που υπολογίζει τη λύση του προβλήματος (3.6), και βρίσκεται έτσι την βέλτιστη κατανομή ισχύος.

Οι αλγόριθμοι αυτοί προσομοιώθηκαν σε σύστημα OFDMA 10 χρηστών και 256 καναλιών με μέσο σηματοθορυβικό λόγο SNR 10dB.

Σε μια παρόμοια με τη προηγούμενη έρευνα [34] οι συγγραφείς μοντελοποιούν το πρόβλημα ως εξής:

$$\begin{aligned}
 & \max \sum_{i=1}^K \ln(R_i - R_{i, \min}) \\
 s.t \quad & p_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j \\
 & x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \\
 & \sum_{i=1}^K x_{ij} = 1 \quad \forall j \\
 & \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^N p_{ij} = P_{total}
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

Κάνοντας τη παραδοχή ισοκατανομής ισχύος δημιουργούν ένα απλοποιημένο πρόβλημα:

$$\begin{aligned}
 & \max \sum_{i=1}^K \ln(R_i - R_{i, \min}) \\
 & x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \\
 & \sum_{i=1}^K x_{ij} = 1 \quad \forall j
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

Αυτό το πρόβλημα παραμένει υπολογιστικά δύσκολο, όμως θεωρώντας ότι κριτήριο είναι η λύση του προβλήματος για τη μέση τιμή των ρυθμών σε διάρκεια ενός παραθύρου μεγαλύτερου της χρονοθυρίδας, και κάνοντας ανάλυση του προβλήματος καταλήγει σε μία σχέση μεγιστοποίησης που καθορίζει τη βέλτιστη κατανομή των καναλιών σε χρήστες.

Έχοντας αυτή την ανάθεση καναλιών καταλήγει στο απλοποιημένο πρόβλημα :

$$\begin{aligned}
 & \max \sum_{i=1}^K \ln(R_i - R_{i, \min}) \\
 s.t \quad & p_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j \\
 & \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^N p_{ij} = P_{total}
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

Το οποίο οδηγεί στη γνωστή λύση multi-level waterfilling, Σε περίπτωση όμως που, όπως στα πρακτικά συστήματα OFDMA, η κωδικοποίηση επιτρέπει μόνο κβαντισμένο αριθμό ρυθμών μετάδοσης προτείνει ένα αλγόριθμο ανάθεσης bit (bit allocation algorithm).

Σε αυτή τη περίπτωση αρχικά κάθε κανάλι δεν έχει κανένα bit. Έπειτα σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου υπολογίζεται το κανάλι που παρέχει τη μέγιστη αύξηση της συνάρτησης χρησιμοποίησης ανά ισχύ που απαιτείται. Όταν υπολογιστεί αυτή η ισχύς ανατίθεται στο κανάλι. Αυτός ο αλγόριθμος επαναλαμβάνεται μέχρι η ισχύς να μη ξεπεράσει τη μέγιστη συνολική ισχύ της κυψέλης.

3.5 Αλγόριθμοι βασισμένοι σε ουρές και στη θεωρία των συστημάτων αναμονής

Μία άλλη εκδοχή είναι η χρησιμοποίηση της θεωρίας των συστημάτων αναμονής για την επίλυση των προβλημάτων ανάθεσης πόρων των OFDMA κυψελών. Οι V.K.N. Lau, Y. Cui στη δημοσίευσή τους [35], θεώρησαν ουρές με τα πακέτα που στέλνουν οι χρήστες. Έτσι οδηγήθηκαν στην αντιμετώπιση του προβλήματος με τη χρήση της θεωρίας των συστημάτων αναμονής. Μοντελοποίησαν έτσι το πρόβλημα σαν ένα πρόβλημα απόφασης Markov (Markov Decision Problem MDP), όπου οι αποφάσεις παίρνονται συναρτήσει των πληροφοριών της κατάστασης των καναλιών (Channel State Information) και των πληροφοριών της κατάστασης της ουράς κάθε χρήστη (Queue State Information). Αυτές οι παραδοχές οδηγούν σε ένα πρόβλημα στοχαστικής μεγιστοποίησης της συνάρτησης χρησιμοποίησης δικτύου (stochastic Network Utility Maximization NUM), και για τη λύση αυτή προτείνουν ένα online επαναληπτικό αλγόριθμο που προσεγγίζει τις ζητούμενες στοχαστικές τιμές. Φυσικά πάλι υπάρχουν οι ίδιοι περιορισμοί όσον αφορά την ισχύ και τα κανάλια.

Για να λύσουν το πρόβλημα χρησιμοποιούν το θεώρημα Little για να υπολογίσουν τη μέση καθυστέρηση κάθε ουράς και τη ισχύ. Επίσης κάνουν χρήση της εξίσωσης Bellman και καταλήγουν σε σχέσεις που δίνουν βέλτιστες τιμές ισχύος και ανάθεσης καναλιών για κάθε κατάσταση του συστήματος. Όμως έπειτα κάνει μια απλοποίηση στην ανάθεση καναλιών όπου πλέον εξαρτάται αποκλειστικά από τη κατάσταση των καναλιών και καταφέρνει έτσι να χωρίσει (decompose) το πρόβλημα σε K (όσοι είναι οι χρήστες) υποπροβλήματα. Έτσι δημιουργείται ένας νέος αλγόριθμος μειωμένης πολυπλοκότητας τόσο σε πράξεις όσο και σε απαιτήσεις μνήμης. Οι προσομοιώσεις γίνονται σε κυψέλη 64 καναλιών συνολικού εύρους 10MHz.

3.6 Αλγόριθμοι βασισμένοι στην ελαχιστοποίηση της εκπεμπόμενης συνολικής ισχύος

Πέρα από τους αλγορίθμους που σκοπό έχουν να μεγιστοποιήσουν το συνολικό ρυθμό μετάδοσης μιας κυψέλης, υπάρχει και μία άλλη κατηγορία που αντιμετωπίζει το πρόβλημα από μία διαφορετική σκοπιά. Αυτοί είναι οι αλγόριθμοι που σκοπό έχουν να ελαχιστοποιήσουν την συνολικά εκπεμπόμενη ισχύ, σεβόμενοι πάντα κάποια ελάχιστα όρια ρυθμού μετάδοσης των χρηστών με βάση τις υπηρεσίες που αιτούνται. Μαθηματικά το μοντέλο αυτό έχει την εξής μορφή:

$$\begin{aligned}
 \min P_T &= \sum_{i=1}^K \sum_{j=0}^N p_{ij} \\
 \text{s.t. } \sum_{j=1}^N x_{ij} r_{ij} &\geq R_{i, \min} \\
 \sum_{i=1}^K x_{ij} &\leq 1 \quad \forall j \in N \\
 x_{ij} &\in \{0,1\} \quad \forall i, j
 \end{aligned} \tag{3.10}$$

Στην ουσία θέτει ως στόχο η ισχύς που μοιράζεται στα κανάλια να γίνει όσο το δυνατόν ελάχιστη, αρκεί όμως να ικανοποιούν τον περιορισμό ότι ο ρυθμός είναι μεγαλύτερος ενός ελάχιστου απαιτούμενου ρυθμού $R_{i, \min}$ που εξαρτάται κάθε φορά από τις υπηρεσίες που αιτείται ο κάθε χρήστης (Quality of Service). Ο δεύτερος περιορισμός είναι (ο αυτονόητος για OFDMA συστήματα) ότι κάθε κανάλι μπορεί να χρησιμοποιηθεί από ένα και μόνο χρήστη.

Αυτή η αντιμετώπιση του προβλήματος ανάθεσης πόρων σε OFDMA δίκτυα έχει πολύ μεγάλο ενδιαφέρον καθώς είναι τάση της εποχής μας να γίνεται πολύ αποδοτική χρήση των πόρων (ισχύος) κυρίως για οικονομικούς λόγους. Οι D. Kivanc, G. Li και H. Liu στη δημοσίευσή τους [36], προσπαθούν να διερευνήσουν το πρόβλημα ικανοποίησης κάποιων απαιτήσεων σε ρυθμό μετάδοσης από τους χρήστες και παράλληλα επίτευξης της όσο το δυνατόν ελάχιστης κατανάλωσης ισχύος.

Το πρόβλημα που παρουσιάζουν έχει τη μαθηματική μορφή της εξίσωσης (3.10). Για να λύσουν το πρόβλημα αυτό το χωρίζουν σε δύο βήματα:

1. Ανάθεση πόρων (resource allocation), όπου ο σταθμός αποφασίζει τον αριθμό των καναλιών που θα πάρει ο κάθε χρήστης, βασισμένος στο ρυθμό μετάδοσης που αιτείται ο κάθε χρήστης και στο μέσο κέρδος των καναλιών (average channel gain), όπως τα 'βλέπει' ο κάθε χρήστης.
2. Ανάθεση καναλιών (channel allocation), όπου ανάλογα με τα αποτελέσματα της ανάθεσης του πρώτου βήματος και της κατάστασης των καναλιών, αναθέτει τα κανάλια στους χρήστες.

Η λύση του προβλήματος δεν είναι η βέλτιστη δυνατή αλλά είναι αρκούντως ικανοποιητική. Για το πρώτο βήμα προτείνει ένα αλγόριθμο όπου:

1. *κάθε χρήστης παίρνει κανάλια ανάλογα με τις ελάχιστες απαιτήσεις του*
2. *Έπειτα*
 - 2.1. *Εάν ο αριθμός των καναλιών είναι μεγαλύτερος από τα διαθέσιμα κανάλια του συστήματος, τότε απορρίπτεται ο χρήστης με τη μικρότερη ζήτηση καναλιών. Αυτό γίνεται μέχρι ο αριθμός καναλιών να γίνει μικρότερος ή ίσος με τον αριθμό των διαθέσιμων καναλιών.*
 - 2.2. *Έπειτα όσο ο αριθμός των καναλιών είναι μικρότερος του αριθμού των διαθέσιμων, δίνει ένα κανάλι τη φορά σε αυτόν το χρήστη, ο οποίος θα προσφέρει τη μεγαλύτερη μείωση στην απαιτούμενη συνολική ισχύ.*

Για το δεύτερο βήμα δίνονται δύο αλγόριθμοι. Ο πρώτος:

1. Αναθέτει κάθε κανάλι στο χρήστη ο οποίος επιτυγχάνει το μεγαλύτερο ρυθμό μετάδοσης με το κανάλι αυτό.
2. Για κάθε χρήστη που έχει μεγαλύτερο αριθμό καναλιών από αυτά που του αντιστοιχούν από το πρώτο βήμα, παίρνουν τα κανάλια αυτά και με καινούργιες αναθέσεις (που μπορεί να μπλέκει και άλλα κανάλια αλλά και χρήστες) προσπαθούν να επιτύχουν μεγιστοποίηση του συνολικού ρυθμού μετάδοσης. Αυτό γίνεται μέχρι κανένας χρήστης να μην έχει περισσότερα κανάλια από αυτά που του αντιστοιχούν.

Ο δεύτερος απαιτεί κάθε χρήστη να μπορεί να ζητήσει μόνο τον αριθμό των καναλιών που του αντιστοιχούν. Μόλις το επιτύχει δε μπορεί πλέον να ζητήσει άλλο κανάλι. Τα μέσα κέρδη των καναλιών κανονικοποιούνται ανά χρήστη ώστε να μπορεί και κάποιος χρήστης με δυσμενείς συνθήκες να λάβει κανάλια:

1. Τα κανάλια διατρέχονται τυχαία, ένα κάθε φορά.
2. Κάθε κανάλι δίνεται στο χρήστη που παρουσιάζει το μέγιστο κανονικοποιημένο κέρδος, και δεν έχει ξεπεράσει τον αριθμό καναλιών που δικαιούται.

3.7 Αλγόριθμοι βασισμένοι στη μεγιστοποίηση του ρυθμού μετάδοσης

Στην βιβλιογραφία που ερευνήθηκε η συντριπτική πλειοψηφία αναφέρονταν σε αυτού του είδους αλγορίθμων. Θα μπορούσαμε να θέσουμε το πρόβλημα που αντιμετωπίζουν με μαθηματική μορφή ως:

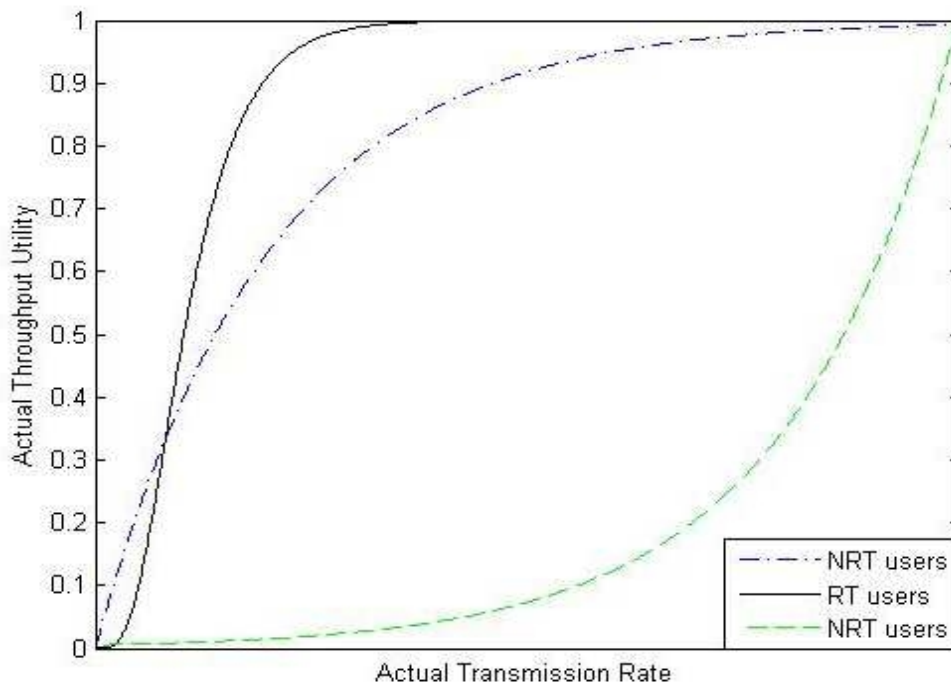
$$\begin{aligned} & \max \sum_{i=1}^K U_i(r) \\ \text{s.t} \quad & \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^N p_{ij} \leq P \\ & \sum_{i=1}^K x_{ij} \leq 1 \quad \forall j \in N \\ & p_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j \in K, N \\ & x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in K, N \end{aligned} \tag{3.11}$$

Δηλαδή, όπως είναι κατανοητό, στόχος για τη κυψέλη είναι να μεγιστοποιήσει το άθροισμα των συναρτήσεων του ρυθμού μετάδοσης (η οποία μπορεί να εξαρτάται και από άλλα μεγέθη) κάθε χρήστη. Φυσικό είναι η συνάρτηση αυτή να εξαρτάται και από το είδος της υπηρεσίας που αιτείται ο χρήστης κάθε συγκεκριμένη στιγμή, δηλαδή τη Quality of Service (QoS).

Τυπικά στην υπάρχουσα βιβλιογραφία τόσο στις ενσύρματα όσο και στις ασύρματα δίκτυα χρησιμοποιούνται συναρτήσεις U_i με τις εξής ιδιότητες:

1. Η U_i είναι αύξουσα συνάρτηση του ρυθμού μετάδοσης R_i .
2. Η U_i είναι δύο φορές διαφορίσιμη και συνεχής.
3. Η $U_i(0)=0$.
4. Η U_i είναι άνω φραγμένη.
5. Η U_i είναι σιγμοειδής ή αυστηρώς κυρτή ή αυστηρώς κοίλη.

Συνήθως σιγμοειδείς είναι οι συναρτήσεις U_i που χαρακτηρίζουν υπηρεσίες πραγματικού χρόνου (Real Time, RT), όπως είναι η τηλεφωνία και οι βιντεοκλήσεις. Αυτές χαρακτηρίζονται από απαιτήσεις ελάχιστου συγκεκριμένου ρυθμού μετάδοσης πέρα από τον οποίο η ποιότητα της υπηρεσίας μειώνεται δραματικά. Κυρτές ή κοίλες είναι οι συναρτήσεις που χαρακτηρίζουν υπηρεσίες μη-πραγματικού χρόνου (Non Real Time, NRT), όπως η μεταφορά αρχείων. Οι συναρτήσεις αυτές παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3.3: Παρουσίαση των τριών τύπων συναρτήσεων ευχαρίστησης U_i .

Υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί στους πόρους του συστήματος, όπως φαίνεται από τον τύπο(3.11). Ο ένας είναι ότι το σύνολο της ισχύος που κατανέμεται σε κάθε κανάλι από κάθε χρήστη δε μπορεί να ξεπεράσει τη συνολική ισχύ που είναι διαθέσιμη στη κυψέλη. Και φυσικά για να μιλάμε για ένα πραγματοποιήσιμο σύστημα πρέπει η κάθε ισχύς p_{ij} να είναι θετικός πραγματικός αριθμός. Επίσης ο άλλος περιορισμός είναι ότι σε κάθε κανάλι το

άθροισμα του ποσοστού του χρόνου που κάθε χρήστης χρησιμοποιεί ένα κανάλι δε μπορεί να ξεπερνά τη μονάδα, δηλαδή τη μία χρονοθυρίδα (timeslot). Και έπειτα για να είναι πιο ρεαλιστικό το σύστημα θέτουμε τον όρο αυτό το κλάσμα να είναι μονάδα ή μηδέν, δηλαδή σε κάθε κανάλι να αντιστοιχείται μόνο ένας χρήστης, όπως συμβαίνει στα πραγματικά συστήματα OFDMA.

Στη δημοσίευση [37], οι H. Lee και S. Chong επιχειρούν να συγκρίνουν τις δύο επιλογές όσον αφορά τη κατανομή της ισχύος και ελέγχουν κατά πόσο η ισοκατανομή ισχύος είναι κοντά στη βέλτιστη λύση.

Φυσικά αναγνωρίζεται η δυσκολία να λυθεί το πρόβλημα έχοντας δύο βαθμούς ελευθερίας (τη κατανομή ισχύος και την ανάθεση καναλιών), επομένως οι συγγραφείς υποθέτουν τη δυνατότητα χρησιμοποίησης ενός καναλιού από πολλούς χρήστες για να κάνουν το πρόβλημα πιο εύκολο.

Χρησιμοποιούν στην ουσία δύο προβλήματα. Το πρώτο (εσωτερικό):

$$\begin{aligned} \max_{x, p \geq 0} & \sum_i \sum_j w_{ij} x_{ij} \log(1 + e_{ij} p_j) \\ \text{s.t.} & \sum_j p_j \leq P \\ & \sum_i x_{ij} \leq 1, \quad \forall j \in N \end{aligned} \quad (3.12)$$

Και το δεύτερο(εξωτερικό):

$$\begin{aligned} \text{s.t.} & \mu \leq \max_{p \geq 0} L(x, p, \lambda), \quad \forall \lambda \geq 0 \\ & \sum_i x_{ij} \leq 1, \quad \forall j \in N \end{aligned} \quad (3.13)$$

Όπου $L(x, p, \lambda)$ είναι η Lagrangian του (3.12) ως προς το πρώτο περιορισμό.

Στην ουσία για να λυθεί το πρόβλημα, ξεκινάμε με μία δεδομένη ανάθεση καναλιών \mathbf{x}^0 . Βάση αυτής της ανάθεσης, από τη σχέση (3.12) προκύπτει μια ανάθεση ισχύος \mathbf{p}^1 . Με αυτή την ανάθεση ισχύος και με το πρόβλημα (3.13) προκύπτει μία καινούργια κατανομή καναλιών \mathbf{x}^1 . Βάζοντας αυτή την ανάθεση καναλιών στο πρώτο πρόβλημα προκύπτει μια καινούργια κατανομή \mathbf{p}^2 . Έτσι επαναληπτικά συνεχίζουμε μέχρι να βρούμε τη λύση που αποδεικνύεται ότι φτάνουμε σε πεπερασμένο αριθμό βημάτων.

Στη συνέχεια προτείνουν ένα νέο αλγόριθμο πιο απλό:

1. Θεωρούμε ισοκατανομή ισχύος και $k=0$.
2. Όσο αλλάζει η ανάθεση καναλιών:
 - 2.1. Χρησιμοποιούμε μία σχέση μεγιστοποίησης για να γίνει η ανάθεση κάθε καναλιού σε ένα χρήστη: $m^k(j) = \arg \max_i w_i \log(1 + e_{ij} p_j^k)$, όπου m είναι ο χρήστης που

ανατίθεται το κανάλι j .

2.2. Λύνουμε το πρόβλημα:

$$\begin{aligned} \mathbf{p}^{k+1} &= \arg \max_{\mathbf{p} \geq 0} \sum_j w_{m^k(j)} \log(1 + e_{m^k(j)j} p_j) \\ \text{s.t.} \quad & \sum_j p_j \leq P \end{aligned} \quad (3.14)$$

2.3 Θέτουμε $k=k+1$.

3. $(\mathbf{m}^{k-1}, \mathbf{p}^k)$ είναι μία υποβέλτιστη (suboptimal) ανάθεση καναλιών και ισχύος.

Για τη προσομοίωση του αλγορίθμου και την σύγκρισή του με αυτόν που θέτει ισοκατανομή ισχύος (που δεν είναι άλλος από τον προηγούμενο εκτελώντας μόνο μέχρι το βήμα 2.2), χρησιμοποιείται σύστημα OFDMA 6 χρηστών και 8 καναλιών με συνολικό εύρος ζώνης 20MHz.

Σε μια άλλη δημοσίευση [38] οι C. Weeraddana, W. Li, M. Codreanu και M. Latvaaho, έχοντας ερευνήσει και άλλες μελέτες οδηγήθηκαν στη χαλάρωση της συνθήκης ένας χρήστης ανά κανάλι. Έτσι οδηγήθηκαν σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης της μορφής:

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^N w_i \log \left(1 + \frac{P_{ij}}{\sum_{k=1, k \neq i}^K p_{kj} + \frac{1}{e_{ij}}} \right) \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^N p_{ij} = P \\ & p_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j \end{aligned} \quad (3.15)$$

Σε αυτή τη περίπτωση παρόλο που μπορούν περισσότεροι χρήστες να χρησιμοποιήσουν ένα κανάλι, κάτι τέτοιο αποφεύγεται αυτόματα, γιατί κάθε επιπλέον χρήστης στο κανάλι εισάγει παρεμβολές στους άλλους χρήστες που μοιράζονται αυτό το κανάλι. Αυτό έχει αποτέλεσμα να μειωθεί δραστικά ο μέγιστος δυνατός ρυθμός. Δηλαδή βλέπουμε ότι ακόμη και εάν επιτρέψουμε τους χρήστες να μοιραστούν ένα κανάλι, το ίδιο το σύστημα με τη μορφή της συνάρτησης χρησιμοποίησης τους αποτρέπει.

Θέτοντας μεταβλητή $p_j = \sum_{i=1}^K p_{ij}$ δηλαδή τη συνολική ισχύ σε κάθε κανάλι το πρόβλημα πλέον παίρνει τη μορφή:

$$\begin{aligned}
 & \max \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^N w_i \log \left(1 + \frac{p_{ij}}{p_j - p_{ij} + \frac{1}{e_{ij}}} \right) \\
 & \text{s.t.} \quad \sum_{j=1}^N p_j = P \\
 & \quad \sum_{i=1}^K p_{ij} = p_j \quad \forall j \\
 & \quad p_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j
 \end{aligned} \tag{3.16}$$

Επομένως μπορεί πλέον το πρόβλημα να αναλυθεί σε N υποπροβλήματα που συντονίζονται από ένα κύριο πρόβλημα. Τα N υποπροβλήματα έχουν τη μορφή:

$$\begin{aligned}
 & \max \sum_{i=1}^K w_i \log \left(1 + \frac{p_{ij}}{p_j - p_{ij} + \frac{1}{e_{ij}}} \right) \\
 & \text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^K p_{ij} = p_j \\
 & \quad p_{ij} \geq 0 \quad \forall i
 \end{aligned} \tag{3.17}$$

Και το κύριο πρόβλημα είναι:

$$\begin{aligned}
 & \max \sum_{j=1}^N f_j^*(p_j) \\
 & \text{s.t.} \quad \sum_{j=1}^N p_j = P \\
 & \quad p_j \geq 0 \quad \forall j
 \end{aligned} \tag{3.18}$$

Με f_j^* συμβολίζεται η βέλτιστη τιμή του προβλήματος (3.17) για δεδομένη τιμή της ισχύος p_j . Από τη λύση των N υποπροβλημάτων παίρνουμε μία σχέση που αντιστοιχίζει κάθε κανάλι σε **ένα και μόνο χρήστη**. Η σχέση αυτή είναι η $i_j = \operatorname{argmax}_i (1 + p_j e_{ij})^{w_i}$ όπου το i_j δείχνει το χρήστη i που αντιστοιχεί στο κανάλι j .

Επομένως ο αλγόριθμος είναι:

1. Αρχικά θεωρούμε ισοκατανομή ισχύος στα κανάλια.
2. Λύνουμε τα N υποπροβλήματα με τις τιμές ισχύος που έχουμε και προκύπτει η αντιστοίχιση κάθε καναλιού με ένα χρήστη.
3. Λύνουμε τη προσέγγιση του κυρίου προβλήματος με τις αντιστοιχίσεις που έχουμε:

$$\begin{aligned}
 & \max \sum_{j=1}^N w_j \log(1 + p_j e_{i,j}) \\
 & \text{s.t. } \sum_{j=1}^N p_j = P \\
 & \quad p_j \geq 0 \quad \forall j
 \end{aligned} \tag{3.19}$$

που μας δίνει καινούργιες τιμές για την ισχύ ανά κανάλι.

4. Ελέγχουμε τα αποτελέσματα. Εάν δεν επιφέρουν κάποια αλλαγή με τις προηγούμενες τιμές ή είναι εντός στα όρια ενός σφάλματος σταματάμε. Αλλιώς πηγαίνουμε στο δεύτερο βήμα.

Ο αλγόριθμος αυτός προσομοιώθηκε σε κυψέλη 8 καναλιών, 4 χρηστών και ισχύος 16W.

Όπως βλέπουμε η ιδέα των συγγραφέων είναι πρακτικά ίδια με αυτή των συγγραφέων J.Huang, V. Subramanian, R. Agrawal, R. Berry πάνω στην οποία θα βασιστεί η διπλωματική. Στη δημοσίευσή τους [39], έχουν αντιμετωπίσει με πολύ αποδοτικό και κατανοητό τρόπο το πρόβλημα που παρουσιάζει η βέλτιστη κατανομή πόρων στα OFDMA συστήματα. Η εργασία αυτή μπορεί να θεωρηθεί σα συνέχεια και επέκταση της δημοσίευσης των R. Agrawal, V. Subramanian και R. Berry [40], στην οποία αντιμετωπίζουν το πρόβλημα της κατανομής πόρων στα CDMA συστήματα.

