



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Βέλτιστη Ανάθεση Χρηστών και Διαμοιρασμός Πόρων σε
Ετερογενή Ασύρματα Δίκτυα**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

του

Γεώργιου Π. Αριστομενόπουλου

Αθήνα, Μάρτιος 2013



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Βέλτιστη Ανάθεση Χρηστών και Διαμοιρασμός Πόρων σε Ετερογενή Ασύρματα Δίκτυα

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

του

Γεώργιου Π. Αριστομενόπουλου

Συμβουλευτική Επιτροπή : Παπαβασιλείου Συμεών,
Μάγκλαρης Βασίλειος, Καθηγητής ΕΜΠ
Θεολόγου Μιχαήλ , Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την Μαρτίου 2013

.....
Συμεών Παπαβασιλείου
Αναπλ. Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Βασίλειος Μάγκλαρης
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Μιχαήλ Θεολόγου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Μιλτιάδης Αναγνώστου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Ιωάννα Ρουσσάκη
Λέκτορας ΕΜΠ

.....
Παναγιώτης Κωττής
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Ιωάννης Σταυρακάκης
Καθηγητής ΕΚΠΑ

Αθήνα, Μάρτιος 2013

.....

Γεώργιος Π. Αριστομενόπουλος

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

Copyright © Γεώργιος Π. Αριστομενόπουλος, 2013.

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 διδακτορική διατριβή πραγματεύεται το πρόβλημα της βέλτιστης ανάθεσης χρηστών και διαμοιρασμού πόρων σε ενοποιημένα ετερογενή ασύρματα δίκτυα, με στόχο όχι μόνο τη βελτιστοποίηση της συνολικής απόδοσης του συστήματος αλλά ταυτόχρονα την αποτελεσματική διασφάλιση των απαιτήσεων Ποιότητας της Υπηρεσίας των χρηστών με υπηρεσίες μη πραγματικού και πραγματικού χρόνου. Η παρούσα μελέτη προτείνει, αναλύει, τεκμηριώνει θεωρητικά, και επιβεβαιώνει μέσω μοντελοποίησης και προσομοίωσης, βέλτιστες και μη λύσεις και αντίστοιχους αυτόνομους και κατανεμημένους αλγορίθμους για την επίτευξη του παραπάνω στόχου.

Πιο συγκεκριμένα στοχεύει και επιτυγχάνει τη σχεδίαση, ανάπτυξη και επίλυση ενός ενοποιημένου πλαισίου που αντιμετωπίζει ολόκληρο το ετερογενές ασύρματο σύστημα σαν ένα ενιαίο πρόβλημα βελτιστοποίησης. Η συγχώνευση αυτή επιτυγχάνεται θέτοντας ένα κοινό στόχο ανεξαρτήτως του υποκείμενου δικτύου πρόσβασης, αυτόν της μεγιστοποίησης της συνολικής απόδοσης των υπηρεσιών των χρηστών σε σχέση με την διασφάλιση των αντίστοιχων κριτηρίων Ποιότητας της Υπηρεσίας τους. Τα τελευταία εκφράζονται με χρήση κανονικοποιημένων συναρτήσεων της απόδοσης της υπηρεσίας, τις επονομαζόμενες συναρτήσεις χρησιμότητας, υιοθετώντας έτσι ένα κοινό πλαίσιο βασισμένο στην θεωρία Μεγιστοποίησης Χρησιμότητας Δικτύου (Network Utility Maximization).

Το σύνολο της μελέτης επικεντρώνεται σε δύο βασικούς άξονες, και εκτείνεται από αυτόνομες ευρετικές (heuristic) λύσεις που εξασφαλίζουν χαμηλής πολυπλοκότητας, εύκολα υιοθετήσιμες και υλοποιήσιμες, πλήρως αυτόνομες λύσεις, με το αντάλλαγμα της μη αποδεδειγμένης βελτιστότητας τους, σε κατανεμημένες βέλτιστες λύσεις που αντιθέτως εξασφαλίζουν το βέλτιστο σημείο λειτουργίας του συνολικού ενοποιημένου συστήματος, εισάγοντας όμως επιπλέον πολυπλοκότητα και σηματοδοσία στο σύστημα.

Συγκεκριμένα, η πρώτη προσέγγιση μας παρακινείται από το γεγονός ότι το όραμα των μελλοντικών αυτόνομων δικτύων στοχεύει στην υλοποίηση αυτό-* (self-*) λειτουργιών για την βελτιστοποίηση και αυτό-προσαρμογή στο περιεχόμενο ή στα γεγονότα που απαιτούν αλλαγή συμπεριφοράς των συστημάτων, υπηρεσιών και

εφαρμογών. Συνεπώς, προκειμένου να παράσχουμε την απαιτούμενη ευελιξία και κλιμάκωση στην διαδικασία διαχείρισης πόρων σε ένα ενοποιημένο ετερογενές δίκτυο, εισάγουμε την έννοια της αυτονομίας ως κινητήριας δύναμης που μας επιτρέπει την σχεδίαση ενός καινοτόμου αυτόνομου πλαισίου που μεγιστοποιεί το κέρδος του ενοποιημένου δικτύου. Αυτό επιτυγχάνεται επιτρέποντας την αυτό-προσαρμογή και αυτό-βελτιστοποίηση τόσο των κινητών κόμβων, όσο και των σταθμών βάσης, αναφορικά με τις διαδικασίες επιλογής του καταλληλότερου σημείου σύνδεσης και διαμοιρασμού των πόρων.

Στον δεύτερο άξονα, στοχεύοντας στην βελτιστοποίηση του συνολικού ετερογενούς συστήματος υπό την υπόθεση της συνεργασίας μεταξύ των διαφόρων τεχνολογιών και επιπέδων, κινούμαστε σε δύο κατευθύνσεις αναλόγως με τον τύπο και τη δομή του ετερογενούς συστήματος. Συγκεκριμένα, στην πρώτη περίπτωση μελετάμε και σκιαγραφούμε το πρόβλημα της ταυτόχρονης ανάθεσης χρηστών και διαμοιρασμού πόρων σε ένα ετερογενές σύστημα αποτελούμενο από πολλαπλές κυψέλες διαφορετικών τεχνολογιών πρόσβασης (CDMA/WLAN/OFDMA). Στην δεύτερη περίπτωση, εξετάζουμε το ίδιο πρόβλημα αυτή τη φορά όμως επικεντρωνόμενοι σε ένα ετερογενές σύστημα αποτελούμενο μονάχα από κυψελωτά σημεία πρόσβασης ίδιας τεχνολογίας πρόσβασης, αλλά πολλαπλών επιπέδων. Στόχος είναι εκτός από την ικανοποίηση των απαιτήσεων Ποιότητας της Υπηρεσίας των χρηστών παρουσία διακυψελικών παρεμβολών, και ο βέλτιστος σχεδιασμός της περιοχής κάλυψης των κυψελών που θα μεγιστοποιήσουν την συνολική απόδοση του συστήματος.

Σε κάθε περίπτωση και πάντα υπό το πρίσμα της ικανοποίησης ελάχιστων κριτηρίων Ποιότητας της Υπηρεσίας των χρηστών, προτείνουμε λύσεις και περιγράφουμε τις εκάστοτε μεθοδολογίες που εξασφαλίζουν την μεγιστοποίηση της απόδοσης του δικτύου αλλά και την αρραγή συνδεσιμότητα των χρηστών.

Λέξεις Κλειδιά: Ετερογενή Δίκτυα, Ποιότητα της Υπηρεσίας, Βέλτιστη Κατανομή Πόρων, Ανάθεση Χρηστών σε Δίκτυα, Θεωρία Βελτιστοποίησης, Συναρτήσεις Χρησιμότητας.

Abstract

Today's wireless networking environment heterogeneity, in terms of various access networks with assorted architectural characteristics, has radically increased its complexity, raising scalability and compatibility issues. This thesis addresses the problem of joint optimal multi-access multi-cell resource allocation over a heterogeneous integrated wireless network, where overlapping cells of various access technologies (including CDMA, WLANs, e.t.c.) are assumed to assemble the wireless environment. The goal is to find the optimal operation point, regarding mobile nodes to cells' base stations (or access points) assignment, and corresponding resource allocation that maximizes the network-wide revenue, in terms of users' QoS-aware service performance. Optimal and suboptimal mechanisms and their underlying algorithms accomplishing the latter goal are proposed, analyzed and evaluated through modeling and simulation.

Focus is placed on two directions, ranging from low complexity, easily applicable autonomic heuristic solutions of unverified optimality though, to distributed optimal solutions, assuring the optimal operational point of the integrated network, under the burden of increased complexity and signaling.

Specifically, our first approach is driven by the vision of future network autonomies, focusing on implementing self-* functions for self-optimization and self-adaptation to context or situation driven behavior changes in the networking environment, services or applications. In order to provide the required flexibility and functional scalability in the joint resource management process, we introduce autonomicity as the vehicle that allows the design of a novel autonomic framework that maximizes overall integrated network's revenue. The latter is accomplished by allowing mobile nodes and base stations to self-adapt and self-optimize their behavior with respect to the network selection and resource allocation processes.

Our second approach, aiming at the global optimality of the integrated heterogeneous network, focuses on two diverse methodologies with respect to the access type and architectural design of the network. Specifically, initially the problem of distributed joint network selection and resource allocation in multi-access multi-cell heterogeneous wireless networks (CDMA/WLAN/OFDMA), is studied and

analyzed. Moreover, the same problem is addressed in the case of two-tier CDMA Macrocell/Femtocell wireless networks. The goal is not only to satisfy users' QoS prerequisites in the presence of co-tier and cross-tier interference, but also to determine cells' optimal coverage area, maximizing network-wide throughput performance and mitigating intercell interference.

Under all proposed schemes and in the light of users' QoS requirements fulfillment, each methodology is analytically described and solutions are proposed, ensuring the seamless connectivity of the users and networks' performance maximization.

Keywords: Heterogeneous Networks, Quality of Service, Optimal Resource Allocation, Network Selection, Optimization Theory, Utility Functions.

Ευχαριστίες

Η εμπιστοσύνη, η καθοδήγηση και η στήριξη που έλαβα από τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Συμεών Παπαβασιλείου αποτέλεσαν τα σημαντικότερα εφόδια για την εκπόνηση και ολοκλήρωση των διδακτορικών σπουδών μου και για αυτό το λόγο θα ήθελα να του εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες μου. Οι εμπειρίες και γνώσεις που αποκόμισα δίπλα του με έκαναν πιο μεθοδικό, υπομονετικό και σίγουρα καλύτερο άνθρωπο.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον κ. Βασίλη Μάγκλαρη, στυλοβάτη και ενθουσιώδη υποστηρικτή του εργαστηρίου NETMODE, για την φιλοξενία που μου παρείχε στο εργαστήριο όλα αυτά τα χρόνια.

Εν συνεχεία θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Κώστα, τη Στέλλα, το Βασίλη, τη Βασιλική, την Ειρήνη, το Χρήστο, το Βασίλη, τον Άρη, το Βαγγέλη, την Έλενα και τον Αλέξανδρο, συνοδοιπόρους στο NETMODE, για τις κουβέντες, τα διαλείμματα στη ταράτσα, τους προβληματισμούς και τις ιδέες που μοιραστήκαμε και κυρίως για τις φιλίες και συνεργασίες που προέκυψαν. Από όλους σας έμαθα κάτι, σας ευχαριστώ. Ιδιαίτερης αναφοράς χρίζει ο Τιμόθεος Καστρινογιάννης, στενός συνεργάτης και φίλος, που δίχως την αμέριστη βοήθεια του αυτή η διατριβή δεν θα ήταν ίδια. Τίμο, σε ευχαριστώ!

Τέλος, θέλω από καρδιάς να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου για την οικογένεια μου, την αδερφή μου και τους γονείς μου, τους οφείλω αυτό που είμαι και τους αφιερώνω αυτή τη διατριβή.

Στην οικογένειά μου...

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1. Εισαγωγή	21
1.1. Συμβολή της διατριβής	23
1.2. Διάρθρωση της διατριβής	26
2. Ανάθεση Χρηστών και Κατανομή Πόρων σε Ενοποιημένα Ετερογενή Ασύρματα Δίκτυα	29
2.1. Σχετικές εργασίες στη βιβλιογραφία	30
2.2. Ενοποιημένα Ασύρματα Τοπικά και Κυψελωτά Δίκτυα	35
2.3. Μοντελοποίηση Συστήματος με Χρήση Συναρτήσεων Χρησιμότητας	37
3. Αυτόνομη Αρχιτεκτονική Διαχείρισης Πόρων σε Ενοποιημένα Ασύρματα Δίκτυα	39
3.1. Χαρακτηριστικά και συνεισφορά της προτεινόμενης λύσης	41
3.2. Η Αυτονομία στην Διαχείριση Κινητικότητας	43
3.2.1. Αυτόνομη διαχείριση κινητικότητας με βρόχους ελέγχου	43
3.2.2. Αυτονομία & IPv6 Πρωτόκολλα Διαχείρισης Κινητικότητας	45
3.3. Αυτόνομη Ενδοκυψελική Διαχείριση Ασύρματων Πόρων	48
3.3.1. Ενδοκυψελικός διαμοιρασμός ασύρματων πόρων σε WLAN ή CDMA κυψελωτά δίκτυα	49
3.3.1.1. Διαμοιρασμός πόρων σε CDMA Δίκτυα	50
3.3.1.2. Διαμοιρασμός πόρων σε WLAN Δίκτυα	51
3.3.1.3. Βέλτιστη επίλυση προβλημάτων διαμοιρασμού πόρων	52
3.3.2. Αυτόνομος ενδοκυψελικός διαμοιρασμός πόρων με χρήση βρόχων ελέγχου	54
3.4. Αυτόνομος Διακυψελικός Μηχανισμός Επιλογής Δικτύου (AJONS)	56
3.4.1. Στόχος και λειτουργία	56
3.4.2. Σχεδιασμός και υλοποίηση	60
3.5. Εφαρμόζοντας τον μηχανισμό AJONS σε Δίκτυα OFDMA	62
3.6. Λειτουργικά χαρακτηριστικά και Πρακτικότητα	63
3.6.1. Ασύγχρονη Λειτουργία	63
3.6.2. Πολυπλοκότητα	64
3.6.3. Αρραγής Υιοθέτηση	65

3.7.	Αριθμητικά Αποτελέσματα	66
3.7.1.	Ενοποιημένο WLAN-CDMA σύστημα (Η περίπτωση του 3GPP2)	68
3.7.2.	Ενοποιημένο WLAN-OFDMA σύστημα (Η περίπτωση του 3GPP/LTE)	72
3.8.	Υλοποίηση του AJONS πάνω από μία Γενική Αυτόνομη Αρχιτεκτονική Δικτύων	74
4.	Θεμελιώδες Πρόβλημα Βέλτιστης Διαχείρισης Πόρων Ετερογενών Ασύρματων Συστημάτων	75
4.1.	Διατύπωση του Θεμελιώδους Προβλήματος	77
5.	Βέλτιστη Διαχείριση Πόρων σε Ετερογενή Ασύρματα Δίκτυα Πολλαπλών Τεχνολογιών Πρόσβασης	83
5.1.	Σύνοψη Μεθοδολογίας	83
5.2.	Χαρακτηριστικά και συνεισφορά της προτεινόμενης λύσης	85
5.3.	Μοντελοποίηση και καθορισμός προβλήματος	87
5.3.1.	Το Γενικό Πρωτεύον Πρόβλημα (Global Primal Problem - GP)	89
5.3.2.	Υποθέσεις και Δικαιολόγηση	90
5.4.	Μετασχηματισμός του προβλήματος	93
5.4.1.	Το Δυικό Πρόβλημα - The Global Dual (GD) Problem	94
5.4.2.	Εφαρμόζοντας Δυική Αποσύνθεση	96
5.5.	Διακυβελική Διαχείριση Πόρων	99
5.5.1.	Λειτουργικά Χαρακτηριστικά	101
5.6.	Στοχεύοντας στην Πλησιοβελτιστότητα και τη Σύγκλιση	103
5.6.1.	Σύγκλιση της Ακολουθίας μεταβλητών $\{(w, x)_{t, \mu(t)}^S\} \rightarrow (w, x)_{t, \mu^*}^S$	104
5.6.2.	Σύγκλιση της ακολουθίας Πολλαπλασιαστών $\{\mu(t)\} \rightarrow \mu^*$	108
5.6.3.	Παρατηρήσεις και Σχολιασμοί	111
5.7.	Εφαρμόζοντας το Προτεινόμενο Πλαίσιο	113
5.7.1.	CDMA Κυβελωτά Δίκτυα	113
5.7.2.	Τοπικά Ασύρματα Δίκτυα WLAN	114
5.7.3.	Κυβελωτά Δίκτυα Διάρθρωσης Συχνότητας OFDM και IEEE 802.16/WiMAX	114
5.8.	Αριθμητικά Αποτελέσματα	115
5.8.1.	Ενοποιημένο Σύστημα CDMA/WLAN	117
5.8.2.	Ενοποιημένο Σύστημα WiMAX(OFDM)/CDMA/WLAN	122

5.9.	Συμπερασματικά Σχόλια	124
6.	Βέλτιστη Διαχείριση Πόρων και Περιοχής Κάλυψης σε Ενοποιημένα Κυψελωτά Δίκτυα Δύο Επιπέδων	127
6.1.	Τα δίκτυα φεμτοκυψελών	127
6.1.1.	Περιορισμοί στην υπάρχουσα βιβλιογραφία	129
6.2.	Χαρακτηριστικά και μεθοδολογία της προτεινόμενης προσέγγισης	130
6.3.	Μοντελοποίηση και καθορισμός του προβλήματος	133
6.4.	Διατύπωση προβλήματος και μετασχηματισμοί	136
6.4.1.	Μία αναγκαία συνθήκη προς την βελτιστότητα (1 ^{ος} μετασχηματισμός)	137
6.4.2.	Στοχεύοντας στην Κυρτότητα (2 ^{ος} μετασχηματισμός)	141
6.5.	Διαχείριση Κατανομής Ισχύος και Περιοχής Κάλυψης σε Ενοποιημένα Κυψελωτά Δίκτυα Δύο Επιπέδων	142
6.5.1.	Επιλύοντας τα ανεξάρτητα υποπροβλήματα Ενδοκυψελικής Κατανομής Ισχύος (IPC)	143
6.5.2.	Υπολογίζοντας τον Πολλαπλασιαστή Lagrange ενός (IPC)	145
6.5.3.	Επιλύοντας το Πρόβλημα Διαχείρισης Περιοχής Κάλυψης (κυρίαρχο πρόβλημα)	146
6.6.	Ένας κατανεμημένος αλγόριθμος βέλτιστης διαχείρισης κατανομής ισχύος και περιοχής κάλυψης	148
6.6.1.	Σχεδίαση και Λειτουργία	148
6.6.2.	Σύγκλιση και Βελτιστότητα	150
6.6.3.	Σχολιασμοί και Σχεδιαστικά Χαρακτηριστικά	151
6.7.	Αριθμητικά Αποτελέσματα	152
6.8.	Συμπερασματικά Σχόλια	158
7.	Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία	161
7.1.	Ανοιχτά ερευνητικά θέματα	166
7.1.1.	Εύρεση Βέλτιστων Χωρητικοτήτων και Ανάθεσης Χρηστών	167
7.1.2.	Ικανοποίηση Ελάχιστων Απαιτήσεων	167
7.1.3.	Αντιμετωπίζοντας το θεμελιώδες πρόβλημα	168
7.1.4.	Παροχή Ποιότητας της Εμπειρίας σε Ετερογενή Ασύρματα Δίκτυα	168
8.	Παράρτημα I - Σημειογραφία	171
9.	Παράρτημα II - Υλοποίηση του AJONS πάνω από μία Γενική Αυτόνομη Αρχιτεκτονική Δικτύων	173

9.1.1.	Η αρχιτεκτονική GANA _____	173
9.1.2.	Ενσωμάτωση στην αρχιτεκτονική GANA _____	175
9.1.3.	Εσωτερική Δομή των DE _____	180
9.1.4.	Ακολουθιακά διαγράμματα αυτόνομων λειτουργιών _____	183
10.	Δημοσιεύσεις _____	191
11.	Αναφορές _____	195

ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1: Στενή και Χαλαρή Σύζευξη για ενοποιημένα CDMA/WLAN συστήματα σύμφωνα με το 3GPP. _____	36
Σχήμα 2: Συναρτήσεις χρησιμότητας χρηστών υπηρεσιών πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου συναρτήσει του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων. _____	38
Σχήμα 3: Αυτόνομη Διαχείριση Κινητικότητας με Βρόχου Ελέγχου _____	44
Σχήμα 4: Αυτόνομη ενδοκυβελική διαχείριση πόρων & Αυτόνομος Διακυβελικός Μηχανισμός Επιλογής (AJONS)._____	57
Σχήμα 5: Ακολουθιακό διάγραμμα της προτεινόμενης τροποποιημένης 3GPP LTE διαδικασίας μεταπομπών _____	65
Σχήμα 6: Συνολική μέση χρησιμότητα του ενοποιημένου CDMA - WLAN συστήματος _____	70
Σχήμα 7: Δείκτης εξισορρόπησης φορτίου CDMA – WLAN σε σχέση με την χρησιμότητα _____	70
Σχήμα 8: Μέση χρησιμότητα των χρηστών στο ενοποιημένο CDMA - WLAN σύστημα _____	70
Σχήμα 9: Συνολική μέση χρησιμότητα του ενοποιημένου OFDMA - WLAN συστήματος _____	73
Σχήμα 10: Μέση χρησιμότητα των χρηστών στο ενοποιημένο OFDMA - WLAN σύστημα _____	73
Σχήμα 11: Αποσυνθέτοντας ένα ενοποιημένο ασύρματο δίκτυο πολλαπλής πρόσβασης _____	84
Σχήμα 12: Το ενοποιημένο CDMA/WLAN σύστημα στην περίπτωση του “Far from BS” _____	118
Σχήμα 13: Η συνολική απόδοση του CDMA/WLAN συστήματος εκφρασμένη με συναρτήσεις χρησιμότητας _____	119
Σχήμα 14: Το ενοποιημένο OFDM/CDMA/WLAN σύστημα: α) Hotspot, β) Grid, γ) Random _____	123
Σχήμα 15: Η συνολική απόδοση του OFDM/CDMA/WLAN συστήματος εκφρασμένη με συναρτήσεις χρησιμότητας _____	123
Σχήμα 16: Διαχείριση ισχύος και περιοχής κάλυψης σε διεπίπεδο σύστημα φέμτο/μάκρο κυβελών με χρήση τεχνικών αποσύνθεσης MXΔ _____	131

Σχήμα 17: Σηματοδοσία του αλγόριθμου διαχείρισης ενδοκυψελικών πόρων και περιοχής κάλυψης _____	144
Σχήμα 18: Αριθμητικά αποτελέσματα για 2 συστάδες φεμτοκυψελών _____	153
Σχήμα 19: Αριθμητικά αποτελέσματα για 4 συστάδες φεμτοκυψελών _____	155
Σχήμα 20: Αριθμός επαναλήψεων που απαιτούνται για την σύγκλιση του αλγόριθμου PCC _____	156
Σχήμα 21: Ιεραρχικές, Ομότιμες και Συγγενικές σχέσεις και διεπαφές των DE στο μοντέλο GANA _____	174
Σχήμα 22: Σύνοψη της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής σύμφωνα με το μοντέλο GANA _____	177
Σχήμα 23: Διεπαφές ενός γενικού DE σύμφωνα με το αρχιτεκτονικό μοντέλο GANA _____	180
Σχήμα 24: Εσωτερική δομή κινητού κόμβου σύμφωνα με το αρχιτεκτονικό μοντέλο GANA _____	182
Σχήμα 25: Ακολουθιακό διάγραμμα διαχείρισης κινητικότητας _____	186
Σχήμα 26: Ακολουθιακό διάγραμμα Proxy Mobile IPv6 Fast Handover _____	187
Σχήμα 27: Ακολουθιακό διάγραμμα αυτόνομου ενδοκυψελικού διαμοιρασμού πόρων στην κάτω ζεύξη ενός CDMA δικτύου _____	188
Σχήμα 28: Ακολουθιακό διάγραμμα κάθετης μεταπομπής πυροδοτούμενη λόγω γεγονότων σχετιζόμενων με την ΠτΥ _____	189

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ I: Κατηγοριοποίηση Προβλημάτων Πολλαπλής Πρόσβασης _____	31
ΠΙΝΑΚΑΣ II: Βρόχος Ελέγχου Διαχείρισης Κινητικότητας _____	44
ΠΙΝΑΚΑΣ III: Επιλογές Κεφαλίδας PMIPv6 _____	46
ΠΙΝΑΚΑΣ IV: Αυτόνομος Βρόχος Ελέγχου Σταθμού Βάσης για ARRM _____	54
ΠΙΝΑΚΑΣ V: Αυτόνομος Βρόχος Ελέγχου Κινητού Κόμβου για ARRM _____	55
ΠΙΝΑΚΑΣ VI: Υποστηρικτικός Βρόχος Ελέγχου AJONS στο Σταθμό Βάσης _____	61
ΠΙΝΑΚΑΣ VII: Βρόχος Ελέγχου AJONS στον Κινητό Κόμβο _____	62
ΠΙΝΑΚΑΣ VIII: Αριθμός Μεταπομπών ανά πολιτική επιλογής δικτύου _____	71
ΠΙΝΑΚΑΣ IX: Multi-access Multi-cell Resource Allocation (MMRA) _____	101
ΠΙΝΑΚΑΣ X: Αριθμός επαναλήψεων του MMRA για σύγκλιση _____	122
ΠΙΝΑΚΑΣ XI: Αλγόριθμος Διαχείρισης Πόρων και Περιοχής Κάλυψης (PCC) _____	149
ΠΙΝΑΚΑΣ XII: Εισαχθέντα DE σύμφωνα με την αρχιτεκτονική GANA _____	177

1. Εισαγωγή

Η ετερογένεια, η ποικιλομορφία της κίνησης, η κινητικότητα των χρηστών και η προσαρμοστικότητα σε συνεχώς μεταβαλλόμενα περιβάλλοντα αναμένεται να αποτελέσουν βασικά χαρακτηριστικά των μελλοντικών δικτύων. Μια πληθώρα ασύρματων δικτύων βασισμένων σε διαφορετικές αλλά και αλληλοσυμπληρούμενες τεχνολογίες θα συνυπάρξουν και θα προσφέρουν υπηρεσίες πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου σε χρήστες με ποικίλες δυνατότητες και χαρακτηριστικά. Προς αυτό το στόχο η επιστημονική κοινότητα δείχνει έντονο ενδιαφέρον για την εξεύρεση τρόπων, μηχανισμών αλλά και κατάλληλων αρχιτεκτονικών που θα επιτρέψουν την ενσωμάτωση πληθώρας ετερογενών δικτύων κάτω από μία κοινή διαχειριστική μονάδα [1], [2].

Αναφερόμενοι όμως σε ενοποιημένα δίκτυα, πρώτιστο μέλημα αποτελεί ο σαφής ορισμός του επιπέδου της ενοποίησης, αναφορικά με τους ανεξάρτητους διαχειριστικούς μηχανισμούς του κάθε δικτύου που πια είτε συγχωνεύονται και αντιμετωπίζονται συνολικά, είτε παραμένουν ανεξάρτητοι. Παραδείγματα ενοποίησης μπορεί να αποτελεί η χρησιμοποίηση κοινών μηχανισμών πιστοποίησης χρηστών σε όλα τα διαθέσιμα δίκτυα, η κοινή διαχείριση της κινητικότητας των χρηστών και η επιλογή των σημείων πρόσβασης που πρέπει αυτοί να συνδεθούν, η συνολική αντιμετώπιση των διαθέσιμων πόρων του δικτύου, και άλλα. Το πρόβλημα του βέλτιστου σχεδιασμού μιας κοινής αρχιτεκτονικής ενοποιημένων δικτύων υπό διάφορα επίπεδα ενοποίησης αποτελεί πολύ σημαντικό πρόβλημα, καθώς η σωστή και ορθή αντιμετώπιση του θα προσφέρει όχι μόνον τη δυνατότητα αύξησης της συνολικής απόδοσης και χρησιμοποίησης του συνολικού συστήματος, μειώνοντας το

συνολικό κόστος λειτουργίας και προσφέροντας κέρδη στους παρόχους, αλλά και θα παράσχει βελτιωμένες υπηρεσίες στους τελικούς χρήστες ενισχύοντας την ικανοποίησή τους.

Προς αυτό το στόχο, το πρότυπο ασύρματων κυψελωτών επικοινωνιών LTE Advanced [3] της ομάδας προτυποποίησης 3rd Generation Partnership Project (3GPP), έχει πρόσφατα αναγνωριστεί και υιοθετηθεί από τον παγκόσμιο οργανισμό ITU (International Telecommunications Union) ως το κυρίαρχο τηλεπικοινωνιακό πρότυπο ασύρματων δικτύων 4ης γενιάς (4G), ενώ αναμένεται η ολοκλήρωση του από την 3GPP. Κύριο όραμα αποτελεί η δημιουργία μιας παγκοσμίας ενοποιημένης αρχιτεκτονικής ικανή να αντιμετωπίσει βέλτιστα διάφορα ετερογενή δίκτυα υπό ένα κοινό διαχειριστικό πλαίσιο, διατηρώντας ταυτόχρονα τα μοναδικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες της κάθε τεχνολογίας πρόσβασης.

Παράλληλα, όταν αναφερόμαστε σε κινητά δίκτυα επικοινωνιών πρωταγωνιστικό ρόλο διαδραματίζουν οι προσφερόμενες υπηρεσίες, καθώς είναι αυτές που καθορίζουν το σχεδιασμό όλων των υποκείμενων μηχανισμών και συνεπώς εξασφαλίζουν την εύρυθμη λειτουργία του δικτύου. Τυπικά σε κινητά δίκτυα προσφέρονται δύο τύποι υπηρεσιών, α) υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου (Non-real Time) που αντιστοιχούν σε υπηρεσίες καλύτερης προσπάθειας (best effort) παραδείγματος χάριν υπηρεσίες φυλλομετρητή, ηλεκτρονικού ταχυδρομείου, μεταφορές FTP κτλ και β) υπηρεσίες πραγματικού χρόνου (Real Time) που αντικατοπτρίζουν υπηρεσίες φωνής και βίντεο με συγκεκριμένες απαιτήσεις ρυθμαπόδοσης, καθυστέρησης, διακύμανσης κτλ, οι οποίες και διαμορφώνουν τα κριτήρια Ποιότητας της Υπηρεσίας (ΠτΥ, Quality of Service - QoS) που το δίκτυο πρέπει να εγγυάται στους χρήστες. Αντίστοιχα, οι μηχανισμοί Διαχείρισης Ασύρματων Πόρων (Radio Resource Management - RRM), όπως υποδηλώνει και το

όνομά τους, είναι υπεύθυνοι για την ανάθεση των διαθέσιμων πόρων στους ενεργούς χρήστες του συστήματος και συνεπώς και την διασφάλιση των αντιστοίχων κριτηρίων ΠτΥ. Ωστόσο, όταν επιδιώκουμε να ικανοποιήσουμε πολλαπλούς περιορισμούς ΠτΥ σε ενοποιημένα δίκτυα, οι αυτόνομες και ανεξάρτητες ερευνητικές προσπάθειες βέλτιστης ανάθεσης πόρων, για κάθε δίκτυο ξεχωριστά, αποδεικνύονται ανεπαρκείς. Με στόχο τη βέλτιστη χρησιμοποίηση των πόρων σε ενοποιημένα ετερογενή δίκτυα, οι τρέχουσες επιστημονικές έρευνες επικεντρώνονται σε διάφορες, συνήθως μη βέλτιστες, τεχνικές, τις οποίες και θα μελετήσουμε στη συνέχεια αναλυτικότερα: α) διαμοιρασμού της κίνησης στα διάφορα δίκτυα ανάλογα με το περιεχόμενο και το είδος της [4], β) έξυπνων τεχνικών ελέγχου αποδοχής κλήσεων με στόχο την αδιάλειπτη συνέχεια της υπηρεσίας [5], [6], [7], και γ) στην εξισορρόπηση της κίνησης και τον διαμοιρασμό του φόρτου στα διαθέσιμα δίκτυα [8].

1.1. Συμβολή της διατριβής

Η παρούσα διδακτορική διατριβή επιδιώκει να καλύψει τα προαναφερθέντα κενά, πραγματεύοντας το πρόβλημα της βέλτιστης ανάθεσης χρηστών και διαμοιρασμού πόρων σε ενοποιημένα ετερογενή ασύρματα δίκτυα, με στόχο όχι μόνο τη βελτιστοποίηση της συνολικής απόδοσης του συστήματος αλλά ταυτόχρονα την αποτελεσματική διασφάλιση των απαιτήσεων ΠτΥ των χρηστών με υπηρεσίες μη πραγματικού και πραγματικού χρόνου κατά τη ζεύξη καθόδου. Η παρούσα μελέτη προτείνει, αναλύει, τεκμηριώνει θεωρητικά, και επιβεβαιώνει πειραματικά μέσω μοντελοποίησης, βέλτιστες και μη λύσεις και αντίστοιχους αυτόνομους και κατανεμημένους αλγόριθμους για την επίτευξη του παραπάνω στόχου. Πιο συγκεκριμένα στοχεύει και επιτυγχάνει το σχεδιασμό, την ανάπτυξη και την επίλυση ενός ενοποιημένου πλαισίου που αντιμετωπίζει ολόκληρο το ετερογενές ασύρματο

σύστημα σαν ένα ενιαίο πρόβλημα βελτιστοποίησης. Η συγχώνευση αυτή επιτυγχάνεται θέτοντας ένα κοινό στόχο ανεξαρτήτως του υποκείμενου δικτύου πρόσβασης, αυτόν της μεγιστοποίησης της συνολικής απόδοσης των υπηρεσιών των χρηστών σε σχέση με την διασφάλιση των αντίστοιχων κριτηρίων ΠτΥ τους. Τα τελευταία εκφράζονται με χρήση κανονικοποιημένων συναρτήσεων της απόδοσης της υπηρεσίας, τις επονομαζόμενες συναρτήσεις χρησιμότητας, ως προς κάποια μετρική δικτύου. Συνεπώς, υιοθετείται ένα κοινό πλαίσιο βασισμένο στην θεωρία Μεγιστοποίησης Χρησιμότητας Δικτύου – ΜΧΔ (Network Utility Maximization – NUM) του οποίου οι ιδιότητες και χαρακτηριστικά αναλύονται εκτενώς στις επόμενες παραγράφους.