Στη παρούσα δημοσίευση, λοιπόν, οι συγγραφείς θεωρούν το διάνυσμα \mathbf{r}^2 (rate) των ρυθμών μετάδοσης των χρηστών και μια συνάρτηση χρησιμοποίησης (χρησιμοποίησης) συστήματος (system utility function) ως $U(\mathbf{W})$, όπου \mathbf{W} συμβολίζεται τη μέση διεκπεραιωτικότητα (average throughput). Στόχος είναι η μεγιστοποίηση της $U(\mathbf{W})$, που είναι το άθροισμα των συναρτήσεων κάθε χρήστη. Αυτό επιτυγχάνεται με την επιλογή του \mathbf{r} ώστε να μεγιστοποιεί τη προβολή του \mathbf{r} πάνω στη κλίση (gradient) της συνάρτησης χρησιμοποίησης του συστήματος, δηλαδή:

$$\max_{\mathbf{r} \in \mathbf{R}^k} \nabla U(\mathbf{W})^T \cdot \mathbf{r} = \max_{\mathbf{r} \in \mathbf{R}^k} \sum_i \dot{U}_i(\mathbf{W}_i) r_i \tag{3.20}$$

Το πρόβλημα αυτό είναι της μορφής (3.2) το οποίο στη γενική του περίπτωση ανήκει στη λεγόμενη τάξη mixed binary integer programming καθώς το $x_{ij} \in \{0,1\}$. Η λύση αυτού του προβλήματος είναι πολύ δύσκολη στο χρόνο κατά το οποίο πρέπει να γίνει αυτό, δηλαδή στη διάρκεια μίας χρονοθυρίδας (timeslot).

Για να το αντιμετωπίσουν το πρόβλημα αυτό, οι συγγραφείς έκαναν τη παραδοχή ότι επιτρέπεται να μοιράζονται οι χρήστες το ίδιο κανάλι για διαφορετικό κλάσμα του χρόνου ο καθένας. Επομένως έθεσαν $x_{ij} \in [0,1]$. Με αυτό το τρόπο έκαναν το πρόβλημα εμφανώς πιο εύκολο. Η μέθοδος που ακολούθησαν ονομάζεται **Lagrangian Relaxation** και είναι μία τεχνική που οδηγεί στη μεταφορά των περιορισμών (constraints) στο στόχο της βελτιστοποίησης (objective). Χρησιμοποιώντας τις συνθήκες **Karush-Khun-Tucker** οδηγούνται σε αναλυτικούς τύπους τόσο της ισχύος p_{ij} , όσο του x_{ij} , και αποδεικνύουν ότι το πολύ δύο χρήστες μοιράζονται κάθε κανάλι, με το ίδιο ποσοστό. Στη συνέχεια προτείνουν

2 Όπως και σε όλη τη διπλωματική με έντονη γραφή στους τύπους συμβολίζουμε τα διανύσματα.

και τρόπους με τους οποίους από τη λύση αυτή μπορούμε να οδηγηθούμε σε λύσεις με ένα μόνο χρήστη σε κάθε κανάλι.

Ιδιαίτερης σημασίας είναι και οι υποβέλτιστες (sub-optimal) λύσεις που προτείνουν στο τέλος, όπου η ανάθεση των καναλιών γίνεται με βάση τις μετρήσεις SNIR, και την δεδομένη ισχύ P . Στον πρώτο αλγόριθμο μετά την ανάθεση σε κάθε κανάλι δίδεται ισχύ P/N (όπου N ο αριθμός των καναλιών), δηλαδή γίνεται ισοκατανομή της ισχύος. Στον δεύτερο αλγόριθμο μετά την κατανομή του φάσματος, γίνεται μία βελτιστοποίηση ως προς τη κατανομή της ισχύος, που προφανώς είναι πιο εύκολη καθώς υπάρχει πλέον μόνο ένας 'βαθμός ελευθερίας'. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι προσομοιώσεις έγιναν με βάση του προτύπου IEEE 802.16 (40 χρήστες, 6W ισχύς εκπομπής, 512 κανάλια συνολικού εύρους 5MHz ομαδοποιημένα σε 64 ομάδες).

Οι ίδιοι ακριβώς συγγραφείς, σε μία άλλη τους δημοσίευση [41] αντιμετωπίζουν το πρόβλημα της κατανομής πόρων στα OFDMA δίκτυα αλλά αυτή τη φορά για την ανερχόμενη ζεύξη. Η ανερχόμενη ζεύξη (uplink) ενέχει άλλες δυσκολίες σε σχέση με τη κατερχόμενη που μελετήθηκε. Πέρα από το ακέραιο αριθμό καναλιών, και τη κατανομή της ισχύος που είναι 'κληρονομημένα' από τη φύση του OFDMA, στη περίπτωση της ανερχόμενης ζεύξης πρέπει να αντιμετωπιστεί το γεγονός ότι ο κάθε χρήστης/συσκευή εκπέμπει πλέον, και όχι ο σταθμός βάσης (base station). Επομένως η ισχύς εξαρτάται πλέον από το κάθε χρήστη/συσκευή. Παρόλα αυτά οι συγγραφείς αντιμετωπίζουν το πρόβλημα με τον ίδιο τρόπο. Βέβαια υπολογίζουν τη συνάρτηση χρησιμοποίησης (utility function) και συναρτήσει του μεγέθους της ουράς κάθε χρήστη (queue-length Q_i). Κάνοντας λοιπόν χρήση της μεθόδου Lagrange Relaxation βρίσκουν πάλι αναλυτικούς τύπους για την ισχύ (και σε αυτή τη περίπτωση είναι water-filling), αλλά υπάρχουν μεγαλύτερες δυσκολίες για την εύρεση της βέλτιστης κατανομής των καναλιών. Γι αυτό το σκοπό προτείνονται δύο υποβέλτιστοι (sub-optimal) αλγόριθμοι. Και οι δύο είναι χωρισμένοι σε δύο φάσεις. Στη πρώτη γίνεται η κατανομή των καναλιών και στη δεύτερη η ανάθεση ισχύος.

Και πάλι, όπως στη περίπτωση της κατερχόμενης ζεύξης, στο πρώτο αλγόριθμο η ανάθεση των καναλιών γίνεται με βάση το SNIR που βλέπει κάθε χρήστης σε κάθε κανάλι και θεωρώντας ισοκατανομή ισχύος στα κανάλια. Έπειτα έχοντας την ανάθεση των καναλιών κάνουν βέλτιστη κατανομή ισχύος με τη μέθοδο water-filling, όπως και στη περίπτωση της κατερχόμενης ζεύξης.

Στο δεύτερο αλγόριθμο στη φάση της ανάθεσης των καναλιών βρίσκεται πρώτα ο αριθμός των καναλιών που θα χρησιμοποιήσει κάθε χρήστης, και μετά γίνεται η ανάθεση των καναλιών ανά χρήστη. Η φάση ανάθεσης ισχύος είναι ίδια με του πρώτου αλγόριθμου.

Οι προσομοιώσεις που κάνουν βασίζονται και πάλι στο πρότυπο IEEE 802.16, με τις ίδιες τιμές όπως και στη κατερχόμενη ζεύξη. Το μόνο που αλλάζει είναι ότι κάθε χρήστης έχει μέγιστη ισχύ εκπομπής τα 2W.

Σε μια άλλη έρευνα τους [42] αντιμετωπίζουν το πρόβλημα και με ατελή γνώση της κατάστασης των καναλιών, αλλά αφού μοντελοποιούν στοχαστικά το σηματοθορυβικό λόγο, η ανάλυση μετέπειτα είναι η ίδια με τις προηγούμενες έρευνες. Άλλη έρευνα με ατελής γνώση των καναλιών είναι των I. C. Wong και B. L. Evans [43]. Η λύση που προτείνει είναι παρόμοια σε σκεπτικό για αυτό και δε γίνεται εκτενής αναφορά.

Σε μία δημοσίευση των R. Agarwal, V. Majjigi, H. Zhu, R. Vannithamby και J.

Cioffi, [44], δίνεται έμφαση και στη σημασία της τροφοδότησης των τιμών του κέρδους κάθε καναλιού ανά χρήστη. Χρησιμοποιώντας ομορτυνιστική τροφοδότηση (πληροφορίες στέλνουν μόνο οι χρήστες με αυξημένη πιθανότητα να επιλεχθούν, κυρίως λόγω του καλύτερου κέρδους που βλέπουν σε σχέση με άλλους χρήστες) των τιμών επιτυγχάνει σημαντικά τη μείωση της τροφοδότησης, και έπειτα αντί να λυθεί το πρόβλημα μεγιστοποίησης συγκεντρωτικά, κατανέμεται σε N υποπροβλήματα (N είναι ο αριθμός των υποκαναλιών) μειώνοντας ακόμη περισσότερο την απαραίτητη τροφοδότηση.

3.8 Οικογένεια αλγορίθμων μεγιστοποίησης με R_{\min} ή/και R_{\max} , και άλλους περιορισμούς

Μια παραλλαγή του παραπάνω προβλήματος είναι εάν θέσουμε στους περιορισμούς και κάποιες απαιτήσεις από τη μεριά των πελατών ή και του δικτύου. Τέτοιες μπορεί να είναι είτε ελάχιστες απαιτήσεις του ρυθμού μετάδοσης R_{\min} , ή και μέγιστος ρυθμός μετάδοσης ανά χρήστη R_{\max} . Κάποιες άλλες παραλλαγές περιλαμβάνουν και άλλες απαιτήσεις συνήθως ως προς χαρακτηριστικά του ρυθμού μετάδοσης (πχ όπως θα δούμε μέγιστη διακύμανση του ρυθμού μετάδοσης). Όλοι αυτοί οι περιορισμοί έχουν ως στόχο τη δημιουργία ρητά καθορισμένων υπηρεσιών (QoS) που μπορεί να υποστηρίξει το δίκτυο.

Σε δημοσίευση των F. Brah, L. Vandendorpe και J. Louveaux [45], οι ερευνητές μοντελοποιούν το πρόβλημα με τη παραδοχή της ατελούς γνώσης της κατάστασης των καναλιών. Στο τέλος της μελέτης κάνουν μια παραδοχή ότι το πρόβλημα μοντελοποιείται με βάση την αναμενόμενη κατάσταση του καναλιού (και πλέον παρουσιάζει πολλές ομοιότητες με το πρόβλημα της τέλει γνώσης της κατάστασης των καναλιών). Το πρόβλημα έχει ως εξής:

$$\begin{aligned}
 & \max \sum_{i=0}^K \frac{1}{\bar{R}_i^{(1-a_f)}} \sum_{j=1}^N p_{ij} \log(1 + p_{ij} e_{ij}) \\
 & s.t \quad \sum_{j=1}^N \log(1 + p_{ij} e_{ij}) \geq R_i \quad \forall i \\
 & \quad \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^N p_{ij} \leq P_{total} \\
 & \quad \sum_{i=1}^K x_{ij} = 1 \quad \forall j \\
 & \quad x_{ij} \in [0,1] \quad \forall i, j
 \end{aligned} \tag{3.21}$$

όπου έχουμε ελάχιστη απαίτηση κάθε χρήστη R_i , μέσος ρυθμός κάθε χρήστη \bar{R}_i και το δείκτη δικαιοσύνης (fairness index) a_f . Παρατηρούμε ότι έχει κάνει παραδοχή ότι ένα κανάλι μπορεί να μοιράζεται από πολλούς χρήστες. Ομοίως με τις άλλες αναλύσεις προκύπτει ότι η βέλτιστη λύση είναι ένας χρήστης ανά κανάλι. Για να βρει τη ανάθεση των καναλιών στους χρήστες, προκύπτει από την ανάλυση μία σχέση αναζήτησης μιας μέγιστης τιμής από τους χρήστες σε κάθε κανάλι. Δηλαδή κάθε κανάλι δίνεται στο χρήστη που μεγιστοποιεί αυτή τη συνάρτηση. Έπειτα από τη κατανομή η ανάθεση της ισχύος γίνεται με τη τεχνική της multi-level waterfilling, όπως έχουμε δει από τις περισσότερες μελέτες. Η

σχέση της ισχύος τώρα εξαρτάται και από την ελάχιστη απαίτηση κάθε χρήστη R_i , το μέσο ρυθμό μετάδοσης κάθε χρήστη \bar{R}_i , και από το δείκτη δικαιοσύνης (fairness index) α_i εκτός από τους πολλαπλασιαστές Lagrange, όπως στις άλλες περιπτώσεις.

Οι αλγόριθμοι αυτοί προσομοιώθηκαν σε κυψέλη OFDMA, 4 χρηστών και 128 υποκαναλιών ομαδοποιημένα σε 8 ομάδες.

Σε μια άλλη δημοσίευση [46] οι J. Shi και A. Hu επιχειρούν να αντιμετωπίσουν το πρόβλημα με τη χρήση ενός ελάχιστου ρυθμού μετάδοσης κάθε χρήστη επιπλέον, ανάλογα με τις υπηρεσίες που ζητά (QoS). Χρησιμοποιούν οικογένεια συναρτήσεων χρησιμοποίησης $U_i(r_i)$ που ανάλογα με τη μορφοποίηση τους αποσκοπούν στην αποδοτική χρήση του συστήματος ή στη δίκαιη χρήση του ανάμεσα στους χρήστες. Το πρόβλημα τους καταστρώνεται ως εξής:

$$\begin{aligned} \min_{x_{i,j}, p_{i,j}} & -\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K U_i(r_i) \\ \text{s.t.} & \sum_{i=1}^K x_{ij} = 1 \quad \forall j \\ & x_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j \\ & r_i \geq r_{i,\min}, \quad \forall i \end{aligned} \quad (3.22)$$

Κάνοντας και εδώ χρήση της μεθόδου Lagrange Relaxation βρίσκουν εξίσωση μεγιστοποίησης που αντιστοιχεί τα κανάλια στους χρήστες με τρόπο που μεγιστοποιεί τη συνάρτηση χρησιμοποίησης.

Με βάση αυτή τη εξίσωση καταστρώνουν τον εξής αλγόριθμο.

1. Στη πρώτη φάση γίνεται ανάθεση των καναλιών με την εξίσωση αυτή ώστε να μεγιστοποιήσουν τη συνάρτηση χρησιμοποίησης. Δε γίνεται κανένας έλεγχος εάν ικανοποιούνται οι ελάχιστες απαιτήσεις των χρηστών.
2. Σα δεύτερο βήμα, έχοντας μία αρχική ανάθεση καναλιών, γίνεται η δεύτερη ανάθεση κάθε καναλιού ξεχωριστά, βήμα προς βήμα, με στόχο να ικανοποιηθούν οι ελάχιστες απαιτήσεις των χρηστών. Για να το πετύχουν αυτό χρησιμοποιούν μία συνάρτηση κόστους (cost function) σύμφωνα με την οποία, απαιτείται για να γίνει η κάθε ανάθεση, να έχει το μικρότερο δυνατό κόστος στη συνάρτηση χρησιμοποίησης (utility function).
3. Για την ανάθεση της ισχύος απλώς κάνουν ισοκατανομή της σε όλα τα κανάλια προς απλοποίηση του αλγορίθμου, αφού πλέον χάνει τον ένα βαθμό ελευθερίας.

Δηλαδή στόχος της μελέτης αυτής ήταν κυρίως η ανάθεση των καναλιών με ένα απλό υπολογιστικά τρόπο κάνοντας τη παραδοχή της ισοκατανομής ισχύος, η οποία θεωρείται από το σύνολο των ερευνητών ότι έχει ελάχιστες αποκλίσεις από τη βέλτιστη λύση.

Σε μια τρίτη δημοσίευση [47], οι ερευνητές κάνουν στην ουσία παρόμοια μελέτη με

τους J.Huang, V. Subramanian, R. Agrawal, R. Berry [39], αλλά με κάποιες βασικές διαφορές. Θέτουν ρητά τις υπηρεσίες που προσφέρει το σύστημα με την εισαγωγή περιορισμών (constraints) στη μοντελοποίηση του προβλήματος. Στην ουσία θεωρούν δύο υπηρεσίες: πραγματικού χρόνου (real-time RT) και βέλτιστης προσπάθειας (best-efford BE). Έτσι σχηματίζουν το πρόβλημα ως εξής:

$$\begin{aligned}
 & \max \sum_{i=K_{RT}+1}^K \sum_j p_j r_{ij} \\
 s.t \quad & \sum_j p_j r_{ij} \geq R_i \quad \forall i=1, \dots, K \\
 & \sum_j p_j |r_{ij} - R_i| \leq D_i \quad \forall i=1, \dots, K_{RT}
 \end{aligned} \tag{3.23}$$

όπου οι χρήστες ταξινομούνται κατά σειρά με πρώτους αυτούς που αιτούνται υπηρεσίες βέλτιστης προσπάθειας (best-efford). Ο πρώτος περιορισμός ορίζει έναν ελάχιστο ρυθμό μετάδοσης για όλους τους χρήστες, ενώ ο δεύτερος θέτει περιορισμό για τους χρήστες πραγματικού χρόνου (real-time) όπου ουσιαστικά απαιτεί η απόλυτη απόκλιση του ρυθμού μετάδοσης να μην υπερβαίνει ένα κατώφλι, πέρα από το οποίο η ποιότητα της υπηρεσίας (QoS) μειώνεται δραματικά.

Στη μελέτη αυτή έπειτα από εκτενή μαθηματική ανάλυση μετατρέπει αυτό το πρόβλημα στην αναζήτηση ενός διανύσματος ρυθμού μετάδοσης και σε ένα διάνυσμα πολλαπλασιαστών Lagrange (Lagrange multipliers) ενός δεύτερου προβλήματος βελτιστοποίησης που προκύπτει έπειτα από ανάλυση του αρχικού.

Στο τέλος καταλήγει σε ένα επαναληπτικό αλγόριθμο, ο οποίος σε κάθε επανάληψή του κάνει και μια καλύτερη προσέγγιση των δύο αυτών διανυσμάτων. Παρόλο που ο αλγόριθμος αυτός είναι πολύπλοκος και απαιτεί μεγάλο αριθμό πράξεων, στην πράξη μόνο με μερικές επαναλήψεις μπορεί να φτάσει ικανοποιητικά κοντά στο ζητούμενο. Ο αλγόριθμος αυτός προσομοιώθηκε σε σύστημα OFDMA 512 καναλιών και διάρκειας χρονοθυρίδας 4ms, με 4 χρήστες BE και 4 χρήστες RT.

Σε μια άλλη δημοσίευση [48], οι ερευνητές προσπαθούν να επιτύχουν τη μεγιστοποίηση του ρυθμού μετάδοσης όλων των χρηστών του συστήματος. Η εργασία τους ακολουθεί παρόμοια βήματα με τους J.Huang, V. Subramanian, R. Agrawal, R. Berry [39], με τη διαφορά ότι θέτει ένα ελάχιστο ρυθμό μετάδοσης που αιτείται ο κάθε χρήστης. Το πρόβλημα τους μορφοποιείται ως εξής:

$$\begin{aligned}
 & \max \sum_i^K \sum_j^N r_{ij} \\
 s.t \quad & \sum_j r_{ij} \geq R_i \quad \forall i \\
 & \sum_i^K \sum_j^N p_{ij} \leq P \\
 & I_i \cap I_k = \emptyset, \quad \forall i \neq k, \quad \bigcup_{i=1}^K I_i \subseteq \{1, \dots, N\}
 \end{aligned} \tag{3.24}$$

Ο τελευταίος περιορισμός δε λέει κάτι διαφορετικό από το ότι κάθε κανάλι αντιστοιχεί σε ένα μόνο χρήστη, και ότι το σύνολο των καναλιών που έχουν ανατεθεί δε ξεπερνάει σε αριθμό το σύνολο των διαθέσιμων καναλιών (σαν I_i ορίζει το σύνολο των καναλιών που ανήκουν στο χρήστη i).

Έχοντας αυτό το πρόβλημα οι συγγραφείς κάνουν τη παραδοχή ότι επιτρέπεται να μοιράζονται το ίδιο κανάλι διαφορετικοί χρήστες. Σκοπός είναι να απλοποιήσουν το πρόβλημα. Έχοντας την απλοποιημένη εκδοχή χρησιμοποιούν πολλαπλασιαστές Lagrange και αναλύουν το πρόβλημα. Χρησιμοποιώντας τις συνθήκες Karush-Khun-Tucker καταλήγουν σε αναλυτικές σχέσεις που ορίζουν τη βέλτιστη ανάθεση ισχύος και καναλιών.

Υλοποιούν ένα αλγόριθμο (margin adaptive) με τον οποίο ψάχνουν τη λύση του προβλήματος με δεδομένο ότι το σύστημα παρέχει στους χρήστες μόνο τις ελάχιστες απαιτήσεις τους σε ρυθμό μετάδοσης. Βάση αυτών βρίσκει την ελάχιστη ισχύ που απαιτείται για να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις αυτές P_{margin} .

Έτσι κατασκευάζουν τον εξής αλγόριθμο σύμφωνα με τον οποίον επιτυγχάνουν ταυτόχρονα τη βέλτιστη ανάθεση ισχύος και καναλιών. Χρησιμοποιούν στον εξωτερικό βρόχο ένα πολλαπλασιαστή Lagrange με τον οποίο ελέγχουν την ισχύ. Αναθέτουν μια αρχική τιμή στο πολλαπλασιαστή και με το προηγούμενο αλγόριθμο βρίσκουν μία τιμή ισχύος και μία ανάθεση καναλιών. Συνεχίζουν την αύξηση του πολλαπλασιαστή μέχρι η τιμή της ισχύος που προκύπτει να φτάσει τη μέγιστη τιμή της ισχύος αλλά όχι να τη ξεπεράσει.

Στη συνέχεια προτείνουν έναν άλλο αλγόριθμο ο οποίος είναι πιο απλός και φτάνει ξεχωριστά στη βέλτιστη ανάθεση καναλιών και ισχύος. Σε αυτό τον αλγόριθμο χρησιμοποιούν τον margin adaptive αλγόριθμο και αποκτούν μία ανάθεση καναλιών και μια ελάχιστη τιμή ισχύος για την οποία ικανοποιούνται οι ελάχιστες απαιτήσεις των χρηστών. Με βάση αυτές τις τιμές, πολύ απλά αναδιανέμουν την υπόλοιπη ισχύ στα κανάλια με βάση τον multilevel waterfilling αλγόριθμο, ο οποίος κατά γενική παραδοχή είναι ο βέλτιστος, όσον αφορά την ανάθεση ισχύος.

Για τη προσομοίωση των αλγορίθμων χρησιμοποίησαν ένα σύστημα 10 χρηστών με 24 διαθέσιμα κανάλια, εύρους ζώνης το καθένα 375MHz.

4 Παρουσίαση μοντέλου ενοποίησης δικτύων OFDMA/WLAN

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιάσουμε το τρόπο ενοποίησης των κυψελωτών δικτύων OFDMA και των ασύρματων τοπικών δικτύων. Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο η διπλωματική αυτή επιδιώκει να επεκτείνει τη δημοσίευση των Γ. Αριστομενόπουλο, Τ. Καστρινογιάννη και Σ. Παπαβασιλείου [14].

Στη δημοσίευση αυτή επιχειρείται να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της ενοποίησης των δικτύων με βάση την αυτονομία των χρηστών. Οι χρήστες μπορούν αυτόνομα να υπολογίσουν το 'καλύτερο' δίκτυο για αυτούς, με την έννοια ότι θα είναι περισσότερο ευχαριστημένοι με αυτή την επιλογή τους, με βάση, φυσικά, μια συνάρτηση χρησιμοποίησης.

Το πρότυπο 3GPP-LTE που θεωρείται ως το επικρατέστερο στην ενοποίηση δικτύων, έχει υιοθετήσει την χρήση OFDMA καθώς η τελευταία προσφέρει καλύτερη αντιμετώπιση της πολυδιαδρομικής παρεμβολής (multi-path interference), όπως και αποδοτικότερη χρήση του φάσματος σε περίπτωση MIMO (Multiple Input Multiple Output) κεραιών καθώς προσφέρει καλύτερη ποιότητα επίπεδων καναλιών έναντι των CDMA. Έτσι πλέον τίθεται το θέμα της **ενοποίησης κυψελωτών δικτύων OFDMA με τα ασύρματα τοπικά δίκτυα WLAN**.

Επομένως στη διπλωματική αυτή αναζητείται κάποιος μηχανισμός ανάθεσης πόρων σε OFDMA συστήματα, που να επιτρέπει την επαναχρησιμοποίηση της μεθοδολογίας που περιγράφεται στο [14], ώστε να καταστεί δυνατή η ενοποίηση OFDMA και WLAN δικτύων. Μετά από την προσεκτική ανάλυση όλων των μεθόδων ανάθεσης πόρων που περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 3 καταλήξαμε ως ορθότερη και συμβατότερη με τον μηχανισμό AJONS τον τρόπο που περιγράφεται στο [39] και εξηγείται αναλυτικά παρακάτω.

4.2 Αναλυτική παρουσίαση κατανομής πόρων στο OFDMA

Οι J.Huang, V. Subramanian, R. Agrawal, R. Berry στη δημοσίευσή [39], έχουν αντιμετωπίσει με πολύ αποδοτικό και κατανοητό τρόπο το πρόβλημα που παρουσιάζει η βέλτιστη κατανομή πόρων στα OFDMA συστήματα, όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο..

Στη δημοσίευση αυτή, οι συγγραφείς θεωρούν το διάνυσμα r^3 (rate) των ρυθμών μετάδοσης των K συνολικά χρηστών και μια συνάρτηση χρησιμοποίησης (χρησιμοποίησης) συστήματος (system utility function) ως $U(W)$, όπου W συμβολίζεται το διάνυσμα της μέσης διεκπεραιωτικότητας (average throughput) των χρηστών. Στόχος είναι η μεγιστοποίηση της $U(W)$, που είναι το άθροισμα των συναρτήσεων κάθε χρήστη:

3 Όπως και σε όλη τη διπλωματική με έντονη γραφή στους τύπους συμβολίζουμε τα διανύσματα.

$$U(\mathbf{W}_t) = \sum_{i=1}^K U_i(W_{i,t}) \quad (4.1)$$

όπου $U_i(W_{i,t})$ είναι μία αυξανόμενη κοίλη (concave) συνάρτηση χρησιμοποίησης του χρήστη i . Ο δείκτης t φανερώνει ότι τα διανύσματα μεταβάλλονται με το χρόνο λόγω αλλαγών των συνθηκών του περιβάλλοντος. Η μεγιστοποίηση αυτή επιτυγχάνεται με την επιλογή του διανύσματος \mathbf{r} ώστε να μεγιστοποιεί τη κλίση (gradient) της συνάρτησης χρησιμοποίησης του συστήματος, δηλαδή:

$$\max_{\mathbf{r} \in \mathbf{R}^K} \nabla U(\mathbf{W})^T \cdot \mathbf{r}_t = \max_{\mathbf{r} \in \mathbf{R}^K} \sum_i \dot{U}_i(W_{i,t}) r_{i,t} \quad (4.2)$$

Στη γενική περίπτωση μπορούμε να θέσουμε το πρόβλημα στη μορφή:

$$\max_{\mathbf{r} \in \mathbf{R}^K} \sum_i w_{i,t} r_{i,t} \quad (4.3)$$

όπου $w_{i,t} \geq 0$ είναι ένα μεταβλητό με το χρόνο βάρος (weight) που ανατίθεται στον i -οστό χρήστη τη χρονική στιγμή t . Στη σχέση (4.2) το βάρος είναι η κλίση της συνάρτησης χρησιμοποίησης.

Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα κάνουμε τη παραδοχή ότι πολλοί χρήστες μπορούν να μοιραστούν ένα κανάλι (ενώ στα πραγματικά συστήματα ρητά κάθε κανάλι ανατίθεται σε ένα μόνο χρήστη), ο καθένας για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα κατά τη διάρκεια μιας χρονοθυρίδας.

Θεωρούμε $N = \{1, \dots, N\}$ το σύνολο των υποκαναλιών. Για κάθε κανάλι j και κάθε χρήστη i ως e_{ij} ορίζεται ο λαμβανόμενος λόγος σήματος προς παρεμβολή και θόρυβο SNIR (Sound to Noise plus Interference Noise) ανά μονάδα ισχύος. Η ισχύς που ανατίθεται στον χρήστη i στο υποκανάλι j συμβολίζεται ως p_{ij} και το κλάσμα του υποκαναλιού j που δίνεται στο χρήστη i ως x_{ij} . Η ισχύς θα πρέπει να περιορίζεται από τη μέγιστη ισχύ P που είναι διαθέσιμη στη κυψέλη, δηλαδή $\sum_{i,j} p_{ij} \leq P$. Για κάθε υποκανάλι j έχουμε το περιορισμό $\sum_i x_{ij} \leq 1$, δηλαδή το άθροισμα των κλασμάτων του χρόνου που διατίθεται κάθε υποκανάλι στους χρήστες να μη ξεπερνάει τη μονάδα. Επομένως η εφικτή περιοχή του διανύσματος των ρυθμών μετάδοσης ορίζεται ως:

$$R(\mathbf{e}) = \left\{ \mathbf{r} : r_i = \sum_j x_{ij} B \log \left(1 + \frac{p_{ij} e_{ij}}{x_{ij}} \right), \sum_{i,j} p_{ij} \leq P, \sum_i x_{ij} \leq 1 \forall j, (\mathbf{x}, \mathbf{p}) \in X \right\} \quad (4.4)$$

όπου B είναι το διαθέσιμο συνολικό εύρος ζώνης του καναλιού και:

$$X := \left\{ (\mathbf{x}, \mathbf{p}) \geq 0 : 0 \leq x_{ij} \leq 1, 0 \leq p_{ij} \leq \frac{x_{ij} s_{ij}}{e_{ij}} \quad \forall i, j \right\} \quad (4.5)$$

το s_{ij} ορίζει ένα μέγιστο περιορισμό του λόγου SNIR στο υποκανάλι j για το χρήστη i .

Από τις σχέσεις (4.3) και (4.4) το πρόβλημα κατανομής πόρων δίνεται από τη σχέση:

$$\begin{aligned} \max_{x_{ij}, p_{ij} \in X} V(\mathbf{x}, \mathbf{p}) &:= \sum_i w_i \sum_j x_{ij} \text{Blog} \left(1 + \frac{p_{ij} e_{ij}}{x_{ij}} \right) \\ \text{s.t.} \quad \sum_{i,j} p_{ij} &\leq P \\ \sum_i x_{ij} &\leq 1, \quad \forall j \in N \end{aligned} \quad (4.6)$$

Στο παραπάνω πρόβλημα ισχύουν οι συνθήκες του Slater και επομένως δεν υπάρχει χάσμα (gap) ανάμεσα στο αρχικό πρόβλημα και το δυικό του, και η βέλτιστη λύση χαρακτηρίζεται από τις συνθήκες Karush-Khun-Tucker. Στην συνέχεια η ανάλυση θα γίνει για $B=1$. Η επέκταση για οποιοδήποτε B είναι αυτονόητη.

Η Lagrangian του παραπάνω προβλήματος δίνεται από τη σχέση:

$$L(\mathbf{x}, \mathbf{p}, \lambda, \boldsymbol{\mu}) := \sum_i w_i \sum_j x_{ij} \log \left(1 + \frac{p_{ij} e_{ij}}{x_{ij}} \right) + \lambda \left(P - \sum_{i,j} p_{ij} \right) + \sum_j \mu_j \left(1 - \sum_i x_{ij} \right) \quad (4.7)$$

Βελτιστοποιώντας τη παραπάνω σχέση με δεδομένα \mathbf{x} , $\boldsymbol{\mu}$ και λ έχουμε για την ισχύ⁴:

$$p_{ij}^* = \frac{x_{ij}}{e_{ij}} \left[\left(\frac{w_i e_{ij}}{\lambda} - 1 \right)^+ \wedge s_{ij} \right] \quad (4.8)$$

Αντικαθιστώντας στη $L(\mathbf{x}, \mathbf{p}^*, \lambda, \boldsymbol{\mu})$ έχουμε:

$$L(\mathbf{x}, \mathbf{p}^*, \lambda, \boldsymbol{\mu}) = \sum_{ij} x_{ij} (w_i h(\lambda, w_i e_{ij}, s_{ij}) - \mu_j) + \sum_j \mu_j + \lambda P \quad (4.9)$$

Όπου:

$$h(x, y, z) = \begin{cases} 0 & \text{για } x \geq y \\ \frac{x}{y} - 1 - \log \frac{x}{y} & \text{για } \frac{y}{1+z} \leq x < y \\ \log(1+z) - \frac{x}{y} z & \text{για } x < \frac{y}{1+z} \end{cases} \quad (4.10)$$

Και $x \geq 0$, $y > 0$, $z \geq 0$.

Βελτιστοποιώντας τη L στο \mathbf{x} έχουμε:

4 Ορίζουμε ως $(x)^+ = \max(x, 0)$ και $x \wedge y = \min(x, y)$

$$L(\lambda, \boldsymbol{\mu}) := L(\mathbf{x}^*, \mathbf{p}^*, \lambda, \boldsymbol{\mu}) = \sum_{ij} (w_i h(\lambda, w_i e_{ij}, s_{ij}) - \mu_j)^+ + \sum_j \mu_j + \lambda P \quad (4.11)$$

Καθώς δεν υπάρχει δυικό χάσμα (duality gap) ελαχιστοποιώντας τη συνάρτηση στο λ και στο $\boldsymbol{\mu}$ θα μας δώσει τη βέλτιστη λύση. βελτιστοποιώντας ως προς τα $\boldsymbol{\mu}$ έχουμε:

$$L(\lambda) := \min_{\boldsymbol{\mu} \geq 0} L(\lambda, \boldsymbol{\mu}) = \lambda P + \sum_j \mu_j^*(\lambda) \quad (4.12)$$

Όπου τα βέλτιστα $\boldsymbol{\mu}^*$ δίνονται από τη σχέση:

$$\mu_j^*(\lambda) = \max_i w_i h(\lambda, w_i e_{ij}, s_{ij}) \quad (4.13)$$

Για να βρούμε λοιπόν το βέλτιστο μ_j^* για κάθε κανάλι j θα πρέπει να γίνει ταξινόμηση όλων των μετρικών (metrics) των χρηστών $\mu_{ij}(\lambda) := w_i h(\lambda, w_i e_{ij}, s_{ij})$ για κάθε υποκανάλι j .

Το βέλτιστο λ μπορεί να βρεθεί με μία μονοδιάστατη αναζήτηση ως προς λ της σχέσης (4.12). Έτσι βρίσκοντας το λ^* , το $L(\lambda^*)$ είναι η βέλτιστη λύση του προβλήματος (4.6). Ως προς τις βέλτιστες τιμές των αρχικών μεταβλητών (\mathbf{x}, \mathbf{p}) για ένα δεδομένο $\lambda \geq 0$ έχουμε:

$$(\mathbf{x}^*, \mathbf{p}^*) := \arg \max_{(\mathbf{x}, \mathbf{p}) \in X} L(\mathbf{x}, \mathbf{p}, \lambda, \boldsymbol{\mu}^*(\lambda)) \quad (4.14)$$

Δεδομένου ότι $\lambda = \lambda^*$, από τη δυαδικότητα εάν η λύση $(\mathbf{x}^*, \mathbf{p}^*)$ είναι εφικτή (feasible) τότε είναι και βέλτιστη. Αλλά στην (4.13) πολλοί χρήστες μπορούν να έχουν μετρική μ_{ij} ίση με τη βέλτιστη τιμή μ_j^* . Σε αυτή τη περίπτωση μπορεί να υπάρχουν πολλαπλές τιμές \mathbf{x} και \mathbf{p} οι οποίες θα ικανοποιούν τη σχέση (4.14), κάποιες από τις οποίες μπορεί να μην είναι εφικτές (feasible). Επομένως για να βρεθεί η βέλτιστη λύση πρέπει να λύσουμε τις 'ισοπαλίες' των χρηστών για κάθε υποκανάλι, εάν υπάρχουν, και να καταλήξουμε στη βέλτιστη λύση. Σημαντικό στοιχείο αποτελεί ότι για ένα δεδομένο λ , όταν υπάρχουν ισοπαλίες των χρηστών η $L(\lambda)$ δεν είναι διαφορίσιμη. Αλλά καθώς η $L(\lambda)$ είναι κυρτή (convex) υπάρχουν subgradient. Σύμφωνα με τη πρόταση 3.1 της μελέτης μπορούμε να ορίσουμε ως subgradient την $d = P - \sum_{ij} \hat{p}_{ij}$.

Για ένα δεδομένο λ , ορίζουμε το $A_j := \{i : i = \arg \max_i \mu_{ij}(\lambda)\}$ που είναι το σύνολο των χρηστών που έχουν ίση μετρική για το κανάλι j . Επομένως από τη προηγούμενη ανάλυση έχουμε ότι το σύνολο των \mathbf{x} που λύνουν την (4.14) είναι αυτό που ικανοποιεί τις εξής ιδιότητες:

1. Για κάθε $i \notin A_j$, $x_{ij} = 0$.
2. Εάν $|A_j| = 1$, τότε $x_{ij} = 1$ for $i \in A_j$.
3. Εάν $|A_j| > 1$ τότε για κάθε $i \in A_j$, $x_{ij} \in [0, 1]$ και $\sum_{i \in A_j} x_{ij} = 1$.

Στη τρίτη περίπτωση θα πρέπει να λύσουμε τις ισοπαλίες των χρηστών για να καθορίσουμε

την ανάθεση των υποκαναλιών. Ορίζουμε ως ακραίο σημείο (extreme point) κάθε ανάθεση που ικανοποιεί τις ιδιότητες 1-3 και επιπροσθέτως ισχύει $x_{ij} \in [0,1]$ για κάθε i και j . Μια τέτοια ανάθεση μπορεί να παρουσιαστεί από μία συνάρτηση $f: N \rightarrow M$ όπου M είναι το σύνολο των χρηστών, έτσι ώστε $f(j)$ να δείχνει το χρήστη που του έχει ανατεθεί το κανάλι j , δηλαδή $x_f(j) j=1$. Ορίζοντας ως $B = \{j: |A_j|=1\}$ και $B^c = N \setminus B$, έχουμε: για κάθε $j \in B$ δεν υπάρχουν ισοπαλίες μεταξύ των χρηστών και το $f(j)$ μπορεί να πάρει μόνο μία τιμή, ενώ για κάθε $j \in B^c$ υπάρχουν ισοπαλίες και το $f(j)$ μπορεί να πάρει $|A_j|$ τιμές. Επομένως ο μέγιστος αριθμός των ακραίων σημείων είναι $\prod_{j \in B^c} |A_j|$,

Κάθε ακραίο σημείο ικανοποιεί τις ιδιότητες 1-3 και επομένως μπορεί να ορίσει μια subgradient για το $L(\lambda)$. Θεωρούμε:

$$\tilde{p}_{ij} := \left[\left(\frac{w_i e_{ij}}{\lambda} - 1 \right)^+ \wedge s_{ij} \right] \frac{1}{e_{ij}} \quad (4.15)$$

Δεδομένου ενός ακραίου σημείου f , η ανάθεση ισχύος του υποκαναλιού j δίνεται από $p_{ij} = \tilde{p}_{ij}$ για $i = f(j)$ και $p_{ij} = 0$ για $i \neq f(j)$. Η subgradient τότε δίνεται από:

$$d(f) = P - \sum_{j \in B} \tilde{p}_{f(j)j} - \sum_{j \in B^c} \tilde{p}_{f(j)j} \quad (4.16)$$

Διαλέγοντας διαφορετικά ακραία σημεία επηρεάζεται μόνο ο τελευταίος όρος στα δεξιά της εξίσωσης. Η μέγιστη subgradient του $L(\lambda)$ αντιστοιχεί στο ακραίο σημείο που ορίζεται από:

$$f(j) = \arg \min_{i \in A(j)} \tilde{p}_{ij}, \quad \forall j \quad (4.17)$$

Και αντίστοιχα η ελάχιστη subgradient αντιστοιχεί στο ακραίο σημείο που ορίζεται από:

$$f(j) = \arg \max_{i \in A(j)} \tilde{p}_{ij}, \quad \forall j \quad (4.18)$$

Στη δημοσίευση αυτή αναφέρεται ένα λήμμα (λήμμα 3.2) που ορίζει ότι υπάρχει μία βέλτιστη λύση όπου το x δίνεται από τη διαμοίραση στο χρόνο ανάμεσα στα ακραία σημεία που ορίζονται από τις σχέσεις (4.17) και (4.18) με $\lambda = \lambda^*$ και το p δίνεται από τη σχέση (4.8). Το λήμμα αυτό ορίζει δηλαδή ότι στη βέλτιστη λύση το πολύ δύο χρήστες μοιράζονται ένα κανάλι και μάλιστα στην ίδια αναλογία. Ο βέλτιστος παράγοντας διαμοιρασμού μπορεί να βρεθεί απλά βρίσκοντας ένα συνδυασμό των subgradients που αντιστοιχούν στις σχέσεις (4.17) και (4.18) που να ισούται με το μηδέν.

Άρα ο αλγόριθμος για να βρεθεί η βέλτιστη λύση στο πρόβλημα (4.6) έχει ως εξής. Πρώτα γίνεται μια μονοδιάστατη εύρεση του βέλτιστου λ^* που ελαχιστοποιεί το $L(\lambda)$. Έπειτα βρίσκεται η βέλτιστη λύση που προτάθηκε στο λήμμα της παραπάνω παραγράφου.

Βέβαια αυτός ο αλγόριθμος δίνει τη βέλτιστη λύση στη περίπτωση που επιτρέπεται οι χρήστες να μοιράζονται τα κανάλια στην ίδια χρονοθυρίδα. Κάτι τέτοιο δεν ισχύει βέβαια στα υπαρκτά συστήματα OFDMA. Ακόμη και σε αυτή τη περίπτωση μπορεί να βρεθεί το βέλτιστο λ^* . Εάν στη λύση δεν υπάρχουν ισοπαλίες ανάμεσα στους χρήστες, τότε η βέλτιστη λύση θα επιτρέπει μόνο ένα χρήστη ανά κανάλι όπως και επιθυμούμε. Εάν

υπάρχουν όμως ισοπαλίες τότε μια απλή ευριστική λύση θα ήταν να επιλέξουμε ένα ακραίο σημείο. Κατάλληλο ακραίο σημείο μπορεί να είναι η επιλογή αυτού για το οποίο το άθροισμα $\sum_{j \in N} \tilde{P}_{f(j)j}$ είναι πιο κοντά στο P .

Ανεξαρτήτως του πως θα γίνει η επιλογή του ακραίου σημείου, η συνολική ισχύς που δίνεται από το άθροισμα τους είτε θα υπερβαίνει είτε όχι τη διαθέσιμη συνολική ισχύ P . Σε αυτή τη περίπτωση θα πρέπει να ξαναγίνει βελτιστοποίηση της ισχύος για τη δεδομένη ανάθεση υποκαναλιών \mathbf{x} που προέκυψε, δηλαδή πρέπει να λυθεί το πρόβλημα:

$$\begin{aligned} & \max_{\mathbf{p}: (\mathbf{p}, \mathbf{x}) \in X} V(\mathbf{x}, \mathbf{p}) \\ & \text{s.t. } \sum_{ij} p_{ij} \leq P \end{aligned} \quad (4.19)$$

Έστω ότι $L_x(\lambda)$ είναι η διπλή συνάρτηση του παραπάνω προβλήματος. Δεδομένου ότι $\tilde{\lambda} = \arg \min_{\lambda \geq 0} L_x(\lambda)$, η βέλτιστη ανάθεση ισχύος του προβλήματος (4.19) δίνεται από τη σχέση (4.8) με $\lambda = \tilde{\lambda}$ και την ανάθεση καναλιών που είχαμε. Ένας άλλος τρόπος χαρακτηρισμού του βέλτιστου λ δίνεται από ένα άλλο λήμμα (λήμμα 3.3) που αναφέρει ότι ένα λ είναι η λύση του προβλήματος $\min_{\lambda \geq 0} L_x(\lambda)$ εάν και μόνο εάν:

$$\lambda = \frac{\sum_{i,j} x_{ij} w_i 1_{W_{ij}(\lambda)}}{P - \sum_{i,j} \frac{s_{ij}}{e_{ij}} 1_{Y_{ij}(\lambda)} + \sum_{i,j} \frac{1}{e_{ij}} 1_{W_{ij}(\lambda)}} \quad (4.20)$$

όπου $W_{ij} = \left[\frac{x_{ij} w_i e_{ij}}{1 + s_{ij}}, x_{ij} w_i e_{ij} \right)$, $Y_{ij} = \left[0, \frac{x_{ij} w_i e_{ij}}{1 + s_{ij}} \right)$ και $1_{I_{i,j}}$ είναι η δείκτρια συνάρτηση.

Με αυτό το λήμμα δίνεται ένας αλγόριθμος εύρεσης του βέλτιστου λ : Για αρχή γίνεται έλεγχος εάν ο περιορισμός ισχύος παραβιάζεται όταν όλοι οι χρήστες χρησιμοποιούν τη μέγιστη διαθέσιμη ισχύ ανά κανάλι (σύμφωνα με τη τιμή s_{ij}) δηλαδή εάν $\sum_{(i,j)} p_{ij}^* = \frac{x_{ij}}{e_{ij}} s_{ij} > P$. Εάν αυτή η ανισότητα δεν ισχύει τότε πρέπει να ευρεθεί το κατάλληλο $\tilde{\lambda}$. Γι αυτό υπάρχει ο παρακάτω αλγόριθμος:

Έστω \mathbf{a} ένας πίνακας μήκους $2N$ που περιέχει τις τιμές $x_{ij} w_i e_{ij}$ και $\frac{x_{ij} w_i e_{ij}}{1 + s_{ij}}$ για όλα τα (i,j) τέτοια ώστε $x_{ij}=1$, ταξινομημένα σε φθίνουσα σειρά. Ορίζονται δύο άλλοι πίνακες \mathbf{z} και \mathbf{y} τέτοιοι ώστε για οποιοδήποτε $k=1, \dots, 2N$,

$$z(k) = 1, \text{ εάν } a(k) = \frac{x_{ij} w_i e_{ij}}{1 + s_{ij}} \text{ για κάποια } (i,j),$$

$$y(k) = \{i, j\}, \text{ εάν } a(k) = x_{ij} w_i e_{ij} \text{ ή } \frac{x_{ij} w_i e_{ij}}{1 + s_{ij}}$$

ο αλγόριθμος για την εύρεση του λ είναι:

Αλγόριθμος 1: Αλγόριθμος εύρεσης βέλτιστου λ

1) Αρχικοποίηση: $k=0, G_{xw}=0, G_{s/e}=0$ και $G_{1/e}=0$

2) $k=k+1$

3) Θέτουμε $\{i(k), j(k)\} = y(k)$

4) Αν $z(k)=0$, τότε

1. $G_{xw} = G_{xw} + x_{i(k)j(k)} w_{i(k)}$

2. $G_{1/e} = G_{1/e} + \frac{1}{e_{i(k)j(k)}}$

αλλιώς

1. $G_{s/e} = G_{s/e} + \frac{s_{i(k)j(k)}}{e_{i(k)j(k)}}$

2. $G_{xw} = G_{xw} - x_{i(k)j(k)} w_{i(k)}$

3. $G_{1/e} = G_{1/e} - \frac{1}{e_{i(k)j(k)}}$

5) Θέτουμε $\lambda(k) = \frac{G_{xw}}{P - G_{s/e} + G_{1/e}}$. Εάν $k=2N$ σταματάμε. Αλλιώς προχωράμε στο βήμα

(6)

6) Εάν $\lambda(k) \leq a(k)$ και $\lambda(k) \geq a(k+1)$, σταματάμε. Αλλιώς πάμε στο βήμα (2).

Η βασική ιδέα πίσω από τον αλγόριθμο είναι να ξεκινήσουμε από το μέγιστο λ , και να υπολογίσουμε το δεξιό μέλος της (4.20). Εάν είναι μικρότερο από τη τρέχουσα τιμή του λ , μειώνουμε το λ και υπολογίζουμε ξανά το δεξιό μέλος, μέχρι να βρεθεί ένα σταθερό σημείο. Μπορεί ναδειχθεί ότι ο παραπάνω αλγόριθμος θα σταματήσει το πολύ σε $2N$ βήματα.

Η βέλτιστη ανάθεση υποκαναλιών καθορίζεται από την ανάθεση κάθε υποκαναλιού j στο χρήστη με τη μεγαλύτερη μετρική $\mu_j^*(\lambda^*)$ (διευθετώντας τις ισοπαλίες με το τρόπο που έχει αναφερθεί πιο πάνω). Όμως αυτός ο τρόπος απαιτεί να ευρεθεί επαναληπτικά ο βέλτιστος πολλαπλασιαστής Lagrange λ^* . Σε περίπτωση που αυτό είναι υπολογιστικά ανέφικτο στο χρόνο που πρέπει να βρεθεί η λύση (όπως είναι για τα τυπικά OFDMA συστήματα όπου πρέπει να βρεθεί λύση στη διάρκεια μιας χρονοθυρίδας, δηλαδή κάποιων χιλιοστών του δευτερολέπτου) υπάρχουν και οι εξής υποβέλτιστοι αλγόριθμοι:

1. Ευριστικός αλγόριθμος 1: Κάθε υποκανάλι j ανατίθεται στο χρήστη με τη μεγαλύτερη τιμή $w_i R_{ij}$, όπου:

$$\bar{R}_{ij} = \log \left[1 + \left(s_{ij} \wedge \left(e_{ij} \frac{P}{N} \right) \right) \right] \quad (4.21)$$

είναι ο ρυθμός μετάδοσης που ο χρήστης i μπορεί να επιτύχει στο υποκανάλι j θεωρώντας ισοκατανομή ισχύος σε κάθε υποκανάλι P/N . Οποιοσδήποτε ισοπαλίες λύνονται αυθαίρετα (τυχαία) και η ανάθεση ισχύος P/N χρησιμοποιείται. Η μετρική αυτή παρακινήθηκε από το γεγονός ότι η ισοκατανομή ισχύος θεωρείται από το σύνολο της βιβλιογραφίας πολύ κοντά στη βέλτιστη ανάθεση ισχύος.

2. Ευριστικός αλγόριθμος 2: Τα υποκανάλια ανατίθενται όπως στον ευριστικό αλγόριθμο 1. Όμως έπειτα από την ανάθεση υποκαναλιών μία βέλτιστη ανάθεση ισχύος όπως στο πρόβλημα (4.19) πραγματοποιείται αντί να υιοθετηθεί η ισοκατανομή ισχύος.

4.3 Κατανομή πόρων του συστήματος OFDMA

Για τη κατανομή των πόρων του συστήματος OFDMA καταλήξαμε στην υιοθέτηση του ευριστικού αλγορίθμου 2, που περιγράφηκε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο. Ο κύριος λόγος που έγινε αυτή η επιλογή ήταν ότι με τον αλγόριθμο αυτό μας δίνεται και η δυνατότητα υπολογισμού των παραγόντων Lagrange, κάτι απαραίτητο για την επίτευξη της ενοποίησης των δικτύων OFDMA/WLAN με τρόπο παρόμοιο με τη δημοσίευση [14]. Ο υπολογισμός των παραγόντων Lagrange δεν είναι εφικτός για την κατανομή των πόρων σύμφωνα με τον αλγόριθμο 1, καθώς η κατανομή των καναλιών εξαρτάται από μία άμεση υπολογίσιμη τιμή και η κατανομή ισχύος είναι η ίδια για κάθε κανάλι. Δηλαδή στον αλγόριθμο 1 δε τίθεται κάποιο πρόβλημα βελτιστοποίησης, σε αντίθεση με τον ευριστικό αλγόριθμο 2 που έπειτα από την ανάθεση καναλιών ακολουθεί βελτιστοποίηση του συστήματος ως προς τη κατανομή της ισχύος στα υποκανάλια. Παρακάτω θα παραθέσουμε τον αλγόριθμο που υλοποιήσαμε. Με τον αλγόριθμο αυτό μπορούμε να κάνουμε τη κατανομή πόρων και να πάρουμε τις βέλτιστες τιμές των παραγόντων Lagrange λ^* και μ^* . Αυτός ο αλγόριθμος χρησιμοποιείται για την ανάθεση πόρων σε κάθε χρονοθυρίδα (δηλαδή σε βραχυπρόθεσμη κλίμακα) από κάθε κυψέλη OFDMA.

Για την υλοποίηση του αλγορίθμου χρησιμοποιούμε δύο βρόχους ελέγχου, ο πρώτος βρίσκεται στο σταθμό βάσης και ο δεύτερος στα τερματικά των χρηστών. Ο βρόχος ελέγχου που βρίσκεται στο σταθμό βάσης OFDMA έχει τις εξής λειτουργίες:

Βήμα 1ο: Συγκεντρώνει πληροφορίες σχετικά με τις απαιτήσεις υπηρεσιών QoS των τρεχόντων χρηστών (δηλαδή την ευχαρίστηση των χρηστών όπως ορίζεται από τις συναρτήσεις χρησιμοποίησης), και τις τρέχουσες συνθήκες των καναλιών (το κέρδος των υποκαναλιών).