Το σύνολο της μελέτης επικεντρώνεται σε δύο βασικούς άξονες, εκτεινώντας από αυτόνομες ευρετικές (heuristic) λύσεις που εξασφαλίζουν χαμηλής πολυπλοκότητας, εύκολα υιοθετήσιμες και υλοποιήσιμες, πλήρως αυτόνομες λύσεις, με το αντάλλαγμα της μη αποδεδειγμένης βελτιστότητας τους, σε κατανεμημένες βέλτιστες λύσεις που αντιθέτως εξασφαλίζουν το βέλτιστο σημείο λειτουργίας του συνολικού ενοποιημένου συστήματος, εισάγοντας όμως επιπλέον πολυπλοκότητα και σηματοδότηση στο σύστημα.

Συγκεκριμένα, η πρώτη προσέγγιση μας παρακινείται από το γεγονός ότι το όραμα των μελλοντικών αυτόνομων δικτύων στοχεύει στην υλοποίηση αυτό-* (self-*) λειτουργιών για την βελτιστοποίηση και αυτό-προσαρμογή στο περιεχόμενο ή στα γεγονότα που απαιτούν αλλαγή συμπεριφοράς των συστημάτων, υπηρεσιών και εφαρμογών [9]. Συνεπώς, προκειμένου να παράσχουμε την απαιτούμενη ευελιξία (flexibility) και κλιμάκωση (scaling) στην διαδικασία διαχείρισης πόρων σε ένα ενοποιημένο ετερογενές δίκτυο, εισάγουμε την έννοια της αυτονομίας ως κινητήριας δύναμης που μας επιτρέπει τον σχεδιασμό ενός καινοτόμου αυτόνομου πλαισίου που

μεγιστοποιεί το κέρδος του ενοποιημένου δικτύου. Αυτό επιτυγχάνεται επιτρέποντας την αυτό-προσαρμογή και αυτό-βελτιστοποίηση τόσο των κινητών κόμβων, όσο και των σταθμών βάσης, αναφορικά με τις διαδικασίες επιλογής του καταλληλότερου σημείου σύνδεσης και διαμοιρασμού των πόρων. Η προτεινόμενη τεχνική υποστηρίζεται αλλά και παρακινείται από τις ερευνητικές προσπάθειες του 3GPP/LTE (Long Term Evolution) που στοχεύουν στην δημιουργία Αυτό-Οργανούμενων / Αυτό-βελτιστοποιούμενων Δικτύων (SON - Self-Organizing / Self-Optimizing Networks) [10].

Στον δεύτερο άξονα, επικεντρωνόμαστε στην βέλτιστη αντιμετώπιση του προβλήματος ανάθεσης χρηστών και ταυτόχρονης κατανομής πόρων σε ένα ενοποιημένο ετερογενές ασύρματο σύστημα κατά τη ζεύξη καθόδου όταν εξυπηρετούνται χρήστες με υπηρεσίες δεδομένων, μη πραγματικού χρόνου. Κύριο στόχο αποτελεί η εύρεση εκείνης της ανάθεσης χρηστών στα διαθέσιμα ασύρματα δίκτυα που θα επιτυγχάνει την βέλτιστη κατανομή πόρων και συνεπώς και τη μεγιστοποίηση της συνολικής απόδοσής του ταυτόχρονα με τη διασφάλιση των κριτηρίων ΠτΥ των χρηστών. Για την επίτευξη του παραπάνω στόχου, προτείνεται κατάλληλο θεωρητικό πλαίσιο βασισμένο σε συναρτήσεις χρησιμότητας (utility functions) που αντιμετωπίζει το μη-κυρτό πρόβλημα που προκύπτει με χρήση αναλυτικών μεθόδων Lagrange και τεχνικών της θεωρίας Αποσύνθεσης του Δυικού Προβλήματος (ΑΔΠ) (dual decomposition theory) ή του Πρωτεύοντος Προβλήματος (ΑΠΠ) (primal decomposition theory) [11].

Ειδικότερα, στοχεύοντας στην βέλτιστη αντιμετώπιση, δηλαδή την βελτιστοποίηση του συνολικού ετερογενούς συστήματος υπό την υπόθεση της συνεργασίας μεταξύ των διαφόρων τεχνολογιών και επιπέδων, θα κινηθούμε σε δύο κατευθύνσεις αναλόγως με τον τύπο και τη δομή του ετερογενούς συστήματος καθώς

και τους περιορισμούς που θα εισάγουμε. Συγκεκριμένα, στην πρώτη περίπτωση θα μελετήσουμε και θα σκιαγραφήσουμε το πρόβλημα της ταυτόχρονης ανάθεσης χρηστών και διαμοιρασμού πόρων σε ένα ετερογενές σύστημα αποτελούμενο από πολλαπλές κυψέλες διαφορετικών τεχνολογιών πρόσβασης (CDMA/WLAN/OFDMA). Στην δεύτερη περίπτωση, εξετάζουμε το ίδιο πρόβλημα αυτή τη φορά όμως επικεντρωνόμενοι σε ένα ετερογενές σύστημα αποτελούμενο μονάχα από κυψελωτά σημεία πρόσβασης ίδιας τεχνολογίας πρόσβασης, αλλά πολλαπλών επιπέδων. Στόχος είναι εκτός από την ικανοποίηση των απαιτήσεων ΠτΥ των χρηστών παρουσία διακυβελικών παρεμβολών, και ο βέλτιστος σχεδιασμός της περιοχής κάλυψης των κυψελών που θα μεγιστοποιήσουν την συνολική απόδοση του συστήματος. Σε κάθε περίπτωση προτείνουμε λύσεις και περιγράφουμε τη μεθοδολογία που πρέπει να ακολουθηθεί πάντα υπό το πρίσμα της ικανοποίησης ελάχιστων κριτηρίων ΠτΥ των χρηστών που θα εξασφαλίζουν την αρραγή συνδεσιμότητα στο οικείο δίκτυο πρόσβασης κάθε συνδεδεμένου χρήστη.

1.2. Διάρθρωση της διατριβής

Το υπόλοιπο της παρούσας μελέτης δομείται ως εξής.

Στο κεφάλαιο 2, παρουσιάζεται μια εκτεταμένη βιβλιογραφική αναφορά επιστημονικών ερευνών που μελετούν το πρόβλημα ανάθεσης χρηστών και κατανομής πόρων σε Ασύρματα Δίκτυα, τονίζοντας την σημαντικότητα του θέματος, αλλά και αναδεικνύοντας τα ανοιχτά ερευνητικά θέματα. Επιπλέον, περιγράφεται το βασικό μοντέλο συστήματος που θα ακολουθηθεί στο υπόλοιπο της διατριβής, εισάγοντας την έννοια των συναρτήσεων χρησιμότητας, ενώ παράλληλα παρουσιάζονται τρόποι διασύνδεσης ετερογενών συστημάτων.

Το κεφάλαιο 3, παρουσιάζει καινοτόμους τρόπους και μεθόδους εμπλουτισμού υπαρχουσών μηχανισμών διαχείρισης κινητικότητας και πόρων με χαρακτηριστικά αυτονομίας, ενώ ταυτόχρονα προτείνει έναν αυτόνομο μηχανισμό σύμφωνα με τον οποίο οι χρήστες μπορούν να επιλέγουν ανεξάρτητα το βέλτιστο σημείο πρόσβασης τους. Παράλληλα οι προτεινόμενοι μηχανισμοί ενσωματώνονται σε μία πρότυπη ετερογενή αυτόνομη αρχιτεκτονική και αξιολογείται η απόδοσή τους.

Στο κεφάλαιο 4, διατυπώνεται το Θεμελιώδες Πρόβλημα Βέλτιστης Διαχείρισης Πόρων Ετερογενών Ασύρματων Συστημάτων, καθιστώντας δυνατή την ταυτόχρονη θεώρηση του συνολικού ασύρματου περιβάλλοντος ως ένα κοινό πρόβλημα βελτιστοποίησης, και συνεπώς την ενιαία αντιμετώπιση διαφόρων τύπων δικτύων υπό ένα κοινό πρίσμα βελτιστοποίησης, αυτό της μεγιστοποίησης των συναρτήσεων χρησιμότητας των χρηστών. Η γενικευμένη μοντελοποίηση του Θεμελιώδους Προβλήματος θέτει τις ερευνητικές βάσεις για μία πληθώρα προβλημάτων βελτιστοποίησης που στοχεύουν στην μεγιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος υπό ποικίλους περιορισμούς που θα μελετηθούν παρακάτω.

Το Κεφάλαιο 5, περιγράφει ένα γενικευμένο πλαίσιο βέλτιστης διαχείρισης πόρων το οποίο αξιοποιεί ήδη υπάρχοντες ενδοκυψελικούς μηχανισμούς προκειμένου να παράσχει μια διακυψελικά βέλτιστη λύση στο πρόβλημα της ταυτόχρονης ανάθεσης χρηστών και πόρων σε ετερογενή ασύρματα δίκτυα, παρουσία πολλαπλών τεχνολογιών πρόσβασης. Η μη κυρτή (non-concave) φύση του προβλήματος αντιμετωπίζεται με κατάλληλους μετασχηματισμούς, ενώ εκμεταλλευόμενοι πρότυπες τεχνικές διαστρωματικής αποσύνθεσης (cross-layering decomposition), επιτυγχάνουμε την ανάπτυξη ενός καταναμημένου μηχανισμού διακυψελικής διαχείρισης πόρων, που εγγυάται υψηλές επιδόσεις και χαμηλή αποδεδειγμένη πολυπλοκότητα.

Το Κεφάλαιο 6, πραγματεύεται το πρόβλημα της βέλτιστης διαχείρισης πόρων και περιοχής κάλυψης σε ενοποιημένα κυψελωτά δίκτυα δύο επιπέδων, μακρο/φέμτο (macro/femto) κυψελών, παρουσία ενδοκυψελικών και διακυψελικών παρεμβολών. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται κατάλληλοι μετασχηματισμοί που μετατρέπουν το μη κυρτό πρόβλημα σε ένα αντίστοιχο κυρτό πρόβλημα βελτιστοποίησης, ενώ ταυτόχρονα με χρήση τεχνικών διαστρωματικής αποσύνθεσης αναπτύσσεται ένας κατακευματισμένος αλγόριθμος που επιτυγχάνει τη βέλτιστη κατανομή ισχύος στους χρήστες καθώς και την βέλτιστη ισχύ εκπομπής και άρα της αντίστοιχης περιοχής κάλυψης των κυψελών. Τέλος, αποδεικνύονται η σύγκλιση και βελτιστότητα του αλγόριθμου, ενώ τα αριθμητικά αποτελέσματα αναδεικνύουν την υπεροχή του.

Το Κεφάλαιο 7, συνοψίζει το σύνολο της διατριβής, επιχειρηματολογώντας για τη σπουδαιότητα των εξεταζόμενων ερευνητικών προβλημάτων και των σχεδιαστικών μεθόδων που επιλέχθηκαν για την επίλυση τους, ενώ παράλληλα παραθέτει συγκεντρωμένα τα κύρια συμπεράσματα που ανέκυψαν. Τέλος προτείνονται ανοιχτά ερευνητικά θέματα για μελλοντική εργασία που είτε θα μπορούσαν να αποτελούν την συνέχεια αυτής της ερευνητικής προσπάθειας, είτε μπορούν να εκμεταλλευτούν την αποκτημένη γνώση προκειμένου να την εφαρμόσουν σε νέους τομείς και δραστηριότητες.

Τέλος, το Κεφάλαιο 8, παραθέτει με τη μορφή πίνακα την συνολική σημειογραφία που υιοθετήθηκε σε αυτή τη διατριβή και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εύκολη αναφορά και κατανόηση.

2. Ανάθεση Χρηστών και Κατανομή Πόρων σε

Ενοποιημένα Ετερογενή Ασύρματα Δίκτυα

Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα (Wireless Local Area Networks - WLANs), κυψελωτά δίκτυα βασισμένα στη Πολυπλεξία Διαίρεσης Κώδικα (Code Division Multiple Access - CDMA) αλλά και κυψελωτά δίκτυα βασισμένα στην Διαίρεση Συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiple Access – OFDMA), αναμένεται να συμπρωταγωνιστήσουν στα ασύρματα δίκτυα του όχι και τόσο μακρινού μέλλοντος, σχηματίζοντας ενοποιημένα ετερογενή συστήματα ικανά να παρέχουν υπηρεσίες πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου σε χρήστες με ποικίλες δυνατότητες και χαρακτηριστικά. Οι διαθέσιμες ταυτόχρονες εναλλακτικές επιλογές πρόσβασης των χρηστών τους ετερογενούς ασύρματου περιβάλλοντος θα προσφέρουν όχι μόνο τη δυνατότητα αύξησης της συνολικής απόδοσης και χρησιμοποίησης του συνολικού συστήματος, μειώνοντας έτσι το συνολικό κόστος λειτουργίας και προσφέροντας κέρδη στους παρόχους, αλλά και θα παράσχουν καλύτερα επίπεδα, ΠτΥ ενισχύοντας την ικανοποίησή τους.

Εντούτοις, οι κύριοι μηχανισμοί της λειτουργίας του συστήματος πρέπει να μεταβληθούν και να τροποποιηθούν καταλλήλως στοχεύοντας στην πλήρη και ορθή διαλειτουργικότητα τους στο ενοποιημένο σύστημα. Πιο συγκεκριμένα αναφερόμενοι στην καθολική διαχείριση πόρων του ασύρματου συστήματος, οι υπομηχανισμοί ανάθεσης χρηστών, διαμοιρασμού εύρους ζώνης και έλεγχου συμφόρησης, πρέπει να ανασχεδιαστούν λαμβάνοντας υπόψη την ποικιλομορφία του περιβάλλοντος αναφορικά με τα διαθέσιμα δίκτυα πρόσβασης, τους διαθέσιμους πόρους του δικτύου και τους τύπους των παρεχόμενων υπηρεσιών. Ακρογωνιαίο λίθο σε αυτή τη

προσπάθεια αποτελεί η βέλτιστη ανάθεση χρηστών στα διαθέσιμα υποδίκτυα καθώς είναι αυτή που θα επιτρέψει τον αποδοτικότερο διαμοιρασμό πόρων σε όλους τους χρήστες του ενοποιημένου συστήματος, θα εμποδίσει τη δημιουργία συμφόρησης και τελικώς θα μεγιστοποιήσει το κέρδος του συνολικού δικτύου, σε σχέση με την ικανοποίηση κριτηρίων ΠτΥ των χρηστών.

2.1. Σχετικές εργασίες στη βιβλιογραφία

Το παραπάνω πρόβλημα έχει ενδελεχώς μελετηθεί στην επιστημονική κοινότητα και υπάρχει αρκετά πλούσια σχετική βιβλιογραφία. Μία αρχική κατηγοριοποίηση της υπάρχουσας έρευνας μπορεί να γίνει με βάση το πλήθος των δικτύων πρόσβασης διαφορετικής τεχνολογίας που εξετάζονται, επικεντρώνοντας κυρίως είτε σε δίκτυα πολλαπλών χρηστών με πολλαπλές κυψέλες της ίδιας τεχνολογίας, είτε σε ενοποιημένα δίκτυα με δύο ή περισσότερες τεχνολογίες πρόσβασης. Μια άλλη κατηγοριοποίηση θα μπορούσε να είναι το είδος των τεχνολογιών υπό εξέταση, καθώς αυτό θα διαφοροποιούσε όχι μόνο το αντίστοιχο μοντέλο συστήματος, αλλά και την περαιτέρω χρήση μεθόδων αντιμετώπισης και λύσης του. Ωστόσο, μια τέτοια προοπτική θα οδηγούσε σε μια εκτεταμένη αλλά μη πρακτική κατηγοριοποίηση. Συνεπώς εκτός από την πληθώρα των διαθέσιμων λύσεων στην βιβλιογραφία, στη συνέχεια αναλύονται επιπρόσθετα κριτήρια που θα επιτρέψουν την καλύτερη, ουσιαστικότερη και πιο κατανοητή ταξινόμηση των προτεινόμενων λύσεων.

Η πρώτη κατηγοριοποίηση αφορά τις αρχιτεκτονικές ιδιότητες των προτεινόμενων λύσεων, σε σχέση με τη «φυσική τοποθεσία» μέσα στο ενοποιημένο δίκτυο που βρίσκονται τα στοιχεία που λαμβάνουν αποφάσεις, καθώς και σε σχέση με τον τρόπο που οι πληροφορίες ανταλλάσσονται στο δίκτυο. Η κατηγοριοποίηση αυτή οδηγεί σε κεντρικοποιημένα, κατανεμημένα αλλά και αυτόνομα αρχιτεκτονικά μοντέλα. Η

δεύτερη αφορά τις θεωρητικές ιδιότητες των λύσεων και καταλήγει σε καθολικά βέλτιστες (global optimal) ή πλησιοβέλτιστες (near-optimal) λύσεις ανάλογα με τα θεωρητικά εργαλεία που υιοθετεί η κάθε μία (π.χ. Αλυσίδες Markov, Θεωρία Παιγνίων, Θεωρία ΜΧΔ, κτλ), καθώς και σε πληθώρα υποβέλτιστων ευρετικών λύσεων. Με βάση τα παραπάνω στον Πίνακα I παρατίθενται οι πιο πρόσφατες ερευνητικές προσπάθειες στον τομέα της διαχείρισης πόρων σε δίκτυα πολλαπλών τεχνολογιών πρόσβασης.

Παρατηρώντας τον Πίνακα I, παρατηρούμε την περιορισμένη ποικιλία διαθέσιμων αυτόνομων λύσεων, καθώς και την παντελή έλλειψη βέλτιστων κατανεμημένων λύσεων με παραπάνω από δύο τεχνολογίες πρόσβασης. Επομένως, αποκαλύπτεται η ανάγκη για αποδοτικά ενοποιημένα πλαίσια που θα οδηγούν είτε σε υποβέλτιστους αλλά αυτόνομους, είτε σε βέλτιστους κατανεμημένους μηχανισμούς ανάθεσης χρηστών και κατανομής πόρων σε ενοποιημένα ετερογενή ασύρματα δίκτυα.

ΠΙΝΑΚΑΣ I: Κατηγοριοποίηση Προβλημάτων Πολλαπλής Πρόσβασης

Κατηγοριοποίηση & Κριτήρια	Μία Τεχνολογία Πρόσβασης		Πολλαπλές Τεχνολογίες Πρόσβασης	
	Πολλαπλές Κυψέλες	Πολλαπλές Κυψέλες & Beamforming	Ενοποιημένα Δίκτυα	Ενοποιημένα Δίκτυα (Τεχνολογίες >2)
Αρχιτεκτονική Ιδιότητα				
Κεντρικοποιημένοι	[12], [13], [14], [15]	[22], [23], [24], [25]	[6], [27]	[34], [35], [36], [37]
Κατανεμημένοι	[16], [17], [18], [19], [20]	[26]	[28], [29], [30], [31], [32]	[37], [38]
Αυτόνομοι	[21]		[33]	[39], [40]
Θεωρητική Ιδιότητα				
Ευρετικοί	[12], [15], [18], [19], [21]	[23]	[26], [27], [28], [29], [30], [32], [33]	[34], [35], [38], [39], [40], [39]
Πλησιοβέλτιστοι	[16], [17]	[22], [26]	[6]	[36], [37]
Βέλτιστοι	[13], [14], [20]	[24], [25]		

Οι προσπάθειες εξεύρεσης αποδοτικής λύσης στο πρόβλημα της διαχείρισης αποδοχής χρηστών σε δίκτυα πολλαπλών κυψελών οδήγησε την ερευνητική κοινότητα στην παρουσίαση απλών, εύρωστων αλλά και σχετικά αποδοτικών ευρετικών μεθόδων που θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν και ως αυτόνομες δεδομένου ότι ο χρήστης λαμβάνει μόνος του την απόφαση προσάρτησης στο εκάστοτε δίκτυο, με ελάχιστη πληροφορία από το δίκτυο που συνήθως αφορά τις γενικές πολιτικές του παρόχου. Οι παραπάνω ερευνητικές προσπάθειες ομαδοποιούνται σε σχέση με την αρχιτεκτονική τους σε δύο γενικές κατηγορίες: Αρχικά, σε μηχανισμούς ανάθεσης χρηστών βασισμένες σε πολιτικές με χρήση κατωφλίων, όπως στα [2], [30], [33], [40] όπου η απόφαση αποδοχής εξαρτάται από τις πληροφορίες περιεχομένου του χρήστη (π.χ. επίπεδα μπαταρίας, τύπος της υπηρεσίας, κινητικότητα, προφίλ χρήστη κτλ) αλλά και του δικτύου (συμφόρηση του δικτύου, πολιτικές χρέωσης κτλ). Με βάση τα παραπάνω ο κάθε χρήστης οδηγούμενος από μηχανισμούς πεπερασμένης κατάστασης επιλέγει το καταλληλότερο δίκτυο πρόσβασης. Εναλλακτικά, σε μηχανισμούς μεγιστοποίησης συναρτήσεων κόστους, παραδείγματος χάριν στο [32], όπου ο χρήστης επιλέγει δίκτυο πρόσβασης αξιολογώντας την ποιότητα του φυσικού καναλιού προς το εκάστοτε διαθέσιμο δίκτυο, και στα [31], [39] όπου ο κάθε χρήστης επιλέγει εκείνο το δίκτυο πρόσβασης που μεγιστοποιεί κάποια σταθμισμένη συνάρτηση είτε ως προς το κόστος της υπηρεσίας, την ποιότητα της και τη διαθεσιμότητα των δικτύων, είτε ως προς την ποιότητα του λαμβανόμενου σήματος και της διαθεσιμότητας των πόρων, αντίστοιχα.

Ωστόσο, παρόλα τα ενθαρρυντικά αποτελέσματα που εξάγουν μερικοί από τους προαναφερθέντες μηχανισμούς ανάθεσης χρηστών σε ετερογενή δίκτυα, η διασφάλιση της κατανεμημένης λειτουργίας τους οδηγεί στην υιοθέτηση μυωπικών

μετρικών (π.χ. ποιότητα λαμβανόμενου σήματος, ταχύτητα κινητού κόμβου κτλ) σαν κριτήρια επιλογής, αποφεύγοντας την ενσωμάτωση και αξιοποίηση μιας γενικευμένης οπτικής του συνολικού δικτύου (π.χ. συμφόρηση των κυψελών, ικανοποίηση κριτηρίων ΠτΥ, κόστος μεταπομπής κτλ). Συνεπώς, δεδομένης της ευρετικής ανάθεσης χρηστών στα διαθέσιμα δίκτυα, ξεχωριστοί και ανεξάρτητοι μηχανισμοί βέλτιστης ανάθεσης πόρων σε κυψελωτά ή ασύρματα τοπικά δίκτυα που δεν αντιμετωπίζουν το ετερογενές δίκτυο από κοινού αποδεικνύονται ανεπαρκείς. Συμπερασματικά, για την εξεύρεση μιας αποδοτικής, ευέλικτης κατανεμημένης ή ακόμα και αυτόνομης λύσης, απαιτείται η αντιμετώπιση του προβλήματος της ανάθεσης χρηστών στα διαθέσιμα ασύρματα δίκτυα κάτω από ένα κοινό θεωρητικό πλαίσιο βελτιστοποίησης, που θα επιτυγχάνει τη μεγιστοποίηση της συνολικής απόδοσης του συστήματος αλλά ταυτόχρονα και την αποτελεσματική διασφάλιση των απαιτήσεων ΠτΥ των χρηστών.

Προς την βέλτιστη επίλυση του προβλήματος οι Niyato και Hossain αντιμετωπίζουν το παραπάνω πρόβλημα από τρεις διαφορετικές προοπτικές στα [36], [37] και [38] αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, στο [36], μία νέα υπηρεσία που εισέρχεται στο σύστημα καταλαμβάνει πόρους, σε μορφή εύρους ζώνης, με ένα δίκαιο και αναλογικό τρόπο, διαμοιράζοντας τις απαιτήσεις της σε όλα τα διαθέσιμα δίκτυα στην περιοχή της, επιτυγχάνοντας εξισορρόπηση φόρτου εργασίας. Ο διαμοιρασμός πόρων στο ετερογενές δίκτυο μοντελοποιείται ως ένα πρόβλημα χρεοκοπίας (bankruptcy problem) και ένας κεντρικοποιημένος αλγόριθμος αναλαμβάνει την διαχείριση τους. Ωστόσο, εκείνος ο μηχανισμός που θα επιτρέψει την συνένωση και τον διαμοιρασμό των υπηρεσιών, καθώς και η ενδεχόμενη πολυπλοκότητα και πρακτικότητα της προτεινόμενης λύσης δεν μελετώνται, ενώ αφετέρου μια ξεκάθαρη μοντελοποίηση των ποικίλων απαιτήσεων ΠτΥ των χρηστών στο πρόβλημα δεν

σχολιάζεται. Επιπλέον, στο [38] το πρόβλημα της ανάθεσης πόρων μοντελοποιείται με τη βοήθεια συναρτήσεων χρησιμότητας με στόχο τη μεγιστοποίηση του κέρδους του δικτύου. Ειδικότερα, ο διαμοιρασμός εύρους ζώνης και ο έλεγχος αποδοχής (admission control) αντιμετωπίζονται σαν ένα μη συνεργατικό παίγνιο. Εντούτοις, το προτεινόμενο αφαιρετικό παίγνιο επικεντρώνεται στις κυψέλες του συστήματος (οι παίχτες στο παίγνιο) και όχι στους τελικούς χρήστες (δηλαδή οι χρήστες δεν διαφοροποιούνται συναρτήσει των απαιτήσεων τους, τα περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά τους ή τους διαθέσιμους πόρους του εκάστοτε δικτύου). Επιπλέον η ιδιότητες ισορροπίας του παιγνίου καθώς και η ταχύτητα σύγκλισης δεν αναλύονται. Παράλληλα στο [37], παρουσιάζονται κεντρικοποιημένες και κατανεμημένες μεθοδολογίες που αντιμετωπίζουν το πρόβλημα της ανάθεσης χρηστών σε ετερογενή δίκτυα, σύμφωνα με τις οποίες οι χρήστες που βρίσκονται σε περιοχές πολλαπλής παράλληλης κάλυψης επιλέγουν με τη βοήθεια της θεωρίας εξελισσόμενων παιγνίων εκείνο το δίκτυο που θα μεγιστοποιήσει την συνάρτηση κόστους τους. Ωστόσο, ο διαχωρισμός των χρηστών σε πληθυσμούς ανάλογα με την διαθεσιμότητα των ασύρματων δικτύων στην περιοχή τους δεν επιτρέπει την συνολική αντιμετώπιση του προβλήματος. Τέλος, στο [6], ο Yu και οι συνεργάτες του, προτείνουν ένα μηχανισμό ελέγχου αποδοχής που μεγιστοποιεί το κέρδος του δικτύου αναθέτοντας χρήστες σε εκείνα τα δίκτυα που εγγυώνται τη μεγιστοποίηση του συνολικού ωφέλιμου εύρου ζώνης. Το παραπάνω πρόβλημα μοντελοποιείται σαν μία semi-Markov στοχαστική διαδικασία και επιλύεται με τη βοήθεια μηχανισμών που βασίζονται σε μεθόδους Γραμμικού προγραμματισμού. Παρόλα αυτά, ο μη-πραγματικός χρόνος επίλυσης, η πολυπλοκότητα και η περιορισμένη επεκτασιμότητα της προτεινόμενης λύσης εισάγουν εμπόδια στην υιοθέτηση της.

2.2. Ενοποιημένα Ασύρματα Τοπικά και Κυψελωτά Δίκτυα

Η ενοποίηση και διαλειτουργικότητα των Ασύρματων Τοπικών Δικτύων (WLAN) και των Κυψελωτών δικτύων (CDMA, OFDMA), επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικές αρχιτεκτονικές, τις ονομαζόμενες, στενή σύζευξη (tight coupling) και χαλαρή σύζευξη (loose coupling) [4], όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.

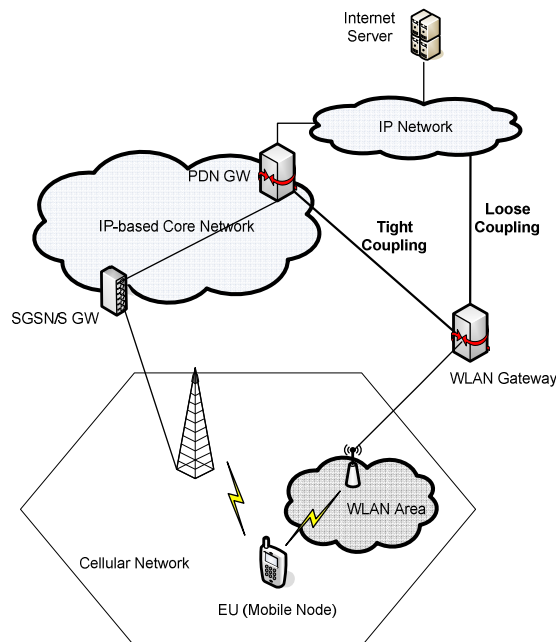
Σε ένα στενά συζευγμένο σύστημα, ένα WLAN δίκτυο συνδέεται με το 3GPP (ή 3GPP2) δίκτυο πυρήνα σαν ένα επιπλέον δίκτυο ασύρματης πρόσβασης. Συγκεκριμένα, τα ασύρματα τοπικά δίκτυα χρησιμοποιούν τους μηχανισμούς πιστοποίησης, διαχείρισης κινητικότητας και χρέωσης του κυψελωτού, ενώ αντιθέτως, καθώς η κίνηση του WLAN περνάει μέσα από το πυρήνα του κυψελωτού δικτύου, η πύλη εξόδου του WLAN πρέπει να υλοποιεί όλα τα αντίστοιχα πρωτόκολλα που απαιτούνται για την εύρυθμη ενσωμάτωση της WLAN κίνησης στο δίκτυο πυρήνα. Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της αρχιτεκτονικής είναι η άμεση επαναχρησιμοποίηση των προαναφερθέντων μηχανισμών, με κύριο ανασταλτικό παράγοντα την αυξημένη πολυπλοκότητα.

Αντίθετα σε ένα χαλαρά συζευγμένο σύστημα, το WLAN δίκτυο δεν είναι άμεσα συνδεδεμένο με τον πυρήνα του 3GPP (3GPP2) δικτύου, αλλά η WLAN κίνηση τροφοδοτείται κατευθείαν στην πύλη εξόδου του συστήματος. Με αυτό τον τρόπο τα τοπικά ασύρματα και τα κυψελωτά δίκτυα μπορούν να χρησιμοποιούν διαφορετικούς μηχανισμούς και πρωτόκολλα πιστοποίησης, διαχείρισης κινητικότητας και χρέωσης, ενώ παράλληλα η κίνηση του WLAN δεν διέρχεται μέσα από το δίκτυο πυρήνα ελαχιστοποιώντας τυχόν προβλήματα συμφόρησης. Ωστόσο τα δύο συστήματα μοιράζονται την ίδια βάση διαπιστευμένων συνδρομητών ώστε να εξασφαλίζεται η ασφάλεια και η σωστή διαχείριση των χρηστών. Παρόλη όμως την απλότητα και ευελιξία που παρέχει η χαλαρή σύζευξη, η παροχή και ικανοποίηση κριτηρίων ΠτΥ

παραμένει μια πολύ δύσκολη υπόθεση, ειδικά αν εξετάσουμε υπηρεσίες πραγματικού χρόνου.

Οι αρχιτεκτονικές που προτείνονται και εξετάζονται στο υπόλοιπο αυτής της διατριβής υιοθετούν τη φιλοσοφία της στενής σύζευξης, ενώ παράλληλα οι υποκείμενοι μηχανισμοί και κόμβοι (κινητοί χρήστες και σταθμοί βάσης) εμπλουτίζονται με διάφορες δυνατότητες που θα επιτρέψουν α) την αρραγή κινητικότητα των κόμβων σύμφωνα με τις τρέχουσες προδιαγραφές του 3GPP/SAE [41], και β) την προηγμένη κατανομή πόρων σεβόμενη τις απαιτήσεις κριτηρίων ΠτΥ των χρηστών, με τελικό στόχο την παροχή αδιάκοπης και αδιάλειπτης επικοινωνίας.

Επιπλέον αξίζει να σημειωθεί πως στο υπόλοιπο της διατριβής με τον όρο σταθμός βάσης εννοείται τόσο ένας σταθμός βάσης ενός κυψελωτού δικτύου (CDMA/OFDMA), όσο και ένας σταθμός πρόσβασης κάποιου ασύρματου τοπικού δικτύου (WLAN). Αντίστοιχα, με τον όρο κυψέλη εννοείται η αντίστοιχη περιοχή κάλυψης του σταθμού βάσης σε οποιοδήποτε από τα προαναφερθέντα συστήματα.

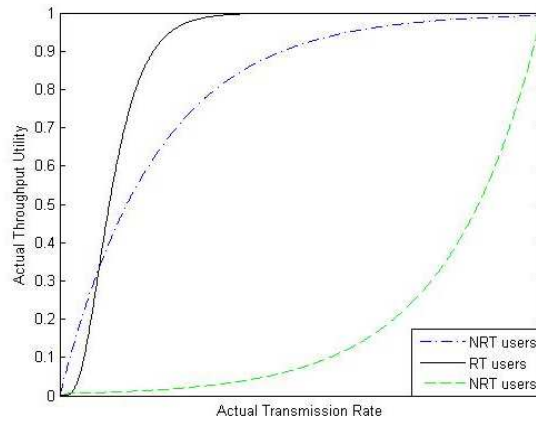


Σχήμα 1: Στενή και Χαλαρή Σύζευξη για ενοποιημένα CDMA/WLAN συστήματα σύμφωνα με το 3GPP.