Βήμα 2ο: Καταστρώνει το πρόβλημα βελτιστοποίησης σύμφωνα με τη σχέση (4.6) και βρίσκει τη λύση του.

Βήμα 3ο: Μεταδίδει στους τρέχοντες χρήστες τα απαραίτητα διανύσματα ανάθεσης πόρων δηλαδή την ανάθεση υποκαναλιών και την ισχύ για κάθε υποκανάλι, όπως επίσης

και τις τιμές των παραγόντων Lagrange που προέκυψαν από τη λύση του συστήματος αυτού.

Αλγόριθμος 2

Σαν δεδομένα κάθε στιγμή έχουμε το πίνακα κερδών $e[i,j]$ διαστάσεως $K \times N$ (K ο αριθμός των χρηστών, N ο αριθμός των καναλιών) και τις τιμές w_i των χρηστών.

A) Κατανομή υποκαναλιών

(θεωρούμε ισοκατανομή ισχύος, δηλαδή ισχύς P/N για κάθε υποκανάλι)

1. Για κάθε κανάλι j
 1. Βρες το χρήστη i ο οποίος έχει τη μεγαλύτερη τιμή $w_i \bar{R}_{ij}$ όπου το \bar{R}_{ij} δίνεται από τη σχέση (4.21). Σε περίπτωση που υπάρχει ισοπαλία χρηστών επιλέγουμε τυχαία έναν από αυτούς.
 2. Ανάθεσε το κανάλι αυτό στο χρήστη i , δηλαδή $f(j)=i$.

B) Κατανομή ισχύος

1. Χρησιμοποίησε τον αλγόριθμο 1 για να βρεθεί η βέλτιστη τιμή λ^* .
2. Για κάθε κανάλι j
 1. Υπολόγισε την ισχύ του καναλιού $p_{f(j)j}$ σύμφωνα με το τύπο (4.8).
 2. Ανάθεσε την ισχύ αυτή στο υποκανάλι j .

C) Υπολογισμός των πολλαπλασιαστών Lagrange μ_j .

1. Για κάθε κανάλι j
 1. Υπολόγισε το πολλαπλασιαστή Lagrange μ_j^* σύμφωνα με το τύπο (4.13).
-

Ο βρόχος ελέγχου που βρίσκεται σε κάθε τερματικό έχει τις εξής λειτουργίες:

Βήμα 1ο: Παρατηρεί την απόδοση της υπηρεσίας (QoS) κάθε χρήστη, όπως και τη τρέχουσα τιμή του κέρδους κάθε υποκαναλιού που 'βλέπει' ο χρήστης αυτός.

Βήμα 2ο: Λαμβάνει την ανάθεση πόρων (δηλαδή ο αριθμός των υποκαναλιών που του αντιστοιχούν και η ισχύς που διανέμεται σε αυτά) και τις τιμές των παραγόντων Lagrange (καθώς προσδιορίζουν την απόδοση κάθε κυψέλης) που προέκυψαν από την επίλυση του προβλήματος ανάθεσης πόρων.

4.4 Κατανομή πόρων των δικτύων WLAN

Για την κατανομή πόρων στο WLAN υιοθετήθηκε ο αλγόριθμος που παρουσιάστηκε στο υποκεφάλαιο 2.3.2. Για να λειτουργήσει ο αλγόριθμος αυτός απαιτούνται δύο είδη βρόχων ελέγχου. Το πρώτο βρίσκεται στο σταθμό βάσης ενώ το δεύτερο βρίσκεται σε κάθε τερματικό. Ο βρόχος ελέγχου που βρίσκεται στο σταθμό βάσης έχει τις εξής λειτουργίες:

Βήμα 1ο: Συγκεντρώνει πληροφορίες σχετικά με τις απαιτήσεις QoS των τρεχόντων χρηστών (δηλαδή την ευχαρίστηση των χρηστών όπως ορίζεται από τις συναρτήσεις χρησιμοποίησης), και τη μέγιστη χωρητικότητα (capacity) της κυψέλης.

Βήμα 2ο: Καταstrώνει το πρόβλημα όπως στις σχέσεις (2.5) και (2.6) και βρίσκει τη λύση του.

Βήμα 3ο: Μεταδίδει τα απαραίτητα διανύσματα ανάθεσης πόρων δηλαδή το ρυθμό μετάδοσης και το αντίστοιχο παράθυρο διαμάχης CW στα τερματικά των τρεχόντων χρηστών.

Ο βρόχος ελέγχου που βρίσκεται σε κάθε τερματικό έχει τις εξής λειτουργίες:

Βήμα 1ο: Παρατηρεί την απόδοση της υπηρεσίας κάθε χρήστη, όπως και τη τρέχουσα τιμή της μέγιστης χωρητικότητας της κυψέλης.

Βήμα 2ο: Αναλύει τη τρέχουσα κατάστασή του με βάση τις απαιτήσεις QoS και υπολογίζει τη τρέχουσα προθυμία του να πληρώσει $\lambda_{i,c}^{max}$ σύμφωνα με τη σχέση:

$$\lambda_i^{max} = \min \left\{ \lambda \geq 0 \mid \max_{0 \leq R \leq C_{max}} \{ U_i(R_i) - \lambda R_i \} = 0 \right\}$$

Βήμα 3ο: Αλληλεπιδρά με τη κυψέλη με σκοπό να βρεθεί ο αριθμός των επιλεχθέντων χρηστών όπως ορίζεται από τη σχέση:

$$T = \operatorname{argmax}_{1 \leq t \leq N} \left\{ \sum_{i=1}^t R_i(\lambda_i^{max}) \leq C_{max} \right\}$$

και με βάση τους επιλεγμένους χρήστες αναζητείται η τιμή ισορροπίας (equilibrium price) ανά μονάδα πόρου λ_c^* που ικανοποιεί τη σχέση $\sum_{i=1}^T R_i(\lambda_c^*) = C_{max}$. Έχοντας τη τιμή λ_c^* πλέον ο χρήστης μπορεί να καθορίσει τους πόρους που του έχουν ανατεθεί (ρυθμός μετάδοσης και CW).

4.5 Ενοποίηση δικτύων OFDMA/WLAN

Οι παραπάνω αλγόριθμοι τρέχουν περιοδικά για κάθε χρονοθυρίδα (timeslot) του δικτύου OFDMA και κάθε χρονοπλαίσιο (time frame) του δικτύου WLAN αντίστοιχα. Σκοπός όμως είναι η ενοποίηση των δικτύων αυτών. Σε αντιστοιχία με την ενοποίηση CDMA/WLAN που παρουσιάστηκε στο υποκεφάλαιο 2.3 θα παρουσιάσουμε την ενοποίηση των δικτύων OFDMA/WLAN.

Όπως είπαμε από την επίλυση των προβλημάτων ανάθεσης πόρων κάθε δικτύου κάθε χρονικό διάστημα προκύπτει και ένας παράγοντας Lagrange λ^* που λειτουργεί σε

δείκτη της συμφόρησης κάθε κυψέλης. Όμως η τιμή αυτή είναι ανεπαρκής για να χρησιμοποιηθεί στην επιλογή του δικτύου που κάνει κάθε χρήστης, επειδή ο παράγοντας Lagrange είναι ευαίσθητος στις στιγμιαίες μεταβολές του περιβάλλοντος (πχ στιγμιαίες αλλαγές στο κέρδος καναλιών κάθε χρήστη). Για το λόγο αυτό μπορεί επίσης να οδηγήσει και στην εμφάνιση του φαινομένου οι χρήστες να αλλάζουν συνέχεια δίκτυο πρόσβασης, το λεγόμενο φαινόμενο ring-pong.

Επομένως για να αντιμετωπίσουμε αυτό το πρόβλημα και να έχουμε ένα μηχανισμό επιλογής ενοποιημένου δικτύου JONS (JOint Network Selection), πρέπει τα προβλήματα (2.5) και (4.6) να καταστρώνονται και να επιλύονται για χρονικά διαστήματα τα οποία να επιτρέπουν τη σωστή έκφραση του φορτίου και του περιβάλλοντος κάθε κυψέλης. Αυτό το διάστημα ορίζεται ως $T_{JONS} = M \cdot \max(T_s, T_f)$ όπου T_s είναι η διάρκεια μιας χρονοθυρίδας OFDMA και T_f είναι η διάρκεια ενός χρονοπλαισίου WLAN, και M είναι ένας παράγοντας που ρυθμίζει την ευαισθησία ως προς τα στιγμιαία (short-term) φαινόμενα.

Έτσι κάθε σταθμός βάσης περιοδικά θέτει και λύνει τα προβλήματα (2.5) και (4.6) χρησιμοποιώντας τις μέσες τιμές αντί για τις στιγμιαίες και παίρνει αντίστοιχα τη λύση λ_{avg}^* . Δηλαδή στη περίπτωση του OFDMA δικτύου θεωρούνται οι εκθετικά μέσες τιμές των κερδών των υποκαναλιών και στο WLAN δίκτυο θεωρείται η μέση τιμή της διεκπεραιωτικότητας (throughput). Περιοδικά λοιπόν η κάθε κυψέλη c κάθε T_{JONS} λύνει το πρόβλημα με τους ήδη υπάρχοντες χρήστες του και υπολογίζει τη τιμή $\lambda_{avg,c}^*$ και μεταδίδεται προς όλα τα κινητά τερματικά.

Αντίστοιχα κάθε χρήστης i για κάθε κυψέλη c που βρίσκεται στην εμβέλεια του υπολογίζει μία τιμή $\lambda_{i,c}^{max}$, που συμβολίζει τη προθυμία του να 'πληρώσει' ανά μονάδα πόρων, για κάθε κυψέλη c που βρίσκεται στην εμβέλεια του χρήστη. Επίσης λαμβάνει τις τιμές $\lambda_{avg,c}^*$ που μεταδίδουν οι κυψέλες. Με αυτό το τρόπο υπολογίζει το κανονικοποιημένο δείκτη $\hat{\lambda}_{i,c}$ που ορίζεται ως εξής:

$$\hat{\lambda}_{i,c} = \begin{cases} \frac{\lambda_{k,c}^{max} - \lambda_{avg,c}^*}{\lambda_{avg,c}^*} & \text{if } \lambda_{k,c}^{max} \geq \lambda_{avg,c}^* \\ 0 & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (4.22)$$

Καθώς το $\lambda_{i,c}^{max}$ μπορεί να θεωρηθεί ως η μέγιστη τιμή που προτίθεται ο χρήστης να πληρώσει ανά μονάδα πόρων της κυψέλης c και το $\lambda_{avg,c}^*$ ως το μακροπρόθεσμο κόστος ανά μονάδα πόρων της κυψέλης τότε το $\hat{\lambda}_{i,c}$ μπορεί να θεωρηθεί ως το κανονικοποιημένο κέρδος ανά μονάδα πόρων αν ο χρήστης i επιλέξει να συνδεθεί στη κυψέλη c . Έχοντας λοιπόν τις τιμές αυτές ο χρήστης i επιλέγει το δίκτυο σύμφωνα με τη σχέση:

$$c^* = \underset{c \in C_i}{argmax} \hat{\lambda}_{i,c} \quad (4.23)$$

όπου C_i είναι το σύνολο των κυψελών που βρίσκεται στην εμβέλεια του χρήστη i .

Για την υλοποίηση των παραπάνω χρησιμοποιούνται δύο βρόχοι ελέγχου. Ο πρώτος βρίσκεται στο σταθμό βάσης κάθε κυψέλης των OFDMA και WLAN (με μικρές παραλλαγές) και ο άλλος στα τερματικά, σε αντιστοιχία με τους βρόχους ανάθεσης πόρων

των OFDMA και WLAN συστημάτων που παρουσιάστηκαν παραπάνω.

Ο βρόχος ελέγχου που βρίσκεται στο σταθμό βάσης του WLAN εκτελεί τις εξής διαδικασίες:

Βήμα 1ο: Θέτει και λύνει το πρόβλημα (2.5) χρησιμοποιώντας την εκθετική μέση τιμή της διεκπεραιωτικότητας της κυψέλης:

$$\bar{C}_{max,c}(t) = (1-w)\bar{C}_{max,c}(t-1) + w C_{max,c}(t) \quad \text{όπου } t = T_f, T_f+1, \dots, T_{AJONS}$$

όπου το $0 < w < 1$ είναι ένας παράγοντας εξομάλυνσης. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του w τόσο πιο ευαίσθητη είναι η τιμή $\lambda_{avg,c}^*$ που παράγεται από τις στιγμιαίες διακυμάνσεις της κίνησης της κυψέλης και του περιβάλλοντος.

Βήμα 2ο: Εκπέμπει τη τιμή $\lambda_{avg,c}^*$ που υπολογίστηκε στα τερματικά που είναι συνδεδεμένα στη κυψέλη.

Ο βρόχος ελέγχου που βρίσκεται στο σταθμό βάσης του OFDA εκτελεί τις εξής διαδικασίες (διαφοροποιημένες από το αντίστοιχο του WLAN):

Βήμα 1ο: Θέτει και λύνει το πρόβλημα (4.6) χρησιμοποιώντας την εκθετική μέση τιμή των κερδών των καναλιών βάση της σχέσης:

$$\bar{e}_{ij,c}(t) = (1-w)\bar{e}_{ij,c}(t-1) + w e_{ij,c}(t) \quad \text{όπου } t = T_f, T_f+1, \dots, T_{JONS}$$

οπότε και έχουμε τις τιμές $\lambda_{avg,c}^*$ και $\mu_{avg,c}^*$.

Βήμα 2ο: Εκπέμπει τη τιμή $\lambda_{avg,c}^*$ που χαρακτηρίζει τη κυψέλη και τις τιμές $\mu_{avg,c}^*$.

Ο βρόχος ελέγχου που βρίσκεται στα τερματικά των χρηστών εκτελεί τις εξής διαδικασίες:

Βήμα 1ο: Συνεχώς παρατηρεί την απόδοση της υπηρεσίας που αιτείται.

Βήμα 2ο: Λαμβάνει τις εκπεμπόμενες τιμές των κοστών ισορροπίας $\lambda_{avg,c}^*$ των κυψελών που βρίσκονται στην εμβέλεια του και τις τιμές $\mu_{avg,c}^*$ των κυψελών OFDMA.

Βήμα 3ο: Υπολογίζει το κανονικοποιημένο κέρδος $\hat{\lambda}_{i,c}$ για κάθε κυψέλη στην εμβέλεια του και επιλέγει το δίκτυο με το οποίο θα συνδεθεί με βάση τη σχέση (4.22).

Βήμα 4ο: Εκπέμπει την απόφαση του στα πρωτόκολλα διαχείρισης κινητικότητας (mobility management protocols) ώστε να εκτελέσουν τη σύνδεση που επιλέγει.

4.6 Εύρεση κατάλληλης μετρικής του συστήματος OFDMA

Όπως έχουμε αναφέρει το πρόβλημα ανάθεσης πόρων για WLAN κυψέλες μοντελοποιείται ως εξής:

$$\begin{aligned} & \max_R \sum_{j=1}^{N_{WLAN}} U_j(R_j) \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{j=1}^{N_{WLAN}} R_j \leq C_{max}, 0 \leq R_j \leq C_{max}, 0 \leq R_j \leq C_{max}, j \in S_{WLAN} \end{aligned} \quad (4.24)$$

Η λύση του προβλήματος αυτού με τη χρήση της χαλάρωσης κατά Lagrange, μας δίνει ένα παράγοντα Lagrange που έχει βέλτιστη τιμή λ^* .

Για το σύστημα αυτό, όπως έχουμε αναφέρει σε προηγούμενο κεφάλαιο, ο κάθε χρήστης i υπολόγιζε τη τιμή $\lambda_{i,c}^{max}$ για κάθε κυψέλη c εντός της εμβέλειας του σύμφωνα με τη σχέση:

$$\lambda_i^{max} = \min \left\{ \lambda \geq 0 \mid \max_{0 \leq X \leq X_{max}} [U_i(X_i) - \lambda X_i] = 0 \right\}$$

όπου U_i είναι η συνάρτηση χρησιμοποίησης του αναλογικά με τις QoS απαιτήσεις του. Η τιμή αυτή ορίζει ουσιαστικά τη κατάταξη του χρήστη στο σύνολο των χρηστών ως προς τη βέλτιστη κατανομή των πόρων τόσο σε αυτόν όσο και στο σύστημα γενικότερα. Δηλαδή μια μεγάλη τιμή $\lambda_{i,c}^{max}$ δείχνει μεγαλύτερη ευχαρίστηση του χρήστη i για κάθε μονάδα πόρων που θα του ανατεθεί απέναντι από άλλους χρήστες με μικρότερη τιμή. Έτσι αυτόματα ο χρήστης αυτός αποκτά προτεραιότητα έναντι των άλλων χρηστών κατά την ανάθεση πόρων οδηγώντας στη βελτιστοποίηση τόσο των υπηρεσιών που απολαμβάνει ο χρήστης όσο και στη βελτιστοποίηση του κάθε δικτύου.

Αντίστοιχα το πρόβλημα ανάθεσης πόρων για OFDMA κυψέλες μοντελοποιείται ως εξής:

$$\begin{aligned} & \max_{x_{ij}, p_{ij} \in X} V(\mathbf{x}, \mathbf{p}) := \sum_i w_i \sum_j x_{ij} \text{Blog} \left(1 + \frac{p_{ij} e_{ij}}{x_{ij}} \right) \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{i,j} p_{ij} \leq P \\ & \sum_i x_{ij} \leq 1, \forall j \in N \end{aligned} \quad (4.25)$$

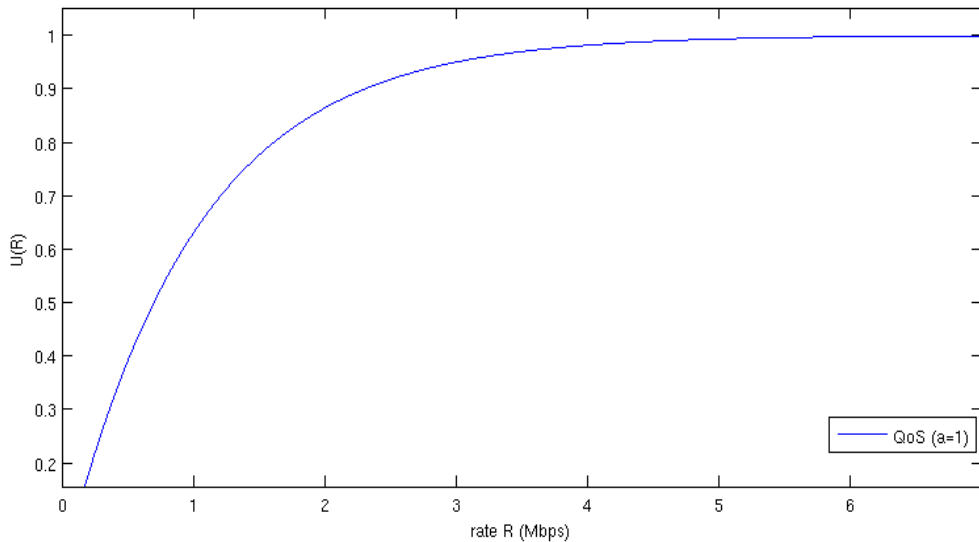
Η λύση του προβλήματος αυτού με τη χρήση της χαλάρωσης κατά Lagrange, μας δίνει ένα παράγοντα Lagrange που έχει βέλτιστη τιμή λ^* και σχετίζεται με το περιορισμό της ισχύος και ένα παράγοντα Lagrange μ_j^* για κάθε υποκανάλι j του συστήματος .

Για την εύρεση μίας τιμής $\lambda_{i,c}^{max}$ για κάθε κυψέλη του συστήματος OFDMA που να μπορεί να είναι ανάλογη με την αντίστοιχη τιμή $\lambda_{i,c}^{max}$ των κυψελών WLAN θα πρέπει να αναζητηθεί μία μετρική (metric) που να χαρακτηρίζει το βαθμό ευχαρίστησης του χρήστη για κάθε μονάδα πόρων που το δίκτυο θα του αναθέσει. Για να βρεθεί αυτή η μετρική θα πρέπει να γίνει χρήση των παραγόντων Lagrange που μας δίνει η λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης πόρων του συστήματος OFDMA. Όπως αναφέραμε το σύστημα OFDMA χαρακτηρίζεται από ένα παράγοντα Lagrange λ^* που σχετίζεται με το περιορισμό της ισχύος και από ένα διάνυσμα παραγόντων Lagrange μ^* διαστάσεως N (όπου N ο αριθμός των υποκαναλιών). Στόχος είναι η επιβεβαίωση ότι ο παράγοντας λ^* που σχετίζεται με τον

περιορισμό της ισχύος είναι αντίστοιχος του παράγοντα λ^* που προκύπτει από την επίλυση του προβλήματος για το WLAN σύστημα και να βρεθεί ένας συνδυασμός των $N+1$ παραγόντων που θα χαρακτηρίζει το βαθμό ευχαρίστησης του χρήστη για κάθε μονάδα πόρων που το δίκτυο θα του αναθέσει. Για το σκοπό αυτό υλοποιήσαμε προσομοιώσεις ενός συστήματος OFDMA με σκοπό την μελέτη των ιδιοτήτων των παραγόντων Lagrange και τη καταλληλότητα διαφόρων προτεινόμενων μετρικών. Τα αποτελέσματα αναφέρονται στα επόμενα υποκεφάλαια.

4.6.1 Το μοντέλο του συστήματος προσομοίωσης

Για το μοντέλο προσομοίωσης θεωρήσαμε μια κυψέλη OFDMA με συνολικό εύρος ζώνης 10 ή 5 Mhz (θα αναφέρεται σε κάθε περίπτωση) χωρισμένο σε 128 ή 64 υποκανάλια (πάλι θα αναφέρεται σε κάθε περίπτωση) και συνολικά εκπεμπόμενη ισχύς 10W. Το κέρδος διαδρομής (path gain) του χρήστη i στο υποκανάλι j μοντελοποιήθηκε σύμφωνα με το μοντέλο απλής διάδοσης, δηλαδή βάση του τύπου $e_{ij} = \frac{K_{ij}}{d_i^n}$ όπου d_i είναι η απόσταση του χρήστη i από το σταθμό βάσης, K_{ij} είναι μία τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί τη λογαριθμική κανονική κατανομή (log-normal) με μέση τιμή μηδέν και διακύμανση $\sigma^2 = 8\text{dB}$. Φυσικά θεωρείται ότι υπάρχει συσχέτιση των κερδών υποκαναλιών κάθε χρήστη. Τέλος $n=4$ είναι ο εκθέτης της απώλειας διάδοσης. Θεωρούμε ένα τύπο προσφερόμενης υπηρεσίας με συνάρτηση χρησιμοποίησης $U_i(R_i) = 1 - e^{-aR_i}$, όπου $a=1$:



Σχήμα 4.1: Συνάρτηση χρησιμοποίησης της υπηρεσίας QoS.

Όλοι οι αλγόριθμοι και τα σενάρια υλοποιήθηκαν σε MATLAB. Σκοπός όπως αναφέρθηκε είναι η μελέτη των ιδιοτήτων των παραγόντων Lagrange.

4.6.2 Μελέτη της μεταβολής του παράγοντα λ^* σχετικά με τον αριθμό των χρηστών του συστήματος

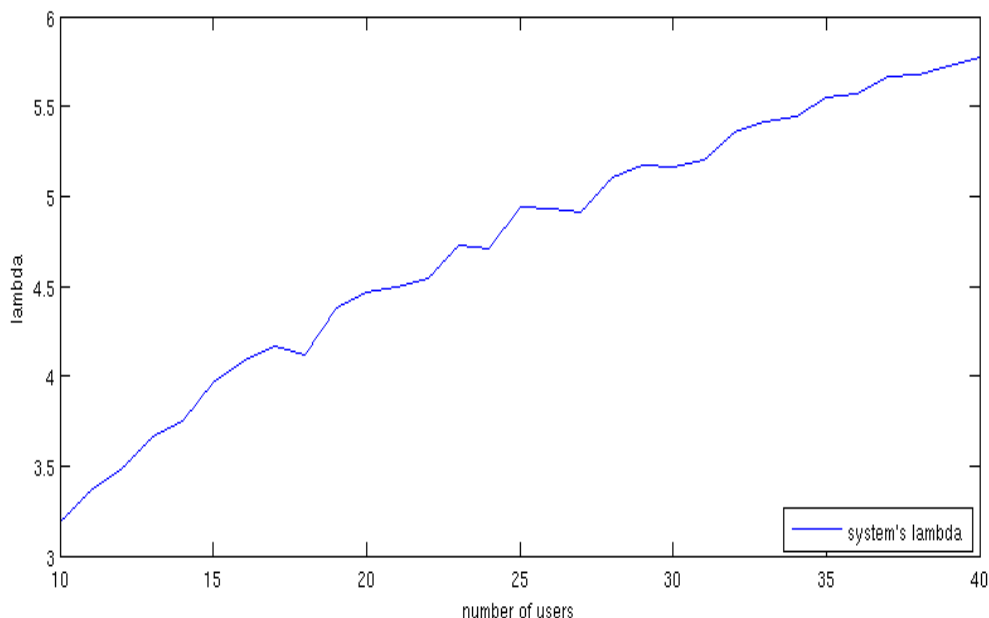
Σε αυτό το σενάριο θεωρούμε σύστημα OFDMA με τα εξής χαρακτηριστικά:

$N= 128$ υποκανάλια

$B_T= 10\text{MHz}$ συνολικό διαθέσιμο εύρος ζώνης

$P= 10\text{W}$ συνολικά διαθέσιμη ισχύς

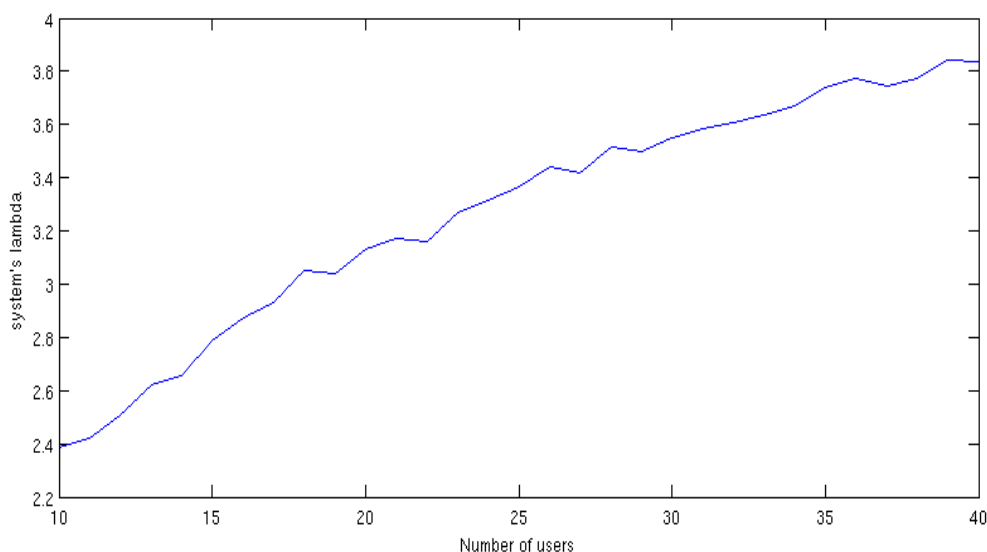
Μέσα σε αυτό το σύστημα τοποθετούμε στο σύστημα από 10 έως 40 χρήστες σταθεροί όλοι στην ίδια απόσταση των 150 μέτρων από το σταθμό βάσης που φυσικά θεωρούμε ότι βρίσκεται στο κέντρο της κυψέλης. Στόχος είναι να βρούμε πως μεταβάλλεται ο παράγοντας Lagrange λ^* με την αύξηση των χρηστών του συστήματος. Πήραμε τη γραφική παράσταση:



Σχήμα 4.2: Μεταβολή του παράγοντα λ^* συστήματος OFDMA 128 καναλιών με τον αριθμό των χρηστών (όλοι σε απόσταση 150m).