2.3. Μοντελοποίηση Συστήματος με Χρήση Συναρτήσεων Χρησιμότητας

Δεδομένων των διαφορετικών τύπων πόρων, των διαφορετικών τεχνολογιών ασύρματης πρόσβασης, όπως και των ποικίλων προσδοκιών των υπηρεσιών των χρηστών, η έννοια των συναρτήσεων χρησιμότητας (utility functions) που έγινε γνωστή από τις Οικονομικές επιστήμες, έχει υιοθετηθεί στο σχεδιασμό μηχανισμών διαχείρισης πόρων ασυρμάτων δικτύων. Μία συνάρτηση χρησιμότητας αντανακλά το βαθμό της ικανοποίησης του χρήστη συναρτήσει της ποιότητας της υπηρεσίας που λαμβάνει, ενώ παράλληλα παρέχει δυνατότητες απεικόνισης διάφορων κριτηρίων ΠτΥ και δικαιοσύνης των χρηστών, βραχυπρόθεσμων, μακροπρόθεσμων ή ελάχιστων απαιτήσεων των υπηρεσιών, καθώς και φυσικούς περιορισμούς του συστήματος.

Η μοντελοποίηση ενός συστήματος με χρήση συναρτήσεων χρησιμότητας επιτρέπει την δημιουργία κοινών προβλημάτων βελτιστοποίησης που μπορούν να επιλυθούν χρησιμοποιώντας εργαλεία και τεχνικές της θεωρίας Μεγιστοποίησης Χρησιμότητας Δικτύου (Network Utility Maximization). Τυπικά παραδείγματα συναρτήσεων χρησιμότητας που έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως στην βιβλιογραφία αποτελούν οι κυρτές (convex) και κοίλες (concave) συναρτήσεις για αναπαράσταση ελαστικών υπηρεσιών (μη πραγματικού χρόνου – non real time (NRT)), και οι σιγμοειδείς (sigmoidal) συναρτήσεις για αναπαράσταση μη ελαστικών (πραγματικού χρόνου – real time (RT)) υπηρεσιών. Στο Σχήμα 2 απεικονίζεται ο κανονικοποιημένος δείκτης χρησιμότητας που επιτυγχάνεται ως συνάρτηση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων για τρεις διαφορετικές υπηρεσίες [42], [43].



Σχήμα 2: Συναρτήσεις χρησιμότητας χρηστών υπηρεσιών πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου συναρτήσει του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων.

Κατά την πορεία ανάλυσης της παρούσας διδακτορικής διατριβής, θα γίνει εκτεταμένη χρήση, μοντελοποίηση και επιλογή διαφόρων συναρτήσεων χρησιμότητας χρηστών αφού θα αποτελέσουν, ταυτόχρονα με τη θεωρία ΜΧΔ (NUM theory), την κοινή μαθηματική γλώσσα και την αντίστοιχη μαθηματική θεωρία, βάση της οποίας θα μοντελοποιούμε, αναλύουμε και επιλύουμε τα διάφορα προβλήματα διαχείρισης πόρων δικτύου που πραγματεύονται σε αυτή.

3. Αυτόνομη Αρχιτεκτονική Διαχείρισης Πόρων σε Ενοποιημένα Ασύρματα Δίκτυα

Εξετάζοντας ένα πολύπλοκο ετερογενές ασύρματο σύστημα που πιθανόν ανήκει και σε διαφορετικούς, μη συνεργαζόμενους παρόχους, είναι εμφανές πως μόνο ο κάθε ένας κινητός κόμβος έχει ολοκληρωμένη άποψη της τρέχουσας κατάστασής του, όπως και του περιβάλλοντος του, σχετικά με τα διαθέσιμα σημεία πρόσβασης στη γειτονιά του, τους αντίστοιχους διαθέσιμους πόρους αυτών, καθώς και τον τρόπο με τον οποίο αυτοί κατανέμονται εξασφαλίζοντας την ικανοποίηση των απαιτούμενων κριτηρίων ΠτΥ. Συνεπώς, γίνεται επιτακτική η ανάγκη εξεύρεσης νέων, μη κεντρικοποιημένων αρχιτεκτονικών, που θα αποτελέσουν τη βάση των μελλοντικών ασύρματων δικτύων. Σύμφωνα με το πρότυπο 3GPP/LTE [10], όπως αναφέρθηκε καινωρίτερα, τα ασύρματα δίκτυα θα απαρτίζονται από αυτόνομους αυτό-προσαρμοζόμενους κόμβους εμπλουτισμένους με δυνατότητες να αντιλαμβάνονται το περιβάλλον τους, και να αντιδρούν σε γεγονότα σχετιζόμενα με την κινητικότητα ή την παροχή ΠτΥ, βελτιστοποιώντας την απόδοσή τους.

Το όραμα των μελλοντικών αυτόνομων δικτύων στοχεύει στην υλοποίηση αυτό-* λειτουργιών για την βελτιστοποίηση και αυτό-προσαρμογή στο περιεχόμενο ή στα γεγονότα που απαιτούν αλλαγή συμπεριφοράς των συστημάτων, υπηρεσιών και εφαρμογών [8]. Συνεπώς, ο σχεδιασμός ενός ευέλικτου μηχανισμού διαχείρισης της κινητικότητας και ταυτόχρονης ανάθεσης χρηστών που ταυτόχρονα σέβεται και ικανοποιεί τα κριτήρια ΠτΥ, εμφανίζεται σαν μία δελεαστική εναλλακτική που ταυτόχρονα επιτρέπει την πλήρη αξιοποίηση των δυνατοτήτων των σύγχρονων ασύρματων δικτύων. Για αυτό το λόγο, εισάγουμε την έννοια της αυτονομίας ως

κινητήρια δύναμη που μας επιτρέπει τον σχεδιασμό ενός καινοτόμου αυτόνομου πλαισίου που μεγιστοποιεί το κέρδος του ενοποιημένου δικτύου, επιτρέποντας την αυτό-προσαρμογή και αυτό-βελτιστοποίηση τόσο των κινητών κόμβων, όσο και των σταθμών βάσης.

Κοινό χαρακτηριστικό όλων των προσπαθειών σχεδιασμού αυτόνομων δικτύων/συστημάτων αποτελεί η χρησιμοποίηση αυτό-προσαρμοζόμενων βρόχων ελέγχου (control loops) και διαδικασιών ανατροφοδότησης [8], [44]. Συνδυαστικά, αυτά επιτρέπουν τον έλεγχο, παρακολούθηση και την αντίδραση των διαφόρων μηχανισμών του δικτύου και των ανεξάρτητων κινητών κόμβων σε διάφορα γεγονότα, προκειμένου να επιτύχουν αλλά και να βελτιστοποιήσουν τους αντίστοιχους στόχους τους. Είσοδος σε έναν βρόχο ελέγχου μπορεί να είναι διάφορα σήματα κατάστασης, συνεχώς μεταδιδόμενες πληροφορίες από το σύστημα, από μηχανισμούς, ή από άλλους πόρους (πχ πρωτόκολλα, κόμβοι, κτλ), μαζί με (συνήθως βασισμένοι σε πολιτικές) κανόνες διαχείρισης που συντονίζουν την συμπεριφορά του συστήματος. Η έξοδος αποτελείται από εντολές προς το σύστημα ή μέρη αυτού που αποσκοπούν στην προσαρμογή της λειτουργίας τους, ή από μηνύματα κατάστασης προς άλλους κόμβους του συστήματος. Επιπλέον, οι ερευνητικές προσπάθειες προς την ανάπτυξη της αυτονομίας οραματίζονται την συνάθροιση πολλαπλών βρόχων ελέγχου στον ίδιο κόμβο, επιτρέποντας την αλληλεπίδραση εσωτερικών και εξωτερικών βρόχων ελέγχου, καθώς και τον έλεγχο και διαχείριση κατώτερων βρόχων ελέγχου από ανώτερους μέσα στον ίδιο κόμβο ή το σύστημα. Διαισθητικά, το παραπάνω οδηγεί σε ένα ιεραρχικό σύστημα βρόχων ελέγχου που θα επιτρέπει τον αποδοτικό σχεδιασμό αυτόνομων κόμβων, συστημάτων και αρχιτεκτονικών. Σε αυτή την διατριβή, η αυτονομία των κόμβων και των δικτύων χρησιμοποιείται ως μοχλός

για τη σχεδίαση ευέλικτων και αποδοτικών αρχιτεκτονικών προσανατολισμένων στην υπηρεσία και στη τήρηση κριτηρίων ΠτΥ.

3.1. Χαρακτηριστικά και συνεισφορά της προτεινόμενης λύσης

Σε αυτό το πρόβλημα, στοχεύοντας στην καθολική βελτιστοποίηση του ενοποιημένου δικτύου, κάτω από ένα κοινό θεωρητικό πλαίσιο, αξιολογούμε την θεωρία Μεγιστοποίησης Χρησιμότητας Δικτύου (NUM theory). Συγκεκριμένα, ενοποιημένοι κυψελωτοί σταθμοί βάσης CDMA και σημεία πρόσβασης WLAN, μέσω εμπλουτισμένων εσωτερικών μηχανισμών βελτιστοποίησης της διαδικασίας διαμοιρασμού πόρων με χρήση της θεωρίας ΜΧΔ, τίθενται ικανοί να απεικονίσουν με ένα κανονικοποιημένο τρόπο τους διαθέσιμους πόρους τους καθώς και τις δυνατότητες παροχής ΠτΥ μέσω κατάλληλων μετρικών. Στη συνέχεια, οι σταθμοί βάσης ευρυεκπέμπουν (broadcast) αυτή τη πληροφορία με τη μορφή σημάτων ελέγχου (beacons) σε όλους τους κινητούς κόμβους που βρίσκονται στην περιοχή κάλυψής τους. Με αυτό τον τρόπο ένας κινητός κόμβος έχει την ικανότητα και ευελιξία να υλοποιήσει ένα βρόχο ελέγχου που δυναμικά α) θα εκμεταλλεύεται την παραπάνω κανονικοποιημένη πληροφορία που έλαβε από όλα τα ασύρματα δίκτυα της γειτονίας του, β) θα παρακολουθεί και θα ελέγχει την απόδοση των υπηρεσιών του, και γ) θα παίρνει βέλτιστες αποφάσεις αποδοχής σε ασύρματα δίκτυα θέτοντας και λύνοντας ένα κατάλληλο πρόβλημα βελτιστοποίησης.

Τα διακριτά κύρια χαρακτηριστικά της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής συνοψίζονται ακολούθως:

- *Αυτόνομη Διαχείριση Κινητικότητας σε συμφωνία με το τρέχον όραμα του Third Generation Partnership (3GPP) System Architecture Evolution (SAE) [41].*

Προαπαιτούμενο μιας ρεαλιστικής αρχιτεκτονικής διαμοιρασμού πόρων και

ικανοποίησης κριτηρίων ΠτΥ, είναι η ύπαρξη ενός αντίστοιχου αυτόνομου μηχανισμού διαχείρισης κινητικότητας που θα επιτρέπει και θα διευκολύνει τις νεοεισαχθέντες αυτό-* ιδιότητες είτε μέσω ελέγχου και παρακολούθησης γεγονότων σχετικών με την κινητικότητα (δηλαδή μετρήσεις 2^ο επιπέδου του 3GPP), είτε υλοποιώντας αυτό-* αποφάσεις (π.χ. μεταπομπές λόγω κριτηρίων ΠτΥ), αντίστοιχα. Προς αυτό το σκοπό, περιγράφουμε μία θεμελιώδη αυτόνομη αρχιτεκτονική διαχείρισης κινητικότητας που αξιοποιεί και επεκτείνει τα μοναδικά χαρακτηριστικά του Proxy MIPv6 (3GPP/SAE).

- *Αυτόνομη Ενδοκυβελική Διαχείριση Ασύρματων Πόρων.* Παρουσιάζεται και περιγράφεται με λεπτομέρεια ο καινοτόμος αυτόνομος ενδοκυβελικός μηχανισμός βέλτιστης κατανομής πόρων και παροχής εγγυήσεων ΠτΥ βασισμένος στη θεωρία ΜΧΔ (*Autonomic Radio Resource Management - ARRM*) για CDMA και WLAN δίκτυα, ενώ σκιαγραφούνται και οι απαραίτητες επεκτάσεις τους για την ενσωμάτωση OFDMA δικτύων. Πιο συγκεκριμένα, προκειμένου να εξασφαλιστεί η λειτουργία του μηχανισμού με πολλαπλές τεχνολογίες πρόσβασης, με ποικίλους τύπους υπηρεσιών, καθώς και με διαφορετικές απαιτήσεις ΠτΥ των χρηστών, η προτεινόμενη προσέγγιση βασίζεται σε ένα κοινό πλαίσιο συναρτήσεων χρησιμότητας, που αντικατοπτρίζει τους διάφορους περιορισμούς και απαιτήσεις ΠτΥ για κάθε τύπο δικτύου με ένα μοναδικό τρόπο, επιτρέποντας την αρραγή και αποδοτική ενοποίηση.
- *Αποδοτική Αυτόνομη Διακυβελική Διαχείριση Πόρων.* Προτείνεται ένας καινοτόμος Αυτόνομος Διακυβελικός Μηχανισμός Επιλογής Δικτύου (*Autonomic JOint Network Selection - AJONS*) που καθορίζει δυναμικά εάν και σε ποιο από τα διαθέσιμα ασύρματα δίκτυα (WLAN ή κυβελωτά) στην

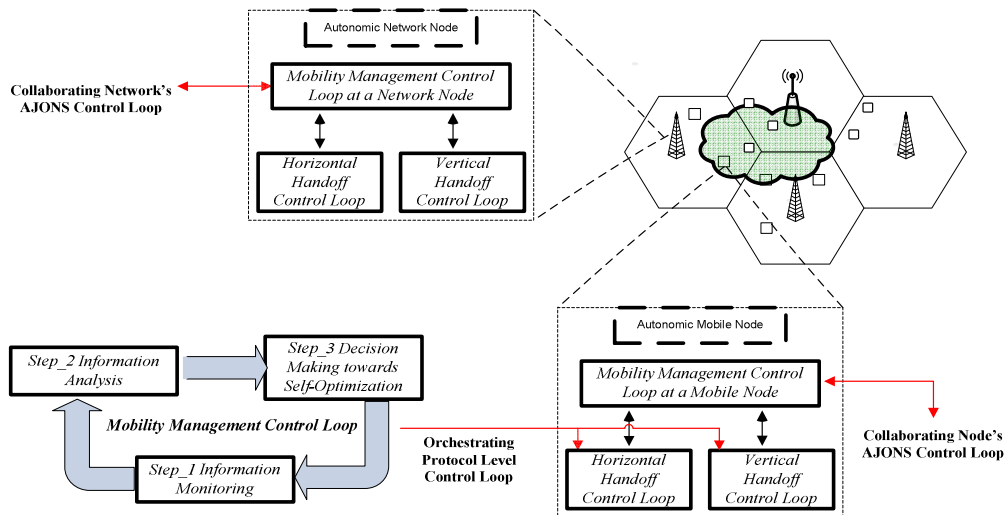
γειτονιά του χρήστη θα πρέπει να προσδεθεί μία νέα, οριζόντια ή κάθετη μεταπομπή. Προς διευκόλυνση αυτού του στόχου, προτείνεται ένας ασύγχρονος, κατανεμημένος μηχανισμός που μεγιστοποιεί το μέσο κέρδος του ενοποιημένου δικτύου, επιτυγχάνοντας εξισορρόπηση του φόρτου του συστήματος, ενώ ταυτόχρονα εγγυάται την ικανοποίηση των κριτηρίων ΠτΥ τόσο σε κυψελωτά, όσο και σε τοπικά ασύρματα δίκτυα.

3.2. Η Αυτονομία στην Διαχείριση Κινητικότητας

Συγκριτικά με τους παραδοσιακούς αλγόριθμους διαχείρισης κινητικότητας σε ομογενή δίκτυα, ο σχεδιασμός μηχανισμών διαχείρισης κινητικότητας σε ετερογενή συστήματα εισάγει επιπλέον προκλήσεις, όπως η επιλογή του σημείου σύνδεσης μεταξύ των διαθέσιμων ετερογενών τεχνολογιών, καθώς και η εκτέλεση της μεταπομπής που απαιτεί τη χρησιμοποίηση διαφορετικών μεθοδολογιών ανά περίπτωση. Χρησιμοποιώντας βρόχους ελέγχου που ελέγχουν σύγχρονα IP πρωτόκολλα κινητικότητας, μία καινοτόμα αρχιτεκτονική που προσθέτει ευελιξία και δυναμικότητα στο σύστημα διαχείρισης κινητικότητας μπορεί να επιτευχθεί. Επιπλέον, η προτεινόμενη αρχιτεκτονική ενεργεί ως *μία γενική πλατφόρμα παρέχοντας εμπλουτισμένες λειτουργίες και δυνατότητες, διευκολύνοντας το σχεδιασμό μηχανισμών διαχείρισης πόρων σε ενοποιημένα ετερογενή κυψελωτά και τοπικά ασύρματα συστήματα.*

3.2.1. Αυτόνομη διαχείριση κινητικότητας με βρόχους ελέγχου

Η προτεινόμενη αυτόνομη λύση υλοποιείται εισάγοντας δύο βρόχους ελέγχου, στους κινητούς κόμβους και στους κόμβους δικτύου αντίστοιχα. Όπως περιγράφεται στο Σχήμα 3 και αναλύεται στον Πίνακα II, ο βρόχος ελέγχου Διαχείρισης Κινητικότητας (Mobility Management – MM) του κινητού κόμβου,



Σχήμα 3: Αυτόνομη Διαχείριση Κινητικότητας με Βρόχου Ελέγχου

ελέγχει τις συμπεριφορές του κόμβου σε γεγονότα που σχετίζονται με την κινητικότητα., ενώ ο βρόχος ελέγχου σε έναν κόμβο δικτύου διαχειρίζεται τις λειτουργίες κινητικότητας σε επίπεδο δικτύου αντίστοιχα. Η συνεργασία μεταξύ του MM και του Αυτόνομου Διακυβελικού Μηχανισμού Επιλογής Δικτύου (AJONS) υλοποιεί τον απόλυτο στόχο της αυτόνομης λήψης αποφάσεων μεταπομπών, σχετιζόμενες με την ικανοποίηση και παροχή εγγυήσεων ΠτΥ, όπως περιγράφεται αναλυτικά στην Παράγραφο 3.4 .

ΠΙΝΑΚΑΣ Π: Βρόχος Ελέγχου Διαχείρισης Κινητικότητας

Βρόχος Ελέγχου Διαχείρισης Κινητικότητας	
Βήμα 1	<i>Παρακολούθηση Πληροφοριών.</i> Για ένα κόμβο δικτύου απαιτείται γνώση των δυνατοτήτων του, της τρέχουσας κατάστασης του, της μέγιστης χωρητικότητας του, των διασυνδεδεμένων κόμβων του, καθώς και των πιθανών διασυνδέσεών του με άλλα συστήματα (π.χ. κινητοί κόμβοι που θα μπορούσαν να προσδεθούν σε ενδεχόμενη μεταπομπή). Για ένα κινητό κόμβο, απαιτείται γνώση των δυνατοτήτων του ίδιου αλλά και του δικτύου, όπως π.χ. οι διαθέσιμες διεπαφές του, και εάν μπορεί να τις χρησιμοποιήσει ταυτόχρονα, καθώς και τα υποστηριζόμενα πρωτόκολλα κινητικότητας. Επίσης συνεχώς ελέγχει την κατάσταση των ασύρματων συνδέσεων του και τα διαθέσιμα δίκτυα πρόσβασης στην γειτονιά του.
Βήμα 2	<i>Ανάλυση Πληροφοριών.</i> Αναλύει τις διαφορές στην απόδοση των

	επικοινωνιακών μονοπατιών του, και κυριότερα ανιχνεύει εκείνα τα γεγονότα που θα οδηγήσουν σε μεταπομπή.
Βήμα 3	<i>Λήψη Απόφασης προς την Αυτό-Βελτιστοποίηση.</i> Αξιολογεί τις διαθέσιμες εναλλακτικές αναζητώντας για την καλύτερη δυνατή σχέση μεταξύ της επικοινωνιακής συνέχειας και της ποιότητας διασύνδεσης. Επιπλέον, σε συνεργασία με τον AJONS υλοποιεί τις μεταπομπές αυτό-βελτιστοποίησης βασισμένες σε χαρακτηριστικά ΠτΥ.

3.2.2. *Αυτονομία & IPv6 Πρωτόκολλα Διαχείρισης Κινητικότητας*

Η πραγματοποίηση των αυτό-βελτιστοποιούμενων λειτουργιών κινητικότητας που παρουσιάστηκαν παραπάνω, απαιτεί από τον MM βρόχο ελέγχου να ενορχηστρώσει τα απαιτούμενα πρωτόκολλα και τις κατάλληλες λειτουργίες που θα υλοποιήσουν τις διαδικασίες οριζόντιας ή κάθετης μεταπομπής (δηλαδή μεταπομπή μεταξύ ομογενών ή ετερογενών τεχνολογιών πρόσβασης αντίστοιχα). Ο βρόχος ελέγχου Οριζόντιας Μεταπομπής (Horizontal Handoff - HH) διαχειρίζεται ενδοκυψελικές μεταπομπές σύμφωνα με τις κατάλληλες πληροφορίες (π.χ. ποιότητα λαμβανόμενου σήματος), ενώ ο βρόχος ελέγχου Κάθετης Μεταπομπής (Vertical Handoff - VH) παρακολουθεί το περιβάλλον και ανιχνεύει διαθέσιμους σταθμούς βάσης καθώς και την ανάγκη πραγματοποίησης διακυψελικών μεταπομπών. Εσωτερικά σε ένα κόμβο (κινητό ή δικτύου) ο MM βρόχος ελέγχου διαχειρίζεται και οργανώνει την λειτουργία και συμπεριφορά των HH και VH βρόχων ελέγχου.

Καθώς τα περισσότερα δίκτυα πρόσβασης ήδη υλοποιούν αποδοτικούς εσωτερικούς μηχανισμούς κινητικότητας, επικεντρωνόμαστε στην πραγματοποίηση αυτόνομων κάθετων μεταπομπών. Είναι ευρέως γνωστό πως τα IP πρωτόκολλα διαχείρισης κινητικότητας υποστηρίζουν τις κάθετες μεταπομπές, συμπεριλαμβάνοντας μηχανισμούς διαχείρισης κινητικότητας οδηγούμενους από το δίκτυο (π.χ. Proxy Mobile IP - PMIP) και μηχανισμούς οδηγούμενους από τον κόμβο

(π.χ. Mobile IP - MIP). Στην πραγματικότητα, το MIP και το PMIP είναι οι εγκεκριμένοι μηχανισμοί διαχείρισης κινητικότητας IP σε 3GPP SAE LTE συστήματα, και χρησιμοποιούνται για να υποστηρίξουν την κινητικότητα μεταξύ 3GPP και μη 3GPP συστημάτων [41]. Το PMIPv6 επιτρέπει την IP κινητικότητα για ένα κόμβο χωρίς να απαιτεί τη συμμετοχή του σε σχετική σηματοδότηση. Το δίκτυο είναι υπεύθυνο για την πραγματοποίηση όλης της απαιτούμενης επικοινωνίας μεταξύ των στοιχείων του δικτύου πυρήνα που θα εξασφαλίσει την ζητούμενη IP κινητικότητα εκ μέρους του κινητού κόμβου. Συνεπώς το PMIPv6 ελαττώνει την σηματοδότηση που σχετίζεται με την κινητικότητα, αποφεύγοντας την δημιουργία τούνελ (tunnel), γεγονός ιδιαίτερα σημαντικό αναλογιζόμενοι την πεπερασμένη χωρητικότητα των ασύρματων δικτύων. Επομένως, εκμεταλλευόμενοι και αναβαθμίζοντας τις βελτιωμένες δυνατότητες του PMIPv6, μπορούμε να σχεδιάσουμε αυτόνομα συστήματα και εφαρμογές. Ο Πίνακας III συνοψίζει τις δυνατότητες και τα χαρακτηριστικά της κεφαλίδας PMIPv6,

ΠΙΝΑΚΑΣ ΙΙΙ: Επιλογές Κεφαλίδας PMIPv6

Όνομα	Περιγραφή	Επιλογές Τιμών
Δείκτης Μεταπομπής - Handoff Indicator	Ένα πεδίο 8-bit που περιγράφει τον τύπο της μεταπομπής. Περιέχει πληροφορία σηματοδότησης που ανταλλάσσεται μεταξύ ενός σταθμού βάσης και της πύλης εξόδου αναφορικά με την μεταπομπή του κινητού κόμβου.	0: Δεσμευμένο 1: Πρόσδεση πάνω από μία νέα διεπαφή 2: Μεταπομπή μεταξύ δυο διαφορετικών διεπαφών του κινητού κόμβου 3: Μεταπομπή μεταξύ διαφορετικών σταθμών βάσης στην ίδια διεπαφή του κινητού κόμβου. 4: Άγνωστη κατάσταση μεταπομπής 5: Μη αλλαγμένη κατάσταση (Επανεγγραφή)

Τύπος Τεχνολογίας Πρόσβασης - Access Technology Type	Ένα πεδίο 8-bit που φέρει πληροφορίες σηματοδοσίας που ανταλλάσσεται μεταξύ ενός σταθμού βάσης και της πύλης εξόδου αναφορικά με την τεχνολογία του σημείου πρόσβασης στο οποίο ο κινητός κόμβος είναι συνδεδεμένος.	0: Δεσμευμένο ("Reserved") 1: Εικονικό ("Logical Network Interface") 2: PPP ("Point-to-Point Protocol") 3: IEEE 802.3 ("Ethernet") 4: IEEE 802.11a/b/g ("Wireless LAN") 5: IEEE 802.16e ("WIMAX")
---	--	--

Οι παραπάνω δυνατότητες αξιοποιούνται αφενός από το VH βρόχο ελέγχου προκειμένου να ανταλλάσει πληροφορίες μεταξύ των εμπλεκόμενων κόμβων διευκολύνοντας την πραγματοποίηση κάθετων μεταπομπών, και αφετέρου από το MM βρόχο ελέγχου, διευκολύνοντας την επικοινωνία μεταξύ των οντοτήτων που υλοποιούν τις διαδικασίες παροχής ασύρματων πόρων, υποστηρίζοντας τους μηχανισμούς ARRM και AJONS, όπως περιγράφεται παρακάτω. Συγκεκριμένα, με την εισαγωγή μιας νέας αίτησης μεταπομπής, τα πεδία του Δείκτη Μεταπομπής και του Τύπου Τεχνολογίας Πρόσβασης της κεφαλίδας PMIPv6 συμπληρώνονται από τις πύλες εξόδου ή τους δρομολογητές πρόσβασης της Πηγής και του Προορισμού προκειμένου να ανταλλάξουν πληροφορίες σχετικές με τον τύπο του δικτύου πρόσβασης και της προτεινόμενης διεπαφής αντίστοιχα. Αυτό παρέχει βελτιωμένη ευελιξία, ειδικά για την πραγματοποίηση κάθετων μεταπομπών μεταξύ δικτύων διαφορετικής τεχνολογίας. Επιπλέον, για την ολοκλήρωση της απαιτούμενης αυτόνομης λειτουργικότητας, το PMIPv6 μπορεί να εκμεταλλευτεί τις διαθέσιμες μετρήσεις επιπέδου 2. Η πληροφορία που παρέχεται από τις μετρήσεις του Επίπεδου 2 περιλαμβάνουν: i) Πληροφορίες σχετιζόμενες με την ΠτΥ της τρέχουσας σύνδεσης, όπως ρυθμός μετάδοσης, καθυστέρησης πακέτων, απώλεια πακέτων, κτλ, και ii)

πιθανές συνδέσεις με άλλα διαθέσιμα σημεία πρόσδεσης της ίδιας ή διαφορετικής τεχνολογίας.

Να υπογραμμίσουμε πως η προτεινόμενη αρχιτεκτονική, εκμεταλλεύεται μόνο τους παραπάνω ήδη υπάρχοντες μηχανισμούς και σηματοδοσία για να ενσωματώσει πληροφορία που θα επιτρέψει την ενεργοποίηση των αυτό-* λειτουργιών. Το γεγονός αυτό, όχι μόνο ελαχιστοποιεί την εισαγόμενη σηματοδοσία στο δίκτυο, αλλά επίσης διασφαλίζει την συμβατότητα και την απρόσκοπτη ενσωμάτωση της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής στις ήδη υπάρχουσες (π.χ. 3GPP). Επιπλέον πληροφορίες σχετικά με την σηματοδοσία περιγράφονται στην Παράγραφο 3.6.3.

3.3. Αυτόνομη Ενδοκυψελική Διαχείριση Ασύρματων Πόρων

Η ύπαρξη ενός κατάλληλου και θεωρητικά σωστού μηχανισμού διαμοιρασμού των ασύρματων πόρων εσωτερικά σε κάθε κυψέλη, αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο στην εισαγωγή ενός καινοτόμου μηχανισμού επιλογής δικτύου πρόσδεσης που επιτρέπει στους χρήστες που εισέρχονται στο σύστημα, ή που επιθυμούν να πραγματοποιήσουν μια οριζόντια ή κάθετη μεταπομπή λόγω γεγονότων που σχετίζονται με την κινητικότητα ή την ΠτΥ τους, να επιλέξουν το πιο επικερδές σημείο πρόσβασης χρησιμοποιώντας τοπικά διαθέσιμες πληροφορίες. Αυτή τη λειτουργία αναλαμβάνουν κατάλληλοι Αυτόνομοι Ενδοκυψελικοί Μηχανισμοί Παροχής Ασύρματων Πόρων (Autonomic Radio Resource Management mechanism - ARRM) βασισμένοι σε καλά ορισμένες διαδικασίες της NUM θεωρίας. Εφεξής, θα χρησιμοποιούμε τον όρο γεγονότα σχετιζόμενα με την ΠτΥ, για να αναφερθούμε σε περιστατικά πτώσης του επιπέδου της ΠτΥ λόγω (α) θεμάτων συνδεσιμότητας (π.χ. χαμηλό λαμβανόμενο σήμα), (β) συμφόρηση στην κυψέλη, (γ) πιθανές υψηλές παρεμβολές στο σήμα, ή (δ) την ύπαρξη λιγότερο φορτωμένων (λιγότερο συμφορημένων) κυψελών στην γειτονιά

του χρήστη που θα μπορούσαν ενδεχομένως να υποστηρίξουν καλύτερα τις απαιτήσεις ΠτΥ του χρήστη. Σε αυτή τη παράγραφο δίνεται έμφαση σε ετερογενή CDMA/WLAN συστήματα, ωστόσο, επεκτάσεις για την εφαρμογή της προτεινόμενης αυτόνομης αρχιτεκτονικής σε WLAN/OFDMA συστήματα περιγράφονται στην Παράγραφο 3.5 .

Συνοπτικά, η προτεινόμενη αρχιτεκτονική βασίζεται σε ένα κοινό πλαίσιο συναρτήσεων χρησιμότητας, όπως περιγράφηκε στην Παράγραφο 2.3, προκειμένου να αξιοποιήσει τις ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά των συναρτήσεων χρησιμότητας, και τελικά να αντικατοπτρίσει τις απαιτήσεις ΠτΥ των χρηστών με ένα μοναδικό και κανονικοποιημένο τρόπο που θα εξασφαλίσει την αποτελεσματική και αρραγή ενοποίηση. Η σημειογραφία που ακολουθείτε παρακάτω και για όλη τη συνέχεια της διατριβής συνοψίζεται στο Παράρτημα I για διευκόλυνση του αναγνώστη.

3.3.1. Ενδοκυψελικός διαμοιρασμός ασύρματων πόρων σε WLAN ή CDMA κυψελωτά δίκτυα

Θεωρώντας την άφιξη ενός νέου χρήστη στο σύστημα, ή έναν ήδη συνδεδεμένο χρήστη που επιθυμεί να πραγματοποιήσει μια οριζόντια ή κάθετη μεταπομπή, ορίζουμε ένα σύνολο C , N_C διαθέσιμων κυψελών που ο χρήστης μπορεί να συνδεθεί. Το σύνολο C καθορίζεται ανάλογα με την ποιότητα του σήματος που ο χρήστης λαμβάνει από τους διαθέσιμους σταθμούς βάσης στη γειτονιά του, το οποίο πρέπει να είναι μεγαλύτερο από μία τιμή κατωφλίου. Μία κυψέλη $c \in C$ μπορεί να ανήκει σε οποιαδήποτε από τις μελετώμενες τεχνολογίες. Ορίζουμε επίσης, ότι σε κάθε κυψέλη c (είτε CDMA είτε WLAN) του ενοποιημένου δικτύου, υπάρχουν συνδεδεμένοι ένα σύνολο C_c (δηλαδή C_{CDMA} ή C_{WLAN} αντίστοιχα) N_c (δηλαδή N_{CDMA} ή N_{WLAN} αντίστοιχα) χρηστών με συνεχώς διαθέσιμα πακέτα προς μετάδοση. Τέλος, λόγω της πληθώρας των διαθέσιμων κριτηρίων ΠτΥ, κάθε κινητός κόμβος i συσχετίζεται με

μία κατάλληλη συνάρτηση χρησιμότητας U_i που αντιπροσωπεύει τον βαθμό ικανοποίησης του, τη χρονική στιγμή t που εξυπηρετείται από την κυψέλη c , συναρτήσει του αναμενόμενου ρυθμού μετάδοσης $r_{c,i}(t)$, και εκφράζεται ως $U_i(r_{c,i}(t))$.

Υποθέτουμε επίσης πως η $U_i(r_{c,i}(t))$ πληροί της ακόλουθες παραδοχές:

- 1 Γνησίως αύξουσα, συνεχής και δίπλα παραγωγίσιμη ως προς $r_{c,i}(t)$.
- 2 $U_i(\infty)=1$ και $U_i(0)=0$, ώστε όταν ο ρυθμός μετάδοσης του χρήστη είναι μηδενικός ($r_{c,i}(t)=0$), η χρησιμότητα του να μηδενίζεται.
- 3 Σιγμοειδής, είτε αυστηρώς κυρτή, είτε αυστηρώς κοίλη συνάρτηση του λαμβανόμενου ρυθμού μετάδοσης.

Η ικανοποίηση των παραπάνω υποθέσεων επιτρέπει στις συναρτήσεις χρησιμότητας να αντικατοπτρίσουν μια ποικιλία υπηρεσιών όπως περιγράφονται [45].

3.3.1.1. Διαμοιρασμός πόρων σε CDMA Δίκτυα

Στα σύγχρονα CDMA κυψελωτά συστήματα ο διαμοιρασμός πόρων με βάση τα κριτήρια ΠτΥ των χρηστών πραγματοποιείται κατά κανόνα μέσω ελέγχου της ισχύος [45]. Εξετάζοντας μία CDMA κυψέλη c , λόγω της ευαίσθητης φύσης του καναλιού στην παρεμβολή που προκαλείται από την ταυτόχρονη μετάδοση πολλαπλών χρηστών, ο λόγος ενέργειας ψηφίου προς παρεμβολές (bit energy to interference density ratio) $\gamma_{c,i}(t)$, παίζει εξαιρετικά σημαντικό ρόλο στην συνολική απόδοση της υπηρεσίας, καθώς καθορίζει την πιθανότητα του χρήστη να λάβει επιτυχώς πακέτα και συνεπώς τον πραγματικό ρυθμό μετάδοσης. Ορίζοντας ως $R_{F,i}$ το σταθερό ρυθμό μετάδοσης της κάτω ζεύξης του χρήστη i , με $G_{c,i}(t)$ τις στιγμιαίες συνθήκες του καναλιού και με $p_{c,i}(t)$ την διανεμημένη ισχύ μετάδοσης, όταν εξυπηρετείται από την

CDMA κυψέλη c , το οποίο ωστόσο περιορίζεται από την μέγιστη ισχύ P_c^{\max} του σταθμού βάσης, το λαμβανόμενο σήμα $\gamma_{c,i}(t)$ για το χρήστη i δίδεται [45]:

$$\gamma_{c,i}(\bar{p}_c(t)) = \frac{W}{R_{F,i}} \frac{G_{c,i}(t)p_{c,i}(t)}{\theta G_{c,i}(t) \sum_{j=1}^{N_c} p_{c,j}(t) - \theta G_{c,i}(t)p_{c,i}(t) + I_{c,i}}$$

όπου το θ δηλώνει τον παράγοντα ορθογωνιότητας, το W είναι το εύρος ζώνης εξάπλωσης (spreading bandwidth), το $\bar{p}_c(t)$, το διάνυσμα ανάθεσης ισχύος, και το $I_{c,i}$ η ποιότητα περιβάλλοντος εκπομπής που συμπεριλαμβάνει και τον θόρυβο του περιβάλλοντος. Για να αποκτηθεί η βέλτιστη ανάθεση πόρων, δηλαδή το διάνυσμα ισχύος $\bar{p}(t)$ που μεγιστοποιεί τις συναρτήσεις χρησιμότητας των χρηστών και την συνολική απόδοση της CDMA κυψέλης, κάθε σχήμα ARRM σε μία περιοδική βάση (ας ορίσουμε με T_s τη διάρκεια μιας χρονοσχιμής στην CDMA κυψέλη), είναι υπεύθυνο για να υπολογίζει τη λύση του ακόλουθου μη-κυρτού NUM προβλήματος βελτιστοποίησης [45]:

$$\begin{aligned} \max_p \quad & \sum_{i=1}^{N_{CDMA}} U_i(r_{c,i}(\gamma_{c,i}(t))) \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{i=1}^{N_{CDMA}} p_{c,i}(t) \leq P_c^{\max} \\ & 0 \leq p_{c,i}(t) \leq P_c^{\max} \quad \forall i \in C_{CDMA} \\ & 0 \leq r_{c,i}(t) \leq R_c^{\max} \quad \forall i \in C_{CDMA} \end{aligned} \quad (1)$$

όπου το $r_{c,i}(\gamma_{c,i}(t))$ αντικατοπτρίζει τη πραγματική ρυθμαπόδοση του χρήστη i (goodput) συναρτήσει του λαμβανόμενου SINR από το σταθμό βάσης c .

3.3.1.2. Διαμοιρασμός πόρων σε WLAN Δίκτυα

Προκειμένου να παράσχουμε ΠτΥ σε ασύρματα τοπικά WLAN δίκτυα, θεωρούμε μία τροποποίηση του προτύπου IEEE 802.11e, που παρουσιάζεται στα [46], [47] και το οποίο επιτρέπει την εξασφάλιση εγγυήσεων μέσης ρυθμαπόδοσης στα WLAN.

Συγκεκριμένα, επιτρέποντας την αλλαγή μερικών παραμέτρων που επηρεάζουν την απόδοση του χρήστη $i \in C_{WLAN}$ (π.χ. το μέγιστο (ελάχιστο) παράθυρο ανταγωνισμού (contention window)) από το σταθμό βάσης, μπορούμε να επιτύχουμε βέλτιστη ανάθεση πόρων. Στη βιβλιογραφία υπάρχει μια πληθώρα μηχανισμών ανάθεσης πόρων σεβόμενων τα κριτήρια ΠτΥ για τα WLAN, οι οποίοι, αφού αρχικά θέτουν το πρόβλημα βελτιστοποίησης της συνολικής ρυθμαπόδοσης του συστήματος, εκμεταλλεύονται την αλληλοσυσχέτιση μεταξύ του εύρους ζώνης των χρηστών και κάποιου από των παραπάνω παραμέτρων [46], [47] ώστε να επιτύχουν τη βέλτιστη λύση. Δεδομένης της μέγιστης πραγματικής ρυθμαπόδοσης του συστήματος C_c^{\max} , το αντίστοιχο μη κυρτό πρόβλημα βελτιστοποίησης για τα WLAN μπορεί να μοντελοποιηθεί κάτω από ένα κοινό πλαίσιο βασισμένο σε συναρτήσεις χρησιμότητας ως εξής [47]:

$$\begin{aligned}
& \max_r \sum_{j=1}^{N_{WLAN}} U_i(r_{c,i}(t)) \\
& s.t. \sum_{i=1}^{N_{WLAN}} r_{c,i}(t) \leq C_c^{\max}(t) \quad \forall i \in C_{WLAN} \\
& \quad 0 \leq r_{c,i}(t) \leq C_c^{\max}(t) \quad \forall i \in C_{WLAN}
\end{aligned} \tag{2}$$

όπου $C_c^{\max}(t)$ είναι η μέγιστη πραγματική ρυθμαπόδοση του c WLAN τη χρονική στιγμή t . Το Πρόβλημα (2) ορίζεται και λύνεται ανά τακτά χρονικά διαστήματα που ορίζονται ως χρονοπλαίσια WLAN (T_f), μετά την πάροδο των οποίων το $C_c^{\max}(t)$ επανα-υπολογίζεται σύμφωνα με το [47].

3.3.1.3. Βέλτιστη επίλυση προβλημάτων διαμοιρασμού πόρων

Οι ομοιότητες των δύο προβλημάτων διαμοιρασμού πόρων που περιγράφηκαν παραπάνω, σε σχέση με τον τρόπο που τα προβλήματα μοντελοποιούνται με τη χρήση συναρτήσεων χρησιμότητας συναρτήσεων των πόρων του δικτύου μας επιτρέπει να χαρακτηρίσουμε τα προβλήματα (1) και (2) σαν μη-κυρτά, γραμμικά περιορισμένα

προβλήματα μιας μεταβλητής. Η επίλυση τέτοιων μη-κυρτών προβλημάτων βελτιστοποίησης επιτυγχάνεται με χρήση αλγορίθμων δυναμικά μεταβαλλόμενου κόστους [45], των οποίων η Pareto-βελτιστότητα καθώς και η ασυμπτωτική βελτιστότητα (σαν συνάρτηση του αριθμού των χρηστών) έχουν ήδη μελετηθεί και αποδειχτεί στην βιβλιογραφία. Στη συνέχεια και για λόγους πληρότητας της διατριβής περιγράφουμε την λύση του προβλήματος (1) σύμφωνα με το [45], ενώ η λύση του προβλήματος (2) μπορεί εύκολα να παραχθεί αναλόγως και σε συμφωνία με το [47].

Στοχεύοντας στην επίλυση του (1), κάθε συνδεδεμένος χρήστης στην CDMA κυψέλη c υπολογίζει τη συνάρτηση Lagrange

$$\lambda_{c,i}^{\max} = \min \left\{ \lambda \geq 0 \mid \max_{0 \leq p_{c,i} \leq P_c^{\max}} \{U_i(r_{c,i}(p_{c,i}(t))) - \lambda p_{c,i}(t)\} = 0 \right\} \quad (3)$$

που μεγιστοποιεί την πραγματική χρησιμότητα του (δηλαδή τη χρησιμότητά του μείον το αντίστοιχο κόστος), που εν γένει αντιπροσωπεύει την μέγιστη χρησιμότητα του χρήστη i ανά μονάδα πόρων [45]. Έπειτα, ο χρονοπρογραμματιστής επιλέγει τους χρήστες I έως T να μεταδώσουν κατά φθίνουσα σειρά της μέγιστης επιθυμίας τους να «πληρώσουν», ικανοποιώντας την:

$$T = \arg \max_{1 \leq t \leq N} \left\{ \sum_{i=1}^t p_{c,i}(\lambda_{c,i}^{\max}) \leq P_c^{\max} \right\} \quad (4)$$

Στη συνέχεια, ο σταθμός βάσης χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο διχοτόμησης [45] υπολογίζει μία μοναδική τιμή ισορροπίας ανά μονάδα πόρων (equilibrium price per unit of resource), ορισμένη ως λ_c^* , που βελτιστοποιεί τον διαμοιρασμό πόρων στην κυψέλη c (δηλαδή παράγει το βέλτιστο διάνυσμα εκπέμπουσας ισχύος στη ζεύξη καθόδου) και τέλος το εκπέμπει στο ασύρματο κανάλι (broadcast). Οι χρήστες

αντίστοιχα, για τους οποίους ισχύει $\lambda_{c,i}^{\max} \geq \lambda^*$, μπορούν εύκολα να υπολογίσουν τους πόρους που θα τους ανατεθούν, σύμφωνα με το [45].

Διαισθητικά, το $\lambda_{c,i}^{\max}$ αντικατοπτρίζει την επιθυμία του χρήστη i να «πληρώσει» [45], [48], αναλογικά με την απόδοση της συνάρτησης χρησιμότητας που θα επιτύχει (ρυθμαπόδοση κάτω ζεύξης) δεδομένου του βέλτιστου διαμοιρασμού πόρων στην κυψέλη c . Συνεπώς, απεικονίζει την προτεραιότητα του χρήστη μεταξύ των άλλων χρηστών, (δηλαδή, όσο υψηλότερη είναι η τιμή $\lambda_{c,i}^{\max}$, τόσο υψηλότερη και η πιθανότητα ο χρήστης να ικανοποιήσει τα κριτήρια ΠτΥ όταν συνδεθεί στην κυψέλη c , και συνεπώς τόσο μεγαλύτερη η πιθανότητα να εξυπηρετηθεί τη χρονική στιγμή t σύμφωνα με την (4)). Τέλος, η τιμή ισορροπίας ανά μονάδα πόρων λ_c^* , απεικονίζει το επίπεδο συμφόρησης (δηλαδή χαμηλότερες τιμές του λ_c^* υποδεικνύουν μεγαλύτερη διαθεσιμότητα πόρων)

3.3.2. *Αυτόνομος ενδοκυψελικός διαμοιρασμός πόρων με χρήση βρόχων ελέγχου*

Ο αυτόνομος ενδοκυψελικός διαμοιρασμός πόρων πραγματοποιείται με τη βοήθεια δύο βρόχων ελέγχου που όπως απεικονίζεται παρακάτω στο Σχήμα 4 εδρεύουν στο σταθμό βάσης και στον κινητό κόμβο αντίστοιχα. (Πίνακας IV και Πίνακας V αντίστοιχα).

ΠΙΝΑΚΑΣ IV: Αυτόνομος Βρόχος Ελέγχου Σταθμού Βάσης για ARRM

Αυτόνομος Βρόχος Ελέγχου Σταθμού Βάσης για ARRM
Περιοδικά, σε κάθε χρονοσχισμή T_s για κυψέλες CDMA και κάθε χρονοπλαίσιο T_f για WLAN, ο βρόχος ελέγχου που βρίσκεται στον σταθμό βάσης πραγματοποιεί τα ακόλουθα βήματα:

Βήμα 1	Παρακολουθεί το περιβάλλον του και συλλέγει πληροφορίες που σχετίζονται με την ΠτΥ: α) τις απαιτήσεις ΠτΥ των χρηστών (δηλαδή U_i), β) την ποιότητα των καναλιών των χρηστών $G_{c,i} \forall i \in C_c$ και τα επίπεδα των συνολικών παρεμβολών $I_{c,i}$ (τρέχουσα συνολική πραγματική ρυθμαπόδοση C_c^{\max} του δικτύου c στην επίπτωση του WLAN).
Βήμα 2	Θέτει και λύνει το αντίστοιχο πρόβλημα βελτιστοποίησης βασισμένο σε συναρτήσεις χρησιμότητας όπως ορίζεται στο (1) (ή στο (2) στην περίπτωση WLAN).
Βήμα 3	Επικοινωνεί το υπολογισθέν βέλτιστο διάνυσμα κατανομής πόρων στους ενεργούς κόμβους του δικτύου.

ΠΙΝΑΚΑΣ V: Αυτόνομος Βρόχος Ελέγχου Κινητού Κόμβου για ARRM

Αυτόνομος Βρόχος Ελέγχου Κινητού Κόμβου για ARRM	
Κάθε κινητός κόμβος i ήδη συνδεδεμένος στο δίκτυο c , πραγματοποιεί τα παρακάτω βήματα:	
Βήμα 1	<i>Παρακολούθηση Πληροφοριών:</i> Παρακολουθεί την επίδοση της υπηρεσίας του (U_i) καθώς και τις περιβαλλοντικές συνθήκες, δηλαδή την ποιότητα του καναλιού $G_{c,i}$ (ή τη συνολική πραγματική ρυθμαπόδοση C_c^{\max} για τα WLAN)..
Βήμα 2	<i>Ανάλυση Πληροφοριών:</i> Υπολογίζει την τρέχουσα επιθυμία του να «πληρώσει» $\lambda_{c,i}^{\max}$ σύμφωνα με το (3)
Βήμα 3	<i>Λήψη Απόφασης προς την Αυτό-Βελτιστοποίηση:</i> Αλληλεπιδρά με το σταθμό βάσης c προκειμένου να προσδιοριστεί η τιμή ισοροπίας της κυψέλης λ_c^* . Έπειτα: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Εάν $\lambda_{c,i}^{\max} < \lambda_c^*$, ο χρήστης δεν επιλέγεται να μεταδώσει (4) και συνεπώς, πυροδοτεί τον μηχανισμό επιλογής δικτύου πρόσβασης προκειμένου να πραγματοποιήσει μία μεταπομπή λόγω γεγονότων ΠτΥ. ▪ Διαφορετικά, υπολογίζει τους πόρους που θα του ανατεθούν

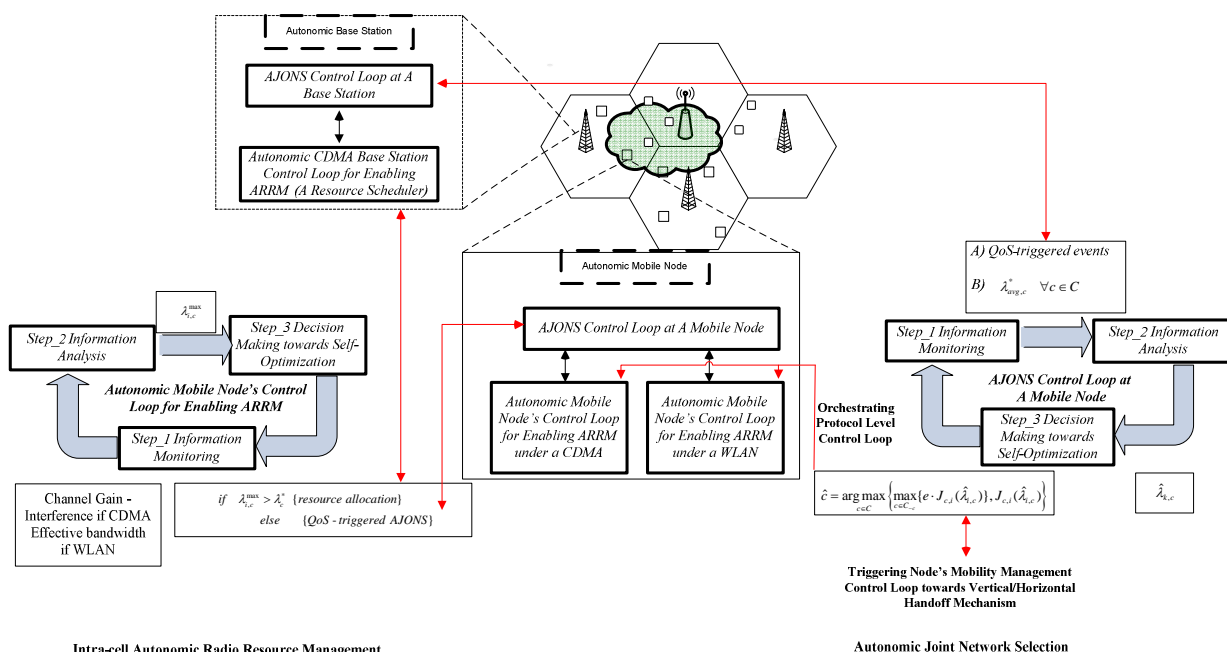
Η υλοποίηση βρόχων ελέγχου που καθοδηγούν τους μηχανισμούς διαχείρισης πόρων των κόμβων αλλά και των σταθμών βάσης, επιτυγχάνει τον εμπλουτισμό τους με χαρακτηριστικά αυτό-βελτιστοποίησης και διαχειρισιμότητας. Επιπλέον,

δεδομένης της ετερογένειας του ασύρματου περιβάλλοντος όσον αφορά τα διαθέσιμα δίκτυα πρόσβασης, τις ποικίλες απαιτήσεις ΠτΥ, και των διαφορετικού τύπου υπηρεσιών, βρόχοι ελέγχου που πραγματοποιούν διαφορετικές διεργασίες πρέπει να συνυπάρχουν και να συνεργάζονται προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος του βέλτιστου διαμοιρασμού πόρων και ικανοποίησης κριτηρίων ΠτΥ. Η υλοποιησιμότητα αυτού, εξαρτάται από έναν ανώτερο στην ιεραρχία βρόχο ελέγχου, με επιπλέον υπευθυνότητες, ο οποίος θα διαχειρίζεται τη λειτουργία ενός συνόλου από κατώτερους στην ιεραρχία βρόχους ελέγχου μέσα σε ένα κινητό κόμβο. Η λειτουργία, υποχρεώσεις, οι στόχοι και οι αλγόριθμοι που διέπουν την λειτουργία τέτοιων κόμβων εξετάζονται στην επόμενη παράγραφο.

3.4. Αυτόνομος Διακυβελικός Μηχανισμός Επιλογής Δικτύου (AJONS)

3.4.1. Στόχος και λειτουργία

Η ιδέα πίσω από τον προτεινόμενο μηχανισμό Αυτόνομου Διακυβελικού Μηχανισμού Επιλογής Δικτύου (Autonomic JOint Network Selection mechanism - AJONS) συνοψίζεται στην ελεύθερη επιλογή των χρηστών με ένα αυτόνομο και ασύγχρονο τρόπο, του σημείου πρόσβασης στο δίκτυο καθώς εισέρχονται σε αυτό ή πραγματοποιούν κάποια μεταπομπή σχετιζόμενη σε γεγονότα ΠτΥ, εκμεταλλευόμενοι μόνο ήδη διαθέσιμη πληροφορία από τους γειτονικούς σταθμούς βάσης τους. Η λειτουργία του προτεινόμενου μηχανισμού εξασφαλίζει την ικανοποίηση των κριτηρίων ΠτΥ των χρηστών, καθώς και τη μεγιστοποίηση του μέσου κέρδους του δικτύου, επιτυγχάνοντας ταυτόχρονα συνολική εξισορρόπηση του φόρτου εργασίας μετρούμενη σε δείκτες χρησιμότητας χρηστών. Με άλλα λόγια, στοχεύουμε στην εξισορρόπηση της μέσης απασχόλησης των κυψελών του συστήματος, καθοδηγώντας τους χρήστες σε κυψέλες με μικρότερη χρησιμοποίηση.



Σχήμα 4: Αυτόνομη ενδοκυβελική διαχείριση πόρων & Αυτόνομος Διακυβελικός Μηχανισμός Επιλογής (AJONS).

Το πρώτο βήμα προς αυτόν τον στόχο, είναι να επιτρέψουμε στους χρήστες να κατέχουν συμπαγή, ποσοτικοποιημένη και κανονικοποιημένη πληροφορία σχετικά με την κατάσταση των κυψελών που είναι διαθέσιμες στην γειτονιά τους, όσον αφορά τους διαθέσιμους πόρους, το επίπεδο συμφόρησης και τη δυνατότητα ικανοποίησης των κριτηρίων ΠτΥ. Για αυτό το λόγο, επωφελούμαστε από τη χρήση της παραμέτρου ισορροπίας ανά μονάδα πόρων λ^* , που εκφράζει με ένα κανονικοποιημένο και μοναδικό τρόπο τις παραπάνω μετρικές, καθώς προκύπτει από την επίλυση του ενδοκυβελικού προβλήματος διαμοιρασμού πόρων (διαισθητικά αναφέρεται στο [45] και εφαρμόζεται στο [48]). Απεναντίας, όπως προαναφέρθηκε, τόσο στο CDMA, όσο και στο WLAN, οι ARRM μηχανισμοί θέτουν και λύνουν τα αντίστοιχα προβλήματα περιοδικά σε μικρά χρονικά διαστήματα (δηλαδή, T_s και T_f αντίστοιχα), προκειμένου να εκμεταλλευτούν την βραχυπρόθεσμη διαφοροποίηση των χρηστών. Μια τέτοια σχεδιαστική ιδιότητα όμως, μας εμποδίζει από την άμεση αξιοποίηση της στιγμιαίας τιμής λ^* , λόγω της ανεπιθύμητης ευαισθησίας της σε

βραχυπρόθεσμες μεταβολές, καθώς θα οδηγούσε σε συχνές και πυκνές εναλλαγές του σημείου πρόσβασης των χρηστών και τελικώς στην εμφάνιση ανεπιθύμητων φαινομένων πινγκ-πονγκ.

Προκειμένου να υπερπηδήσουμε αυτό το πρόβλημα, απαιτούμε, παράλληλα με την κανονική λειτουργία των μηχανισμών ARRM, την επανεπίλυση των προβλημάτων ανάθεσης πόρων σε CDMA και WLAN δίκτυα όπως ορίζονται στα (1) και (2) σε μεγαλύτερες περιόδους, γνωστές ως χρονόπλαίσια AJONS T_{AJONS} , που ορίζονται ως $T_{AJONS} = M \cdot \max(T_s, T_f), M \in \mathbb{N}$. Διαμέσου τέτοιων περιόδων, υπολογίζονται οι εκθετικοί μέσοι των χαρακτηριστικών του συστήματος (π.χ. το κέρδος καναλιού του χρήστη) και εισάγονται στα προβλήματα (1) και (2). Όσο μικρότερη είναι η τιμή του M , τόσο πιο ευαίσθητος είναι ο μηχανισμός AJONS σε βραχυπρόθεσμες αλλαγές του περιβάλλοντος. Η ομαλοποίηση δυναμικά μεταβαλλόμενων παραμέτρων συστήματος με χρήση του εκθετικού μέσου όρου εφαρμόζεται τακτικά στην διαχείριση πόρων ασύρματων συστημάτων πολλαπλών κυψελών [15]. Η υπολογιζόμενη μέση τιμή ισορροπίας ανά μονάδα πόρων λ^* , οριζόμενη ως λ_{avg}^* , μπορεί συνεπώς να αντανakλά αποδοτικά τη μακροπρόθεσμη συμφόρηση της κυψέλης και των περιβαλλοντικών συνθηκών και εν τέλει να χρησιμοποιηθεί σαν ένας δείκτης κατάστασης του δικτύου.

Σύμφωνα με τα προηγούμενα, καθώς το σύστημα εξελίσσεται, περιοδικά κάθε T_{AJONS} , κάθε σταθμός βάσης λύνει το πρόβλημα (1) στην περίπτωση μιας CDMA κυψέλης και το (2) στην περίπτωση ενός WLAN κελιού, υπολογίζοντας τους ήδη συνδεδεμένους χρήστες του και θεωρώντας τον εκθετικό μέσο όρο των τιμών των χαρακτηριστικών μεταβλητών των κινητών κόμβων και των κυψελών αντιστοίχως. Εν συνεχεία, η μέση τιμή ισορροπίας ανά μονάδα πόρων $\lambda_{avg,c}^*$ για κάθε κυψέλη c προωθείται μέσω ευρεσκομπής στους κινητούς κόμβους. Κάθε αυτόνομος κόμβος i ,

είτε εισερχόμενος στο σύστημα είτε αντιδρώντας σε κάποιο γεγονός σχετιζόμενο με την ΠτΥ υπολογίζει ασύγχρονα και δυναμικά, για κάθε διαθέσιμη κυψέλη στην περιοχή κάλυψής του την μέγιστη επιθυμία του να «πληρώσει» ανά μονάδα πόρων $\lambda_{c,i}^{\max}$ που θα αποκτούσε εάν επέλεγε τη κυψέλη c για να συνδεθεί. Συνεπώς, κάθε χρήστης i γνωρίζει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για να υπολογίσει για κάθε κυψέλη c στην γειτονιά του τον κανονικοποιημένο δείκτη $\hat{\lambda}_{c,i}$, όπως ορίζεται:

$$\hat{\lambda}_{c,i} = \begin{cases} \frac{\lambda_{c,i}^{\max} - \lambda_{avg,c}^*}{\lambda_{avg,c}^*} & \text{if } \lambda_{c,i}^{\max} \geq \lambda_{avg,c}^* \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

Καθώς το $\lambda_{c,i}^{\max}$ μπορεί να μεταφραστεί σαν την μέγιστη τιμή ανά μονάδα πόρων που ο χρήστης i είναι διατεθειμένος να «πληρώσει» στην κυψέλη c και το $\lambda_{avg,c}^*$ σαν την μακροπρόθεσμη τιμή ανά μονάδας πόρων στην κυψέλη c , τότε το $\hat{\lambda}_{c,i}$ μπορεί να μεταφραστεί σαν το κανονικοποιημένο κέρδος ανά μονάδα πόρων που θα αποκτούσε ο χρήστης i εάν επέλεγε τη κυψέλη c για να συνδεθεί. Εν συνεχεία, ο κόμβος επιλέγει την κυψέλη \hat{c} που τελικά θα συνδεθεί σύμφωνα με την ακόλουθη πολιτική.

$$\hat{c} = \arg \max_{c \in \mathcal{C}} \left\{ \max_{c \in \mathcal{C}_c} \{e \cdot J_{c,i}(\hat{\lambda}_{c,i})\}, J_{c,i}(\hat{\lambda}_{c,i}) \right\} \quad (6)$$

όπου $J_{c,i}$, είναι μία μη-αρνητική, αύξουσα, κοίλη συνάρτηση του $\hat{\lambda}_{c,i}$ και εισάγεται για να αντικατοπτρίσει (στην στρατηγική επιλογής δικτύου) διάφορους παραμέτρους του δικτύου, ή για να επιτρέψει στους παρόχους να επιβάλουν πολιτικές σχετικά με την χρέωση, τις προτεραιότητες πρόσβασης χρηστών και υπηρεσιών, καθώς και πολιτικές αποφυγής συμφόρησης. Για παράδειγμα, για να εισάγουμε διάφορες τιμολογιακές πολιτικές ανά τύπο δικτύου, η συνάρτηση $J_{c,i}$ μπορεί να οριστεί ως $J_{c,i}(\hat{\lambda}_{c,i}) = F_{c,i} \hat{\lambda}_{c,i}$ όπου το $F_{c,i}$ καθορίζει το κανονικοποιημένο κόστος της υπηρεσίας

σύμφωνα με τον τύπο της κυψέλης c . Επιπλέον, το e ($0 \leq e \leq 1$) αποτελεί το δείκτη ευαισθησίας που εισάγεται για να αντιμετωπίσει ανεπιθύμητα περιστατικά πινγκ-πονγκ. Διαισθητικά, όσο χαμηλότερη είναι η τιμή της μεταβλητής e τόσο πιο ανεκτός στα γεγονότα που σχετίζονται με την ΠτΥ εξελίσσεται ο χρήστης.

Η ιδέα πίσω από την προτεινόμενη μέθοδο επιλογής δικτύου είναι διπλή. Από την προοπτική του δικτύου, όσο μεγαλύτερη είναι η συμφόρηση της κυψέλης, τόσο υψηλότερη θα είναι η τιμή ισορροπίας ανά μονάδα πόρων $\lambda_{avg,c}^*$ και συνεπώς θα αποθαρρύνει ή και θα αποτρέπει ένα χρήστη από το να επιλέξει το συγκεκριμένο δίκτυο. Μία τέτοια συμπεριφορά θα οδηγήσει τελικά σε ένα ισορροπημένο από πλευράς φορτίου ενοποιημένο σύστημα. Από την προοπτική του χρήστη, όσο υψηλότερη είναι η ικανοποίησή του σύμφωνα με τη συνάρτηση χρησιμότητας του (δηλαδή η επίδοση της ΠτΥ) από την επιλογή του να συνδεθεί σε μία κυψέλη, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η μέγιστη επιθυμία του να «πληρώσει» ($\lambda_{c,i}^{max}$) για τη συγκεκριμένη υπηρεσία, παρακινώντας τον να επιλέξει το πιο κερδοφόρο δίκτυο για να συνδεθεί.

Ακολουθώντας περιγράφουμε τη λειτουργία δύο βρόχων ελέγχου, οι οποίοι υλοποιούν την παραπάνω κατανομημένη ασύγχρονη σεβόμενη την ΠτΥ επιλογή δικτύου πρόσβασης.

3.4.2. Σχεδιασμός και υλοποίηση

Ακολουθώντας μια τέτοια προσέγγιση, προχωράμε ένα βήμα παραπέρα όχι μόνο από τους παραδοσιακούς κεντρικοποιημένους δικτυακούς μηχανισμούς διαχείρισης μεταπομπών, αλλά και από τους σύγχρονους μηχανισμούς μεταπομπών οδηγούμενων από τον κινητό κόμβο. Με απλά λόγια, και όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4, ο προτεινόμενος ασύγχρονος διακυβελικός μηχανισμός επιλογής δικτύου υλοποιείται

μέσω δύο ασύγχρονων βρόχων ελέγχου. Οι αυτόνομοι κινητοί κόμβοι σε *συμβάντα σχετιζόμενα με την ΠτΥ*, (δηλαδή, πυροδοτούμενα είτε από τον *Βρόχο Ελέγχου Διαχείρισης Κινητικότητας*, είτε από τον *Βρόχο Ελέγχου ARRM*) και διαμέσου του **Βρόχου Ελέγχου AJONS** (δεξί κομμάτι στο Σχήμα 4) συγκεντρώνουν τις περιοδικά εκπεμπόμενες τιμές $\lambda_{avg,c}^*$ από τους Σταθμούς Βάσης στη γειτονιά τους, και έπειτα πραγματοποιούν με ένα ασύγχρονο τρόπο την απόφαση πρόσδεσης τους σύμφωνα με τις (5) και (6). Από την άλλη μεριά, κάθε σταθμός βάσης, ενεργεί μόνο υποστηρικτικά, λύνοντας περιοδικά το ενδοκυψελικό πρόβλημα διαχείρισης πόρων (χρησιμοποιώντας εκθετικά μέσες τιμές) και μεταδίδοντας τις τιμές $\lambda_{avg,c}^*$, κατευθύνοντας τις αυτόνομες συμπεριφορές των κινητών χρηστών. Η παραπάνω λειτουργία συνοψίζεται στους Πίνακες VI και VII για τον Σταθμό Βάσης και τον αυτόνομο κινητό κόμβο αντίστοιχα.

ΠΙΝΑΚΑΣ VI: Υποστηρικτικός Βρόχος Ελέγχου AJONS στο Σταθμό Βάσης

Υποστηρικτικός Βρόχος Ελέγχου AJONS στο Σταθμό Βάσης	
Βήμα 1	<p>Περιοδικά, σε κάθε T_{AJONS}, τίθενται και επιλύονται για κάθε κυψέλη c τα φραγμένα μη-κυρτά προβλήματα βέλτιστης ανάθεσης πόρων βασισμένα σε συναρτήσεις χρησιμότητας των χρηστών, όπως ορίζονται στα (1) και (2) χρησιμοποιώντας για μια περίοδο T_{AJONS} τους εκθετικούς μέσους όρους των παραμέτρων των ήδη συνδεδεμένων χρηστών, προσδιοριζόμενοι ως:</p> <p>Για CDMA κυψέλες $c, \forall c \in C_c$:</p> $\bar{G}_{c,i}(t) = (1-w)\bar{G}_{c,i}(t-1) + wG_{c,i}(t)$ <p>Για WLAN $c, \forall c \in C_c$:</p> $\bar{C}_c^{\max}(t) = (1-w)\bar{C}_c^{\max}(t-1) + wC_c^{\max}(t)$ <p>Όπου $t = T_s, T_s + 1, \dots, T_{AJONS}$ και το $0 < w < 1$ είναι ένας εκθετικός παράγοντας εξομάλυνσης.</p>
Βήμα 2	<p>Μεταδίδεται η τιμή ισορροπίας ανά μονάδα πόρων $\lambda_{avg,c}^*$ στους αυτόνομους κόμβους/χρήστες στην κυψέλη</p>

ΠΙΝΑΚΑΣ VII: Βρόχος Ελέγχου AJONS στον Κινητό Κόμβο

Βρόχος Ελέγχου AJONS στον Κινητό Κόμβο	
Βήμα 1	Ελέγχει συνεχώς την επίδοση της υπηρεσίας του χρήστη και αντιδρά σε γεγονότα σχετιζόμενα με την ΠτΥ (πυροδοτούμενα από το Βήμα 3 είτε του Βρόχου Ελέγχου ARRM στον Κινητό Κόμβο ή του Βρόχου Ελέγχου Διαχείρισης Κινητικότητας).
Βήμα 2	Αποκτά τις τιμές ισορροπίας ανά μονάδα πόρων $\lambda_{avg,c}^* \forall c \in C_c$, για όλες τις κυψέλες στην γειτονιά του από τους αντίστοιχους σταθμούς βάσης
Βήμα 3	Υπολογίζει το κανονικοποιημένο κέρδος ανά μονάδα πόρων $\hat{\lambda}_{c,i}$ για κάθε κυψέλη στη γειτονιά του σύμφωνα με την (5), και επιλέγει το πιο κερδοφόρο δίκτυο να συνδεθεί σύμφωνα με την (6).
Βήμα 4	Μεταδίδει την επιλογή του σε βρόχους ελέγχου κατώτερων επιπέδων για να πραγματοποιηθεί η μεταπομπή.