Παρατηρούμε ότι ο παράγοντας λ^* αυξάνει αναλογικά με την αύξηση του αριθμού των συνδεδεμένων χρηστών στο σύστημα. Κάτι τέτοιο έρχεται σε συμφωνία με το παράγοντα λ^* που προκύπτει από την επίλυση του προβλήματος ανάθεσης πόρων στο σύστημα WLAN. Επομένως μπορούμε να υποθέσουμε ότι ο παράγοντας λ^* όπως και στο σύστημα OFDMA είναι ενδεικτικός του συνωστισμού των χρηστών στο σύστημα.

Το ίδιο παρατηρούμε εάν θέσουμε σύστημα OFDMA 64 καναλιών:



Σχήμα 4.3: Μεταβολή του παράγοντα λ^* συστήματος OFDMA 64 καναλιών με τον αριθμό των χρηστών (όλοι σε απόσταση 150m).

4.6.3 Μελέτη της μεταβολής του παράγοντα λ^* σχετικά με την απόσταση των χρηστών από το σταθμό βάσης

Σε αυτό το σενάριο θεωρούμε σύστημα OFDMA με τα εξής χαρακτηριστικά:

$N= 128$ υποκανάλια

$B_T= 10\text{MHz}$ συνολικό διαθέσιμο εύρος ζώνης

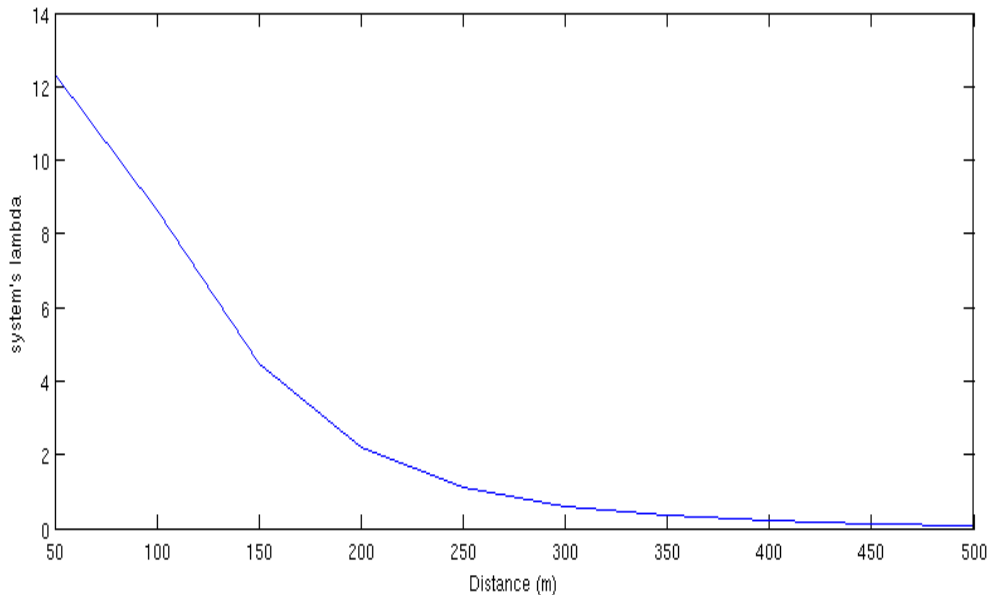
$P= 10\text{W}$ συνολικά διαθέσιμη ισχύς

Μέσα σε αυτό το σύστημα τοποθετούμε 20 χρήστες που ισαπέχουν από το σύστημα (για τον ίδιο λόγο που εξηγήθηκε στο προηγούμενο σενάριο. Η απόστασή τους μεταβάλλεται από τα 50 μέτρα έως τα 500 μέτρα με βήμα τα 50 μέτρα. Στόχος είναι να βρούμε πως μεταβάλλεται ο παράγοντας λ με την αύξηση της απόστασης των χρηστών του συστήματος. Πήραμε τη γραφική παράσταση 4.4.

Παρατηρούμε ότι όταν οι χρήστες βρίσκονται κοντά στο σταθμό βάσης το σύστημα έχει υψηλό λ^* και μειώνεται όσο οι χρήστες απομακρύνονται. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι όταν οι χρήστες είναι κοντά, τα κέρδη καναλιών και επομένως ο εφικτός ρυθμός μετάδοσης ανά υποκανάλι είναι υψηλότερα από όταν οι χρήστες είναι μακριά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το σύστημα να είναι πιο 'ευχαριστημένο' με τους χρήστες κοντά οπότε και μεγιστοποιεί το συνολικό ρυθμό μετάδοσης και λιγότερο 'ευχαριστημένο' όταν οι χρήστες βρίσκονται μακριά οπότε και το σύστημα δε επιτυγχάνει (σχετικά) μεγάλους ρυθμούς μετάδοσης. Αυτό αντανακλάται στη τιμή του παράγοντα λ^* . Είναι μεγαλύτερος όταν οι χρήστες είναι κοντά οπότε και το σύστημα θέτει μεγαλύτερο κόστος ανά μονάδα πόρων (που αντιπροσωπεύει το λ^*) ώστε να αποτρέψει άλλους χρήστες να εισέλθουν αφού είναι ευχαριστημένο με τους ήδη υπάρχοντες. Αντίστοιχα είναι μικρότερος όταν οι χρήστες είναι

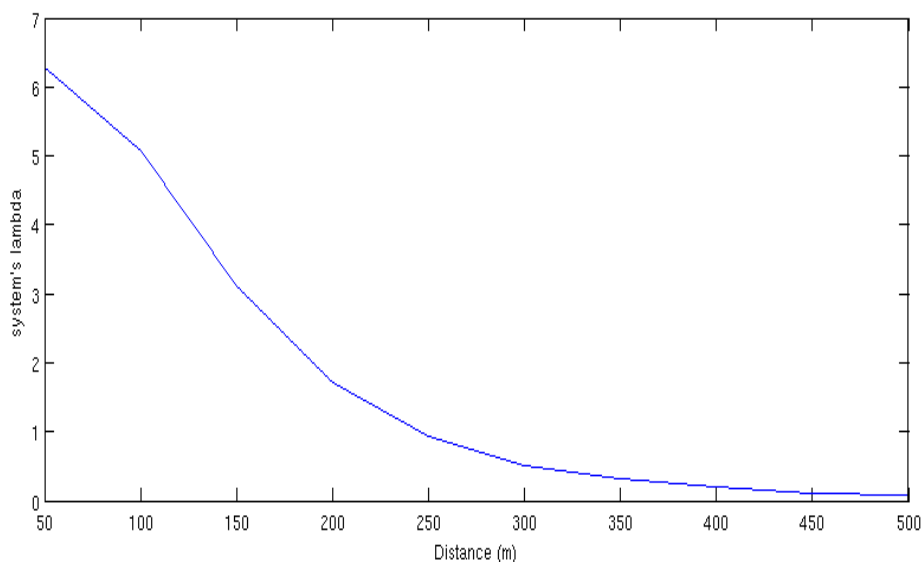
Παρουσίαση μοντέλου ενοποίησης δικτύων OFDMA/WLAN

μακρυνά οπότε και θέτει μικρό κόστος ανά μονάδα πόρων ώστε να προσελκύσει και άλλους χρήστες με σκοπό να βελτιώσει την απόδοση του συστήματος.



Σχήμα 4.4: Μεταβολή του παράγοντα λ^* συστήματος OFDMA 128 καναλιών σε σχέση με την απόσταση των χρηστών (όλοι οι χρήστες ισαπέχουν από το σταθμό βάσης)

Ακριβώς το ίδιο συμβαίνει και για σύστημα OFDMA 64 καναλιών:



Σχήμα 4.5: Μεταβολή του παράγοντα λ^* συστήματος OFDMA 64 καναλιών σε σχέση με την απόσταση των χρηστών (όλοι οι χρήστες ισαπέχουν από το σταθμό βάσης).

Όπως παρατηρήσαμε ο παράγοντας λ^* του συστήματος OFDMA έχει τις επιθυμητές ιδιότητες και μπορεί να αντιστοιχισθεί με το λ^* του συστήματος WLAN. Επομένως στα επόμενα σενάρια αναζητάμε μία τιμή που να μπορούμε να την αντιστοιχίσουμε με τη τιμή $\lambda_{i,c}^{max}$, του κάθε χρήστη i για κάθε κυψέλη c , του συστήματος WLAN που ο κάθε χρήστης υπολόγιζε και ήταν ενδεικτική της προθυμίας του να 'πληρώσει' ανά μονάδα πόρων.

4.6.4 Σύγκριση προτεινόμενων μετρικών του συστήματος OFDMA

Σε αυτό το υποκεφάλαιο θα προσπαθήσουμε να αξιοποιήσουμε τους παράγοντες Lagrange που προκύπτουν από την επίλυση του προβλήματος κατανομής πόρων του OFDMA συστήματος για να υπολογίσουμε μία μετρική που να συγκρίνεται με τις τιμές λ_i^{max} που προκύπτουν από τη λύση του συστήματος WLAN. Όπως έχουμε ήδη παρατηρήσει ο παράγοντας λ^* αντικατοπτρίζει το σύστημα σε συμφωνία με το παράγοντα λ^* του συστήματος WLAN. Επομένως πρέπει να χρησιμοποιήσουμε τους παράγοντες μ^* που αντιστοιχούν στο περιορισμό της ανάθεσης καναλιών. Κάτι τέτοιο διαισθητικά ισχύει, καθώς ο αριθμός των καναλιών που ανατίθενται στο χρήστη καθορίζει το τελικό ρυθμό μετάδοσης που του αναλογεί, καθώς ο ρυθμός μετάδοσης του είναι το σύνολο των ρυθμών μετάδοσης των υποκαναλιών που του 'ανήκουν'. Κατ' αυτό το τρόπο και η ευχαρίστηση του χρήστη θα εξαρτάται από τους παράγοντες μ^* , επομένως μένει να βρούμε το κατάλληλο συνδυασμό των παραγόντων αυτών που θα 'εξηγή' την ευχαρίστηση κάθε χρήστη. Μελετάμε τις εξής προτεινόμενες μετρικές:

- Μετρική 1: $\sum_j \mu_j^* \forall j \in N_i$, δηλαδή θεωρούμε ως μετρική το άθροισμα των παραγόντων μ_j^* , που αντιστοιχούν στο περιορισμό του j -οστού καναλιού, όπου N_i είναι το σύνολο των καναλιών που ανατέθηκαν στο χρήστη i . Αυτή η μετρική βασίζεται στο γεγονός ότι ο χρήστης έχει ρυθμό μετάδοσης που προκύπτει από το άθροισμα των ρυθμών μετάδοσης των υποκαναλιών που του έχουν ανατεθεί, και φυσικά η συνάρτηση ευχαρίστησης του κάθε χρήστη είναι συναρτήσει του ρυθμού μετάδοσης.

- Μετρική 2: $\frac{\sum_{j \in N_i} \mu_j^*}{\lambda^*}$, δηλαδή θεωρούμε ως μετρική το άθροισμα των παραγόντων

Lagrange μ_j^* προς τη τιμή του παράγοντα λ^* που σχετίζεται με το περιορισμό της ισχύος και όπως είδαμε προσδιορίζει το σύστημα. Αυτή η μετρική βασίζεται στο ίδιο σκεπτικό με τη προηγούμενη αλλά με την ιδέα να γίνει κανονικοποίηση ως προς το λ^* που προσδιορίζει τη συνολική ποιότητα του συστήματος. Κάτι τέτοιο φαντάζει πιο ορθό καθώς το άθροισμα μ_j^* χαρακτηρίζει την ικανοποίηση του χρήστη ως προς τους άλλους χρήστες (όποιος χρήστης έχει τα περισσότερα κανάλια πετυχαίνει μεγαλύτερο ρυθμό μετάδοσης από άλλους χρήστες που έχουν λιγότερα). Επομένως ο συνδυασμός του $\sum_{j \in N_i} \mu_j^*$ κανονικοποιημένος ως προς λ^* θα χαρακτηρίζει την ικανοποίηση του χρήστη ως προς τους άλλους χρήστες άλλα και συναρτήσει της κατάστασης του δικτύου.

- Μετρική 3: $\frac{\sum_{j \in N_i} \mu_j^*}{|N_i|}$, δηλαδή τη μέση τιμή των παραγόντων μ_j^* που αντιστοιχούν στα υποκανάλια που έχουν ανατεθεί στο χρήστη. Αυτή η μετρική βασίζεται στην ιδέα της κανονικοποίησης της ποιότητας που προσφέρει το κάθε υποκανάλι (η ποιότητα εκφράζεται από το ρυθμό μετάδοσης που προσφέρει).

Σκοπός είναι να βρούμε πως μεταβάλλονται οι μετρικές αυτές για ένα χρήστη σε σχέση με τη τιμή λ^* του συστήματος. Σε αυτό το σενάριο θεωρούμε σύστημα OFDMA με τα εξής χαρακτηριστικά:

$K=20$ χρήστες.

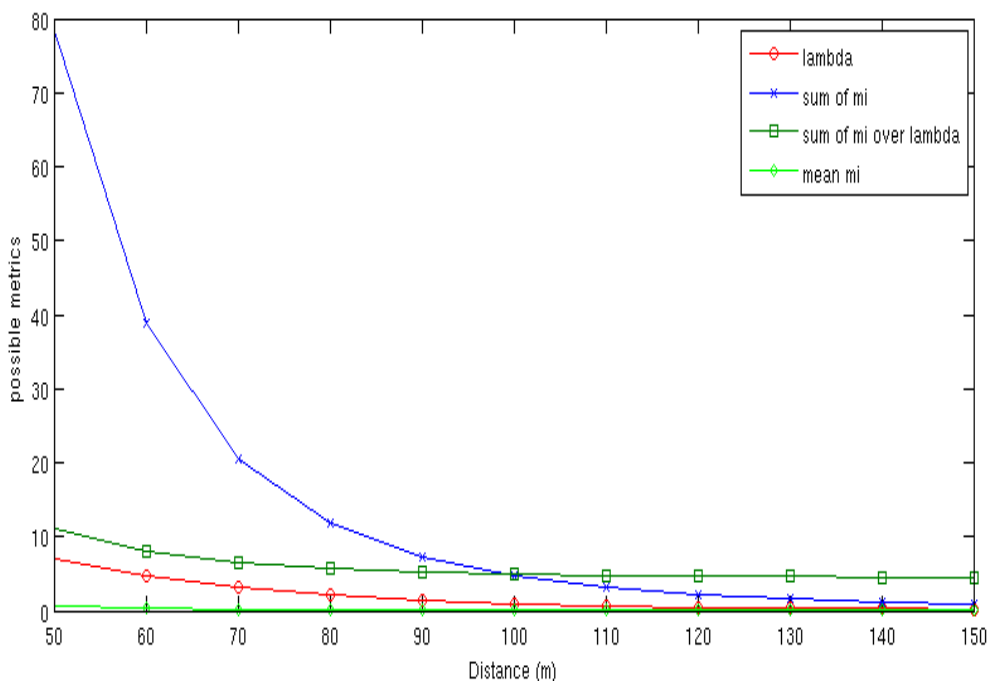
$N=128$ κανάλια.

$B_T=10\text{MHz}$ συνολικό εύρος ζώνης.

$P=10\text{W}$ συνολική ισχύς.

Τοποθετούμε ακίνητους τους 19 χρήστες σε απόσταση 200 μέτρων από το σταθμό βάσης. Ένας χρήστης (του οποίου τις μετρικές μελετάμε) κινείται και η απόστασή του μεταβάλλεται από τα 50 έως τα 150 μέτρα με βήμα τα 10 μέτρα.

Αυτό που αναζητάμε σε μία μετρική είναι να είναι πάντα μεγαλύτερη του λ^* του συστήματος και να μεταβάλλεται ομοίως με το παράγοντα λ^* για διάφορες καταστάσεις του συστήματος. Πήραμε την εξής γραφική παράσταση:



Σχήμα 4.6: Μεταβολή προτεινόμενων μετρικών ενός χρήστη σε σχέση με την απόστασή του από το σταθμό βάσης.

Αυτό που παρατηρούμε είναι ότι τόσο η μετρική 1 όσο και η μετρική 2 μεταβάλλονται ομαλά σε σχέση με τη μεταβολή του λ^* του συστήματος και είναι πάντα μεγαλύτερες από τη τιμή του λ^* ιδιότητες που είναι επιθυμητές. Η μετρική 3 (η μέση τιμή των μ_j^*) είναι μικρότερη του λ^* και επίσης φαίνεται ότι η μεταβολή της δεν είναι ομαλή με τη μεταβολή του λ^* . Από τις μετρικές 1 και 2 πιο κατάλληλη φαίνεται η μετρική 2 καθώς η τιμή της μεταβάλλεται πιο ομαλά από τη μετρική 1, που παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση. Βέβαια η καταλληλότητα της μετρικής 2 εξηγήθηκε και θεωρητικά πιο πάνω, καθώς αντικατοπτρίζει καλύτερα την ευχαρίστηση του χρήστη σε σχέση με την ευχαρίστηση των άλλων χρηστών και σε σχέση επίσης με τη ποιότητα του συστήματος (συνωστισμός χρηστών) και το ρυθμό μετάδοσης που προσφέρει αυτό.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι σαν μετρική του χρήστη για τη προθυμία του να πληρώσει ανά μονάδα πόρων καταλληλότερη είναι η μετρική 2, δηλαδή το άθροισμα των μ_j^* των καναλιών που ανατίθενται στο χρήστη προς το παράγοντα Lagrange λ^* του συστήματος:

$$\lambda_i^{max} = \frac{\sum_{j \in N_i} \mu_i^*}{\lambda^*} \quad (4.26)$$

4.6.5 Μελέτη της επιλεγόμενης μετρικής

Αφού επιλέξαμε τη τιμή που καθορίζει τη προθυμία του χρήστη να πληρώσει για τους πόρους ενός συστήματος, πρέπει να στήσουμε ένα σενάριο και να παρατηρήσουμε πως μεταβάλλεται η τιμή αυτή για ένα χρήστη σε διάφορα συμβάντα. Θεωρούμε σύστημα OFDMA με τα εξής χαρακτηριστικά:

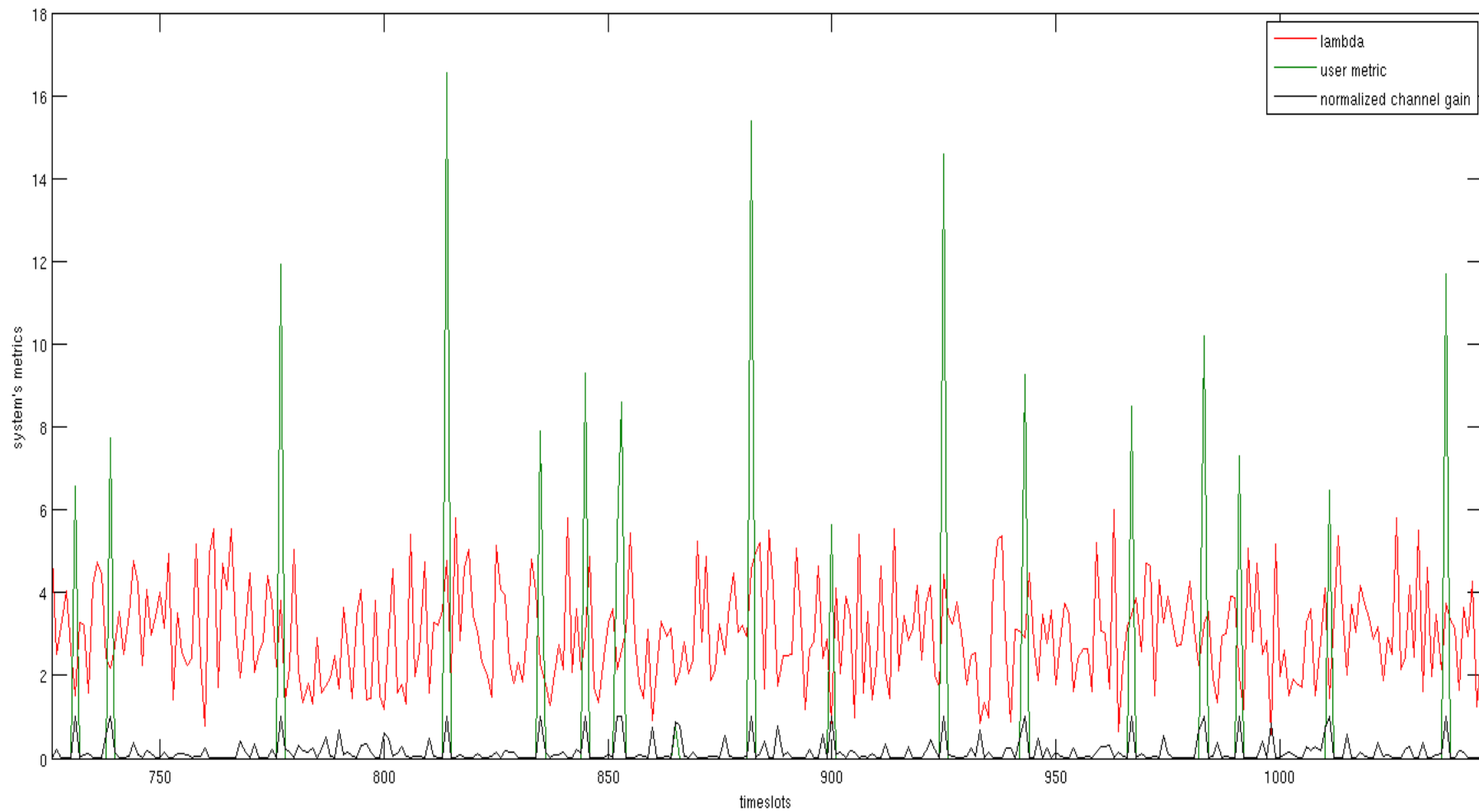
$K=20$ χρήστες.

$N=64$ κανάλια.

$BT=10\text{MHz}$ συνολικό εύρος ζώνης.

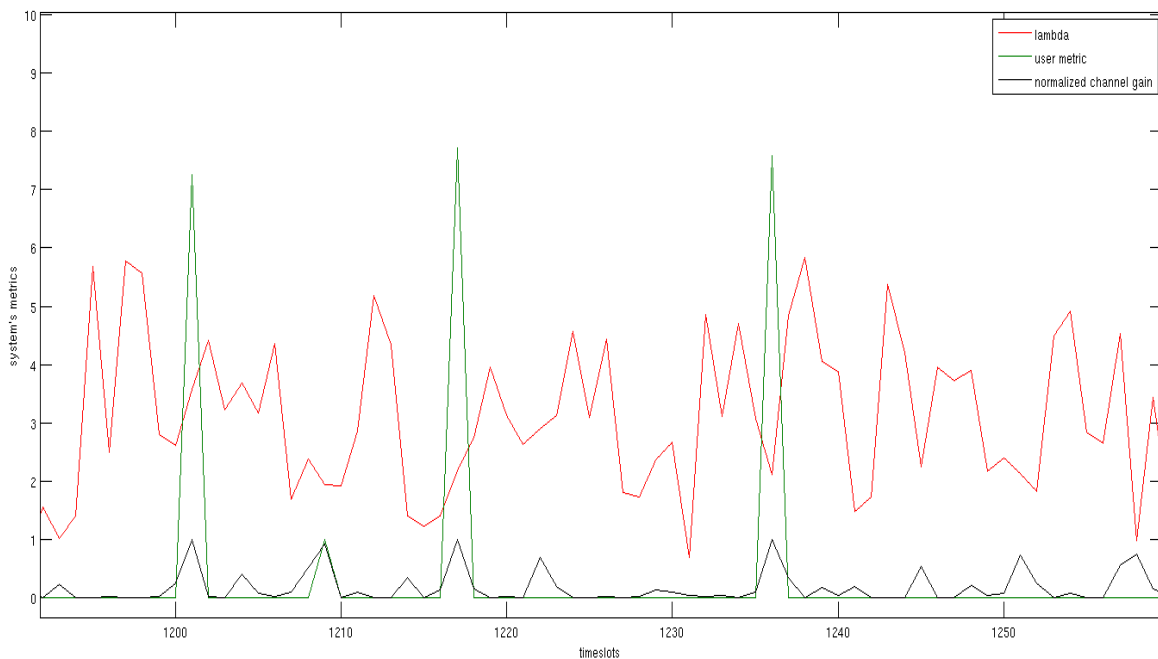
$P=10\text{W}$ συνολική ισχύς.