3.5. Εφαρμόζοντας τον μηχανισμό AJONS σε Δίκτυα OFDMA

Επεκτείνοντας και εφαρμόζοντας το προτεινόμενο πλαίσιο ώστε να είναι συμβατό και να υποστηρίζει το πρότυπο 3GPP LTE, απαιτείται να σχεδιασθεί ένας κατάλληλος βέλτιστος μηχανισμός διαχείρισης της διαδικασίας διαμοιρασμού πόρων σε Κυψελωτά Δίκτυα βασισμένα στην Διαίρεση Συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiple Access – OFDMA), που να συνάδει με τις σχεδιαστικές φιλοσοφίες του AJONS. Προς αυτό το στόχο, υιοθετούμε τη μεθοδολογία που προτείνεται στο [49], όπου το πρόβλημα της ανάθεσης πόρων σε ένα OFDMA σύστημα μοντελοποιείται ως ένα NUM πρόβλημα και αντιμετωπίζεται με χρήση μεθόδων χαλάρωσης Lagrange (Lagrange relaxation) των περιορισμών χωρητικότητας, παρόμοια με το (1). Ακολουθώντας μια προσέγγιση δύο βημάτων, σε κάθε χρονοσχισμή, σε κάθε OFDMA κυψέλη c , ο αλγόριθμος υπολογίζει την βέλτιστη τιμή ισορροπίας ανά μονάδα πόρων λ_c^* , (Proposition 3 στο [49]), η οποία διαισθητικά υποδηλώνει την κατάσταση του δικτύου σε σχέση με την τρέχουσα συμφόρηση του

και τους διαθέσιμους πόρους. Έπειτα, για κάθε χρήστη i , ο αλγόριθμος υπολογίζει για κάθε υποφέρουσα (συχνότητα) j , την τιμή $\mu_{i,j,c}$, που εκφράζει την επιθυμία του χρήστη i να «πληρώσει» ώστε να χρησιμοποιήσει την υποφέρουσα j για να λάβει δεδομένα. Τελικά και σύμφωνα με τις προηγούμενες πληροφορίες, επιτυγχάνεται ο βέλτιστος διαμοιρασμός των πόρων.

Εξασφαλίζοντας την αποδοτική λειτουργία του παραπάνω μηχανισμού με τον AJONS, ορίζουμε την μέγιστη επιθυμία του χρήστη i να πληρώσει, $\lambda_{c,i}^{\max}$, για κάθε μονάδα πόρων που ανατίθεται σε αυτόν (δηλαδή, τις υποφέρουσες και την αντίστοιχη ισχύ) ως:

$$\lambda_{c,i}^{\max} = \frac{\sum_{j \in N_{i,j,c}} \mu_{i,j,c}}{\lambda_c^*} \quad (7)$$

όπου το $N_{i,j,c}$ καθορίζει τον αριθμό των υποφερουσών που ανατέθηκαν στο χρήστη i . Συνεπώς, το $\lambda_{c,i}^{\max}$ αντιστοιχεί στην κανονικοποιημένη τιμή, σε σχέση με τις υποφέρουσες που επιλέχθηκαν, την οποία ο χρήστης i επιθυμεί να πληρώσει για να αποκτήσει πρόσβαση στους αντίστοιχους πόρους του δικτύου.

Τελικά και δεδομένων των παραπάνω ο χρήστης i μπορεί να υπολογίσει τη τιμή του κανονικοποιημένου κέρδους ανά μονάδα πόρων $\hat{\lambda}_{c,i}$ και για OFDMA κυψέλες σύμφωνα με την (5) και να εφαρμόσει το Βρόχο Ελέγχου AJONS.

3.6. Λειτουργικά χαρακτηριστικά και Πρακτικότητα

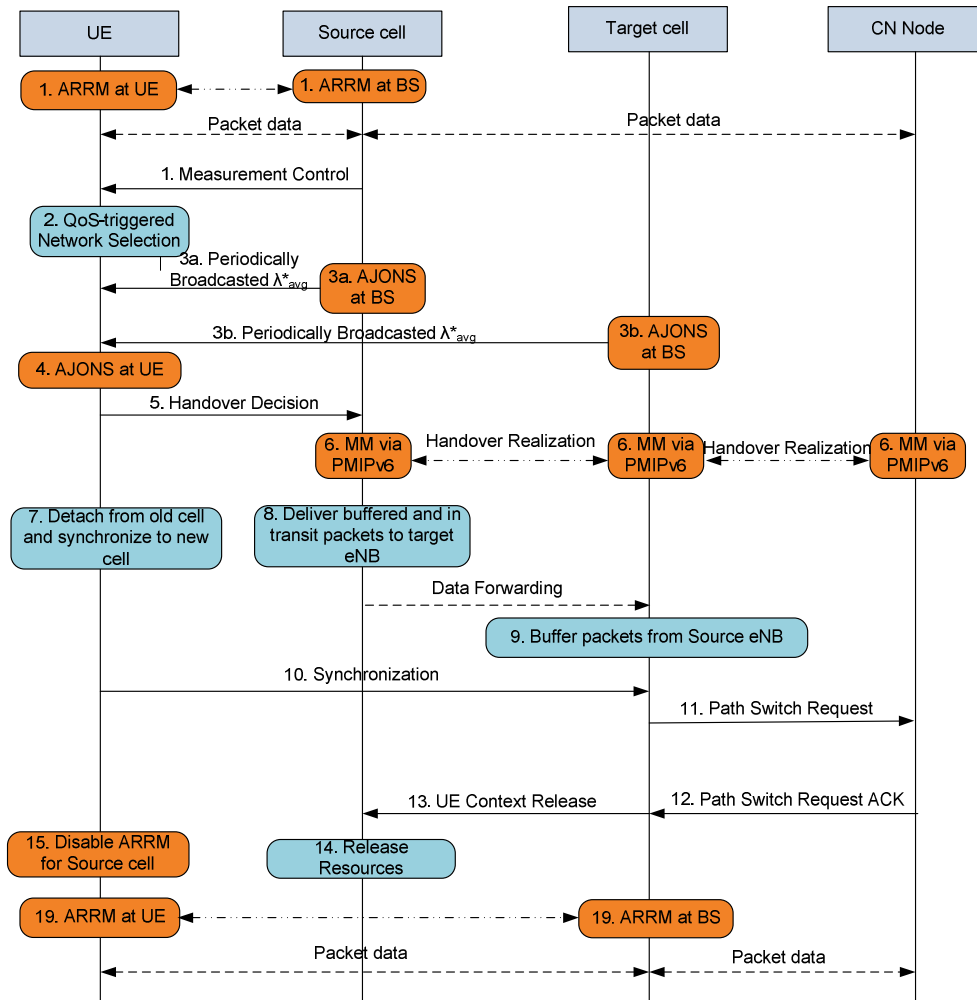
3.6.1. Ασύγχρονη Λειτουργία

Είναι αναγκαίο να υπογραμμίσουμε πως στην προτεινόμενη αρχιτεκτονική, ο ρόλος του Σταθμού Βάσης είναι μόνο υποστηρικτικός (δηλαδή να μεταδίδει περιοδικά την τιμή $\lambda_{avg,c}^*$). Η εκκίνηση διαδικασιών μεταπομπής και οι διαδικασίες

επιλογής δικτύου πρόσβασης πραγματοποιούνται αποκλειστικά από τον κινητό κόμβο με ένα ασύγχρονο και αυτόνομο τρόπο, στοχεύοντας στην αυτό-βελτιστοποίηση. Μια τέτοια σχεδιαστική ιδιότητα, όχι μόνο περιορίζει το φόρτο της σηματοδοσίας συγκρινόμενα με πιο κεντροκοιμημένες αρχιτεκτονικές, αλλά πιο σημαντικά, στηρίζει και αποδεικνύει την κλιμακοθετησιμότητα του σχήματος, καθώς δεν απαιτεί κανένα συγκεντρωτικό κόμβο λήψης αποφάσεων.

3.6.2. Πολυπλοκότητα

Η υπολογιστική πολυπλοκότητα και των δύο βρόχων ελέγχου AJONS είναι χαμηλή. Ειδικότερα, επικεντρώνοντας στο Βρόχο Ελέγχου AJONS του κινητού κόμβου, και λαμβάνοντας υπόψη τις περιορισμένες υπολογιστικές δυνατότητες κινητών συσκευών, ο προτεινόμενος αλγόριθμος πραγματοποιεί μόνο λίγες πράξεις πραγματικών αριθμών σύμφωνα με τις (5) και (6). Επιπλέον, ο κινητός κόμβος απαιτείται να αποθηκεύει στην εσωτερική του μνήμη μόνο μερικούς πραγματικούς αριθμούς οι οποίοι εξαρτώνται από τον αριθμό των κυψελών που βρίσκονται στην γειτονιά του. Εξετάζοντας τον Βρόχο Ελέγχου AJONS στο σταθμό βάσης, η συνολική πολυπλοκότητα έγκειται αποκλειστικά στην πολυπλοκότητα των αλγορίθμων που λύνουν τα προβλήματα (1) και (2), όπως περιγράφεται στα [45] και [47]. Υποθέτοντας πως η επίλυση τέτοιων προβλημάτων υλοποιείται για την ανεύρεση λύσης στο πρόβλημα του βέλτιστου ενδοκυψελικού διαμοιρασμού πόρων, η επιπλέον πολυπλοκότητα που εισάγει το AJONS είναι σχεδόν μηδαμινή.



Σχήμα 5: Ακολουθιακό διάγραμμα της προτεινόμενης τροποποιημένης 3GPP LTE διαδικασίας μεταπομπών

3.6.3. Αρραγής Υιοθέτηση

Στο Σχήμα 5, παρουσιάζεται ένα ακολουθιακό διάγραμμα των επιπλέον λειτουργιών και της προστιθέμενης σηματοδοσίας που απαιτείται για την ενσωμάτωση της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής (χρωματισμένα με πορτοκαλί) στους υπάρχοντες σύγχρονους μηχανισμούς μεταπομπών του 3GPP LTE [3] (χρωματισμένα με μπλε). Όπως αναλύθηκε στην Παράγραφο 3.2 και περιγράφεται στο Σχήμα 5, όλη η απαιτούμενη σηματοδοσία ενσωματώνεται στις κεφαλίδες της ήδη υπάρχουσας σηματοδοσίας του PMIPv6. Συνεπώς η αρραγής ενοποίηση και εναρμόνιση των λειτουργιών του AJONS με την τρέχουσα αρχιτεκτονική του 3GPP μπορεί να

διεκπεραιωθεί, εκπληρώνοντας το όραμα μιας ενιαίας αυτόνομης αρχιτεκτονικής όπου η διαχειριστική ευφυΐα πηγάζει από τους κινητούς κόμβους.

3.7. Αριθμητικά Αποτελέσματα

Σε αυτή τη παράγραφο, παραθέτουμε αριθμητικά αποτελέσματα που απεικονίζουν τα λειτουργικά χαρακτηριστικά και τις επιδόσεις του προτεινόμενου μηχανισμού διαμοιρασμού πόρων και επιλογής δικτύου (ARRM AJONS) συγκριτικά με άλλα σχήματα που έχουν προταθεί στην βιβλιογραφία. Προς αυτό το στόχο, αναπτύξαμε ένα μοντέλο προσομοίωσης σε MATLAB για να αξιολογήσουμε την επίδοση WLAN-CDMA (3GPP2) συστημάτων, αλλά και WLAN-OFDMA (3GPP) συστημάτων. Να σημειωθεί πως για λόγους δικαιοσύνης στην αξιολόγηση των μηχανισμών, ο βέλτιστος ενδοκυβελικός διαμοιρασμός πόρων (σε CDMA, OFDMA ή WLAN δίκτυα) επιτυγχάνεται σε κάθε περίπτωση χρησιμοποιώντας τον ίδιο μηχανισμό ARRM.

Μοντελοποιούμε το κέρδος καναλιού από τον κυβελωτό σταθμό βάσης στον χρήστη i ως $G_i = K_i/s_i^n$, όπου s_i είναι η απόσταση του χρήστη i από το σταθμό βάσης, n ο παράγοντας απώλειας καναλιού ($n=4$) και K_i είναι μια λογαριθμοκανονικά κατανεμημένη μεταβλητή με μηδενικό μέσο όρο και διακύμανση $\sigma^2 = 8(dB)$ [16]. Όσον αφορά το WLAN, το σημείο πρόσβασης είναι τοποθετημένο στο κέντρο της περιοχής κάλυψης και λειτουργεί στα $5GHz$ με μέγιστο θεωρητικό ρυθμό μετάδοσης τα $54Mbit/s$. Η πραγματική ρυθμαπόδοση του WLAN, C_{max} υπολογίζεται δυναμικά για κάθε σύνολο ενεργών κόμβων χρησιμοποιώντας έναν προσομοιωτή που υλοποιεί τους μηχανισμούς ανταγωνισμού, πρόσβασης μέσου και μετάδοσης του προτύπου IEEE 802.11e. Τέλος, για λόγους επίδειξης, τίθεται $J_{c,i}(\hat{\lambda}_{c,i}) = \hat{\lambda}_{c,i}$, $e=0.7$ και $M=1$.

Περιοδικά, νέοι χρήστες εισέρχονται στο δίκτυο στην επικαλυπτόμενη περιοχή (με ρυθμό $1/T_{ALONS}$) ζητώντας υπηρεσίες Πραγματικού Χρόνου (Real Time - RT) και Μη-Πραγματικού Χρόνου (Non-Real Time - NRT) ενώ κινούνται με τυχαίο τρόπο προς όλες τις κατευθύνσεις με τυχαίες ταχύτητες. Χρησιμοποιούμε την παρακάτω ραγδαίως αυξανόμενη σιγμοειδή συνάρτηση για να αναπαραστήσουμε μία συνεχούς ρυθμού μετάδοσης (π.χ. φωνή ή ροή βίντεο) υπηρεσία πραγματικού χρόνου,

$$U_i(r_i) = m \left\{ \frac{1}{1 + e^{-a(r_i - p)}} - d \right\}, \text{ όπου για λόγους κανονικοποίησης θέτουμε } m = \frac{(1 + e^{ap})}{e^{ap}}$$

και $d = \frac{1}{1 + e^{ap}}$ (έτσι ώστε $U(0) = 0$ και $U(\infty) = 1$ αντίστοιχα), ενώ θέτουμε επίσης $a=3$ και $p=3$, σύμφωνα με το [45]. Επίσης, για την απεικόνιση υπηρεσιών μη-πραγματικού χρόνου, υιοθετούμε την κοίλη συνάρτηση $U_i(r_i) = 1 - \exp(-gr_i)$, με $g=0.8$, που διαισθητικά αντιστοιχεί με μια υπηρεσία βέλτιστης προσπάθειας, υψηλών απαιτήσεων ρυθμαπόδοσης

Προκειμένου να απεικονίσουμε ξεκάθαρα την επίδοση του προτεινόμενου μηχανισμού αυτόνομης επιλογής δικτύου και μεταπομπής παρακινούμενων από γεγονότα σχετιζόμενα με την ΠτΥ, σε σχέση με την συνολική απόδοση των συναρτήσεων χρησιμότητας των χρηστών, συγκρίνουμε την προτεινόμενη αρχιτεκτονική με άλλες τέσσερις πολιτικές επιλογής δικτύου. Η πρώτη, χρησιμοποιεί την ποιότητα του λαμβανόμενου σήματος για να αποφασίσει την κυψέλη που πρέπει να προσδεθεί, και θα αναφερόμαστε σε αυτή ως RSS (Radio Signal Strength) [30]. Η δεύτερη, επονομαζόμενη Αυτόνομη Διαφοροποίηση Υπηρεσιών (Autonomic Service Differentiation – ASDiff), εφαρμόζει μία αυτόνομη πολιτική επιλογής σύμφωνα με το [5], όπου οι RT χρήστες επιλέγουν αυτόνομα το προσδεθούν στο κυψελωτό CDMA (OFDMA) δίκτυο, ενώ οι NRT επιλέγουν το WLAN. Το τρίτο σχήμα, ακολουθεί μια

αυτόνομη πολιτική επιλογής πολλαπλών κατωφλίων που παρουσιάζεται στο [50] και θα αναφερόμαστε σε αυτήν ως AUtonomic HandOver - AUHO, Συγκεκριμένα, η επιλογή δικτύου πραγματοποιείται αυτόνομα από τους κινητούς χρήστες χρησιμοποιώντας ένα σταθμισμένο συνδυασμό πληροφοριών περιβάλλοντος (δηλαδή, ποιότητα σήματος, είδος δικτύου, φόρτος εργασίας), προτιμήσεων χρήστη (δηλαδή χρεώσεις) και απαιτήσεις της υπηρεσίας. Επίσης, προκειμένου να επιδείξουμε τα οφέλη της ασύγχρονα πυροδοτούμενης μεταπομπής λόγω γεγονότων ΠτΥ, συγκρίνουμε την προτεινόμενη αρχιτεκτονική μας με το σχήμα NSA-INS (Network Selection Algorithm - Initial Network Selection) [51], το οποίο πραγματοποιεί μόνο αρχική επιλογή δικτύου κατά την είσοδο του χρήστη στο σύστημα ακολουθώντας παρόμοιες αρχές με τον AJONS, ωστόσο κάθετες μεταπομπές δεν επιτρέπονται καθόλη τη διάρκεια της υπηρεσίας.

3.7.1. Ενοποιημένο WLAN-CDMA σύστημα (Η περίπτωση του 3GPP2)

Θεωρούμε ένα ενοποιημένο CDMA και WLAN (IEEE 802.11e) σύστημα, με μία κυψέλη CDMA, και ένα WLAN δίκτυο μερικώς επικαλυπτόμενο από την περιοχή κάλυψης του CDMA, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1. Ο σταθμός βάσης της CDMA κυψέλης θεωρούμε ότι βρίσκεται στο κέντρο και η μέγιστη ισχύς εκπομπής του είναι $P_c^{\max} = 10W$. Επιπλέον υποθέτουμε πως το εύρος ζώνης εξάπλωσης είναι $W=10$ (MHz) και ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης της κάτω ζεύξης των χρηστών είναι $R_{F,i} = 2 \cdot 10^3$ kbps.

Το Σχήμα 6 απεικονίζει την μέση χρησιμότητα του ενοποιημένου συστήματος που επιτυγχάνεται για τα σχήματα AJONS, NSA-INS, RSS, AUHO και ASDiff, όπου κάθε σημείο της καμπύλης αντιστοιχεί στον συγκλίνον μέσο της απόδοσης των συναρτήσεων χρησιμότητας ανά χρονικά παράθυρα των 10 δευτερολέπτων. Να

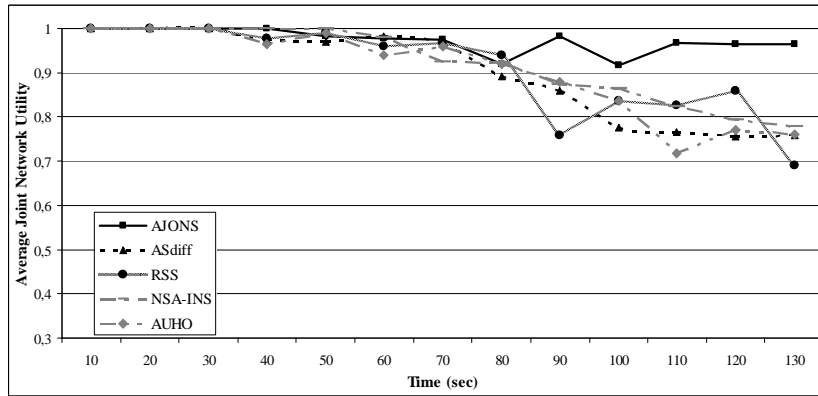
σημειωθεί πως καθώς το σύστημα εξελίσσεται, νέοι χρήστες εισέρχονται στο σύστημα αυξάνοντας το συνολικό φόρτο του δικτύου και συνεπώς μειώνουν τη μέση απόδοση του. Το Σχήμα 6 δείχνει πως το προτεινόμενο αυτόνομο σχήμα υπερνικά όλες τις παραδοσιακές εναλλακτικές όσον αφορά τη συνολική απόδοση, καθώς το σύστημα εξελίσσεται και νέοι χρήστες εξυπηρετούνται.

Επιπλέον, ο δείκτης κανονικοποιημένου κέρδους ανά μονάδα πόρων ($\hat{\lambda}$) που εισάγει το σχήμα ARRM - AJONS όχι μόνο εκφράζει δικτυακά χαρακτηριστικά απόδοσης και των δύο τύπων δικτύου, (δηλαδή επίπεδα συμφόρησης, διαθέσιμοι πόροι και ποιότητα καναλιού), αλλά μπορεί επίσης να αντικατοπτρίσει τις απαιτήσεις κριτηρίων ΠτΥ των χρηστών, κατευθύνοντας τους στην λήψη της βέλτιστης απόφασης πρόσδεσης, στοχεύοντας ταυτόχρονα στην ικανοποίηση των κριτηρίων ΠτΥ και στην συνολική εξισορρόπηση του φόρτου εργασίας.

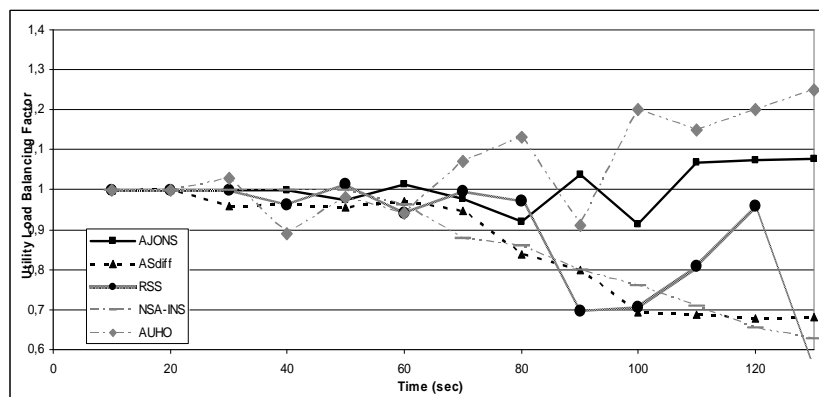
Οι παραπάνω ιδιότητες απεικονίζονται πιο ξεκάθαρα στο Σχήμα 7, το οποίο αναπαριστά το Δείκτη εξισορρόπησης φορτίου CDMA – WLAN σε σχέση με την χρησιμότητα (Utility Load Balancing Factor - ULBF) που ορίζεται ως:

$$\frac{N_{CDMA}^{-1} \sum_{i=1}^{N_{CDMA}} U_i}{N_{WLAN}^{-1} \sum_{j=1}^{N_{WLAN}} U_j} \quad (8)$$

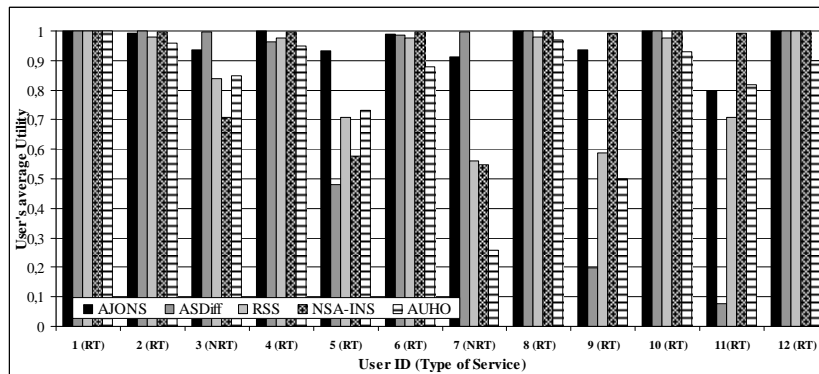
και υποδηλώνει τον λόγο (δηλαδή την κατανομή) του φόρτου εκφρασμένο με χρήση της μέσης χρησιμότητας των χρηστών μεταξύ των CDMA και WLAN κυψελών. Τιμές του ULBF κοντά στο ένα υποδηλώνουν ένα ισορροπημένο δίκτυο. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 7, παραδοσιακά σχήματα επιλογής δικτύου (RSS), είτε βασισμένα σε στατικές πολιτικές (ASDiff), είτε σε πολλαπλά κατώφλια (AUHO), είτε έξυπνα, αλλά στατικά σχήματα που απαγορεύουν τις κάθετες μεταπομπές (NSA-INS), λειτουργούν με μυωπικές πολιτικές, δεν είναι ικανά να αντιδράσουν και να



Σχήμα 6: Συνολική μέση χρησιμότητα του ενοποιημένου CDMA - WLAN συστήματος



Σχήμα 7: Δείκτης εξισορρόπησης φορτίου CDMA – WLAN σε σχέση με την χρησιμότητα



Σχήμα 8: Μέση χρησιμότητα των χρηστών στο ενοποιημένο CDMA - WLAN σύστημα

αντιμετωπίσουν τις περιβαλλοντικές αλλαγές (π.χ. φόρτος εργασίας των κυψελών, χρονομεταβαλλόμενο κανάλι), καταλήγοντας σε μειωμένη συνολική απόδοση του ενοποιημένου συστήματος (Σχήμα 6), σε ασύμμετρο φόρτο εργασίας (Σχήμα 7) και τελικώς στον εκφυλισμό της λαμβανόμενης ΠτΥ των χρηστών. Αυτό περιγράφεται

ΠΙΝΑΚΑΣ VIII: Αριθμός Μεταπομπών ανά πολιτική επιλογής δικτύου

	AJONS	ASDiff	RSS	NSA-INS	AUHO
Αριθμός Μεταπομπών	14	0	39	0	34
Μεταπομπές Μ.Ο. ανά χρήστη	0,93	0	2,6	0	2,26
Πιθανότητα Μεταπομπής	15%	0	42%	0	37%

επίσης στο Σχήμα 8, όπου απεικονίζεται η μέση χρησιμότητα των χρηστών σαν συνάρτηση του τύπου της λαμβανόμενης υπηρεσίας.

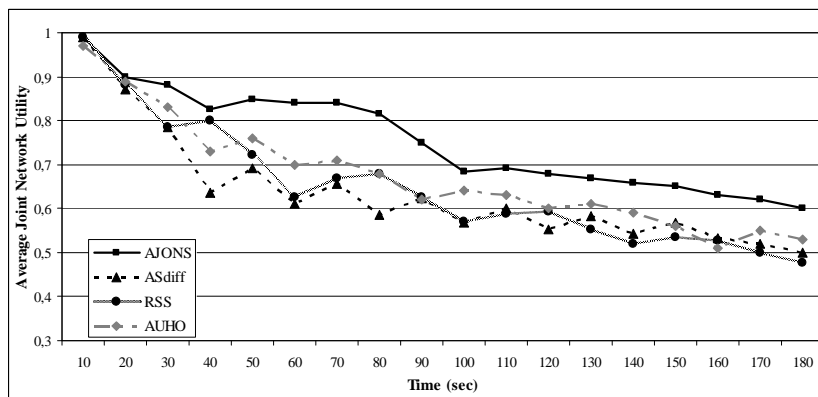
Τέλος, στον Πίνακα VIII παραθέτουμε τον αριθμό των κάθετων μεταπομπών που πραγματοποιήθηκαν κατά την διάρκεια του πειράματος μας για κάθε μία από τις εξεταζόμενες πολιτικές επιλογής δικτύου. Όπως είναι λογικό, για τις πολιτικές ASDiff και NSA-INS δεν πραγματοποιήθηκαν κάθετες μεταπομπές. Αντιθέτως παρατηρούμε πως για τις πολιτικές RSS και AUHO ο αριθμός των μεταπομπών ήταν εξαιρετικά μεγάλος, κυρίως λόγω της επιρροής που έχει η ποιότητα λαμβανόμενου σήματος στην απόφαση πραγματοποίησης μιας κάθετης μεταπομπής. Σύμφωνα με αυτό, οι κόμβοι έχουν περίπου 40% πιθανότητα να πραγματοποιήσουν μία κάθετη μεταπομπή και άρα να αλλάξουν τύπο δικτύου, κατά την στιγμή που λαμβάνεται η απόφαση, ενώ κατά τη διάρκεια των πειραμάτων μας οι κόμβοι πραγματοποίησαν κατά μέσο όρο 2,26-2,6 μεταπομπές. Αναφορικά με την περίπτωση του AJONS, τα αποτελέσματα είναι εμφανώς καλύτερα. Πιο συγκεκριμένα οι κόμβοι έχουν πιθανότητα μόνον 15% να πραγματοποιήσουν μια κάθετη μεταπομπή, ενώ στα πειράματα μας οι κόμβοι κατά μέσο όρο πραγματοποίησαν μόνον μία κάθετη μεταπομπή. Τα παραπάνω αποδεικνύουν πως (α) κατά την είσοδο ενός χρήστη στο σύστημα η απόφαση πρόσδεσης στο δίκτυο που λαμβάνεται από τον AJONS είναι η

βέλτιστη καθώς επιτυγχάνει όχι μόνον την προσωρινή βελτιστοποίηση της απόδοσης του κόμβου, αλλά και την μακροπρόθεσμη ευημερία του, (β) η μετάβαση σε ένα άλλο δίκτυο πραγματοποιείται μόνον όταν είναι σίγουρο πως θα προσφέρει αύξηση της απόδοσης του χρήστη λαμβάνοντας υπόψη την γενικότερη εικόνα του δικτύου και όχι βραχυπρόθεσμες μυωπικές μετρικές, και (γ) η παράμετρος e της (6) είναι ικανή να αντιμετωπίσει επαρκώς φαινόμενα πινγκ-πονγκ ελαχιστοποιώντας τις κάθετες μεταπομπές και άρα και την επιπλέον σηματοδοσία.

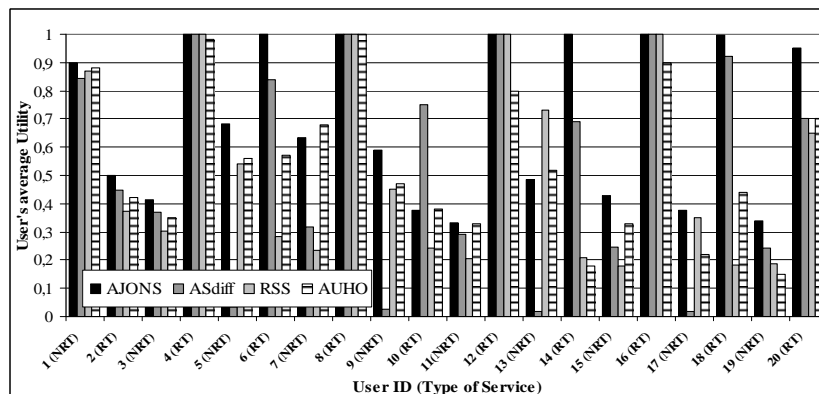
3.7.2. Ενοποιημένο WLAN-OFDMA σύστημα (Η περίπτωση του 3GPP/LTE)

Θεωρούμε ένα ενοποιημένο OFDMA/WLAN (IEEE 802.11e) σύστημα με μία OFDMA κυψέλη και ένα δίκτυο WLAN μερικώς επικαλυπτόμενο από την περιοχή κάλυψης του OFDMA. Πάλι, θεωρούμε πως ο σταθμός βάσης του OFDMA βρίσκεται στο κέντρο της κυψέλης και εκπέμπει με μέγιστη ισχύ $P_c^{\max} = 10W$. Επιπλέον θεωρούμε πως το εύρος ζώνης εξάπλωσης είναι ίσο με $W = 10MHz$ έχοντας 128 υποφέρουσες. Το Σχήμα 9 δείχνει την μέση συνολική δικτυακή χρησιμότητα του δικτύου κάτω από τις πολιτικές επιλογής δικτύου AJONS, RSS, AUHO και ASDiff, όπου κάθε σημείο της καμπύλης αντιστοιχεί στον συγκλίνον μέσο της απόδοσης των συναρτήσεων χρησιμότητας ανά χρονικά παράθυρα των 10 δευτερολέπτων. Όπως προηγουμένως, παρατηρούμε πως το σχήμα ASDiff δεν είναι ικανό να διακρίνει μεταξύ των διαφορετικών τύπων πόρων που προσφέρει η κάθε τεχνολογία πρόσβασης και η κάθε υπηρεσία χρειάζεται, καταλήγοντας στην ανεπαρκή διαχείριση πόρων και συνεπώς στην μειωμένη χρησιμοποίηση. Το σχήμα RSS επίσης αποδίδει φτωχά λόγω της ανισοκατανεμημένης γεωγραφικής κατανομής των χρηστών και του λόγου των υπηρεσιών RT και NRT, οδηγώντας σε ανισόρροπους φόρτους εργασίας μεταξύ των κελιών. Τέλος, στατικά σχήματα

πολλαπλών κατωφλίων, όπως το AUHO, αδυνατούν να ρυθμίσουν δυναμικά τα επίπεδα των κατωφλίων αντιδρώντας στο συνεχές μεταβαλλόμενο περιβάλλον, καταλήγοντας σε χαμηλά επίπεδα συνολικής χρησιμότητας. Αντιθέτως, ο AJONS λαμβάνοντας υπόψη την άνιση κατανομή των χρηστών και των υπηρεσιών καθώς και το φόρτο εργασίας της κάθε κυψέλης, αναθέτει χρήστες με τέτοιο τρόπο ώστε να κρατά τα επίπεδα χρησιμότητας των χρηστών και άρα και του συνολικού συστήματος σε υψηλά επίπεδα. Αυτό απεικονίζεται καλύτερα στο Σχήμα 10, όπου η αυξημένη χρησιμότητα των χρηστών με χρήση του AJONS, επιφέρει αυξημένες τιμές συνολικής απόδοσης και χρησιμοποίησης του συστήματος.