Θέτουμε όλους τους χρήστες ακίνητους στα 150 μέτρα. Η επιλογή οι χρήστες να είναι ακίνητοι δεν επηρεάζει το αποτέλεσμα καθώς το μόνο που επηρεάζεται είναι το πότε ο χρήστης θα εμφανίσει το καλύτερο κέρδος για να του ανατεθούν πόροι (σύμφωνα με τον αλγόριθμο που υλοποιήσαμε). Όπως και στο προηγούμενο παράδειγμα έτσι και εδώ μελετάμε το σύστημα από τη σκοπιά ενός χρήστη. Σκοπός είναι να δούμε τι τιμές παίρνει η μετρική που υιοθετήσαμε με τη πάροδο του χρόνου και για διάφορα συμβάντα. Τα συμβάντα αποτελούν η ανάθεση καναλιών ή μη στο χρήστη στη συγκεκριμένη χρονοθυρίδα, όπως και ο αριθμός των υποκαναλιών που του δόθηκαν. Έχουμε τη παρακάτω γραφική παράσταση:



Σχήμα 4.7: Παρουσίαση της μεταβολής της μετρικής ενός χρήστη και του λ^* του συστήματος

Στο παραπάνω σχήμα βλέπουμε πως μεταβάλλονται οι τιμές του λ^* , της μετρικής λ_i^{max} που υιοθετήθηκε, όπως και το κανονικοποιημένο κέρδος κάθε χρονοθυρίδας για το χρήστη που μελετάμε. Το κανονικοποιημένο κέρδος είναι ο λόγος του κέρδους του χρήστη προς το μέγιστο κέρδος που εμφανίζεται τη χρονοθυρίδα αυτή. Παρατηρούμε ότι τις στιγμές που ο χρήστης έχει το μέγιστο κέρδος και επομένως παίρνει τα περισσότερα κανάλια (σύμφωνα με τον αλγόριθμο που υλοποιήσαμε) η μετρική λ_i^{max} είναι πάντα μεγαλύτερη του λ^* του συστήματος. Πιο κάτω φαίνεται ένα ειδικότερο στιγμιότυπο για να φανεί καλύτερα:



Σχήμα 4.8: Παρουσίαση της μεταβολής της μετρικής ενός χρήστη και του λ του συστήματος σε ένα μικρότερο στιγμιότυπο.

4.6.6 Ειδικότερη μελέτη της επιλεγόμενης μετρικής σε σύστημα δύο χρηστών

Σε αυτό το σενάριο υποθέσαμε σύστημα OFDMA με τα εξής χαρακτηριστικά:

$K=2$ χρήστες.

$N=128$ κανάλια.

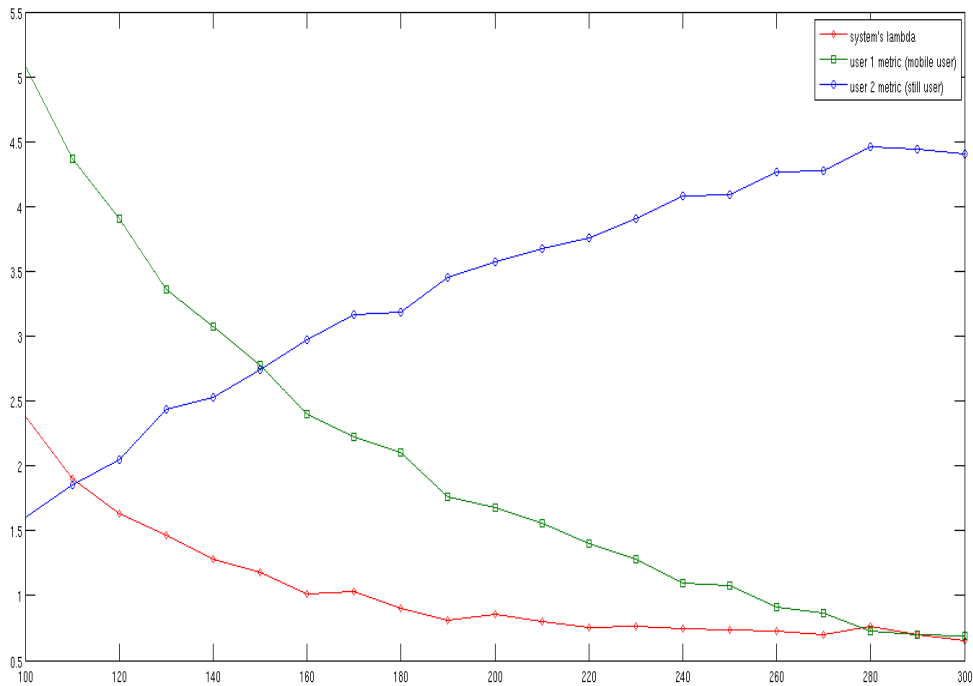
$BT=10\text{MHz}$ συνολικό εύρος ζώνης.

$P=10\text{W}$ συνολική ισχύς.

Θεωρούμε δύο μόνο χρήστες ώστε να μελετήσουμε την μεταβολή των μετρικών των χρηστών, τόσο μεταξύ τους όσο και με τη τιμή λ^* του συστήματος. Σε αυτό το σενάριο θεωρούμε ένα χρήστη σταθερό στα 150 μέτρα και ο άλλος μετακινείται από τα 100 στα 300

μέτρα. Θέλουμε να παρατηρήσουμε πως μεταβάλλεται η μετρική ενός χρήστη στην ακραία περίπτωση που απολαμβάνει τους περισσότερους πόρους (ξεκινώντας από τα 100 μέτρα και μέχρι να συναντήσει τον άλλον χρήστη στα 150 μέτρα), και έπειτα απολαμβάνει τους λιγότερους (μετά από τα 150 μέχρι και τα 300 μέτρα).

Σύμφωνα με τις ιδιότητες που έχουμε δει περιμένουμε η μετρική του χρήστη που κινείται να έχει υψηλότερη τιμή από το λ^* του συστήματος και μέχρι το διάστημα των 150 μέτρων, όπου συναντά τον άλλο χρήστη, η μετρική του να είναι υψηλότερη του ακίνητου χρήστη. Βεβαίως σταδιακά θα φθίνει. Από τα 150 μέτρα και μετά περιμένουμε η μετρική του ακίνητου χρήστη να είναι μεγαλύτερη αφού πλέον θα απολαμβάνει τους περισσότερους πόρους του συστήματος. Για τον άλλο χρήστη περιμένουμε το αντίθετο. Αυτά επαληθεύονται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 4.9: Σύγκριση μεταβολής μετρικής χρηστών λ_i^{max} και λ^* του συστήματος.

Συνοψίζοντας λοιπόν, η βέλτιστη ανάθεση πόρων που περιγράφεται στο [39] και υιοθετήσαμε, είναι ικανή να μας παράσχει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες προκειμένου να επιτρέψουμε σε ένα OFDMA δίκτυο να συνεργαστεί επιτυχώς με την μεθοδολογία του JONS που περιγράφεται αναλυτικά στην παράγραφο 4.5. Ορίζουμε συνεπώς και

χρησιμοποιούμε στο εξής σαν $\lambda_i^{max} = \frac{\sum_{j \in N_i} \mu_j^*}{\lambda_{OFDMA}^*}$ και $\lambda^* = \lambda_{OFDMA}^*$. Στη συνέχεια εφαρμόζουμε

αυτές τις μετρικές σε ένα ενοποιημένο OFDMA/WLAN σύστημα και μελετάμε την απόδοσή του.

5 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παραθέσουμε τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων μας. Στο πρώτο υποκεφάλαιο θα παραθέσουμε προσομοιώσεις που συγκρίνουν τον ευριστικό αλγόριθμο 1 και τον ευριστικό αλγόριθμο 2 κατανομής πόρων δικτύου OFDMA που περιγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στο δεύτερο υποκεφάλαιο παραθέτουμε τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του ενοποιημένου δικτύου OFDMA και WLAN που υλοποιήσαμε.

5.1 Αποτελέσματα σύγκρισης των δύο ευριστικών αλγορίθμων ανάθεσης πόρων OFDMA δικτύων

Για το μοντέλο προσομοίωσης θεωρήσαμε μια κυψέλη OFDMA με συνολικό εύρος ζώνης 10 ή 5 Mhz (θα αναφέρεται σε κάθε περίπτωση) χωρισμένο σε 128 ή 64 υποκανάλια (πάλι θα αναφέρεται σε κάθε περίπτωση) και συνολικά εκπεμπόμενη ισχύς 10W. Το κέρδος διαδρομής (path gain) του χρήστη i στο υποκανάλι j μοντελοποιήθηκε σύμφωνα με το μοντέλο απλής διάδοσης, δηλαδή βάση του τύπου $e_{ij} = \frac{K_{ij}}{d_i^n}$ όπου d_i είναι η απόσταση του χρήστη i από το σταθμό βάσης, K_{ij} είναι μία τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί τη λογαριθμική κανονική κατανομή (log-normal) με μέση τιμή μηδέν και διακύμανση $\sigma^2 = 8\text{dB}$. Φυσικά θεωρείται ότι υπάρχει συσχέτιση των κερδών υποκαναλιών κάθε χρήστη. Ο εκθέτης της απώλειας διάδοσης είναι $n=4$. Όλοι οι αλγόριθμοι και τα σενάρια υλοποιήθηκαν σε MATLAB. Σκοπός όπως αναφέρθηκε είναι η σύγκριση των δύο ευριστικών αλγορίθμων που προτάθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Υπενθυμίζουμε τους αλγόριθμους:

Ευριστικός αλγόριθμος 1: Κάθε υποκανάλι j ανατίθεται στο χρήστη με τη μεγαλύτερη τιμή $w_i \bar{R}_{ij}$, όπου:

$$\bar{R}_{ij} = \log \left[1 + \left(s_{ij} \wedge \left(e_{ij} \frac{P}{N} \right) \right) \right] \quad (5.1)$$

είναι ο ρυθμός μετάδοσης που ο χρήστης i μπορεί να επιτύχει στο υποκανάλι j θεωρώντας ισοκατανομή ισχύος σε κάθε υποκανάλι P/N . Οποιοσδήποτε ισοπαλίες λύνονται αυθαίρετα (τυχαία) και η ανάθεση ισχύος P/N χρησιμοποιείται. Η μετρική αυτή παρακινήθηκε από το γεγονός ότι η ισοκατανομή ισχύος θεωρείται από το σύνολο της βιβλιογραφίας πολύ κοντά στη βέλτιστη ανάθεση ισχύος.

Ευριστικός αλγόριθμος 2: Τα υποκανάλια ανατίθενται όπως στον ευριστικό αλγόριθμο 1. Όμως έπειτα από την ανάθεση υποκαναλιών μία βέλτιστη ανάθεση ισχύος πραγματοποιείται αντί να υιοθετηθεί η ισοκατανομή ισχύος.

5.1.1 Σύγκριση των ευριστικών αλγορίθμων σχετικά με τον αριθμό των χρηστών

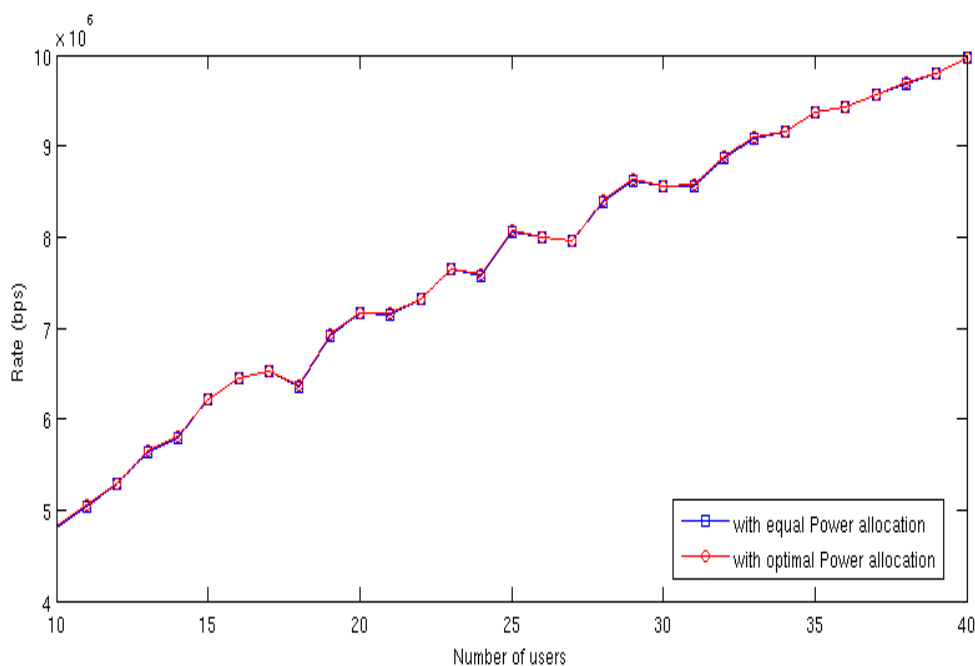
Σε αυτό το σενάριο θεωρούμε σύστημα OFDMA με τα εξής χαρακτηριστικά:

$N= 128$ υποκανάλια

$B_T= 10\text{MHz}$ συνολικό διαθέσιμο εύρος ζώνης

$P=10W$ συνολικά διαθέσιμη ισχύς

Μέσα σε αυτό το σύστημα τοποθετούμε στο σύστημα από 10 έως 40 χρήστες σταθεροί όλοι στην ίδια απόσταση των 150 μέτρων από το σταθμό βάσης που φυσικά θεωρούμε ότι βρίσκεται στο κέντρο της κυψέλης. Ο λόγος της ίσης απόστασης είναι το σκεπτικό ότι αφού η ανάθεση των καναλιών ουσιαστικά δίνεται ανάλογα με το κέρδος των καναλιών (εάν θεωρήσουμε μία QoS), τότε οι χρήστες που ισαπέχουν θα έχουν παρεμφερές κέρδος καναλιών και επομένως θα λαμβάνουν πόρους από το σύστημα. Στόχος είναι να βρούμε πως μεταβάλλεται ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης κάτω ζεύξης με την αύξηση των χρηστών του συστήματος και για τους δύο ευριστικούς αλγόριθμους. Πήραμε τη γραφική παράσταση:

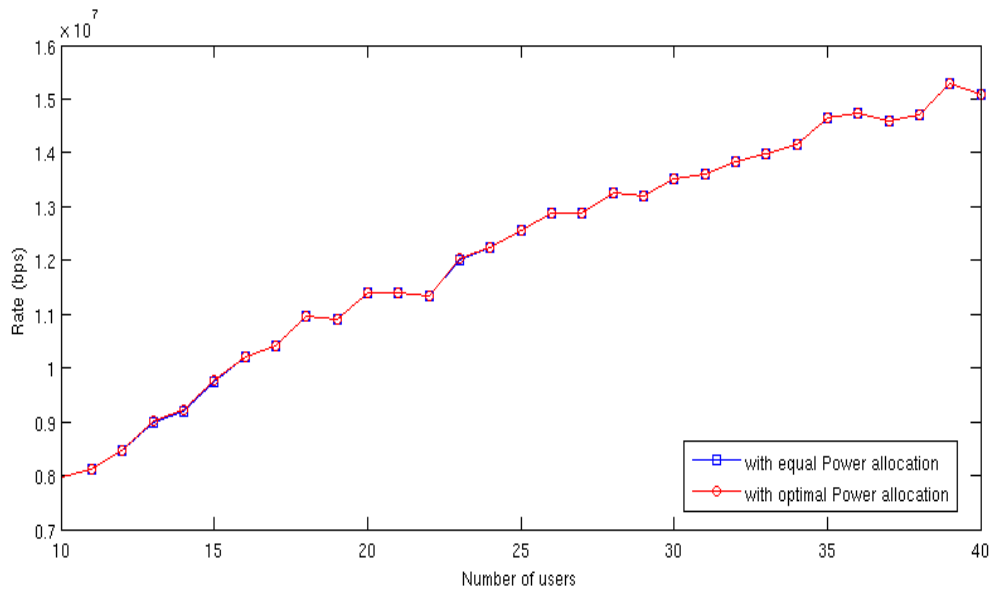


Σχήμα 5.1: Συνολικός ρυθμός μετάδοσης σε bps της κυψέλης OFDMA 128 καναλιών ανάλογα με τον αριθμό των χρηστών (οι χρήστες σταθεροί στα 150 μέτρα).

Παρατηρούμε ότι με την αύξηση των χρηστών ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης αυξάνεται, κάτι αναμενόμενο καθώς ο αυξημένος αριθμός χρηστών προσφέρει αυξημένες πιθανότητες κάποιου εξ αυτών να απολαμβάνουν καλές τιμές κέρδους υποκαναλιών (channel gain).

Επίσης παρατηρούμε ότι οι δύο ευριστικοί αλγόριθμοι προσφέρουν σχεδόν ίδια αποτελέσματα στο ρυθμό μετάδοσης. Κάτι τέτοιο δεν εκπλήσσει καθώς είναι ευρέως αποδεκτό στη βιβλιογραφία ότι η ισοκατανομή ισχύος είναι πολύ κοντά (στην απόδοση) με τη βέλτιστη ανάθεση ισχύος.

Ακριβώς η ίδια τάση παρατηρείται εάν θέσουμε σύστημα OFDMA 64 καναλιών:



Σχήμα 5.2: Συνολικός ρυθμός μετάδοσης σε bps της κυψέλης OFDMA 64 καναλιών ανάλογα με τον αριθμό των χρηστών (οι χρήστες σταθεροί στα 150 μέτρα).

5.1.2 Σύγκριση των ευριστικών αλγορίθμων σχετικά με την απόσταση των χρηστών

Στόχος του σεναρίου αυτού είναι να βρούμε πως μεταβάλλεται ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης κάτω ζεύξης με την αύξηση της απόστασης των χρηστών του συστήματος και για τους δύο ευριστικούς αλγόριθμους. Θεωρούμε αποκλειστικά το σύστημα OFDMA με τα εξής χαρακτηριστικά:

$N= 128$ υποκανάλια

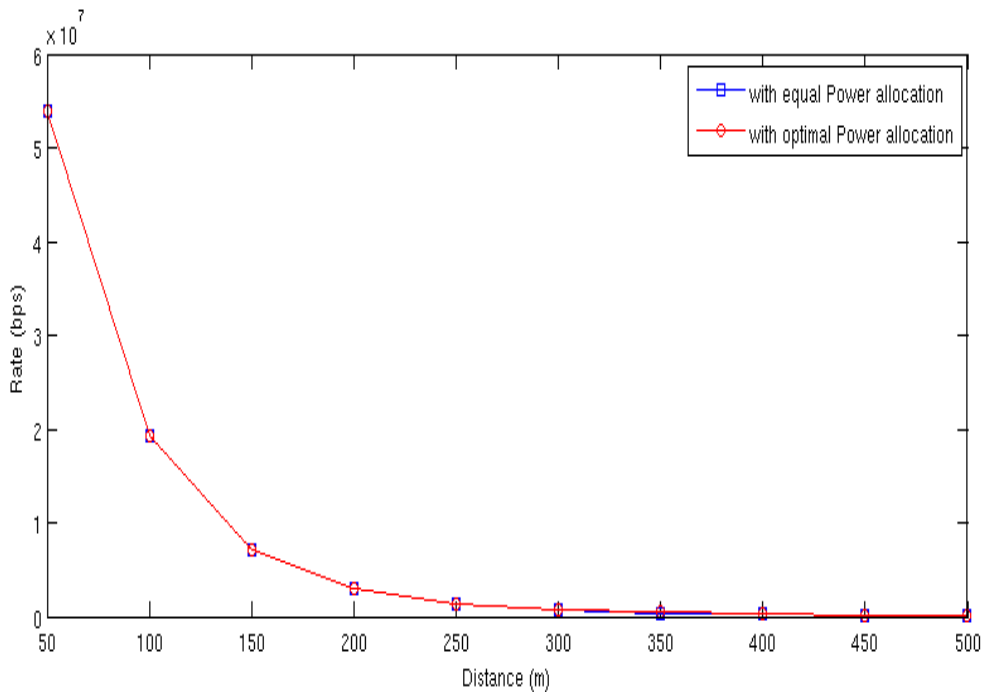
$B_T= 10\text{MHz}$ συνολικό διαθέσιμο εύρος ζώνης

$P= 10\text{W}$ συνολικά διαθέσιμη ισχύς

Μέσα σε αυτό το σύστημα τοποθετούμε 20 χρήστες που ισαπέχουν από το σύστημα (για τον ίδιο λόγο που εξηγήθηκε στο προηγούμενο σενάριο. Η απόστασή τους μεταβάλλεται από τα 50 μέτρα έως τα 500 μέτρα με βήμα τα 50 μέτρα. Προέκυψε το σχήμα 5.3.

Παρατηρούμε ότι με την απομάκρυνση των χρηστών από το σταθμό βάσης, ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης της κατερχόμενης ζεύξης μειώνεται. Κάτι τέτοιο είναι αναμενόμενο καθώς όσο απομακρύνονται οι χρήστες από το σταθμό βάσης τόσο το κέρδος καναλιών τους μειώνεται σύμφωνα με τη σχέση $e_{ij} = \frac{K_{ij}}{d_i^n}$, όπως εξηγήθηκε παραπάνω.

Αυτή η μείωση του κέρδους καναλιών οδηγεί στη μείωση του ρυθμού μετάδοσης που μπορεί να επιτύχει κάθε υποκανάλι σύμφωνα με το νόμο του Shannon. Επίσης παρατηρούμε ότι όπως στο προηγούμενο σενάριο οι δύο ευριστικοί αλγόριθμοι προσφέρουν σχεδόν ίδια αποτελέσματα στο ρυθμό μετάδοσης.



Σχήμα 5.3: Συνολικός ρυθμός μετάδοσης σε bps της κυψέλης OFDMA 128 καναλιών ανάλογα με την απόσταση των χρηστών (20 ενεργοί χρήστες).

5.1.3 Σύγκριση των ευριστικών αλγορίθμων για τυχαίες χωρικά κατανομές των χρηστών

Οι παραπάνω παρατηρήσεις οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι οι δύο ευριστικοί αλγόριθμοι είναι τόσο κοντά από άποψη αποδόσεως που η διαφορά τους είναι αμελητέα. Όμως στα προηγούμενα παραδείγματα οι χρήστες ισαπέχαν από το σταθμό βάσης. Για να δούμε εάν αυτή η παραδοχή οδήγησε σε αλλοίωση των αποτελεσμάτων τρέξαμε δύο σενάρια. Και για τα δύο σενάρια θέσαμε σύστημα OFDMA με τα εξής χαρακτηριστικά:

$K=20$ χρήστες.

$N=64$ κανάλια.

$B_T=10\text{MHz}$ συνολικό εύρος ζώνης.

$P=10\text{W}$ συνολική ισχύς.

Για τη πρώτη δοκιμή θεωρήσαμε ότι οι χρήστες κατανέμονται τυχαία σε διάστημα από 100 έως 200 μέτρα. Σκοπός είναι να συγκρίνουμε το συνολικό μέσο ρυθμό μετάδοσης και για τους δύο ευριστικούς αλγορίθμους. Πήραμε τα εξής:

	Ευριστικός αλγόριθμος 2 (βέλτιστη ανάθεση ισχύος)	Ευριστικός αλγόριθμος 1 (ισοκατανομή ισχύος)
Συνολικός ρυθμός μετάδοσης(rate).	15.5456 Mbps	15.5411 Mbps

Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Στη δεύτερη δοκιμή κατανέμουμε τους μισούς χρήστες σε απόσταση 100 μέτρων και τους άλλους σε απόσταση 150 μέτρων. Πήραμε τα εξής:

	Ευριστικός αλγόριθμος 2 (βέλτιστη ανάθεση ισχύος)	Ευριστικός αλγόριθμος 1 (ισοκατανομή ισχύος)
Συνολικός ρυθμός μετάδοσης(rate).	20.8116 Mbps	20.8091 Mbps

Και πάλι παρατηρήσαμε μηδαμινές διαφορές. Κάτι τέτοιο εξηγείται καθώς θεωρήσαμε ένα τύπο υπηρεσιών για όλους τους χρήστες και επομένως το πρόβλημα μεγιστοποίησης είναι πρόβλημα μεγιστοποίησης του συνολικού ρυθμού μετάδοσης. Όμως είναι αυτονόητο ότι καλύτερο ρυθμό μετάδοσης ανά υποκανάλι απολαμβάνουν οι χρήστες που είναι πιο κοντά στο σταθμό βάσης, επομένως και τα περισσότερα κανάλια αποδίδονται μόνο στους κοντινότερους χρήστες. Και επειδή λόγω των αυξημένων χρηστών η πιθανότητα να βρεθεί ένας χρήστης με πολύ καλές συνθήκες καναλιού οδηγούμαστε στη κατάσταση ενός περιβάλλοντος υψηλού SNR όπου η ισοκατανομή ισχύος αποδίδει το ίδιο σχεδόν με τη βέλτιστη κατανομή ισχύος.

Επομένως παρατηρήσαμε ότι οι δύο αλγόριθμοι είναι πολύ κοντά από άποψη απόδοσης. Και μάλιστα η υπολογιστική απλότητα του ευριστικού αλγορίθμου 1 τον καθιστά ιδιαίτερα ελκυστικό σε σχέση με τον ευριστικό αλγόριθμο 2 που απαιτεί και την υλοποίηση μιας βελτιστοποίησης. Εντούτοις εμείς υιοθετήσαμε τον ευριστικό αλγόριθμο 2 καθώς μας έδινε τη βέλτιστη ανάθεση πόρων αλλά επίσης και τους αναγκαίους παράγοντες Lagrange που χρειαζόμασταν για την επίτευξη της ενοποίησης όπως περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

5.2 Αποτελέσματα προσομοιώσεων ενοποιημένων δικτύων OFDMA/WLAN

Στο προηγούμενο κεφάλαιο περιγράψαμε το προτεινόμενο τρόπο ενοποίησης των κυψελωτών OFDMA δικτύων με τα ασύρματα τοπικά δίκτυα WLAN. Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και θα γίνει σύγκριση του τρόπου αυτού με άλλες προτάσεις ενοποίησης που υπάρχουν στη βιβλιογραφία.

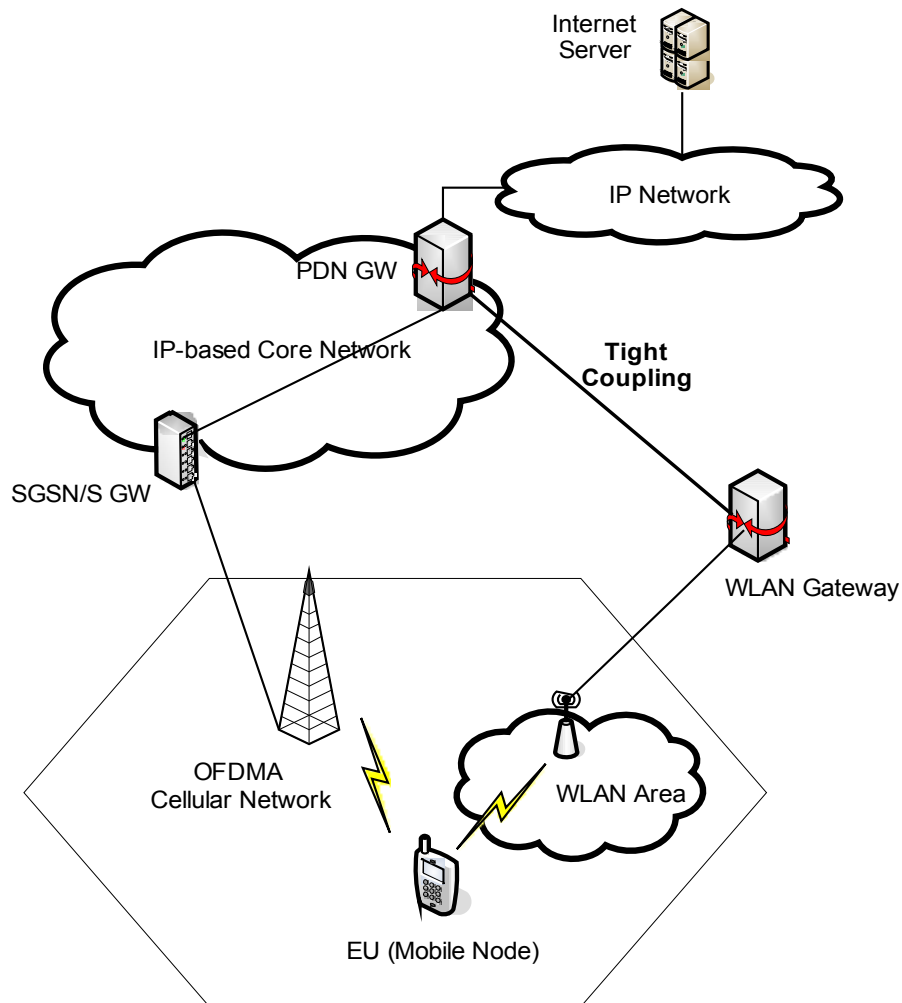
Μία πρόταση ενοποίησης με την οποία θα συγκριθεί η μοντελοποίηση του συστήματος που προτείναμε είναι η επιλογή του δικτύου με το οποίο θα συνδεθεί ο κάθε χρήστης με βάση τη ποιότητα του σήματος που έχει από κάθε κυψέλη (radio signal strength, RSS). Θεωρούμε λοιπόν πως χρήστες που απέχουν πάνω από 70m από το σταθμό βάσης OFDMA επιλέγουν ως σημείο πρόσβασης το WLAN, ενώ αντιθέτως το OFDMA. Το σκεπτικό πίσω από αυτή τη πολιτική βρίσκεται στο γεγονός ότι όσο καλύτερο σήμα έχει κάποιος χρήστης σε μία κυψέλη τόσο καλύτερη ποιότητα υπηρεσιών μπορεί να απολαμβάνει, αφού η καλύτερη ποιότητα του σήματος αντιστοιχεί σε καλύτερο ρυθμό μετάδοσης που μπορεί να επιτύχει ο χρήστης. Βεβαίως αυτή η πολιτική είναι μυωπική, δηλαδή δε μπορεί να λάβει υπόψιν της τη ποιότητα κάθε δικτύου από άποψη συνωστισμού χρηστών.

Μία άλλη πολιτική ανάθεσης χρηστών με την οποία θα συγκρίνουμε τη δικιά μας πολιτική αφορά τη πολιτική ανάθεσης χρηστών βάσει της υπηρεσίας που αιτούνται (DiffServ). Σκοπός αυτής της πολιτικής είναι να συγκεντρώνει σε κάθε δίκτυο τον τύπο υπηρεσίας (QoS) που μπορεί να εξυπηρετήσει καλύτερα. Για παράδειγμα η πολιτική αυτή αναθέτει τους χρήστες που αιτούνται υπηρεσίες τηλεφωνίας (και γενικότερα υπηρεσίες χαμηλής απαίτησης ρυθμού μετάδοσης, αλλά και μικρής χρονικής καθυστέρησης) στο δίκτυο των κινητών τηλεπικοινωνιών και τους χρήστες που αιτούνται υπηρεσίες δεδομένων (γενικότερα υπηρεσίες υψηλής απαίτησης ρυθμού μετάδοσης με ανεκτικότητα στη χρονική καθυστέρηση) στο ασύρματο τοπικό δίκτυο. Πάλι και αυτή η πολιτική χαρακτηρίζεται από 'μυωπία' καθώς οι χρήστες κατανέμονται μόνο ανάλογα με τις υπηρεσίες τους και δε λαμβάνονται υπόψιν η κατάσταση του συστήματος (από άποψη συνωστισμού χρηστών και δυνατοτήτων ανάθεσης πόρων).

5.2.1 Το μοντέλο του συστήματος προσομοίωσης

Για το μοντέλο προσομοίωσης θεωρήσαμε μία τυπική 3GPP διάταξη με μία κυψέλη OFDMA και ένα WLAN τοποθετημένο στο εσωτερικό του χώρου κάλυψης της κυψέλης όπως φαίνεται στο σχήμα 5.4. Θεωρούμε πώς νέοι χρήστες εισέρχονται στο σύστημα ζητώντας εξυπηρέτηση ανά τακτά διαστήματα, ενώ καθ' όλη τη διάρκεια εξυπηρέτησης παραμένουν στάσιμοι.

Όσον αφορά τα δίκτυα, το WLAN θεωρούμε ότι λειτουργεί στη μπάντα των 5 Ghz, με μέγιστο ρυθμό μετάδοσης κατερχόμενης ζεύξης τα 54 Mbit/s. Η ενεργή χωρητικότητα (effective capacity) C_{max} υπολογίζεται δυναμικά με προσομοιωτή που ενσωματώνει το πρωτόκολλο IEEE 802.11e. Για το σύστημα OFDMA θεωρήθηκε κυψέλη με συνολικό εύρος ζώνης 5 Mhz χωρισμένο σε 128 υποκανάλια και συνολικά εκπεμπόμενη ισχύς 10W. Το κέρδος διαδρομής (path gain) μοντελοποιήθηκε σύμφωνα με το μοντέλο απλής διάδοσης, δηλαδή βάση του τύπου $e_{ij} = \frac{K_{ij}}{d_i^n}$ όπου d_i είναι η απόσταση του χρήστη i από το σταθμό βάσης OFDMA, K_{ij} είναι μία τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί τη λογαριθμική κανονική κατανομή (log-normal) με μέση τιμή μηδέν και διακύμανση $\sigma^2 = 8\text{dB}$. Φυσικά θεωρείται ότι υπάρχει συσχέτιση των κερδών υποκαναλιών κάθε χρήστη. Θεωρούμε ότι ο εκθέτης της απώλειας διάδοσης είναι $n=4$. Εκτός και εάν προσδιοριστεί αλλιώς σε κάθε περίοδο T_{JONS} καινούργιοι χρήστες εισέρχονται στο σύστημα και ο συνολικός αριθμός των χρηστών είναι είκοσι (20). Οι τύποι των προσφερόμενων QoS θα οριστούν σε κάθε προσομοίωση.



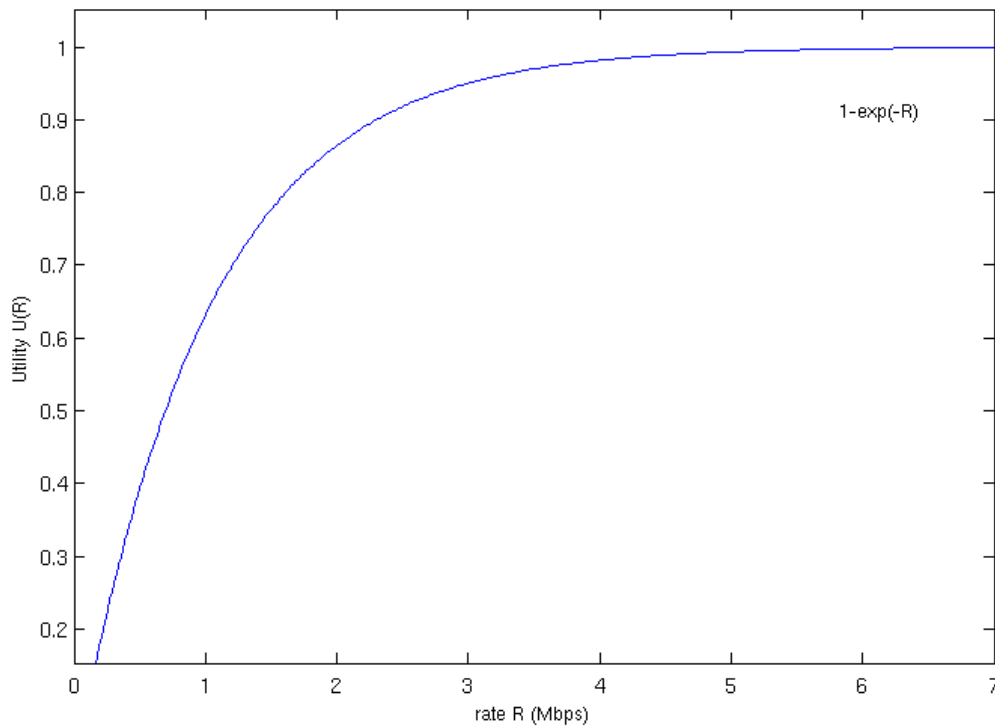
Σχήμα 5.4: Τυπική 3GPP διάταξη με μία κυψέλη OFDMA και ένα WLAN.

5.2.2 Σύγκριση της προτεινόμενης πολιτικής με την πολιτική επιλογής δικτύου με βάση τη ποιότητα του σήματος

Για να συγκρίνουμε τις δύο αυτές πολιτικές θεωρήσαμε ένα τύπο προσφερόμενης υπηρεσίας που ορίζεται από τη σχέση:

$$U(R) = 1 - e^{-aR} \quad (5.2)$$

για $a=1$, και R σε Mbps.

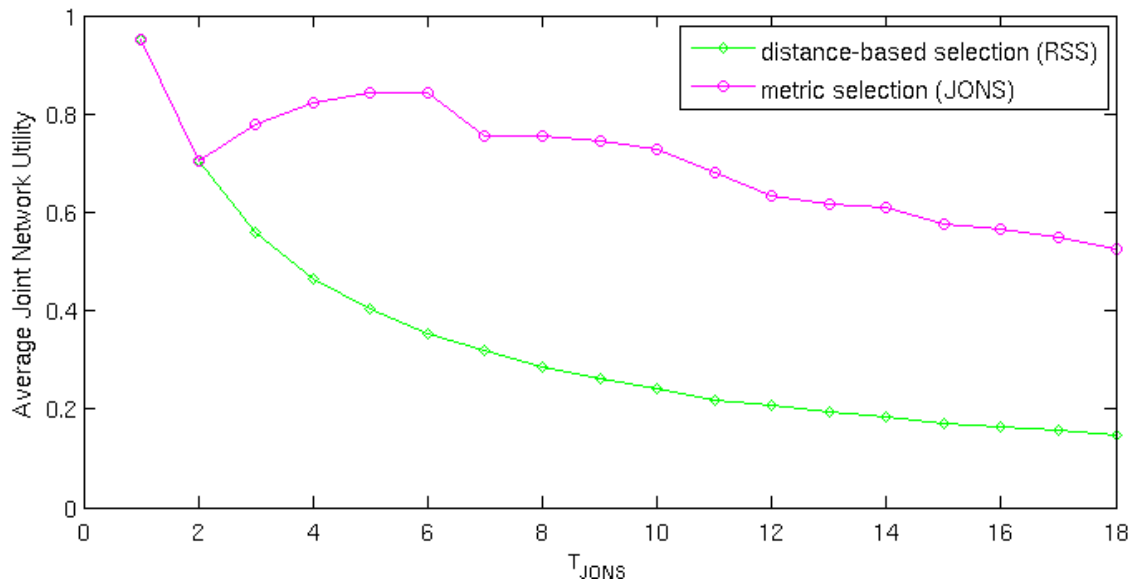


Σχήμα 5.5: Συνάρτηση χρησιμοποίησης $U(R)$.

Σενάριο 1: Πλήρης Μονομερής καταμερισμός χρηστών

Σε μια πρώτη προσομοίωση θεωρούμε ένα ακραίο σενάριο και θέτουμε όλους τους χρήστες στα 50 μέτρα ακίνητους. Σύμφωνα με χρήση του μηχανισμού JONS οι χρήστες μοιράζονται στα δύο δίκτυα προσφέροντας εξισορρόπηση του φορτίου. Συγκεκριμένα παρατηρούμε πως οι πρώτοι χρήστες προτιμούν να συνδεθούν στο δίκτυο OFDMA μέχρι που ο συνωστισμός των χρηστών οδηγεί στην αύξηση της τιμής λ_{avg}^* της κυψέλης OFDMA και οι χρήστες επιδιώκουν να συνδεθούν στο WLAN που δεν υποφέρει από 'συνωστισμό'. Έπειτα αφού οι χρήστες μοιραστούν στα δίκτυα η επιλογή κάθε καινούργιου χρήστη i γίνεται με βάση τις τιμές λ_{avg}^* και λ_i^{max} , οδηγώντας κάθε χρήστη στο βέλτιστο για αυτόν και το συνολικό σύστημα δίκτυο.

Αντίθετα, η πολιτική επιλογής με βάση τη ποιότητα του σήματος, μωπικά θα οδηγήσει όλους τους χρήστες στην επιλογή του δικτύου OFDMA καθώς βρίσκονται σε απόσταση μικρότερη των 70 μέτρων με συνέπεια τον συνωστισμό των χρηστών στο δίκτυο OFDMA ενώ το δίκτυο WLAN θα μένει ανεκμετάλλευτο. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα τη δραματική πτώση της απόδοσης του συνολικού συστήματος. Αυτό φαίνεται από το διάγραμμα της μέσης χρησιμοποίησης του ενοποιημένου συστήματος (όλα τα γραφήματα των προσομοιώσεων θα είναι της χρησιμοποίησης του ενοποιημένου συστήματος):

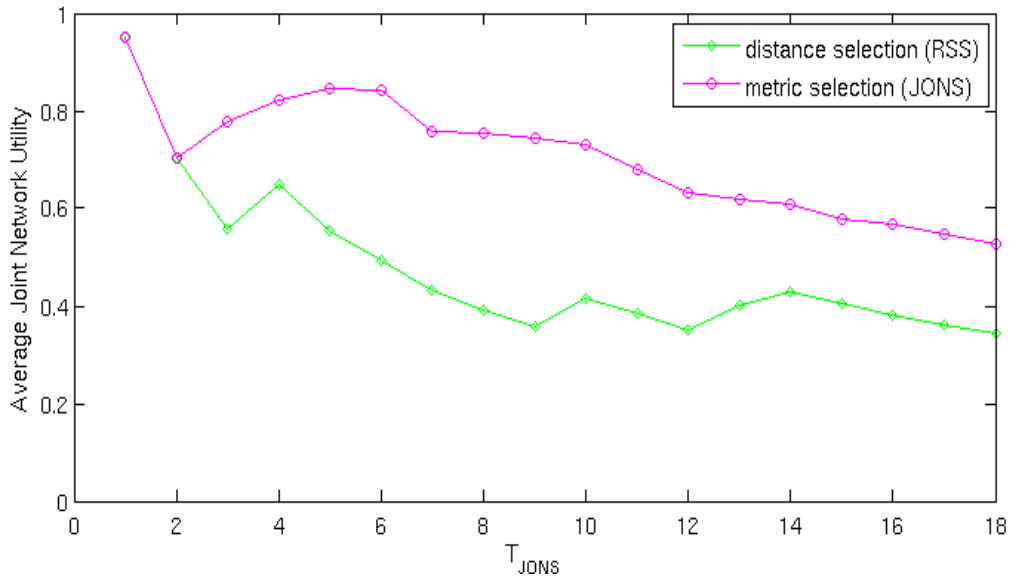


Σχήμα 5.6: Σύγκριση απόδοσης πολιτικών επιλογής για χρήστες στα 50 μέτρα.

Στη παραπάνω γραφική παράσταση παρατηρούμε ότι η επιλογή δικτύου με βάση τη ποιότητα του σήματος οδηγεί σε γρήγορη πτώση της απόδοσης του συνολικού δικτύου, ενώ η επιλογή βάση των μετρικών που προτείναμε είναι πολύ καλύτερη. Παρατηρούμε επίσης ότι η πολιτική που προτείνουμε είναι πολύ κοντά σε απόδοση με τη πολιτική της τυχαίας κατανομής. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς θέσαμε όλους τους χρήστες στα 50 μέτρα και την υποστήριξη μιας υπηρεσίας. Έτσι όλοι οι χρήστες είναι ίδιοι μακροσκοπικά, δηλαδή βλέπουν τις ίδιες συνθήκες καναλιών και αιτούνται τις ίδιες υπηρεσίες. Αυτό που καταφέρνει η τυχαία επιλογή είναι να ισοκατανείμει τους χρήστες στα δύο δίκτυα κάτι που οδηγεί στον ισοκαταμερισμό φορτίου και φυσικά θα έχει παραπλήσια απόδοση με τον προτεινόμενο αλγόριθμο. Να υπενθυμίσουμε ότι η τυχαία επιλογή δεν υπάρχει σε πολιτική ανάθεσης χρηστών.

Σενάριο 2: Μερικώς Μονομερής καταμερισμός χρηστών I

Στο δεύτερο σενάριο θεωρήσαμε ότι οι περισσότεροι χρήστες είναι κοντά στο σταθμό βάσης OFDMA (δηλαδή ότι περίπου το 66% των χρηστών βρίσκονται στα 50 μέτρα), και οι υπόλοιποι βρίσκονται στα 100 μέτρα για να προσομοιώσουμε καλύτερα πραγματικές συνθήκες. Η πολιτική επιλογής με βάση τη ποιότητα του σήματος θα ωθήσει τους περισσότερους χρήστες στο δίκτυο OFDMA και όσους βρίσκονται στα 100 μέτρα θα συνδεθούν στο WLAN. Αντίθετα η προτεινόμενη πολιτική για τους ίδιους λόγους που εξηγήθηκαν (η τιμή λ_{avg}^* αποτελεί δείκτη και του συνωστισμού και των διαθέσιμων πόρων κάθε κυψέλης, ενώ η μετρική λ_i^{max} ορίζει την 'επιθυμία' κάθε χρήστη για τους διαθέσιμους πόρους) θα οδηγήσει σε καλύτερη κατανομή. Όλα αυτά αποδεικνύονται στο σχήμα 5.7.



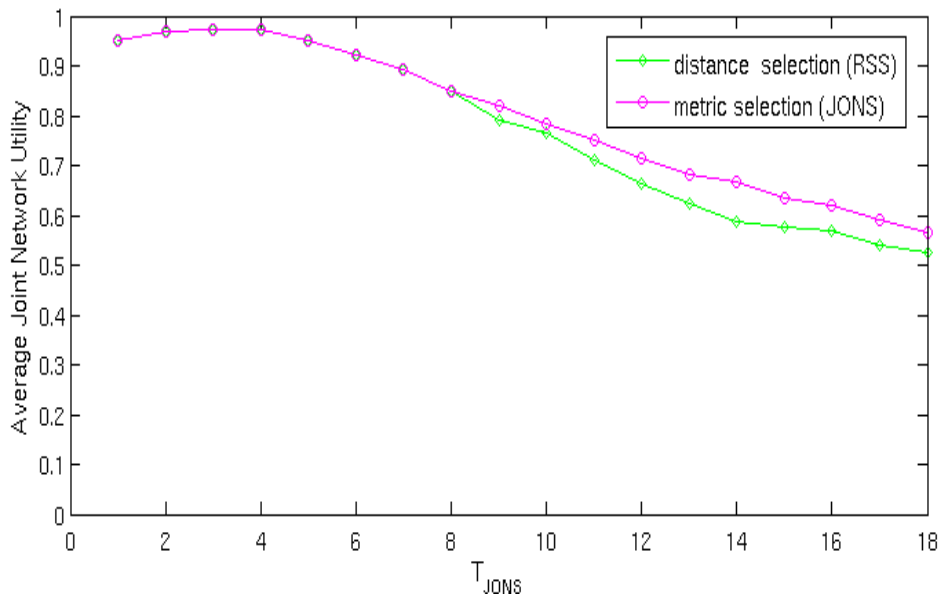
Σχήμα 5.7: Σύγκριση απόδοσης πολιτικών επιλογής δικτύου με τους περισσότερους χρήστες κοντά στο σύστημα OFDMA.

Σε αυτό το σενάριο βλέπουμε και πάλι τη καλύτερη χρησιμοποίηση του ενοποιημένου δικτύου που προσφέρει η προτεινόμενη πολιτική έναντι της επιλογής δικτύου με βάση τη ποιότητα του σήματος (RSS).

Σενάριο 3: Μερικώς Μονομερής καταμερισμός χρηστών II

Αντίστοιχα σε ένα άλλο σενάριο θεωρούμε ότι πλέον οι περισσότεροι χρήστες είναι μακριά από το σταθμό βάσης OFDMA (δηλαδή ότι περίπου το 66% των χρηστών βρίσκονται στα 100 μέτρα), και οι υπόλοιποι βρίσκονται στα 50 μέτρα και πάλι για να προσομοιώσουμε ρεαλιστικότερες συνθήκες. Η πολιτική επιλογής με βάση τη ποιότητα του σήματος θα ωθήσει τους περισσότερους χρήστες στο δίκτυο WLAN και όσους βρίσκονται στα 50 μέτρα θα συνδεθούν στο OFDMA. Αντίθετα η προτεινόμενη επιλογή για τους ίδιους λόγους που εξηγήθηκαν παραπάνω θα οδηγήσει σε καλύτερη κατανομή. Όλα αυτά αποδεικνύονται στο σχήμα 5.8.

Και εδώ παρατηρούμε ότι η προτεινόμενη επιλογή είναι καλύτερη, αν και σε αυτή τη περίπτωση η επιλογή με βάση τη ποιότητα του σήματος έδωσε αποτελέσματα κοντά σε αυτά της προτεινόμενης.

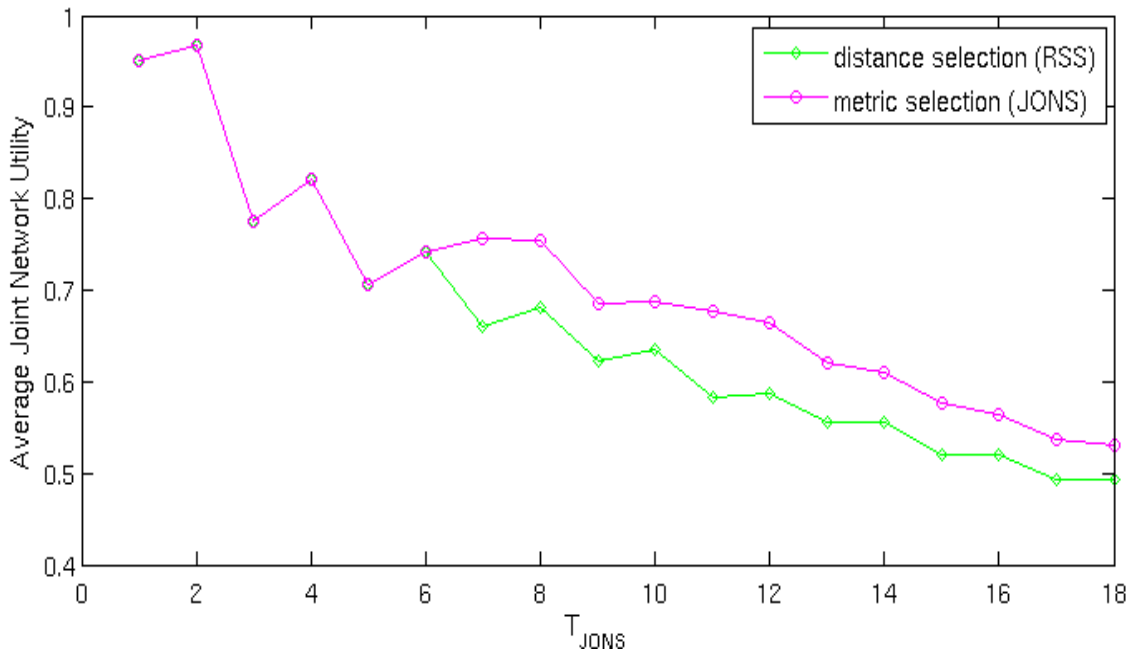


Σχήμα 5.8: Σύγκριση απόδοσης πολιτικών επιλογής δικτύου με τους περισσότερους χρήστες μακριά από το σύστημα OFMDA.

Σενάριο 4: Τυχαία κατανομή χρηστών

Σε ένα άλλο σενάριο θεωρήσαμε τους χρήστες να τοποθετούνται τυχαία στο διάστημα [20-120] μέτρα. Ως αποτέλεσμα, η πολιτική επιλογής με βάση τη ποιότητα του σήματος θα οδηγήσει τους μισούς χρήστες στο δίκτυο OFDMA και τους υπόλοιπους μισούς στο δίκτυο WLAN. Κάτι τέτοιο φαινομενικά οδηγεί σε ισοκαταμερισμό των χρηστών και στην άποψη ότι έγινε βέλτιστη κατανομή, κάτι που δεν ισχύει, όπως θα δούμε αν συγκριθεί με την προτεινόμενη πολιτική μας. Αυτό συμβαίνει επειδή υπάρχει ο φόρτος σε κάθε δίκτυο δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τον αριθμό των χρηστών που εξυπηρετεί, αλλά και από το ίδια τα χαρακτηριστικά του δικτύου και των πόρων που προσφέρει. Από τη προσομοίωση έχουμε το σχήμα 5.9.

Παρατηρούμε ότι και πάλι η προτεινόμενη πολιτική επιλογής είναι καλύτερη της πολιτικής επιλογής δικτύου με βάση τη ποιότητα του σήματος. Και φυσικά αφού τώρα υποθέσαμε δύο δυνατές αποστάσεις των χρηστών έναντι της μίας του προηγούμενου σεναρίου βλέπουμε ότι η απόδοση της τυχαίας επιλογής δικτύου φθίνει έναντι των άλλων πολιτικών. Τέλος παρατηρούμε ότι ακόμα και η τυχαία επιλογή γίνεται καλύτερη της επιλογής με βάση τη ποιότητα του σήματος, κάτι που δείχνει τη μυωπική ιδιότητα της πολιτικής αυτής.