Σχήμα 9: Συνολική μέση χρησιμότητα του ενοποιημένου OFDMA - WLAN συστήματος



Σχήμα 10: Μέση χρησιμότητα των χρηστών στο ενοποιημένο OFDMA - WLAN σύστημα

3.8. Υλοποίηση του AJONS πάνω από μία Γενική Αυτόνομη Αρχιτεκτονική Δικτύων

Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική αυτόνομης διαχείρισης κινητικότητας, ανάθεσης χρηστών και διαμοιρασμού ασύρματων πόρων σε ετερογενή ασύρματα δίκτυα σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε τηρώντας τις προδιαγραφές της *Γενικής Αυτόνομης Αρχιτεκτονικής Δικτύων (Generic Autonomic Network Architecture – GANA)*. Η αρχιτεκτονική GANA αναπτύχθηκε και παρουσιάστηκε στα πλαίσια του έργου EC FP7 EFIPSANS [52], παρέχοντας ένα συμπαγές και μεθοδικό αρχιτεκτονικό πλαίσιο για το σχεδιασμό αυτόνομων δικτυακών αρχιτεκτονικών. Η αναλυτική παρουσίαση της δομής και των βασικών σχεδιαστικών χαρακτηριστικών της αρχιτεκτονικής GANA, καθώς και η λεπτομερής περιγραφή του τρόπου ενσωμάτωσης και ενοποίησης σε αυτήν της προτεινόμενης αυτόνομης αρχιτεκτονικής διαχείρισης κινητικότητας και ασύρματων πόρων (AJONS) παραθέτονται στο Παράρτημα II.

4. Θεμελιώδες Πρόβλημα Βέλτιστης

Διαχείρισης Πόρων Ετερογενών Ασύρματων

Συστημάτων

Στο προηγούμενο κεφάλαιο προτείναμε, σχεδιάσαμε, αναλύσαμε και σχολιάσαμε μια καινοτόμα αυτόνομη αρχιτεκτονική ανάθεσης χρηστών σε ετερογενή ασύρματα δίκτυα, που στοχεύει αφενός στην ελαχιστοποίηση των κεντρικοποιημένων λειτουργιών διαχείρισης πόρων, και αφετέρου στην αύξηση της μέσης χρησιμοποίησης και στην εξισορρόπηση φόρτου στα διαθέσιμα ασύρματα δίκτυα. Παρόλα τα ελκυστικά αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθόδου, η παρουσίαση ενός πραγματικά βέλτιστου ή πλησιοβέλτιστου μηχανισμού διαχείρισης του συνόλου των διαθέσιμων ασύρματων πόρων απουσιάζει. Στα Κεφάλαια 5 και 6 η μεθοδολογία και η λύση αυτού ακριβώς του προβλήματος θα μελετηθεί και προταθεί. Συνεπώς, ενώ ο αρχικός μας στόχος παραμένει ο ίδιος, δηλαδή η εύρεση μηχανισμών ανάθεσης χρηστών και διαμοιρασμού πόρων σε ενοποιημένα ασύρματα δίκτυα που οδηγούν στην μεγιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος, παρακάτω θα υποδείξουμε κατανοημένους μηχανισμούς που οδηγούν στην *πλησιοβέλτιστη* λύση του παραπάνω προβλήματος υπό διάφορες υποθέσεις και περιορισμούς.

Τα βασικά χαρακτηριστικά καθώς και οι θεμελιώδεις διαφοροποιήσεις της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής είναι οι ακόλουθες:

- Θεωρούμε ένα ετερογενές σύστημα αποτελούμενο από μια πληθώρα ασύρματων δικτύων πολλαπλών τεχνολογιών πρόσβασης και συνεπώς διαφορετικών χαρακτηριστικών και ιδιαιτεροτήτων.

- Ένα σύνολο κινούμενων χρηστών ζητά υπηρεσίες πραγματικού και μη-πραγματικού χρόνου και αναζητά το καταλληλότερο ασύρματο σημείο πρόσβασης που αφενός θα εγγυηθεί την ικανοποίηση των κριτηρίων ΠτΥ που θέτουν οι εφαρμογές τους, και αφετέρου θα ελαχιστοποιήσει το δαπανώμενο κόστος τους.
- Το σύστημα είναι υπεύθυνο για την υιοθέτηση ενός *κατακεντρωμένου ενοποιημένου πλησιοβέλτιστου* μηχανισμού διαχείρισης του συνόλου των διαθέσιμων πόρων από κάθε ασύρματο δίκτυο στο σύστημα, ικανό να ικανοποιεί τα κριτήρια ΠτΥ που θέτουν οι χρήστες με έναν τρόπο που να εξασφαλίζει τη μέγιστη απόδοση και χρησιμοποίηση του δικτύου καθώς και τη μεγιστοποίηση των κερδών των παρόχων.

Όπως αναφέρθηκε και στην Παράγραφο 2.1, η ερευνητική κοινότητα είχε ενασχοληθεί με το παραπάνω πρόβλημα, προτείνοντας διάφορους μηχανισμούς [6], [36], [37], [38] που όμως είτε δεν αντιμετώπιζαν το ενοποιημένο σύστημα ως ένα ενιαίο σύνολο, είτε πρότειναν πολύπλοκους, μη ρεαλιστικούς μηχανισμούς υπό αμφίβολες (μη ρεαλιστικές) υποθέσεις. Αντιθέτως, η βέλτιστη επίλυση ενός τέτοιου προβλήματος απαιτεί την ταυτόχρονη θεώρηση του συνολικού ασύρματου περιβάλλοντος ως ένα κοινό πρόβλημα βελτιστοποίησης, και συνεπώς την ενιαία αντιμετώπιση των διαφορετικών τύπων δικτύων και των αντιστοιχών πόρων τους υπό ένα κοινό πρίσμα βελτιστοποίησης. Το κεφάλαιο αυτό στοχεύει στο να προτείνει και να μοντελοποιήσει ένα γενικό θεμελιώδες πρόβλημα βέλτιστης διαχείρισης πόρων για ενοποιημένα ετερογενή συστήματα, το οποίο θα είναι αρκετά αφαιρετικό ώστε να μπορεί να υιοθετηθεί από μια πληθώρα περιπτώσεων ανεξαρτήτως τεχνολογίας πρόσβασης, αλλά και ταυτόχρονα πλήρες ώστε να περιλαμβάνει όλους τους πιθανούς περιορισμούς, φυσικούς ή μη, που θα χαρακτηρίζουν το εκάστοτε πρόβλημα.

4.1. Διατύπωση του Θεμελιώδους Προβλήματος

Ακολουθώντας την σημειογραφία των προηγούμενων παραγράφων, η οποία και συνοψίζεται στο Παράρτημα I, το γενικευμένο θεμελιώδες πρόβλημα (Fundamental Problem – **FP**) της βέλτιστης διαχείρισης πόρων σε ένα ενοποιημένο ετερογενές περιβάλλον μπορεί να μοντελοποιηθεί ως εξής:

$$\text{FP:} \quad \max \sum_{c \in C} \sum_{j \in J} U_j(w_{c,j}) x_{c,j} \quad (9)$$

$$\text{st.} \quad \sum_{c \in C} x_{c,j} = 1 \quad \forall j \in J \quad (10)$$

$$\sum_{j \in J} w_{c,j} x_{c,j} \leq W_c \quad \forall c \in C \quad (11)$$

$$W_c^{\min} \leq W_c \leq W_c^{\max} \quad \forall c \in C \quad (12)$$

$$w_{c,j} \geq \Gamma_{j,\min} \quad \forall j \in J \quad (13)$$

$$x_{c,j} \in \{0,1\} \quad \forall c \in C, \forall j \in J \quad (14)$$

Θεωρούμε, ένα ετερογενές ασύρματο δίκτυο πολλαπλών κυψελών πολλαπλών τεχνολογιών πρόσβασης, όπου ένα σύνολο C από N_c κυψέλες συνυπάρχουν με μία συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή (π.χ. μία Οντότητα Διαχείρισης Κινητικότητας (Mobility Management Entity - MME) της αρχιτεκτονικής 3GPP/SAE). Επίσης θεωρούμε ένα σύνολο J από N_j ενεργούς χρήστες κατανομημένους τυχαία στην παραπάνω υπό θεώρηση περιοχή. Επίσης υποθέτουμε πλήρη κάλυψη, δηλαδή ότι πάντα υπάρχει τουλάχιστον μία κυψέλη c στην οποία ένας χρήστης $j \in J$ μπορεί ανά πάσα στιγμή να συνδεθεί.

Το παραπάνω πρόβλημα διαισθητικά περιγράφεται ως εξής: Να βρεθεί για κάθε κυψέλη c από το σύνολο κυψελών του ενοποιημένου συστήματος C , και για κάθε χρήστη j που ανήκει στο σύνολο των χρηστών του συστήματος J , εκείνη η ανάθεση

χρηστών σε δίκτυα, και εκείνος ο διαμοιρασμός πόρων ($w_{c,j}$ είναι οι πόροι που ανατίθεται από την κυψέλη c στον χρήστη j) που μεγιστοποιεί την απόδοση του συνολικού συστήματος εκφρασμένη με την μορφή συναρτήσεων χρησιμότητας (9), υπό τους εξής περιορισμούς: i) κάθε χρήστης μπορεί να είναι συνδεδεμένος μόνο σε ένα σημείο πρόσβασης ανά πάσα χρονική στιγμή (10), ii) το σύνολο των πόρων που κατανέμονται στους χρήστες της κάθε κυψέλης πρέπει να είναι μικρότερο από την συνολική χωρητικότητα της, η οποία είναι φραγμένη (11)-(12), και iii) σε κάθε χρήστη ανατίθεται ένα ελάχιστο κομμάτι πόρων (13), που μπορεί να οριστεί σαν π.χ., το ελάχιστο SINR το οποίο εγγυάται αρραγή συνδεσιμότητα ή ακόμα και ελάχιστη ρυθμαπόδοση.

Το πρόβλημα **FP** στοχεύει στην αντιμετώπιση ενός αυθαίρετου αριθμού κελιών πολλαπλών τεχνολογιών και ενός τυχαίου αριθμού χρηστών στην περιοχή κάλυψής τους. Συνεπώς το κέρδος από την ανάθεση ενός χρήστη σε μια συγκεκριμένη κυψέλη, δεν εξαρτάται αποκλειστικά από το εύρος των πόρων που ανατίθενται σε αυτόν, αλλά είναι συνάρτηση της ικανοποίησης του χρήστη εκφρασμένη με τη μορφή συναρτήσεων χρησιμότητας, που απεικονίζουν με ένα κανονικοποιημένο τρόπο την απόδοση της ΠτΥ της υπηρεσίας του σε σχέση με τους διαμοιραζόμενους πόρους που του ανατίθενται, ανεξάρτητα από τον τύπο του δικτύου πρόσβασης. Συνεπώς θέτουμε $U_j(w_{c,j})x_{c,j}$ αντί για $U_j(w_{c,j} \cdot x_{c,j})$, ως την συνολική αντικειμενική συνάρτηση του κάθε χρήστη.

Οι κυψέλες στο C μπορούν να ανήκουν σε διαφορετικές τεχνολογίες πρόσβασης π.χ. κυψελωτά CDMA ή OFDM δίκτυα, όπως επίσης και τοπικά ασύρματα δίκτυα, όπως WiFi (802.11.x) και/ή WiMAX. Επίσης θεωρούμε σαν $w_{c,j}$ τους πόρους που μία κυψέλη $c \in C$ αναθέτει σε ένα συνδεδεμένο χρήστη j , και σαν W_c^{\max} , το αντίστοιχο άνω όριο των πόρων της κυψέλης λόγω των φυσικών περιορισμών της (μέγιστη

χωρητικότητα). Η παραπάνω μοντελοποίηση, όπως θα επεξηγηθεί και στη συνέχεια, μπορεί να εφαρμοστεί άμεσα σε μία πληθώρα τεχνολογιών πρόσβασης. Παραδείγματος χάριν, στην περίπτωση ενός CDMA δικτύου, το $w_{c,i}$ απεικονίζει την ισχύ μετάδοσης της κάτω ζεύξης ($p_{c,i}$) που ανατίθεται από τον σταθμό βάσης στον χρήστη j και W_c^{\max} , η μέγιστη ισχύς εκπομπής του σταθμού βάσης (P_c^{\max}). Αντίστοιχα στην περίπτωση του WLANs, το $w_{c,i}$ θα απεικόνιζε το ρυθμό μετάδοσης της κυψέλης c που έχει ανατεθεί από το σταθμό βάσης (AP) για το χρήστη j , και W_c^{\max} , ο μέγιστος πραγματικός ρυθμός μετάδοσης του AP (C_c^{\max}).

Τα κανάλια κάτω ζεύξης μεταξύ των σταθμών βάσης και των κινητών χρηστών μοντελοποιούνται σαν ένα διακριτού χρόνου, σταθερής διάλειψης και προστιθέμενου λευκού θορύβου Gauss (AWGN) πολλαπλής πρόσβασης κανάλι. Ορίζουμε σαν $G_{c,j}$ το αντίστοιχο κέρδος μονοπατιού μεταξύ της κυψέλης c και του χρήστη j , και με σ_j τον λαμβανόμενο θόρυβο στο κινητό χρήστη j . Τα κέρδη μονοπατιού θεωρούμε πως είναι χρονικά μη-μεταβαλλόμενα (συχνή τακτική σε αντίστοιχα προβλήματα διαχείρισης πόρων που αφορούν είτε μονοκυψελωτά, είτε πολυκυψελωτά δίκτυα [14], [16], [19]), σαν δηλαδή οι κινητοί χρήστες να είναι σταθεροί ή να κινούνται σε χρονικά διαστήματα μεγαλύτερα του χρόνου που απαιτείται για την λύση του προβλήματος. Συνεπώς η έννοια του χρόνου παραλείπεται σε όλες τις μεταβλητές της παρούσης διατριβής. Συνεπώς το $G_{c,j}$ αντικατοπτρίζει τη μακροπρόθεσμη συμπεριφορά (δηλαδή την αργή διάλειψη – slow fading) του καναλιού. Οι επιπτώσεις της ταχείας διάλειψης (fast fading) μπορούν να ληφθούν υπόψη ομαλοποιώντας τέτοιου είδους μεταβολές με κατάλληλη μεσοτίμηση. Η απόφαση αποδοχής σε κάποιο δίκτυο πρέπει να πραγματοποιείται λαμβάνοντας υπόψη μόνο τις παραμέτρους της αργής διάλειψης, έτσι ώστε να αποφεύγονται συνεχείς αλλαγές του σημείου πρόσβασης (οι οποίες και οδηγούν στην αποσταθεροποίηση του δικτύου) [15]. Συνεπώς με $\gamma_{c,j} = G_{c,j} p_{c,j} / \sigma_j^2$

ορίζουμε το λαμβανόμενο λόγο ενέργειας ψηφίου προς θόρυβο και παρεμβολές (SINR) στο χρήστη j από τη κυψέλη c .

Επίσης για την απεικόνιση πολλαπλών υπηρεσιών σε κάθε κινητό χρήστη j ανατίθεται μία κατάλληλη συνάρτηση χρησιμότητας $U_j(w_{c,j})$ που αντιπροσωπεύει το βαθμό της ικανοποίησης του αναφορικά με την απόδοση της υπηρεσίας που λαμβάνει σε σχέση με τους πόρους $w_{c,j}$ που του έχουν διαμοιραστεί από την κυψέλη c . Η συνάρτηση χρησιμότητας του κάθε χρήστη είναι μοναδική και σχετίζεται μόνο με τον τύπο της υπηρεσίας που ζητά καθώς και με τα κριτήρια ΠτΥ που αυτή θέτει. Συνεπώς είναι ανεξάρτητη από τον τύπο του δικτύου που εξυπηρετείται. Βασιζόμενοι στη δουλειά του Shenker [42], ένα τέτοιο πλαίσιο βελτιστοποίησης με βάση την θεωρία ΜΧΔ λειτουργεί συνδετικά, επιτρέποντας την θεώρηση και αντιμετώπιση του ετερογενούς ασύρματου δικτύου σαν ένα κοινό βελτιστοποιητή.

Όπως και στην προηγούμενη παράγραφο, θα χρησιμοποιήσουμε το θεωρητικό πλαίσιο βελτιστοποίησης βασισμένο σε συναρτήσεις χρησιμότητας (NUM theory). Συνεπώς, κάθε κινητός κόμβος i συσχετίζεται με μία κατάλληλη συνάρτηση χρησιμότητας U_i που αντιπροσωπεύει τον βαθμό ικανοποίησης του, συναρτήσει των πόρων που του ανατίθενται από την κυψέλη c , και εκφράζεται ως $U_i(w_{c,j})$. Υποθέτουμε επίσης πως η $U_i(w_{c,j})$ πληροί της ακόλουθες παραδοχές:

- 1 Γνησίως αύξουσα, συνεχής και διπλά παραγωγίσιμη ως προς $w_{c,j}$.
- 2 $U_i(\infty) = 1$ και $U_i(0) = 0$, ώστε όταν οι πόροι που ανατίθενται στον χρήστη είναι μηδενικοί ($w_{c,j} = 0$), η χρησιμότητα του να μηδενίζεται.
- 3 Αυστηρώς κοίλη συνάρτηση των ανατιθέμενων πόρων $U_i(w_i) = (c - (aw_i)^b / b)$, όπου $a, b \in \mathbb{R}, c = (1 + e^{a \cdot b}) / e^{a \cdot b}, d = 1 / (1 + e^{a \cdot b})$

Το παραπάνω πρόβλημα είναι εκ φύσεως ιδιαίτερα ενδιαφέρον, αλλά ταυτόχρονα και δύσκολο στην επίλυση του. Στην γενικευμένη μορφή τους, τα παραπάνω

προβλήματα κατατάσσονται στην κατηγορία των Γενικευμένων Αμοιβαίων Προβλημάτων Ανάθεσης (Generalized Mutual Assignment Problem - GMAP), δηλαδή ενός συνδυαστικού προβλήματος βελτιστοποίησης όπου ένα σύνολο στοιχείων που διαθέτουν κάποια αγαθά, προσπαθούν να τα καταναείμουν στους πελάτες τους, ενώ ταυτόχρονα ικανοποιούν τους περιορισμούς τους. Τα προβλήματα GMAP είναι NP-Δύσκολα (NP-hard), ενώ η εξεύρεση εφικτής λύσης είναι επίσης NP-πλήρης (NP-complete) [53].

Τα προβλήματα που τίθενται στα επόμενα κεφάλαια προτείνουν τρόπους αντιμετώπισης τέτοιων προβλημάτων με κατανεμημένους τρόπους, βασισμένους σε σύγχρονες μαθηματικές τεχνικές, για τα οποία αποδεικνύονται η αρραγής λειτουργία και σύγκλιση. Πιο συγκεκριμένα, η έρευνα μας επικεντρώνεται σε δύο άξονες οι οποίοι και θα μελετηθούν στα Κεφάλαια 5 και 6 αντίστοιχα: α) στη βέλτιστη αντιμετώπιση του συνολικού προβλήματος διαχείρισης πόρων (FP) σε ένα ενοποιημένο ασύρματο σύστημα με την παρουσία πολλαπλών τεχνολογιών, και β) στη βέλτιστη αντιμετώπιση του ίδιου προβλήματος αυτή τη φορά όμως σε ένα ενοποιημένο ετερογενές κυψελωτό σύστημα παρουσία διακυψελικών παρεμβολών, λόγω της ύπαρξης μιας μεν τεχνολογίας πρόσβασης στο μέσο αλλά πολλαπλών επιπέδων κυψελών (πολλές φορές επικαλυπτόμενων) που επαναχρησιμοποιούν το ίδιο διαθέσιμο εύρος ζώνης συχνότητας.

5. Βέλτιστη Διαχείριση Πόρων σε Ετερογενή

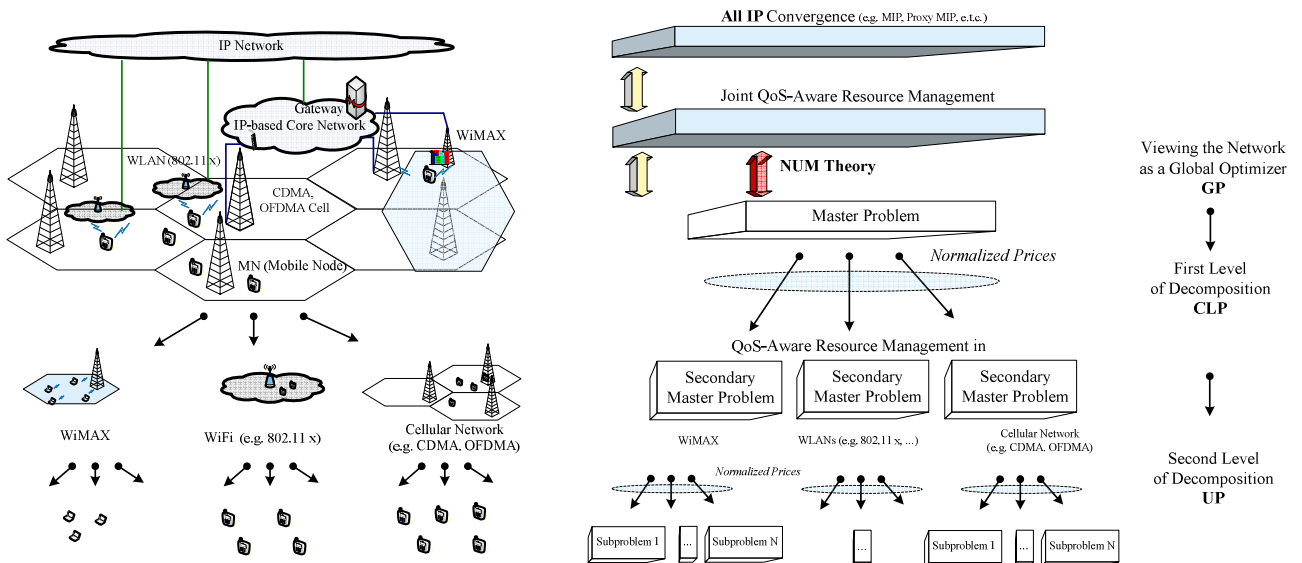
Ασύρματα Δίκτυα Πολλαπλών Τεχνολογιών

Πρόσβασης

Σε αυτό το κεφάλαιο θα περιγράψουμε ένα γενικευμένο πλαίσιο βέλτιστης διαχείρισης πόρων το οποίο θα αξιοποιεί ήδη υπάρχοντες ενδοκυβελικούς μηχανισμούς διαμοιρασμού πόρων προκειμένου να παράσχει μια διακυβελικά βέλτιστη λύση στο πρόβλημα της ανάθεσης χρηστών και πόρων σε ετερογενή ασύρματα δίκτυα, παρουσία πολλαπλών τεχνολογιών πρόσβασης. Πιο συγκεκριμένα, το προτεινόμενο πλαίσιο θα εκμεταλλεύεται τις μαθηματικές ιδιότητες των ενδοκυβελικών μηχανισμών ανάθεσης πόρων που λειτουργούν με βάση την Θεωρία Lagrange και τη Θεωρία Μεγιστοποίησης Χρησιμότητας Δικτύου (NUM theory), ώστε να καθορίζει εκείνη την ανάθεση χρηστών σε δίκτυα που θα μεγιστοποιεί την συνολική απόδοση του ενοποιημένου συστήματος. Αυτό επιτυγχάνεται ικανοποιώντας το στόχο της μεγιστοποίησης της ικανοποίησης και της απόδοσης της υπηρεσίας του χρήστη, που εκφράζεται με χρήση συναρτήσεων χρησιμότητας. Συνεπώς υιοθετούμε και πάλι ένα κοινό πλαίσιο βελτιστοποίησης βασισμένο στην Θεωρία ΜΧΔ (NUM theory), ενώ η ενοποίηση, εφαρμοσιμότητα και πρακτικότητα επιτυγχάνεται διαμέσου της διαστρωμάτικης αποσύνθεσης του προβλήματος.

5.1. Σύνοψη Μεθοδολογίας

Αρχικά μοντελοποιούμε το ενοποιημένο πρόβλημα ανάθεσης χρηστών και διαμοιρασμού πόρων σε ένα ετερογενές σύστημα με χρήση της θεωρίας ΜΧΔ,



Σχήμα 11: Αποσυνθέτοντας ένα ενοποιημένο ασύρματο δίκτυο πολλαπλής πρόσβασης

αναφερόμενο ως “γενικό πρόβλημα” (global problem - **GP**) και έπειτα, το διασπούμε σε δύο επίπεδα εφαρμόζοντας τη θεωρία αποσύνθεσης του δυικού προβλήματος, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 11.

Το πρώτο επίπεδο αφορά τους σταθμούς βάσης, όπου το πρωτεύον **GP** πρόβλημα αποσυντίθεται σε ανεξάρτητα ενδοκυψελικά υποπροβλήματα βελτιστοποίησης του μηχανισμού ανάθεσης πόρων, (αποκαλούμενα ως Τοπικά Προβλήματα Κυψέλης - Cell Local Problems - **CLP**), ευνοώντας έτσι το σχεδιασμό ενός κατανεμημένου σχήματος διαχείρισης ασύρματων πόρων (Radio Resource Management - RRM).

Η συνεργασία των διάφορων **CLP** προβλημάτων επιτυγχάνεται με έναν κατανεμημένο τρόπο διαμέσου μεταβλητών κόστους (δηλαδή τους πολλαπλασιαστές Lagrange του δυικού προβλήματος του **GP**), ο υπολογισμός των οποίων πραγματοποιείται με μεθόδους υποβαθμίδων (subgradient method). Όπως προκύπτει από την ανάλυση του παραπάνω προβλήματος, αυτές οι τιμές εξαρτώνται μόνο από τους κινητούς χρήστες και συνεπώς μπορούν να υπολογιστούν από αυτούς ανεξάρτητα και κατανεμημένα, χρησιμοποιώντας μόνο τοπικά διαθέσιμες πληροφορίες. Αυτή η ιδιότητα διευκολύνει το σχεδιασμό ενός ευέλικτου και

κατανεμημένου μηχανισμού ανάθεσης χρηστών. Το δεύτερο επίπεδο αφορά τους κινητούς χρήστες, όπου το κάθε **CLP** αποσυντίθεται σε υποπροβλήματα βελτιστοποίησης για τον κάθε χρήστη (Πρόβλημα Χρήστη – User Problem - **UP**) σε κάθε κελί. Τα **UP**, συχνά αναφερόμενα ως καθαρή χρησιμότητα χρήστη [16], [47], [54], συντονίζονται πάλι μέσω κατάλληλων τιμών (δηλαδή οι πολλαπλασιαστές Lagrange του δυικού προβλήματος των **CLP**), προκειμένου να υλοποιηθεί η βέλτιστη ενδοκυψελική ανάθεση πόρων. Σε αυτή την διατριβή, θα δοθεί έμφαση στο πρώτο επίπεδο αποσύνθεσης, ενώ για το δεύτερο επίπεδο (δηλαδή τον ενδοκυψελικό διαμοιρασμό πόρων) θα υιοθετήσουμε υπάρχουσες αναλυτικές μεθόδους και αποτελέσματα για το εκάστοτε ασύρματο δίκτυο.

5.2. Χαρακτηριστικά και συνεισφορά της προτεινόμενης λύσης

Σύμφωνα με τα προηγούμενα, ο πρωταρχικός στόχος μας είναι να αποσυνδέσουμε τη λύση και αντιμετώπιση των τοπικών προβλημάτων κυψέλης (**CLP**), από τη λύση του συνολικού γενικού προβλήματος διαχείρισης πόρων **GP**. Χρησιμοποιούμε λοιπόν τον όρο “αποσύνδεση” και όχι “διαχωρισμό” προκειμένου να τονίσουμε πως οι ανεξάρτητοι μηχανισμοί **RRM** των κυψελών συνεχίζουν να συνεργάζονται (συντονίζονται) προς την επίτευξη της συνολικής βελτιστοποίησης του συστήματος. Ωστόσο, πρέπει να τονίσουμε πως αυτή η συνεργασία είναι μόνο τοπική, και πιο σημαντικά, ανεξάρτητη από τα υποκείμενα προβλήματα βέλτιστης διαχείρισης πόρων των εκάστοτε κυψελών, επιτρέποντας την αραγή συνύπαρξη διαφορετικών τεχνολογιών πρόσβασης. Συνεπώς προτείνουμε ένα νέο, καινοτόμο πλαίσιο ταυτόχρονης ανάθεσης χρηστών σε δίκτυα και διαμοιρασμού πόρων σε αυτούς, με τις ακόλουθες ιδιότητες:

- **Χωρικά Αποσυνδεδεμένη Λύση** (σαν αποτέλεσμα της οριζόντιας αποσύνδεσης

που επιτυγχάνεται μέσω της αποσύνθεσης του **GP**), εννοώντας πως προκειμένου να κατορθώσουμε τη συνολική βελτιστοποίηση του συστήματος, οι μηχανισμοί RRM των κυψελών (και οι χρήστες) απαιτείται να κρατούν και να διαμοιράζουν μόνο τοπικά διαθέσιμη πληροφορία. Από την οπτική γωνία της κυψέλης, η τοπική περιοχή αναφέρεται στο σύνολο των ασύρματων κόμβων που είναι συνδεδεμένοι με αυτήν, σύμφωνα με κάποιο κατώφλι SINR, ενώ από τη μεριά των χρηστών, η τοπική περιοχή αναφέρεται στο σύνολο των κυψελών (ανεξαρτήτως της τεχνολογίας τους) που ο χρήστης βρίσκεται στην εμβέλεια τους και θα μπορούσε ενδεχομένως να συνδεθεί. Αυτή η ιδιότητα εξασφαλίζει χαμηλό όγκο σηματοδοσίας και ευνοεί την κλιμακοθετησιμότητα.

- **Λειτουργικά Αποσυνδεδεμένη Λύση** (σαν αποτέλεσμα της κάθετης αποσύνδεσης που επιτυγχάνεται μέσω της αποσύνθεσης του **GP**), εννοώντας πως η επίτευξη της πλησιοβελτιστότητας είναι ανεξάρτητη του τύπου και των τεχνολογιών των κυψελών που συνυπάρχουν στο ενοποιημένο σύστημα (δηλαδή μπορούν να ενσωματωθούν σε πληθώρα δικτύων διαφορετικών τεχνολογιών πρόσβασης με αντίστοιχους ποικίλους πόρους), εννοώντας την τεχνολογική ποικιλότητα. Συγκεκριμένα, εξετάζουμε την ενσωμάτωση κυψελωτών δικτύων (π.χ. CDMA), τοπικών ασύρματων δικτύων (π.χ. 802.11.x) και WiMAX δικτύων.
- **Καθολική Πλησιοβελτιστότητα και Σύγκλιση** (σαν αποτέλεσμα της επίλυσης του δυικού προβλήματος του **GP** με μεθόδους υποβαθμίδων). Το προτεινόμενο πλαίσιο εφαρμόζει έναν κατανεμημένο, χαμηλής πολυπλοκότητας αλγόριθμο υποβαθμίδων, που κατοικεί στους κινητούς χρήστες και στους σταθμούς βάσης ή σημεία πρόσβασης των κυψελών. Ταυτόχρονα, αποδεικνύεται η σύγκλιση του σε ένα καθολικά πλησιοβέλτιστο σημείο λειτουργίας, καθορίζονται τα άνω και

κάτω όρια της τιμής της βέλτιστης λύσης του προβλήματος **GP**, υπολογίζεται η συνεπαγόμενη απόκλιση από τη βέλτιστη λύση, ενώ μελετάται η σταθερότητα του αλγόριθμου. Αποτελέσματα προσομοίωσης υποδεικνύουν την ανωτερότητα του προτεινόμενου σχήματος, συγκρινόμενο με άλλες συνήθως χρησιμοποιούμενες μεθόδους.

Από θεωρητικής απόψεως, το πρόβλημα **GP**, το οποίο και ανήκει στην οικογένεια των προβλημάτων GMAP, μελετήθηκε πρόσφατα στο [55], όπου παρουσιάζεται μία μέθοδος κατανεμημένης επίλυσης του. Ωστόσο, σε αυτή την διατριβή, επιπλέον υπολογίζεται και καθορίζεται η σύγκλιση της προτεινόμενης λύσης σε ένα πεπερασμένο χρονικό πλαίσιο, χρησιμοποιώντας βήμα σταθερού μεγέθους αντί για φθίνον [55]. Αυτή η ιδιότητα είναι εξαιρετικά επιθυμητή σε ασύρματα περιβάλλοντα, καθώς δεν απαιτείται συγχρονισμός μεταξύ των κόμβων, ελαχιστοποιώντας την απαιτούμενη σηματοδοσία. Επιπλέον, η μοντελοποίηση του προβλήματος μας είναι πιο γενική από αυτήν που υιοθετείται στο [55], καθώς η τιμή ενός αγαθού (δηλαδή, η απόδοση της υπηρεσίας ενός χρήστη εκφρασμένη με χρήση συναρτήσεων χρησιμότητας) κατά την ανάθεση σε μία κυψέλη δεν είναι σταθερή, λόγω των έμφυτων χαρακτηριστικών του ασύρματου περιβάλλοντος, (π.χ. ενδοκυψελική παρεμβολή), αλλά επηρεάζεται και επηρεάζεται από το σύνολο των χρηστών ανατίθενται στη συγκεκριμένη κυψέλη.

5.3. Μοντελοποίηση και καθορισμός προβλήματος

Θεωρούμε ένα ετερογενές ασύρματο δίκτυο αποτελούμενο από κυψέλες πολλαπλών τεχνολογιών πρόσβασης, αλλά και πολλαπλούς χρήστες με ποικίλα τεχνικά χαρακτηριστικά και απαιτήσεις ΠτΥ. Συνεπώς, υποθέτουμε πως ένα σύνολο C από N_c κυψέλες συνυπάρχουν σε μία κοινή γεωγραφική περιοχή, (π.χ. σε μία

Διαχειριστική Μονάδα Κινητικότητας (Mobility Management Entity (MME)) στην 3GPP/SAE αρχιτεκτονική). Επίσης θεωρούμε ένα σύνολο J από N_J ενεργούς κινητούς κόμβους τυχαία καταναμημένους στην περιοχή αυτή. Σε κάθε περίπτωση, ένας χρήστης $j \in J$ μπορεί να συνδεθεί σε μία και μόνο μία κυψέλη $c \in C$ ανά πάσα χρονική στιγμή. Τέλος, υποθέτουμε καθολική κάλυψη, δηλαδή υπάρχει πάντα τουλάχιστον μία κυψέλη c στην οποία ένας χρήστης $j \in J$ μπορεί να συνδεθεί αν επιθυμεί.