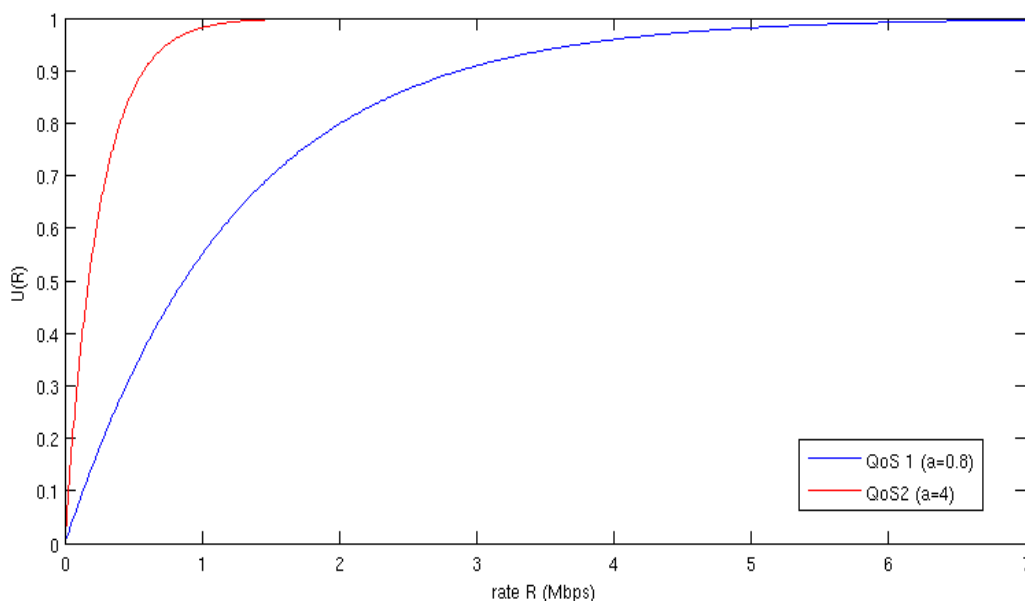
Σχήμα 5.9: Σύγκριση απόδοσης πολιτικών επιλογής δικτύου για χρήστες τυχαία καταναμημένους στα [20-120] μέτρα.

Μέσα από όλα αυτά τα σενάρια είδαμε ότι η προτεινόμενη πολιτική αποδίδει καλύτερα από την επιλογή δικτύου με βάση τη ποιότητα του σήματος για διάφορες καταστάσεις του συστήματος. Οι λόγοι για τους οποίους συμβαίνει αυτό έχουν ήδη εξηγηθεί. Κυρίως όμως είναι ότι η μετρική που επιλέξαμε όπως και η τιμή λ_{avg}^* κάθε κυψέλης είναι δείκτες τόσο του συνωστισμού των χρηστών σε κάθε κυψέλη όσο και των διαθέσιμων πόρων που έχει να προσφέρει το κάθε δίκτυο. Έτσι έχοντας αυτή τη γνώση ο χρήστης μπορεί να επιλέξει το δίκτυο που έχει να του προσφέρει καλύτερους ρυθμούς μετάδοσης και επομένως καλύτερες υπηρεσίες. Αντίθετα εάν ο χρήστης χρησιμοποιήσει τη πολιτική επιλογής με βάση τη ποιότητα του σήματος μπορεί, όπως είδαμε και στα σενάρια, να 'ξεγελαστεί' και να επιλέξει δίκτυο στο οποίο μεν θα έχει καλύτερη ποιότητα καναλιού, και επομένως προσδοκά να έχει καλύτερο ρυθμό μετάδοσης, αλλά επειδή η κυψέλη είναι ήδη φορτωμένη με πολλούς χρήστες να μη μπορεί να του προσφέρει τους απαραίτητους πόρους σε αντίθεση με άλλες κυψέλες με μικρότερο συνωστισμό που θα μπορούν να του προσφέρουν περισσότερους πόρους.

5.2.3 Σύγκριση της προτεινόμενης πολιτικής με την πολιτική επιλογής δικτύου βάση των QoS των χρηστών

Όπως αναφέραμε μια άλλη πολιτική ανάθεσης χρηστών αποτελεί η επιλογή δικτύου με βάση την υπηρεσία (QoS) που αιτείται ο κάθε χρήστης. Για να συγκρίνουμε τη πολιτική αυτή με τη προτεινόμενη πολιτική θεωρούμε δύο τύπους υπηρεσιών. Ο πρώτος

χαρακτηρίζει υπηρεσίες δεδομένων και η αντίστοιχη συνάρτηση χρησιμοποίησης είναι της μορφής (5.2) για $\alpha=0.8$. Ο δεύτερος χαρακτηρίζει υπηρεσίες πραγματικού χρόνου και η αντίστοιχη συνάρτηση χρησιμοποίησης είναι της μορφής (5.2) για $\alpha=4$. Όπως φαίνεται και από το σχήμα 5.10, ο δεύτερος τύπος υπηρεσίας έχει πιο απότομη συνάρτηση χρησιμοποίησης που σημαίνει ότι η ευχαρίστηση του 'πέφτει' απότομα για χαμηλές τιμές ρυθμών μετάδοσης, γεγονός που συμβαδίζει με τα χαρακτηριστικά των υπηρεσιών πραγματικού χρόνου.



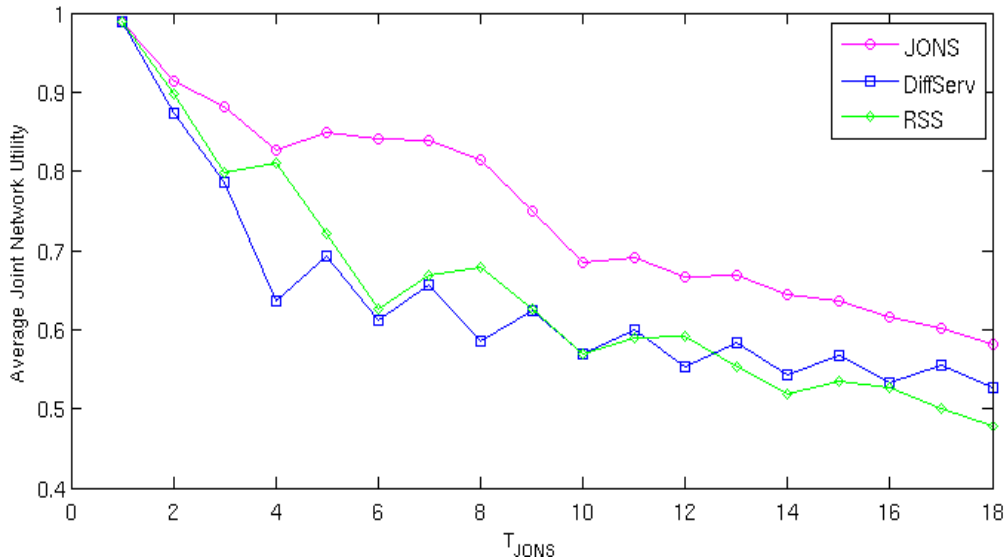
Σχήμα 5.10: Παρουσίαση συναρτήσεων χρησιμοποίησης για δύο τύπους υπηρεσιών.

Η επιλογή του δικτύου γίνεται ως εξής. Οι χρήστες που αιτούνται τη πρώτη υπηρεσία (δεδομένα) συνδέονται στο δίκτυο WLAN, ενώ οι χρήστες που αιτούνται τη δεύτερη υπηρεσία (τηλεφωνία, υπηρεσίες πραγματικού χρόνου) συνδέονται στο δίκτυο OFDMA.

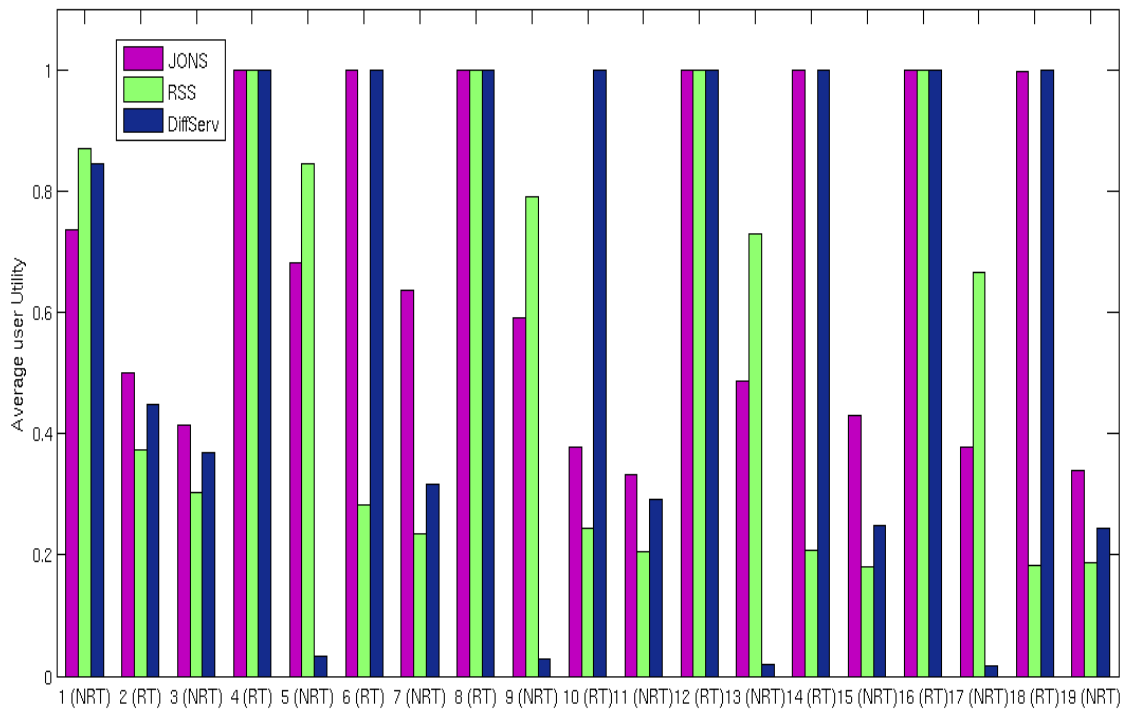
Με βάση τους δύο αυτούς τύπους υπηρεσιών θεωρούμε σενάριο με 20 χρήστες οι μισοί των οποίων βρίσκονται στα 50 μέτρα και οι άλλοι μισοί βρίσκονται στα 100 μέτρα. Οι μισοί από αυτούς αιτούνται υπηρεσίες QoS1 και οι υπόλοιποι υπηρεσίες QoS2. Σύμφωνα με την πολιτική επιλογής δικτύου με βάση την υπηρεσία (QoS) που αιτείται ο κάθε χρήστης οι μισοί χρήστες που αιτούνται QoS1 συνδέονται στο WLAN και οι υπόλοιποι (QoS2) συνδέονται στο δίκτυο OFDMA. Από τη προσομοίωση προέκυψε το σχήμα 5.11.

Όπως φαίνεται η προτεινόμενη πολιτική είναι καλύτερη και από την πολιτική επιλογής δικτύου με βάση την υπηρεσία που αιτείται ο κάθε χρήστης (DiffServ), όπως και από την πολιτική επιλογής δικτύου με βάση την ποιότητα του σήματος (RSS). Αυτό συμβαίνει καθώς με την πολιτική επιλογής δικτύου με βάση την υπηρεσία που αιτείται ο κάθε χρήστης (DiffServ) οι χρήστες κατανομούνται στα δίκτυα χωρίς να υπολογίζεται ο συνωστισμός κάθε δικτύου ή οι διαθέσιμοι πόροι του. Το ίδιο συμβαίνει και για τη πολιτική επιλογής με βάση την ποιότητα του δικτύου (RSS). Βλέπουμε λοιπόν ότι οι μωπικές

πολιτικές DiffServ και RSS οδηγούν σε πτώση της απόδοσης του συστήματος σε σχέση με τη προτεινόμενη πολιτική JONS.



Για να φανεί καλύτερα αυτό, στο σχήμα 5.12 παραθέτουμε τις μέσες τιμές των συναρτήσεων χρησιμοποίησης των χρηστών, όπως και την υπηρεσία που αιτείται ο κάθε χρήστης. Από το σχήμα αυτό προκύπτει ότι συνολικά η προτεινόμενη πολιτική (JONS) είναι καλύτερη από τις άλλες προτεινόμενες πολιτικές. Όπως φαίνεται οι περισσότεροι χρήστες απολαμβάνουν υψηλότερες τιμές των συναρτήσεων χρησιμοποίησης τους με τη πολιτική JONS. Η εξήγηση που κάποιοι χρήστες παρουσιάζουν μικρότερες τιμές είναι ότι το σύστημα αναθέτοντας λιγότερους πόρους σε αυτούς, μπορεί να μοιράσει τους διαθέσιμους πόρους σε άλλους χρήστες, που η συνάρτηση χρησιμοποίησης τους παρουσιάζει μεγαλύτερη αύξηση για τους πόρους αυτούς. Έτσι οδηγούμαστε σε μεγαλύτερες τιμές της χρησιμοποίησης του ενοποιημένου δικτύου. Η πολιτική επιλογής σύμφωνα με το τύπο της υπηρεσίας που αιτούνται οι χρήστες (DiffServ) αποτυγχάνει να εξυπηρετήσει τους χρήστες που αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου (Real Time, RT), καθώς τους οδηγεί όλους στο σύστημα OFDMA και υπάρχει συνωστισμός τους. Τέλος η πολιτική επιλογής με βάση τη ποιότητα του σήματος (RSS) οδηγεί στην ικανοποίηση των χρηστών ανεξαρτήτως τύπου υπηρεσιών με αποτέλεσμα να αναθέτει πόρους στους χρήστες υπηρεσιών μη πραγματικού χρόνου σε βάρος των χρηστών υπηρεσιών πραγματικού χρόνου, οδηγώντας στη μείωση της χρησιμοποίησης του ενοποιημένου δικτύου.



Σχήμα 5.12: Σύγκριση ικανοποίησης χρηστών για διαφορετικές πολιτικές επιλογής δικτύου.

Αποδείξαμε επομένως ότι σε πολλές περιπτώσεις η προτεινόμενη πολιτική που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο είναι καλύτερη τόσο της πολιτικής επιλογής δικτύου με βάση τη ποιότητα του σήματος όσο και της πολιτικής επιλογής δικτύου με βάση το τύπο των υπηρεσιών (QoS) που αιτείται ο κάθε χρήστης.

6 Συμπεράσματα

Με τη παρούσα διπλωματική εργασία επιχειρείται η ενοποίηση των κυψελωτών δικτύων OFDMA με τα ασύρματα τοπικά δίκτυα υπολογιστών WLAN. Η ενοποίηση αυτή εναρμονίζεται με τις προθέσεις του 3GPP και το πρότυπο LTE-Advanced που προτείνει μια ολοκληρωμένη αρχιτεκτονική 4ης γενιάς και κρίνεται αναγκαία για την ικανοποίηση των ολοένα και αυξανόμενων απαιτήσεων των χρηστών για διάφορους τύπους υπηρεσιών.

Αρχικά μελετήθηκαν αλγόριθμοι ανάθεσης πόρων σε συστήματα OFDMA με απώτερο στόχο την εύρεση ενός μηχανισμού που να έχει τα αναγκαία χαρακτηριστικά ώστε να μπορεί να ενσωματωθεί με την μεθοδολογία βέλτιστης ανάθεσης πόρων (JOint Network Selection, JONS) που περιγράφεται στο [14] και αναλύεται στο δεύτερο κομμάτι της διπλωματικής.

Στη συνέχεια υιοθετώντας τον παραπάνω μηχανισμό και καταφέροντας να δημιουργήσουμε ένα κοινό θεωρητικό πλαίσιο ανάθεσης χρηστών και κατανομής πόρων σε ενοποιημένα OFDMA/WLAN δίκτυα, προσομοιώσαμε το παραπάνω σύστημα ώστε να μελετήσουμε την απόδοσή του. Πιο συγκεκριμένα συγκρίναμε την προτεινόμενη τεχνική με άλλους διαθέσιμους στην βιβλιογραφία και αποδείξαμε ότι ο προτεινόμενος μηχανισμός JONS έχει τη βέλτιστη απόδοση από τους άλλους μηχανισμούς.

Σαν περαιτέρω μελέτη μπορεί να προταθεί η σχολαστικότερη προσομοίωση του προτεινόμενου JONS υπό διάφορες συνθήκες, για παράδειγμα λαμβάνοντας υπόψιν την κινητικότητα των χρηστών και επιτρέποντας στους χρήστες την εναλλαγή δικτύου (vertical handoff) με σκοπό τη βελτιστοποίηση των υπηρεσιών που απολαμβάνει και κατ' επέκταση τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του συνολικού δικτύου. Επιπλέον προτείνεται η προσπάθεια εκμετάλλευσης του μηχανισμού JONS σε ενοποιημένα OFDMA/ WiMAX σε πλήρη συμφωνία με την 3GPP, όπως και η πρόταση αναλυτικής παρουσίασης ενός ενιαίου γενικότερου μηχανισμού ανάθεσης χρηστών σε ετερογενή δίκτυα, ανεξαρτήτως της φύσης τους, παραδείγματος χάριν δικτύων κινητής τηλεφωνίας OFDMA, δικτύων WiMAX και δικτύων ασυρμάτων τοπικών δικτύων WLAN.

7 Βιβλιογραφία

- [1] Anton A. Huurdeman, "The WorldWide History of Telecommunications", Εκδόσεις John Wiley & Sons, 1η έκδοση, 2003.
- [2] Friedhelm Hillebrand, "GSM and UMTS, The Creation of Global Mobile Communications", John Wiley & Sons, 2002.
- [3] Α. Κανάτας, Φ. Κωνσταντίνου, Γ. Πάντος, "Συστήματα κινητών τηλεπικοινωνιών", Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 1^η έκδοση, σελίδες 22-30, 2008.
- [4] George A. Coddington, Jr, "Evolution of the ITU", Telecommunications Policy, Volume 15, Issue 4, p.p 271-285, 1991.
- [5] ITU Web Page, <http://www.itu.int/>, ITU, 2010.
- [6] 3GPP Web Page, <http://www.3gpp.org/>, 3GPP, 2010.
- [7] 3GPP2 Web Page, <http://www.3gpp2.org/>, 3GPP, 2010.
- [8] LTE-Advanced Web Page, <http://www.3gpp.org/LTE-Advanced>, 3GPP, 2010.
- [9] Takehiro Nakamura, "Proposal for Candidate Radio Interface Technologies for IMT-Advanced Based on LTE Release 10 and Beyond (LTE-Advanced) ", 3GPP, 2009.
- [10] IEEE Web Page, <http://www.ieee.org/>, IEEE, 2010.
- [11] IEEE, Standard 802.11-2007, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications , 2007.
- [12] Α. Κανάτας, Φ. Κωνσταντίνου, Γ. Πάντος, "Συστήματα κινητών τηλεπικοινωνιών", Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 1^η έκδοση, σελίδες 32-34, 2008.
- [13] Ι. Στ. Βενιέρης, "Δίκτυα Ευρείας Ζώνης", Εκδόσεις Τζιόλα, 2η έκδοση, σελ. 251-276, 2007.
- [14] G. Aristomenopoulos, T. Kastrinogiannis, and S. Papavassiliou, "Efficient QoS-Driven Resource Allocation in Integrated CDMA/WLAN Networks - An Autonomic Architecture," in Proc. of 1st International Conference on Mobile Lightweight Wireless Systems (MOBILIGHT 2009), LNICST Springer, p.p. 25-34, 2009.
- [15] IETF Web Page, <http://www.ietf.org/>, IETF, 2010.
- [16] C. Perkins, 'IP Mobility Support', RFC 2002, IETF, 1996.
- [17] C. Perkins, 'IP Mobility Support for IPv4', RFC 3220, IETF, 2002.
- [18] C. Perkins, 'IP Mobility Support for IPv4', RFC 3344, IETF, 2002.
- [19] C. Perkins, P. Calhoun, J. Bharatia, 'Mobile IPv4 Challenge/Response Extensions (Revised)', RFC 4721, IETF, 2007.
- [20] D. Johnson, C. Perkins, J. Arkko, 'Mobility Support in IPv6', RFC 3775, IETF, 2004.
- [21] DVB Project Web Page, <http://www.dvb.org/technology/standards/>, DVB Project, 2010.
- [22] V. Devarapalli, R. Wakikawa, A. Petrescu, P. Thubert, 'Network Mobility (NEMO) Basic Support Protocol', RFC 3963, IETF, 2005.
- [23] J. Luo et al, "Investigation of Radio Resource Scheduling in WLANs Coupled with 3G Cellular Network", IEEE Communications Magazine, Volume 41, Issue 6, p.p 108-115, 2003.
- [24] W. Song, H. Jiang, W. Zhuang, X. Shen, "Resource management for QoS Support in Cellular/WLAN Interworking", IEEE Network, Volume 19, Issue

- 5, p.p 12-18, 2005.
- [25] F. Yu , V. Krishnamurthy,"Optimal Joint Session Admission Control in Integrated WLAN and CDMA Cellular Networks with Vertical Handoff", IEEE Transactions on Mobile Computing, Volume 6, Issue 1, p.p 126-139, 2007.
- [26] W. Shen, Q. Zeng, "Cost-Function-Based Network Selection Strategy in Integrated Wireless and Mobile Networks", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Volume 57, Issue 6, p.p 3778-3788, 2008
- [27] D. Niyato, E. Hossain,"A Noncooperative Game-Theoretic Framework for Radio Resource Management in 4G Heterogeneous Wireless Access Networks", IEEE Transactions on Mobile Computing, Volume 7, Issue 3, p.p 332-345, 2008.
- [28] D. Niyato, E. Hossain, "Dynamics of Network Selection in Heterogeneous Wireless Networks: An Evolutionary Game Approach", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Volume 58, Issue 4, p.p 2008-20017, 2009
- [29] H. Yin, S. Alamuti, "OFDMA: A broadband wireless Access Technology", in Proc. of IEEE Sarnoff Symposium 2006, p.p 1-4, 2006.
- [30] S. Kibeom, M. Mohseni, J.M. Cioffi, "Optimal Resource Allocation for OFDMA Downlink Systems", in Proc of IEEE International Symposium on Information Theory, p.p. 1394 - 1398, 2006.
- [31] D. Zarbouti, I. Stiakogiannakis, G. Tsoulos, G. Athanasiadou, D. Kaklamani, " OFDMA techniques in multicellular networks with total frequency reuse", Computer Communications, Volume 32, Issue 3,p.p 522-530, 2009.
- [32] Y. Dixiong, W. Dan, C. Yueming, Z. Wei, "Power Allocation Based on Power Efficiency in Uplink OFDMA Systems: A Game Theoretic Approach", in Proc. of 11th IEEE Singapore International Conference on Communication Systems,2008. ICCS 2008, p.p 92-97,2008.
- [33] T.K. Chee, C. Lim, J. Choi, "A Cooperative Game Theoretic Framework for Resource Allocation in OFDMA Systems", in Proc. of 10th IEEE Singapore International Conference on Communication Systems,2006. ICCS 2006, p.p 1-5, 2006.
- [34] G. Zhang , H. Zhang, "Adapative Resource Allocation for Downlink OFDMA Networks Using Cooperative Game Theory" , in Proc. of 11th IEEE Singapore International Conference on Communication Systems,2008. ICCS 2008, p.p 98-103, 2008.
- [35] V.K.N. Lau, Y. Cui, "Delay-Optimal Power and Subcarrier Allocation for OFDMA Systems via Stochastic Approximation", IEEE Transactions on Wireless Communications,Volume 9, Issue 1, p.p 227-233, 2010.
- [36] D. Kivanc, G. Li, H. Liu, "Computationally Efficient Bandwidth Allocation and Power Control for OFDMA", IEEE Transactions on Wireless Communications,Volume 2, Issue 6, p.p 1150-1158, 2003.
- [37] L. Hyang-Won, C. Song "Downlink resource allocation in multi-carrier systems: frequency-selective vs. equal powerallocation", IEEE Transactions on Wireless Communications, Volume 7 , Issue 10, p.p 3738- 3747, 2008.
- [38] C. Weeraddana, Li Wei, M. Codreanu, M. Latva-aho, "Weighted sum-rate maximization for downlink OFDMA systems", in Proc. of 42nd Asilomar

- Conference on Signals, Systems and Computers, p.p 990-994, 2008.
- [39] H. Jianwei, V.G. Subramanian, R. Agrawal, R.A. Berry, "Downlink Scheduling and Resource Allocation for OFDMA Systems", in Proc. of 40th Annual Conference on Information Sciences and Systems, p.p 1272 - 1279, 2006.
- [40] V.G. Subramanian, R. Agrawal, R.A. Berry, "Joint Scheduling and Resource allocation in CDMA Systems", IEEE Transactions on Information Theory, Volume 56, Issue 5, p.p 2416 - 2432, 2010.
- [41] H. Jianwei, V.G. Subramanian, R. Agrawal, R.A. Berry, "Joint Scheduling and Resource Allocation in Uplink OFDM Systems for Broadband Wireless Access Networks ", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Volume 27, Issue 2, p.p 226 - 234, 2009.
- [42] R. Agrawal, R. Berry, H. Jianwei, V.G. Subramanian, "Optimal Scheduling for OFDMA Systems", in Proc. of Fortieth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, p.p 1347 – 1351, 2006.
- [43] I.C. Wong, B.L. Evans, "OFDMA Downlink Resource Allocation for Ergodic Capacity Maximization with Imperfect Channel Knowledge", in Proc. of IEEE Global Telecommunications Conference, 2007. GLOBECOM '07, p.p 3729 – 3733, 2007.
- [44] R. Agarwal, V. Majjigi, H. Zhu, R. Vannithamby, J. Cioffi, "Low complexity resource allocation with opportunistic feedback over downlink OFDMA networks", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Volume 26, Issue 8, p.p 1462 – 1472, 2008.
- [45] F. Brah, L. Vandendorpe, J. Louveaux, "OFDMA Constrained Resource Allocation with imperfect Channel Knowledge", in Proc. of 14th IEEE Symposium on Communications and Vehicular Technology in the Benelux, 2007, p.p 1-5, 2007.
- [46] S. Juncai, H. Aiqun, "Maximum Utility-Based Resource Allocation Algorithm in the IEEE 802.16 OFDMA System", in Proc. of IEEE International Conference on Communications, 2008. ICC '08, p.p 311- 316, 2008.
- [47] K. W.Choi; W. S. Jeon; D.G. Jeong, "Resource Allocation in OFDMA Wireless Communications Systems Supporting Multimedia Services", IEEE/ACM Transactions on Networking, Volume 17, Issue 3, p.p 926-935, 2009.
- [48] M. Assaad, N.U. Hassan, "Resource Allocation in Multiuser OFDMA System: Feasibility and Optimization Study", in Proc. of IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2009. (WCNC 2009), p.p 1-6, 2009.