Οι κυψέλες στο C μπορούν να ανήκουν σε διαφορετικές τεχνολογίες πρόσβασης (δηλαδή σε κυψελωτά CDMA ή OFDM δίκτυα, καθώς και τοπικά ασύρματα δίκτυα όπως WiFi (802.11.x)). Δεδομένης της ποικιλομορφίας του συστήματος, ορίζουμε ως $w_{c,j}$ το σύνολο των πόρων μίας κυψέλης $c \in C$ που δεσμεύει ένας συνδεδεμένος χρήστης j , ανάλογα με τον τύπο του δικτύου, και σαν W_c^{\max} , το άνω όριο των διαθέσιμων πόρων της εκάστοτε κυψέλης λόγω φυσικών περιορισμών. Το παραπάνω ενδοκυψελικό μοντέλο μπορεί να αναπαραστήσει και να εφαρμοστεί άμεσα σε μία πληθώρα τεχνολογιών πρόσβασης όπως περιγράφεται στην παράγραφο 5.7. Παραδείγματος χάριν, στην περίπτωση ενός CDMA δικτύου, το $w_{c,j}$ μπορεί να αναπαριστά την ανατιθέμενη ισχύ εκπομπής του j από την κυψέλη c , ενώ σε ένα WLAN, τον ανατιθέμενο ρυθμό μετάδοσης του χρήστη j .

Το κανάλι εκπομπής μεταξύ των σταθμών βάσης και των κινητών χρηστών μοντελοποιείται σαν ένα κανάλι πολλαπλής πρόσβασης παρουσία προσθετικού λευκού θορύβου Gauss. Τα κέρδη των καναλιών θεωρούμε πως είναι χρονικά αμετάβλητα, [14], [16], [19], όπως θα ήταν στην περίπτωση που οι χρήστες είναι ακίνητοι, ή κινούνται σε πολύ μεγαλύτερη κλίμακα σε σχέση τον χρόνο σύνδεσης τους στο δίκτυο. Ορίζουμε επίσης, σαν $G_{c,j}$ το κέρδος μονοπατιού μεταξύ μιας κυψέλης c και ενός χρήστη j , αντικατοπτρίζοντας την μακροχρόνια συμπεριφορά του

κέρδους του καναλιού. Φαινόμενα ταχείας διάλειψης μπορούν να ενσωματωθούν με χρήση κατάλληλων μέσων όρων [15]. Συνεπώς η έννοια του χρόνου παραλείπεται στον ορισμό των μετρικών και μεταβλητών καθ' όλη τη συνέχεια της ανάλυσης. Συμβολίζουμε με $\gamma_{c,j} = G_{c,j} P_{c,j} / \sigma_j^2$ τον σηματοθορυβικό λόγο του χρήστη j από τον ΣΒ c , όπου το σ_j ορίζει τον θόρυβο στον κινητό κόμβο j .

Προκειμένου να αναπαραστήσουμε μία πληθώρα υπηρεσιών, σε κάθε κινητό χρήστη j ανατίθεται μία κατάλληλα ορισμένη συνάρτηση χρησιμότητας $U_j(w_{c,j})$, η οποία και αναπαριστά με έναν κανονικοποιημένο τρόπο τον βαθμό της ικανοποίησης του χρήστη ως προς την απόδοση της υπηρεσίας του, (δηλαδή την ικανοποίηση των κριτηρίων ΠτΥ), σαν συνάρτηση του ανατιθέμενου ρυθμού μετάδοσης, εκφρασμένο κατάλληλα στους αντίστοιχούς πόρους $w_{c,j}$ του εκάστοτε δικτύου πρόσβασης c [42].

5.3.1. Το Γενικό Πρωτεύον Πρόβλημα (Global Primal Problem - GP)

Στόχος μας είναι η ανάθεση χρηστών στα διαθέσιμα δίκτυα και ο ταυτόχρονος διαμοιρασμός πόρων σε αυτούς προς την μεγιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος. Θεωρούμε μια απλουστευμένη μορφή του προβλήματος (9) όπως τέθηκε παραπάνω,

$$\text{GP:} \quad \max \sum_{c \in C} \sum_{j \in J} U_j(w_{c,j}) x_{c,j} \quad (15)$$

$$\text{st.} \quad \sum_{c \in C} x_{c,j} = 1 \quad \forall j \in J \quad (16)$$

$$\sum_{j \in J} w_{c,j} x_{c,j} \leq W_c \quad \forall c \in C \quad (17)$$

$$x_{c,j} \in \{0,1\} \quad \forall c \in C, \forall j \in J \quad (18)$$

όπου το $x_{c,j}$ είναι 1 όταν ο χρήστης j ανατίθεται να συνδεθεί στην κυψέλη c , και 0 αντίθετα. Ο περιορισμός (16) ορίζει πως ένας χρήστης μπορεί να συνδεθεί σε μία

μόνο κυψέλη, ενώ ο (17) ότι το άθροισμα των ανατιθέμενων πόρων μίας κυψέλης c δεν δύναται να ξεπεράσουν ένα καθορισμένο άνω όριο W_c^{\max} . Ορίζουμε σαν (W, X) το σύνολο όλων των δυνατών διανυσμάτων ανάθεσης πόρων $(w, x) = ((w, x)^1, \dots, (w, x)^c, \dots, (w, x)^{N_c})$ που ικανοποιούν τους (16)-(17), και σαν $(w, x)^c = ((w_{c,1}, \dots, w_{c,N_j}), (x_{c,1}, \dots, x_{c,N_j}))$ την ενδοκυψελική κατανομή πόρων στην κυψέλη c . Ορίζουμε ως $(w, x)^* \in (W, X)$ την βέλτιστη λύση του προβλήματος **GP**, εάν υπάρχει, και θα αναφερόμαστε σε αυτήν ως την πρωταρχική βέλτιστη λύση.

Στο **GP** το κέρδος της ανάθεσης ενός χρήστη σε μία κυψέλη δεν είναι συνάρτηση των πόρων που ανατέθηκαν σε αυτόν (λόγω της παρουσίας πολλαπλών τύπων πόρων ανάλογα με την τεχνολογία του υποκείμενου δικτύου πρόσβασης (π.χ. CDMA, WLAN, κ.τ.λ.)), αλλά συνάρτηση την ικανοποίησης του εκφρασμένη με χρήση συναρτήσεων χρησιμότητας, οι οποίες και εκφράζουν με ένα κανονικοποιημένο τρόπο την απόδοση της υπηρεσίας ως προς την ικανοποίηση των κριτηρίων ΠτΥ. Συνεπώς θέτουμε $U_j(w_{c,j}((w, x)^c))x_{c,j}$ αντί για $U_j(w_{c,j}((w, x)^c) \cdot x_{c,j})$ σαν το συνολικό κέρδος ανά χρήστη και για απλότητα θέτουμε $U_j(w_{c,j}((w, x)^c))x_{c,j} \equiv U_j(w_{c,j})x_{c,j}$.

5.3.2. Υποθέσεις και Δικαιολόγηση

Στοχεύοντας σε μία αποδοτική λύση του GP, υιοθετούμε τις ακόλουθες υποθέσεις.

- **ΥΠ1.** Το Πρόβλημα **GP** είναι αυστηρά εφικτό (Slater Conditions Qualification [56]). Με απλά λόγια, υπάρχει πάντα ένα διάνυσμα $(\bar{w}, \bar{x}) \in (W, X)$ τέτοιο ώστε να ικανοποιούνται αυστηρά οι περιορισμοί (16) και (17).
- **ΥΠ2.** Οι συναρτήσεις χρησιμότητας των κινητών χρηστών U_j επιλέγονται ως εξής: (α) $U_i(w_{c,j})$ είναι αυστηρώς κοίλη/κυρτή και διπλά διαφορίσιμη στο διάστημα $w_{c,j} = (0, W_c^{\max}]$, $\lim_{w_{c,j} \rightarrow 0^+} U_j(w_{c,j}) = -\infty$ και (β)

$-w_{c,j}U_j''(w_{c,j})/U_j'(w_{c,j}) \geq 1$ για κάθε $w_{c,j} > 0$ (το ' δηλώνει παραγώγιση).

- **ΥΠ3.** Υποθέτουμε πως η ενδοκυψελική παρεμβολή μεταξύ κυψελών της ίδιας τεχνολογίας πρόσβασης είναι στατική και μπορεί να θεωρηθεί σαν θόρυβος τύπου Gauss. Αυτή η υπόθεση δεν θέτει κανέναν περιορισμό στην ύπαρξη επικαλυπτόμενων κυψελών διαφορετικών, μη παρεμβαλλόμενων τεχνολογιών πρόσβασης (π.χ. επικαλυπτόμενα κυψελωτά CDMA από WLAN).
- **ΥΠ4.** Υπάρχει ένας μηχανισμός διαμοιρασμού πόρων για κάθε κυψέλη c που διανέμει βέλτιστα τους διαθέσιμους πόρους στους συνδεδεμένους χρήστες της, ικανοποιώντας τις υποθέσεις **ΥΠ1-ΥΠ3**.

Παρατηρήσεις. Η **ΥΠ1** αντιστοιχεί στην ικανοποίηση των περιορισμών κατά Slater (Slater's Constraint Qualification), η οποία και εγγυάται την ύπαρξη των βέλτιστων πολλαπλασιαστών Lagrange [[56] παρ 3.3.5], η παρουσία των οποίων θα διευκολύνει την επίλυση του προβλήματος **GP**, όπως περιγράφεται στη συνέχεια. Η **ΥΠ1** υιοθετείται συχνά στα προβλήματα διαχείρισης ασύρματων πόρων, όπως στα [14]-[15], [57]-[59].

Η **ΥΠ2(α)** είναι επίσης καθιερωμένη στη βιβλιογραφία [58]. Επιπλέον, ενστερνιζόμαστε την **ΥΠ2(β)** προκειμένου να εξασφαλίσουμε την αυστηρά κοίλη φύση της $U_j(w_{c,j})$ υπό λογαριθμική αλλαγή μεταβλητών (π.χ. $w_{c,j} = e^{y_{c,j}}$) η οποία θα εξασφαλίσει την κυρτότητα του υποκείμενου ενδοκυψελικού προβλήματος ανάθεσης πόρων [60]. Συγκεκριμένα, $d^2U_j(e^{w_{c,j}})/d w_{c,j}^2 \leq 0 \Leftrightarrow -\xi U_j''(\xi)/U_j'(\xi) \geq 1$, όταν $w_{c,j} = e^{y_{c,j}}$. Αυτή η αλλαγή μεταβλητών εφαρμόζεται συχνά σε προβλήματα διαχείρισης πόρων σε ασύρματα περιβάλλοντα παρουσία παρεμβολών (π.χ. CDMA [58]). Παραδείγματα συναρτήσεων χρησιμότητας που ικανοποιούν την **ΥΠ2** και συναντώνται συχνά στην βιβλιογραφία διαχείρισης ασύρματων πόρων π.χ. για

κυψελωτά [14], [23], [58] και WLAN [47], είναι $U_i(w_{c,j})=\log(w_{c,j})$, $U_i(w_{c,j})=\ln(w_{c,j})$ και $U_i(w_{c,j})=w_{c,j}^a/a$ με $a<0$.

Η **ΥΠ3** υπαινίσσεται πως μεταξύ κυψελών της ίδια τεχνολογίας πρόσβασης, εφαρμόζονται είτε τεχνικές επαναχρησιμοποίησης συχνότητας, ώστε η διακυψελική παρεμβολή μεταξύ κυψελών που λειτουργούν υπό την ίδια συχνότητα μπορεί να θεωρηθεί σαν στατικός θόρυβος (δηλαδή σαν ένας επιπλέον θόρυβος Gauss [61]-[62]), είτε εφαρμόζονται ορθογώνιοι κώδικες επικοινωνίας, που συντελούν στην ελαχιστοποίηση των παρεμβολών, όπως στο [15]. Κάτω υπό αυτές τις υποθέσεις η διακυψελική παρεμβολή γίνεται είτε πρακτικά αμελητέα, είτε πιο γενικά μπορεί να αγνοηθεί και να μοντελοποιηθεί σαν μία (μέση) στατική τιμή ([63] και [64]). Τα παραπάνω, όχι μόνο κάνουν το πολύ-κυψελωτό πρόβλημα επιλύσιμο, επιτρέποντας την ανάπτυξη αποδοτικών, καταναμημένων λύσεων, αλλά επίσης πρακτικά ισχύουν στην περίπτωση των νέων και μελλοντικών ασύρματων δικτύων, όπως στο WiMAX2 [65] και LTE-Advanced [66], τα οποία και ενσωματώνουν πληθώρα στρατηγικών για να μετριάσουν τις επιπτώσεις της διακυψελικής παρεμβολής, διασφαλίζοντας πως γειτονικές κυψέλες (ή τομείς κυψελών) λειτουργούν σε διαφορετικές συχνότητες. Συνεπώς, για το υπόλοιπο της ανάλυσης θα θεωρούμε την ύπαρξη μόνο ενδοκυψελικής παρεμβολής, δηλαδή την παρεμβολή που εισάγεται μεταξύ των συνδεδεμένων χρηστών της κάτω ζεύξης μιας κυψέλης που χρησιμοποιεί κάποια τεχνολογία πρόσβασης με ύπαρξη παρεμβολών (π.χ. CDMA).

Η **ΥΠ4** εξασφαλίζει την εφαρμοσιμότητα του προτεινόμενου πλαισίου, υιοθετώντας υπάρχουσες τεχνικές της βιβλιογραφίας, ικανές να αντιμετωπίσουν το πρόβλημα της βέλτιστης ενδοκυψελικής κατανομής πόρων σε πληθώρα διαφορετικών τεχνολογιών πρόσβασης, όπως παρουσιάζεται στην παράγραφο 5.7. Τέλος, οι **ΥΠ1-ΥΠ2** εξασφαλίζουν ότι ο μεγιστοποιητής του **GP**, δηλαδή το $(w,x)^* \in (W,X)$,

υπάρχει, καθώς η υποκείμενη συνάρτηση είναι αυστηρώς κοίλη και συνεχής, και επίσης το σύνολό των εφικτών λύσεων είναι συμπαγές ¹(compact) [67], [68].

Η διαφοροποίηση αυτού του προβλήματος με το γενικευμένο θεμελιώδες πρόβλημα (**FP**) έγκειται σε δύο παραμέτρους:

1. Η μέγιστη χωρητικότητα (οι διαθέσιμοι πόροι) της κάθε κυψέλης είναι σταθερή και γνωστή εκ των προτέρων και ισούνται με $W_c, \forall c \in C$.
2. Θεωρούμε πως δεν υπάρχει κάποιο ελάχιστο όριο πόρων που πρέπει να ανατεθεί σε κάθε χρήστη, προκειμένου να εισαχθεί στο σύστημα και να επιλεγεί προς εξυπηρέτηση.

Οι δύο παραπάνω διαφοροποιήσεις δεν επιφέρουν σοβαρές επιπτώσεις στο συνολικό πρόβλημα. Συγκεκριμένα οι μεταβαλλόμενες μέγιστες χωρητικότητες δεν συναντούνται συχνά σε προβλήματα διαχείρισης πόρων ετερογενών συστημάτων, ενώ επιπλέον οι ελάχιστες απαιτήσεις μπορούν εύκολα να εισαχθούν στην υπάρχουσα μορφή του προβλήματος επιλέγοντας κατάλληλες συναρτήσεις χρησιμότητας. Συνοψίζοντας το πρόβλημα **GP** παραμένει ένα πολύ σημαντικό πρόβλημα καθώς επιτρέπει, όπως έχουμε τονίσει και παραπάνω, την ταυτόχρονη βέλτιστη ανάθεση χρηστών και πόρων σε ενοποιημένα ετερογενή συστήματα πολλαπλών τεχνολογιών πρόσβασης.

5.4. Μετασχηματισμός του προβλήματος

Διαισθητικά, όπως αναφέραμε και προηγουμένως το παραπάνω πρόβλημα μπορεί να χαρακτηριστεί σαν ένα γενικευμένο πρόβλημα αμοιβαίας ανάθεσης GMAP, όπου το προσδοκώμενο είναι η εύρεση της πιο αποδοτικής ανάθεσης N_I χρηστών σε N_C

¹ Το σύνολο M είναι συμπαγές αν και μόνο αν οποιαδήποτε ακολουθία στο M υπάρχει υπο-ακολουθία που συγκλίνει σε στοιχείο του M .

κυψέλες καθώς και τους αντίστοιχους πόρους τους, δεδομένων των περιορισμών. Να υπενθυμίσουμε πως τα προβλήματα *GMAP* είναι NP-Δύσκολα (NP-hard), ενώ η εξεύρεση εφικτής λύσης είναι επίσης NP-πλήρης (NP-complete) [53]. Στην παρούσα περίπτωση ένα επιπλέον πρόβλημα προστίθεται λόγω της φύσης του ασύρματου περιβάλλοντος. Για μία δεδομένη διαμόρφωση χρηστών-κυψελών-πόρων, μια οποιαδήποτε αλλαγή στο σημείο πρόσβασης ενός χρήστη είναι πολύ πιθανόν να επηρεάσει την χρησιμότητα και τους διαμοιρασμένους πόρους άλλων χρηστών, σε αντίθεση με το κλασσικό *GMAP*, όπου η χρησιμότητα του κάθε χρήστη είναι σταθερή και εξαρτάται μόνο από το σημείο εξυπηρέτησης [55]. Συνεπώς, απαιτείται μια πιο γενική αντιμετώπιση.

Να τονίσουμε επίσης πως οι περιορισμοί (16) και (17) θέτουν δύο τύπους εξάρτησης. Σε μικροσκοπικό επίπεδο, οι πόροι της κάθε κυψέλης είναι εξαρτώμενοι (17) καθώς οι συνδεδεμένοι χρήστες της εκάστοτε κυψέλης ανταγωνίζονται για αυτούς, ενώ σε μακροσκοπικό επίπεδο οι συνολικοί πόροι του συστήματος είναι εξαρτημένοι (16) καθώς η κατανομή των χρηστών στις κυψέλες επηρεάζει και την κατανομή των πόρων. Προκειμένου να επιλύσουμε το παραπάνω πρόβλημα εφαρμόζουμε μερική δυική αποσύνθεση, στοχεύοντας στην μερική χαλάρωση του συνόλου των περιορισμών ανάθεσης χρηστών σε κυψέλες. όπως απεικονίζεται και στο Σχήμα 11.

5.4.1. Το Δυικό Πρόβλημα - *The Global Dual (GD) Problem*

Ορίζουμε την συνάρτηση Lagrange που αντιστοιχεί στο πρόβλημα **GP** ως

$$L(\mathbf{w}, \mathbf{x}, \boldsymbol{\mu}) = \sum_{c \in C} \sum_{j \in J} U_j(w_{c,j}) x_{c,j} - \sum_{j \in J} \mu_j (1 - \sum_{c \in C} x_{c,j}) \quad (19)$$

όπου, $\boldsymbol{\mu} = (\mu_1, \dots, \mu_{N_j})$ είναι το διάνυσμα πολλαπλασιαστών Lagrange που αντιστοιχούν στην χαλάρωση του περιορισμού (17). Κάθε στοιχείο του οποίου, που

ονομάζεται πολλαπλασιαστής Lagrange ή κόστος, παίρνει τιμές στο διάστημα $(-\infty, +\infty)$. Η υποκείμενη συνάρτηση του δυικού προβλήματος είναι συνεπώς:

$$DL(\boldsymbol{\mu}) = \max_{\mathbf{w}, \mathbf{x}} \sum_{c \in C} \sum_{j \in J} U_j(w_{c,j}) x_{c,j} - \sum_{j \in J} \mu_j \left(1 - \sum_{c \in C} x_{c,j}\right) \quad (20)$$

Η οποία μετά από πράξεις γίνεται:

$$\begin{aligned} DL(\boldsymbol{\mu}) &= \\ &= \sum_{c \in C} \left(\max_{\mathbf{w}, \mathbf{x}} \left\{ \sum_{j \in J} U_j(w_{c,j}) x_{c,j} - \sum_{j \in J} \mu_j x_{c,j} \right\} \right) + \sum_{j \in J} \mu_j \\ &= \sum_{c \in C} \left(\max_{\mathbf{w}, \mathbf{x}} \left\{ \sum_{j \in J} U_j(w_{c,j}) x_{c,j} - \sum_{j \in J} \mu_j x_{c,j} \right\} + \sum_{j \in J} \frac{\mu_j}{N_C} \right) \end{aligned} \quad (21)$$

Το Δυικό πρόβλημα (**GD**) μπορεί να οριστεί λοιπόν ως:

$$\begin{aligned} \text{GD:} \quad & \min_{\boldsymbol{\mu} \in \mathbb{R}^{N_C}} DL(\boldsymbol{\mu}) \\ & \text{st.} \quad \sum_{j \in J} w_{c,j} x_{c,j} \leq W_c^{\max} \quad \forall c \in C \\ & \quad \quad x_{c,j} \in \{0,1\}, \forall c \in C, \forall j \in J \end{aligned} \quad (22)$$

Ορίζουμε σαν \mathbf{M}^* το μη-κενό σύνολο λύσεων του δυικού προβλήματος **GD** και σαν $\boldsymbol{\mu}^* = (\mu_1^*, \dots, \mu_{N_j}^*)$ το σύνολο των βέλτιστων πολλαπλασιαστών Lagrange για τον περιορισμό (17). Στηριζόμενοι στην **ΥΠ1**, η ύπαρξη αυτών είναι εγγυημένη.

Διαισθητικά, στην (21) το $\mu_c^j = \sum_{j \in J} \mu_j x_{c,j}$ μπορεί να ερμηνευτεί σαν το συνολικό κόστος των συνδεδεμένων χρηστών για μία κυψέλη c και το $\max_{\mathbf{w}, \mathbf{x}} \sum_{j \in J} U_j(w_{c,j}) x_{c,j} - \mu_c^j$ σαν το μέγιστο όφελος της κυψέλης c . Συνοψίζοντας, ας επισημάνουμε ότι το $DL(0)$ είναι ίσο με ένα άνω όριο της λύσης του **GP**, που θα λαμβάναμε αν αγνοούσαμε τους περιορισμούς ανάθεσης χρηστών σε ένα μόνο δίκτυο ανά πάσα χρονική στιγμή, ενώ το καλύτερο άνω όριο δίνεται από τη λύση του **GD**, [69], [70] όπως αναλύεται στην επόμενη παράγραφο.

5.4.2. Εφαρμόζοντας Δυική Αποσύνθεση

Ο πρώτος όρος της δυικής υποκείμενης συνάρτησης (20) είναι προστεθειμένος (additive) για τις κυψέλες στο C . Συνεπώς, το σύνολο των λύσεων του προβλήματος **GD** μπορεί να γραφεί σαν ένα Καρτεσιανό γινόμενο (δηλαδή ανεξάρτητοι περιορισμοί ανά κυψέλη). Άρα, σπάμε το **GD** σε δύο επίπεδα βελτιστοποίησης. Στο χαμηλότερο επίπεδο, έχουμε τα υποπροβλήματα, ένα για κάθε κυψέλη $c \in C$, στα οποία αποσυντίθεται η (22), τα επονομαζόμενα Ενδοκυψελικά Προβλήματα Βελτιστοποίησης (intra-Cell optimization Problems):

$$\begin{aligned}
 \text{CP:} \quad \max_{\mathbf{w}, \mathbf{x}} DL_c(\mathbf{w}, \mathbf{x}) &= \max_{\mathbf{w}, \mathbf{x}} \sum_{j \in J} U_j(w_{c,j}) x_{c,j} - \sum_{j \in J} \mu_j x_{c,j} + \sum_{j \in J} \frac{\mu_j}{N_C} \\
 \text{st.} \quad \sum_{j \in J} w_{c,j} x_{c,j} &\leq W_c^{\max} \\
 x_{c,j} &\in \{0, 1\}, \forall j \in J
 \end{aligned} \tag{23}$$

Στο υψηλότερο επίπεδο, το βασικό πρόβλημα είναι υπεύθυνο για την ανανέωση των δυικών μεταβλητών $\boldsymbol{\mu}$ επιλύοντας το παρακάτω δυικό πρόβλημα:

$$\begin{aligned}
 \min_{\boldsymbol{\mu}} DL'(\boldsymbol{\mu}) &= \min_{\boldsymbol{\mu}} \sum_{c \in C} DL_c(\boldsymbol{\mu}) \\
 \text{st.} \quad \boldsymbol{\mu} &\in \mathbb{R}^{N_C}
 \end{aligned} \tag{24}$$

όπου η $DL'(\boldsymbol{\mu})$ είναι η δυική συνάρτηση που προκύπτει συναθροίζοντας τις τιμές των πολλαπλασιαστών Lagrange του προβλήματος (23), για ένα δεδομένο $\boldsymbol{\mu}$. Προκειμένου να επιλύσουμε το πρόβλημα (24) με κατανομημένο τρόπο, εφαρμόζουμε μία μέθοδο υποβαθμίδων (sub-gradient method), που αναλύεται στην επόμενη παράγραφο. Πριν από αυτό όμως, επικεντρωνόμαστε στην αποδοτική επίλυση του προβλήματος (23), δοθέντος ενός διανύσματος $\boldsymbol{\mu}$. Αρχικά παραθέτουμε τους ακόλουθους ορισμούς.

Ορισμός 1. Κάθε χρήστης j συνδέεται με ένα ελάχιστο επίπεδο σηματοθορυβικού λόγου, Γ_j , το οποίο καθορίζει το σύνολο των κυψελών στην γειτονιά του που θα μπορούσε ενδεχομένως να συνδεθεί, το οποίο ορίζουμε ως:

$$S_j := \{c \in C \mid \gamma_{c,j} \geq \Gamma_j\} \text{ and } S_j \subseteq C \quad (25)$$

Διαισθητικά, το S_j δείχνει τα πιθανά σημεία πρόσβασης του χρήστη j . Επιπλέον, υποθέτουμε πως $S_j \neq \emptyset \quad \forall j \in J$. Πρακτικά, το σύνολο S_j ακολουθεί την αρχή των λιστών γειτονικών κελιών, που μπορούν πολύ εύκολα να υπολογιστούν από τον ίδιο το χρήστη, μιας και η πλειονότητα των τεχνολογιών πρόσβασης παρέχουν τέτοια δυνατότητα π.χ. 3GPP/LTE [71].

Ορισμός 2. Λόγω του Ορισμού 1, μόνο ένα υποσύνολο χρηστών στο σύνολο J μπορεί να συνδεθεί με μία κυψέλη $c \in C$. Ορίζουμε αυτό το σύνολο σαν S_c :

$$S_c := \{j \in J \mid \gamma_{c,j} \geq \Gamma_j\} \text{ and } S_c \subseteq J \quad (26)$$

Ξανά, υποθέτουμε ότι το S_c μπορεί να υπολογιστεί από κάθε κυψέλη $c \in C$. Διαισθητικά το S_c περιέχει του χρήστες στην περιοχή κάλυψης της κυψέλης c .

Βασιζόμενοι στους Ορισμούς 1 και 2, και σύμφωνα με το [72], το πρόβλημα **CP** μπορεί να ξαναγραφεί σαν ένα χωρικά περιορισμένο πρόβλημα, το οποίο ονομάζουμε **intra-Cell Local optimization Problem**,

$$\begin{aligned} \text{CLP:} \quad & \max_{w,x} \sum_{j \in S_c} U_j(w_{c,j})x_{c,j} + \sum_{j \in S_c} \mu_j \left(\frac{1}{|S_j|} - x_{c,j} \right) \\ & \text{st.} \quad \sum_{j \in S_c} w_{c,j}x_{c,j} \leq W_c^{\max} \\ & x_{c,j} \in \{0,1\}, \forall j \in S_c \end{aligned} \quad (27)$$

όπου το $(W, X)^S$ καθορίζει το σύνολο των εφικτών λύσεων όλων των ανεξάρτητων κυψελών. Ισχύει πως $(W, X) \subseteq (W, X)^S$. Συνεπώς, δοθέντος ενός διανύσματος πολλαπλασιαστών $\boldsymbol{\mu}(t) = (\mu_1(t), \dots, \mu_{N_j}(t))$, μία χρονική στιγμή t , το

$(w, x)_t^S \equiv (w, x)_{t, \mu(t)}^S \in (W, X)^S$ περιγράφει όλα τα διανύσματα ανάθεσης ισχύος, όλων των κυψελών του συστήματος, όπου το $(w, x)_{t, \mu(t)}^S = ((w, x)_{t, \mu(t)}^{1,S}, \dots, (w, x)_{t, \mu(t)}^{c,S}, \dots, (w, x)_{t, \mu(t)}^{N_c,S})$ λαμβάνεται από την επίλυση όλων των προβλημάτων **CLP**, ανεξάρτητα από κάθε κυψέλη c .

Το πρόβλημα **CLP** είναι αντίστοιχο με ένα πρόβλημα σακιδίου (knapsack problem) του οποίου στόχος είναι να επιλέξει το πιο επικερδές υποσύνολο του S_c δεδομένου ότι η συνολική απαίτηση πόρων δεν θα ξεπερνά το W_c^{\max} . Στο **CLP**, το $U_j(w_{c,j}) - \mu_j$ ορίζει ο κέρδος που αποκομίζει η κυψέλη c από την επιλογή του χρήστη j , το οποίο με τη σειρά του εξαρτάται από τους πόρους $w_{c,j}$ που του αναθέτει.

Πρακτικότητα και Σπουδαιότητα. Η πρακτικότητα επίλυσης των προβλημάτων **CLP** (27), έγκειται στην ύπαρξη μεθόδων και τεχνικών που έχουν προταθεί στην βιβλιογραφία και αντιμετωπίζουν το πρόβλημα της ενδοκυψελικής ανάθεσης πόρων για μία πληθώρα τεχνολογιών πρόσβασης, δεδομένων των περιορισμών **ΥΠ1-ΥΠ3** και των τιμών μ . Συγκεκριμένα, αντί του δυαδικού προβλήματος σακιδίου (Binary knapsack problem) (27), υιοθετούμε μια τροποποιημένη εκδοχή του, που περιγράφεται ακολούθως,

$$\begin{aligned} \widehat{\text{CLP}}: \quad & \max_{(w)_{t, \mu(t)}^{c,S}} \sum_{j \in S_c} [U_j(w_{c,j}) - \mu_j] \\ & \text{st. } \sum_{j \in S_c} w_{c,j} \leq W_c^{\max} \end{aligned} \quad (28)$$

όπως αποδεικνύεται και στα [70] και [72]. Στο παραπάνω πρόβλημα, οι τιμές του διανύσματος μ υπολογίζονται με χρήση μίας μεθόδου υποβαθμίδων (sub-gradient method), όπως αναλύεται παρακάτω. Συνεπώς, ο μόνος άγνωστος είναι το διάνυσμα $(w)_{t, \mu(t)}^{c,S}$, όπου $0 \leq w_{c,j}(t) \leq W_c^{\max} \quad \forall j \in S_c$. Μετά την επίλυση του $\widehat{\text{CLP}}$ μπορούμε να διακρίνουμε δύο σύνολα χρηστών, τους χρήστες στους οποίους δεν ανατίθενται

καθόλου πόροι δηλαδή, $w_{c,j}(t)=0$, και τους χρήστες στους οποίους ανατίθενται πόροι, δηλαδή $w_{c,j}(t)>0$, όπως και στα [16], [47]. Με αυτόν τον τρόπο, το διάνυσμα $(x)_{t,\mu(t)}^{c,S}$ μπορεί να υπολογιστεί έμμεσα, από την τελική κατανομή πόρων, δηλαδή όταν $w_{c,j}(t)=0$ τότε $x_{c,j}(t)=0$, αλλιώς $x_{c,j}(t)=1$. Η περιγραφή και αντιστοίχιση των προβλημάτων **CLP/CLP** σε υπάρχουσα προβλήματα ενδοκυψελικής κατανομής πόρων για μια πληθώρα τεχνολογιών πρόσβασης παρουσιάζονται στην παράγραφο 5.7.

5.5. Διακυψελική Διαχείριση Πόρων

Αυτό που απομένει λοιπόν, είναι ο υπολογισμός τους διανύσματος μ διαμέσου της επίλυσης του (24). Αξίζει να τονίσουμε πως, ακόμα και αν τα διανύσματα $(w, x)_{t,\mu(t)}^S$ αποτελούν εφικτές λύσεις των N_c **CLP** προβλημάτων και συνεπώς συμμορφώνονται με τους περιορισμούς της εκάστοτε κυψέλης, αυτό δεν εγγυάται τη συμμόρφωση με τον περιορισμό (16) του **GP** (δηλαδή, κάθε χρήστης πρέπει να είναι ανά πάσα χρονική στιγμή συνδεδεμένος μόνο σε μία κυψέλη). Είναι το βασικό πρόβλημα (24) που καθοδηγεί το συνολικό δίκτυο στην ικανοποίηση του περιορισμού (16), μέσω του κόστους των χρηστών, δηλαδή τους πολλαπλασιαστές μ .

Στοχεύοντας στην επίλυση του (24) και συνεπώς, του δυικού προβλήματος **GD**, εφαρμόζουμε μία μέθοδο προβολής σε υποβαθμίδες (gradient projection method), όπου οι πολλαπλασιαστές μ (δηλαδή το κόστος των χρηστών) ανανεώνονται προς την αντίθετη κατεύθυνση του $\nabla DL(\mu) \forall j \in J$, σύμφωνα με:

$$\mu_j(t+1) = \mu_j(t) - q(t) \frac{\partial D(\mu(t))}{\partial \mu_j} \quad (29)$$

όπου $q(t)=\varepsilon$ είναι ένα σταθερού μεγέθους βήμα, η επιλογή του οποίου, όπως επίσης και οι τιμές του σχολιάζονται στην Παράγραφο 5.6. Συνεπώς,

$$\frac{\partial DL(\mu(t))}{\partial \mu_j} = -\sum_{c \in C} x_{c,j} + \sum_{c \in C} \frac{1}{N_c} = -\sum_{c \in C} x_{c,j} + 1 \stackrel{C \rightarrow S_j}{=} 1 - \sum_{c \in S_j} x_{c,j} = 1 - x_j^{S_j} \quad (30)$$

όπου το $x_j^{S_j}$ μπορεί να ερμηνευτεί ως η συνολική ζήτηση/ανταγωνισμό για τον χρήστη j από τις κυψέλες στην γειτονιά του. Αντικαθιστώντας την (30) στην (29) έχουμε τον ακόλουθο κανόνα ανανέωσης:

$$\mu_j(t+1) = \mu_j(t) - \varepsilon(1 - x_j^{S_j}) \quad (31)$$

Παρατηρώντας την (31), βλέπουμε πως ακολουθεί τον κανόνα αγοράς και ζήτησης, σύμφωνα με τον οποίον τα αγαθά είναι οι χρήστες και οι πελάτες είναι οι κυψέλες. Έτσι εάν η ζήτηση για ένα χρήστη j , $x_j^{S_j}$, είναι υψηλή και υπερβαίνει τη διάθεση (στην περίπτωση μας ένας χρήστης μπορεί να συνδεθεί σε μόνο μία κυψέλη), τότε η τιμή αυτού του χρήστη μεγαλώνει, διαφορετικά μικραίνει.

Συνοψίζοντας, σε κάθε επανάληψη t , οι κυψέλες επιλύουν ανεξάρτητα τα προβλήματα **CLP** δοθέντων των τιμών μ , και επικοινωνούν τα αποτελέσματα $x_{c,j}$ στους χρήστες της περιοχής κάλυψής τους S_c . Κάθε χρήστης j με τη σειρά του, ανανεώνει την τιμή του κόστους του μ_j σύμφωνα με την (31), μεταδίδει αυτή τη τιμή σε κάθε κυψέλη c στην γειτονιά του S_j , και ο κύκλος επαναλαμβάνεται.

Στον Πίνακα IX παρουσιάζεται συγκεντρωτικά η λειτουργία του προτεινόμενου καταναμημένου αλγόριθμου. Σε κάθε επανάληψη, τα προβλήματα **CLP** επιλύονται και προκύπτουν διανύσματα βέλτιστης ενδοκυψελικής κατανομής πόρων. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, μπορεί να υπάρξουν περιπτώσεις που ένας χρήστης έχει επιλεγεί από παραπάνω από μία κυψέλη την ίδια χρονική στιγμή, παραβαίνοντας τον περιορισμό (16). Είναι η ανανέωση και η σύγκλιση του διανύσματος μ στο μ^* ,

που οδηγεί τελικά στην ικανοποίηση του (16). Συγκεκριμένα, καθώς ένας χρήστης j επιλέγεται από παραπάνω της μίας κυψέλης, το κόστος του μ_j αυξάνει (ανά επανάληψη) και συνεπώς, γίνεται λιγότερο ελκυστικός προς αυτές. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρις ότου μόνο μία κυψέλη επιλέξει (ενδιαφέρεται) για αυτόν τον χρήστη. Ο αλγόριθμος τερματίζει μόνον όταν ο περιορισμός (16) ικανοποιηθεί.

5.5.1. Λειτουργικά Χαρακτηριστικά

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, το πρόβλημα **GP** ανήκει στην οικογένεια των Γενικευμένων Αμοιβαίων Προβλημάτων Ανάθεσης (Generalized Mutual Assignment Problem - GMAP), το οποίο είναι NP-δύσκολο. Ωστόσο, έξυπνοι τρόποι βέλτιστης επίλυσης των μετασχηματισμένων προβλημάτων $\widehat{\text{CLP}}$ έχουν προταθεί στην βιβλιογραφία (βλέπε [16], [23], [47], [49]) με αποδεδειγμένη πολυπλοκότητα, οι οποίοι και μπορούν να ενσωματωθούν στο προτεινόμενο πλαίσιο μας. Σύμφωνα με τα προηγούμενα, η εξεύρεση μιας πλησιοβέλτιστης λύσης του συνολικού προβλήματος **GP** διαμέσου της προτεινόμενης μεθοδολογίας εξαρτάται α) από την βέλτιστη επίλυση των προβλημάτων $\widehat{\text{CLP}}$ και β) την επαναληπτική ανανέωση του διανύσματος των πολλαπλασιαστών Lagrange

ΠΙΝΑΚΑΣ IX: Multi-access Multi-cell Resource Allocation (MMRA)

Αλγόριθμος του Κινητού Χρήστη j
<p>Σε κάθε επανάληψη $t=1,2,\dots$, ο κινητός χρήστης j:</p> <p>Βήμα 1. Λαμβάνει από τις κυψέλες της γειτονιάς του τα αποτελέσματα $x_{c,j} \forall c \in S_j$.</p> <p>Βήμα 2. Υπολογίζει το νέο του κόστος $\mu_j(t+1)$ σύμφωνα με την (31).</p> <p>Βήμα 3. Μεταδίδει το νέο κόστος $\mu_j(t+1)$ και το $x_j^{S_j}$ σε κάθε κυψέλη στο S_j.</p>
Αλγόριθμος στην Κυψέλη c

Σε κάθε επανάληψη $t=1,2,\dots$, η κυψέλη c :

Βήμα 1. Λαμβάνει τα κόστη $\mu(t)$ όλων των χρηστών $j \in S_c$, καθώς και τα $x_j^{S_j}$.

Για $t=0$ τότε $\mu(t)=(0,\dots,0)$.

Βήμα 2. Αν $x_j^{S_j} = 1, \forall j \in S_c$ τότε **Τερμάτισε**.

Βήμα 3. Λύσε το αντίστοιχο πρόβλημα $\widehat{\text{CLP}}$ (ενδοκυψελική ανάθεση πόρων) ανάλογα με την τεχνολογία πρόσβασης (Παράγραφος 5.7).

Βήμα 4. Επικοινωνήσε τα αποτελέσματα $x_{c,j}(t+1)$ με όλους τους χρήστες στο S_c .

1. Κατανεμημένος Τερματισμός. Η συνθήκη τερματισμού επιτυγχάνεται όταν το συνολικό σύστημα φτάσει σε μία εφικτή λύση του αρχικού προβλήματος, δηλαδή όταν ο περιορισμός (16) ικανοποιείται καθολικά (δηλαδή μία κυψέλη ανά χρήστη). Καθώς ο περιορισμός είναι πολύ πιθανό να μην ικανοποιηθεί ταυτόχρονα από όλες τις κυψέλες, και για την διευκόλυνση της επιτυχούς σύγκλισης, κάθε κυψέλη συνεχίζει να μεταδίδει τις τελευταίες τιμές της (δηλαδή την επιλογή των χρηστών και την ανάθεση των πόρων) μέχρι το σύστημα να φτάσει σε ένα σταθερό σημείο και να συγκλίνει.

2. Πολυπλοκότητα. Η πολυπλοκότητα και των δύο αλγορίθμων είναι πολύ χαμηλή. Συγκεκριμένα, λαμβάνοντας υπόψη τις χαμηλές υπολογιστικές δυνατότητες των κινητών κόμβων, ο MMRA αλγόριθμος στον κινητό κόμβο απαιτεί μόνο την πραγματοποίηση κάποιων απλών μαθηματικών πράξεων σύμφωνα με την (31). Επίσης, απαιτεί την αποθήκευση στην μνήμη μόνον $3+|S_j|$ πραγματικών αριθμών, μέγεθος πολύ μικρό ακόμα και για κινητές συσκευές. Αναφορικά με τον αλγόριθμο MMRA στο σταθμό βάσης της κυψέλης, η συνολική πολυπλοκότητα εξαρτάται αποκλειστικά από την πολυπλοκότητα των αλγορίθμων που επιλύουν τα προβλήματα CLP, η οποία και θα αναλυθεί στην Παράγραφο 5.6.

Τέλος, η απαιτούμενη σηματοδοσία είναι πολύ περιορισμένη, αποτελούμενη από μόνον N_j πραγματικούς αριθμούς ανά επανάληψη, (δηλαδή την μετάδοση των τιμών

των χρηστών), η οποία μπορεί εύκολα να ενσωματωθεί σε ήδη υπάρχουσα σηματοδοσία σύγχρονων 3GPP συστημάτων. Επιπλέον, ένα άνω όριο του αριθμού των επαναλήψεων που απαιτούνται για τη σύγκλιση του αλγόριθμου παρατίθεται στην επόμενη παράγραφο, ενώ αριθμητικά αποτελέσματα για συγκεκριμένα σενάρια παρουσιάζονται στην Παράγραφο 5.8.

5.6. Στοχεύοντας στην Πλησιοβελτιστότητα και τη Σύγκλιση

Σε αυτή τη παράγραφο μελετάμε τις πλησιοβέλτιστες ιδιότητες και τη σύγκλιση του προτεινόμενου MMRA αλγόριθμου. Προτού συνεχίσουμε, αξίζει να διαφοροποιήσουμε την δουλειά μας από την κοινώς εφαρμοζόμενη μεθοδολογία των [15] και [16], σύμφωνα με τα οποία η σύγκλιση επιτυγχάνεται λόγω της αυστηρώς φθίνουσας φύσης της δυικής συνάρτησης. Σύμφωνα με το [69], δείχνεται πως τόσο οι βασικές, όσο και οι δυικές μεταβλητές (οι πολλαπλασιαστές Lagrange) συγκλίνουν στην βέλτιστη λύση τους, αρκούντως της απόδειξης ότι η συνάρτηση gradient της δυικής συνάρτησης είναι Lipschitz και κάτω φραγμένη. Στην περίπτωση μας, επιδιώκοντας ένα πλαίσιο ανεξάρτητο των υποκειμένων τεχνολογιών πρόσβασης, αποτρέπεται η εφαρμογή και υιοθέτηση της παραπάνω μεθοδολογίας, καθώς η αναλυτική και άμεση έρευνα της σύγκλισης στο βέλτιστο σημείο των ενδοκυψελωτών διανυσμάτων ανάθεσης ισχύος, δεν μπορεί να εφαρμοστεί. Παρόλα αυτά, η σύγκλιση καθώς και όρια πλησιοβελτιστότητας (καθώς το πρόβλημα **GP** είναι NP-δύσκολο) μελετούνται και αποδεικνύονται.

Στη συνέχεια, αρχικά μελετάμε τη σύγκλιση της ακολουθίας $\{(w, x)_t^s\}$ του **GD** στο βέλτιστο διάνυσμα πόρων $(w, x)_{t, \mu}^s$. Συγκεκριμένα, παραθέτουμε ένα άνω και ένα κάτω όριο της τιμής της κύριας συνάρτησης (δηλαδή της συνάρτησης του **GP** όταν $(x, w) = (w, x)^*$) και του αποτελέσματος της προτεινόμενης μεθόδου (δηλαδή

της δυικής συνάρτησης του **GD** όταν $(x, w) = (w, x)_{t, \mu^*}^S$, που επιλύει το **GP** βασιζόμενο στις πληροφορίες από το σύνολο των πολλαπλασιαστών Lagrange. Στη συνέχεια αποδεικνύουμε τη σύγκλιση της ακολουθίας $\{\mu(t)\}$ στη βέλτιστη τιμή μ^* για βήμα σταθερού μεγέθους ε (σύμφωνα με τα [68] και [73]). Επιπλέον, σκιαγραφούμε και σχολιάζουμε το ρυθμό σύγκλισης της προτεινόμενης κατανεμημένης λύσης ως συνάρτηση της διαστασιολόγησης του συστήματος. Τέλος, συνοψίζουμε αναφερόμενοι στην σταθερότητα του μηχανισμού MMRA.

5.6.1. Σύγκλιση της Ακολουθίας μεταβλητών $\{(w, x)_{t, \mu(t)}^S\} \rightarrow (w, x)_{t, \mu^*}^S$

Εκμεταλλευόμενοι τις προτάσεις 1 και 2 του [55] και την ανάλυση στο [72] (παράγραφος 8.3.1) μπορούμε να εξάγουμε τα ακόλουθα λήμματα.

Λήμμα 1. Για μία οποιαδήποτε τιμή του μ , το συνολικό άθροισμα των συναρτήσεων χρησιμότητας όλων των κυψελών $c \in C$, δεδομένης της ύπαρξης βέλτιστης ενδοκυψελικής κατανομής πόρων (δηλαδή των προβλημάτων **CLP** $\forall c \in C$), παρέχει ένα **άνω όριο (upper bound - UB)** της βέλτιστης τιμής της συνολικής χρησιμότητας του συστήματος, δηλαδή,

$$\sum_{c \in C} \sum_{j \in J} U_j(w_{c,j}) x_{c,j} \Big|_{\substack{(x,w)= \\ (w,x)_{t, \mu(t)}^S}} \geq \sum_{c \in C} \sum_{j \in J} U_j(w_{c,j}) x_{c,j} \Big|_{\substack{(x,w)= \\ (w,x)^*}}$$

όπου το μ αναπαριστά ένα διάνυσμα εφικτών πολλαπλασιαστών Lagrange στο **GD**.

Απόδειξη: Αρχικά παραθέτουμε τα ακόλουθα Λήμματα, που αφορούν μονοκυψελωτά συστήματα, και στη συνέχεια θα τα γενικεύσουμε.

Λήμμα 1.1. Δεδομένου του συνόλου των χρηστών S_c στην περιοχή κάλυψης μιας κυψέλης c και του αντίστοιχου διανύσματος ενδοκυψελικής ανάθεσης πόρων $(w^*, x^*)^{c, S_c}$ που λαμβάνουμε από την επίλυση του **CLP**, για κάθε υποσύνολο

χρηστών του S_c , $S_c' \subseteq S_c$, το άθροισμα των τιμών των συναρτήσεων χρησιμότητας των χρηστών του S_c' (δηλαδή η συνολική χρησιμότητας που επιτυγχάνεται από τη βέλτιστη επίλυση του αντίστοιχου προβλήματος **CLP**, οριζόμενη ως $(w^*, x^*)^{c, S_c'}$) είναι άνω φραγμένη από το άθροισμα των συναρτήσεων χρησιμότητας των χρηστών του S_c , δηλαδή,
$$\sum_{j \in S_c'} U_j(w_j^*)x_j^* \geq \sum_{j \in S_c} U_j(w_j^*)x_j^*$$

Απόδειξη: Αρχικά υποθέτουμε πως $S_c' = S_{c/j}$ (το σύνολο των χρηστών του S_c χωρίς τον χρήστη j) και θεωρούμε τη βέλτιστη λύση $(w^*, x^*)^{c, S_c'}$ του προβλήματος **CLP** της κυψέλης c για $S_c' \subseteq S_c$. Διαισθητικά, αυτό περιγράφει την περίπτωση που ο χρήστης j εισέρχεται στο δίκτυο. Στο καινούριο πρόβλημα **CLP** που πια τίθεται, παρουσία του χρήστη j , προκειμένου να επιτευχθεί η μεγιστοποίηση της απόδοσης ένα από τα ακόλουθα μπορεί να συμβεί:

α) να μην αποδοθούν στο χρήστη j πόροι και συνεπώς, το σύστημα παραμένει στην πρότερα κατάσταση, δηλαδή, $(w_j, x_j) = (0, 0) \Rightarrow \sum_{j \in S_c} U_j(w_j^*)x_j^* = \sum_{j \in S_c'} U_j(w_j^*)x_j^*$,

β) να αποδοθούν στον χρήστη j πόροι, μόνον και μόνον εάν η συνολική απόδοση του συστήματος αυξηθεί, δηλαδή, $(w_j, x_j) = (w^*, 1) \Rightarrow \sum_{j \in S_c} U_j(w_j^*)x_j^* > \sum_{j \in S_c'} U_j(w_j^*)x_j^*$,

δεδομένου ότι το πρόβλημα **CLP** πάντα στοχεύει στη βελτιστοποίηση της απόδοσης.

Η παραπάνω θεώρηση μπορεί να γενικευτεί και για την περίπτωση που περισσότεροι χρήστες εισέρχονται στο σύστημα, ολοκληρώνοντας την απόδειξη ■

Με απλά λόγια το *Λήμμα 1.1* λέει πως η συνολική απόδοση μιας κυψέλης δεδομένου ενός συνόλου χρηστών, δεν μπορεί ποτέ να είναι χαμηλότερη από αυτήν που θα επιτύγχανε μία κυψέλη αποκλείοντας έναν ή περισσότερους χρήστες. Αυτή είναι μια απόλυτα αναμενόμενη ιδιότητα, καθώς το πρόβλημα βελτιστοποίησης **CLP** πάντα θα επιλέξει εκείνο το υποσύνολο χρηστών (από τους διαθέσιμους) που θα

εγγυάται τη μεγιστοποίηση της συνολικής απόδοσης. Διαισθητικά, το *Λήμμα 1.1* τονίζει πως σε έναν χρήστη που επιζητά πόρους, αυτοί θα ανατεθούν εάν και μόνον εάν αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της συνολικής απόδοσης, ή αντίστροφα, ένα μεγαλύτερο σύνολο υποψήφιων χρηστών εξασφαλίζει την ίδια ή μεγαλύτερη συνολική απόδοση.

Θεωρούμε τώρα την ύπαρξη πολλαπλών κυψελών στο σύστημα όπως και στο προτεινόμενο μοντέλο μας. Σε κάθε επανάληψη t , και για ένα δεδομένο διάνυσμα $\mu(t)$, οι κυψέλες επιλύουν βέλτιστα τα ανεξάρτητα **CLP** προβλήματα τους, καθορίζοντας το σύνολο των χρηστών από τους διαθέσιμους πόρους στην περιοχή κάλυψής τους S_c , στους οποίους και θα ανατεθούν οι εκάστοτε πόροι. Δηλαδή σε κάθε επανάληψη υπολογίζεται το διάνυσμα $(w, x)_{t, \mu(t)}^S$. Σε οποιαδήποτε επανάληψη πριν τον τερματισμό του αλγόριθμου, όπου $\mu(t) \neq \mu^*$, ένας χρήστης μπορεί να έχει επιλεγεί από παραπάνω της μίας κυψέλης, καταπατώντας τον περιορισμό (16). Αν ορίσουμε σαν S_c^* το βέλτιστο σύνολο χρηστών που θα επιλεγούν τελικά από την κυψέλη c , και ικανοποιούν τον περιορισμό (16), δεδομένου ότι τώρα $\mu(t) = \mu^*$, ισχύει ότι $S_c^* \subseteq S_c \subseteq J$ για όλες τις κυψέλες. Συνεπώς, σύμφωνα με το *Λήμμα 1.1*, έχουμε

$$\sum_{j \in J} U_j(w_{c,j})x_{c,j} \Big|_{\substack{(x,w)= \\ (w,x)_{t, \mu(t)}^{c, S_c}}} \geq \sum_{j \in J} U_j(w_{c,j})x_{c,j} \Big|_{\substack{(x,w)= \\ (w,x)_{\mu^*}^{c, S_c^*}}}$$

Γενικεύοντας για όλες τις κυψέλες, και αθροίζοντας όλες τις συναρτήσεις χρησιμότητας των κυψελών $c \in C$ στην επανάληψη t , έχουμε

$$\sum_{c \in C} \sum_{j \in J} U_j(w_{c,j})x_{c,j} \Big|_{\substack{(x,w)= \\ (w,x)_{t, \mu(t)}^S}} \geq \sum_{c \in C} \sum_{j \in J} U_j(w_{c,j})x_{c,j} \Big|_{\substack{(x,w)= \\ (w,x)_{\mu^*}^{c, S_c^*}}}$$

που ολοκληρώνει την απόδειξη μας. ■

Με άλλα λόγια, η βέλτιστη λύση του **GD** (χωρίς τον περιορισμό (16)), που επιτυγχάνεται μέσω της συνάθροισης των υποπροβλημάτων **CLP**, ενεργεί ως ένα άνω όριο (upper bound - **UB**) της λύσης του **GP**. Συνεπώς, η λύση του δυικού προβλήματος που επιτυγχάνει ο αλγόριθμος μας, είναι μοναδική, υπό την έννοια ότι υπολογίζει ένα άνω όριο **UB** που συγκλίνει στη βέλτιστη λύση. Διαισθητικά, το *Λήμμα 1* υπονοεί πως για την επίτευξη του βέλτιστου σημείου λειτουργίας του συστήματος μας θα ήταν υποχρεωτική η ανάθεση κάποιων χρηστών σε παραπάνω της μίας κυψέλης, παραβιάζοντας τον περιορισμό (16). Επίσης, σύμφωνα με τα παραπάνω, το υπολογιζόμενο άνω όριο μπορεί να μειωθεί και να προσεγγίσει πολύ κοντά στη βέλτιστη λύση θέτοντας τις κατάλληλες τιμές στο διάνυσμα πολλαπλασιαστών μ .

Λήμμα 2. Για κάποια τιμή του μ , εάν όλες οι κυψέλες ικανοποιούν τον περιορισμό (16) του **GP**, όπως συμβαίνει και στην περίπτωση που $\mu = \mu^*$, τότε, οι υπολογισθέντες ανά κυψέλη βέλτιστες λύσεις των υποπροβλημάτων **CLP** αποτελούν μία βέλτιστη λύση για το **GP**. Συνεπώς, εάν $\mu = \mu^*$ το κάτω όριο (**lower bound - LB**) της συνολικής απόδοσης του συστήματος εκφρασμένη σαν το άθροισμα των βέλτιστων λύσεων των υποπροβλημάτων **CLP** είναι,

$$\sum_{c \in C} \sum_{j \in J} U_j(w_{c,j}) x_{c,j} \Big|_{\substack{(x,w) = \\ (w,x)^*}} \geq \sum_{c \in C} \sum_{j \in J} U_j(w_{c,j}) x_{c,j} \Big|_{\substack{(x,w) = \\ (w,x)_{t,\mu^*}^s}} .$$

Απόδειξη: Δεδομένου ότι η κοίλη συνάρτηση Lagrange $L(x, w, \mu)$ είναι φθίνουσα ως προς μ και άνω φραγμένη από την τιμή της στο $(x, w) = (w, x)^*$, τότε $L(x^*, w^*, \mu^*) \geq L(x, w, \mu^*)$ όταν $\mu = \mu^*$ [72]. ■

Διαισθητικά, το *Λήμμα 2* δηλώνει πως όταν οι βέλτιστες λύσεις ανά κυψέλη που ικανοποιούν το *Λήμμα 1*, ικανοποιούν επίσης τον περιορισμό (16) του **GP**, τότε

αποτελούν μία εφικτή λύση που παρέχει ένα κάτω όριο της βέλτιστης τιμής του **GP**. Δηλαδή, η βέλτιστη λύση του δυικού προβλήματος, που στην περίπτωση μας είναι το **LB**, είναι σχεδόν ίσο και ποτέ μεγαλύτερο από τη βέλτιστη λύση του **GP**.

Τα *Λήμματα 1* και *2* εξασφαλίζουν πως καθώς η ακολουθία των πολλαπλασιαστών $\{\mu(t)\}$ συγκλίνει στη βέλτιστη τιμή της μ^* , οδηγώντας το συνολικό δίκτυο στην ικανοποίηση του περιορισμού (16), τότε η βέλτιστη λύση του συνολικού προβλήματος **GP** περιορίζεται μεταξύ των **UB** και **LB**. Συγκεκριμένα, καθώς η ακολουθία των πολλαπλασιαστών $\{\mu(t)\}$ συγκλίνει, το **LB** αυξάνει τείνοντας προς τη **μέγιστη δυνατή λύση**, το άνω όριο **UB** (που ουσιαστικά δίνεται από τη λύση του προτεινόμενου MMRA αλγόριθμου) μειώνεται, τείνοντας και αυτό **προς τη βέλτιστη λύση**. Η απόσταση μεταξύ των **UB** και **LB** (δηλαδή το **κενό**) υποδηλώνει πόσο κοντά η λύση μας προσεγγίζει τη βέλτιστη. Αξίζει να υπογραμμίσουμε πως παρόλη την κυρτή φύση του προβλήματος **GD**, η NP-πληρότητα του **GP** εμποδίζει την εξεύρεση της ακριβούς λύσης με ένα καταναμημένο τρόπο. Συνεπώς, παρόλο που σύμφωνα με την προτεινόμενη μέθοδο το κενό ελαχιστοποιείται παρέχοντας αποτελέσματα υψηλής ποιότητας, το ακριβές μέγεθος του παραμένει άγνωστο. Η παράμετρος ε , όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια, είναι αυτή που επηρεάζει το ρυθμό της σύγκλισης και συνεπώς καθορίζει και το μέγεθος του κενού μεταξύ των **UB** και **LB** [74], ανεξαρτήτως του γεγονότος ότι τα αποτελέσματα είναι πάντα πλησιοβέλιστα.

5.6.2. Σύγκλιση της ακολουθίας Πολλαπλασιαστών $\{\mu(t)\} \rightarrow \mu^*$.

Αυτό που απομένει είναι η σύγκλιση της ακολουθίας του διανύσματος των πολλαπλασιαστών που υπολογίζονται από την (31) στην βέλτιστη τιμή, δηλαδή στη βέλτιστη λύση του δυικού προβλήματος **GD**.

Λήμμα 3. Η ακολουθία των πολλαπλασιαστών Lagrange $\{\mu(t)\}$, όπως υπολογίζεται από την (31) με χρήση υποβαθμίδων και σταθερού βήματος $q(t)=\varepsilon$ είναι, υπό τους περιορισμούς Slater (Slater's Constraint Qualification), φραγμένη από:

$$\|\mu_j(t)\| \leq 3N_j N_c U^{\max} + \frac{\varepsilon L^2}{2} + \varepsilon L \quad \forall j \in J$$

όπου, $L = \sqrt{N_j} (N_c - 1) \quad \forall j \in J$, και το $U^{\max} = \max_{j \in J} U_j^{\max}$ υποδηλώνει το μέγιστο άνω όριο του αθροίσματος των συναρτήσεων χρησιμότητας των χρηστών, δεδομένου ότι αυτές φράσσονται από $U_j(w_{c,j}) \leq U_j^{\max} \quad \forall j \in J$.

Απόδειξη: Η απόδειξή μας βασίζεται στο Λήμμα 3 του [73]. Αρχικά δείχνουμε πως η ακολουθία των πολλαπλασιαστών είναι φραγμένη για $j \in J$, δηλαδή, υπάρχει ένας βαθμωτός αριθμός L τέτοιος ώστε $\|\nabla DL(\mu_j)\| \leq L \quad \forall j \in J$. Μετά από μερικές αριθμητικές πράξεις και βασιζόμενοι στο [69], έχουμε:

$$\|\nabla DL(\mu_j)\| \equiv \|\nabla DL(\mu_j)\|_2 \leq \sqrt{N_j} \|\nabla DL(\mu_j)\|_1 \leq \sqrt{N_j} \max_{j \in J} \left\{ 1 - \sum_{c \in S_j} x_{c,i} \right\} \leq \sqrt{N_j} (N_c - 1) = L \quad \forall j \in J$$

Συνεπώς ισχύει: (Ιδιότητα Φραγμένων Υποβαθμίδων - Bounded Subgradients Property)

$$\|\nabla DL(\mu_j)\| \leq L \quad \forall j \in J \quad (32)$$

όπου, $L = \sqrt{N_j} (N_c - 1)$. Βασιζόμενοι σε αυτό και το Λήμμα 3 στο [73], ισχύει πως η ακολουθία $\{\mu(t)\}$ με σταθερό βήμα ε , είναι άνω φραγμένη από

$$\|\mu_j(t)\| \leq \frac{2}{\gamma} (U((\bar{w}, \bar{x})) - DL(\mu^*)) + \max \left\{ \|\mu(0)\|, \frac{1}{\gamma} (U((\bar{w}, \bar{x})) - DL(\mu^*)) + \frac{\varepsilon L^2}{2\gamma} + \varepsilon L \right\} \quad \forall j \in J$$

και λόγω του ότι η βέλτιστη τιμή της δυικής λύσης δεν είναι γνωστή, αντικαθιστούμε το $DL(\mu^*)$ με $DL(\mu(0))$, αφού $DL(\mu^*) \geq DL(\mu(0))$, λαμβάνοντας την ακόλουθη νόρμα:

$$\|\mu_j(t)\| \leq \frac{2}{\gamma} (U((\bar{w}, \bar{x})) - DL(\mu(0))) + \max \left\{ \|\mu(0)\|, \frac{1}{\gamma} (U((\bar{w}, \bar{x})) - DL(\mu(0))) + \frac{\varepsilon L^2}{2\gamma} + \varepsilon L \right\} \quad \forall j \in J$$

όπου, $U((\bar{w}, \bar{x})) = \sum_{c \in C} \sum_{j \in J} U_j(w_{c,j}) x_{c,j} \Big|_{(x,w)=(\bar{w}, \bar{x})}$ είναι το άθροισμα της συνολικής

χρησιμότητας του συστήματος, η οποία και είναι άνω φραγμένη από την τιμή $N_j N_c U^{\max}$, υποθέτοντας πως οι συναρτήσεις χρησιμότητας των χρηστών είναι άνω φραγμένες, δηλαδή $U_j(w_{c,j}) \leq U_j^{\max} \quad \forall j \in J$, το οποίο είναι απόλυτα φυσιολογικό δεδομένης της κοίλης φύσης τους. Συνεπώς, μπορούμε να ορίσουμε $U^{\max} = \max_{j \in J} U_j^{\max}$

και $\gamma = \min_{j \in J} \{-g_j(\bar{x})\}$, όπου από τη (16) $g_j(\bar{x}) = \sum_{c \in C} x_{c,j} - 1 \quad \forall j \in J$. Τέλος, σύμφωνα

με τα προηγούμενα όρια, θέτουμε $\mu(0) = (0, \dots, 0)$ και άρα $DL(\mu(0)) > 0$, παίρνοντας έτσι το ακόλουθο χαλαρό, αλλά υπολογίσιμο όριο:

$$\|\mu_j(t)\| \leq \frac{3}{\gamma} N_j N_c U^{\max} + \frac{\varepsilon L^2}{2\gamma} + \varepsilon L \quad \forall j \in J \quad \blacksquare$$

Βασιζόμενοι στο *Λήμμα 3* το παρακάτω λήμμα εξασφαλίζει τη σύγκλιση των δυικών μεταβλητών στις βέλτιστες τιμές τους.

Λήμμα 4. Η ακολουθία των πολλαπλασιαστών Lagrange $\{\mu(t)\}$ όπως υπολογίζεται από την (31) με σταθερό βήμα ε συγκλίνει στη βέλτιστη δυική λύση μ^* σε πεπερασμένο χρόνο όταν $\varepsilon \ll 2/N_j(N_c - 1)^2$, ενώ ικανοποιούνται οι περιορισμοί κατά Slater (δηλαδή η **ΥΠ1**).

Απόδειξη: Λόγω της ιδιότητας των φραγμένων υποβαθμίδων (bounded subgradients property) όπως αποδείχτηκε στο *Λήμμα 3*, και της επιλογής ενός κατάλληλου σταθερού βήματος ε , για το οποίο ισχύει:

$$0 < \varepsilon < \frac{2(DL(\mu_j(t)) - DL(\mu^*))}{L^2} \quad \forall j \in J \quad (33)$$

τότε, όπως επιβεβαιώνεται και στα [68] και [73], η ακολουθία $\{\mu(t)\}$ συγκλίνει στη βέλτιστη τιμή μ^* καθώς,

$$\text{dist}^2(\mu_j(t+1), M^*) \leq \text{dist}^2(\mu_j(t), M^*) - 2\varepsilon(DF(\mu_j^*) - DF(\mu_j(t))) + \varepsilon^2 \|g_j\|^2$$

όπου M^* είναι το μη-κενό σύνολο λύσεων του δυικού προβλήματος **GD** και το $\text{dist}(y, Y)$ ορίζει την Ευκλείδεια απόσταση του διανύσματος y από το σύνολο Y . Αυτό διαισθητικά φαίνεται και από το γεγονός ότι το $\|\mu_j(t)\| \quad \forall j \in J$ είναι άνω φραγμένο (*Λήμμα 3*) και επίσης το $\{\mu_j(t)\}$ αυξάνει καθώς το t εξελίσσεται. Τέλος, προκειμένου να ορίσουμε ένα πρακτικό και εύκολα υπολογίσιμο βήμα ε , που να ικανοποιεί την (33), θεωρούμε πως $\varepsilon \ll 2/L^2$ και συνεπώς, $\varepsilon \ll 2/N_j(N_c - 1)^2$ λόγω της (32). Αυτό ολοκληρώνει την απόδειξη μας. ■

Τα *Λήμματα 3* και *4*, μαζί με την κυρτότητα του δυικού προβλήματος, εξασφαλίζουν τη σύγκλιση των δυικών πολλαπλασιαστών στη βέλτιστη τιμή τους, και συνεπώς στη βέλτιστη λύση του δυικού προβλήματος.

5.6.3. Παρατηρήσεις και Σχολιασμοί

Ακρίβεια και Πολυπλοκότητα: Υπάρχει ένας εγγενής συμβιβασμός μεταξύ της ακρίβειας των αποτελεσμάτων και της υπολογιστικής πολυπλοκότητας εξεύρεσης τους, που έγκειται στην επιλογή του κατάλληλου βήματος (σταθερού, ή μεταβαλλόμενου) για την βαθμωτή (subgradient) μέθοδο, όπως επίσης

επιβεβαιώνεται στο [58] και ποσοτικοποιείται στο [73]. Προκειμένου να αιτιολογήσουμε την επιλογή μας για ένα βήμα σταθερού μεγέθους, επιχειρηματολογούμε με βάση: α) την υιοθέτηση μίας μοναδικής παραμέτρου που ο πάροχος πρέπει να επιλέξει και οι χρήστες να εφαρμόσουν, (δηλαδή την παράμετρο ϵ , που μπορεί εύκολα να υπολογιστεί σύμφωνα με το *Λήμμα 4*), σε αντίθεση με άλλες προτεινόμενες μεθόδους που εφαρμόζουν φθίνοντα βήματα [55], β) τις καλές ιδιότητες σύγκλισης και βελτιστότητας της προτεινόμενης μεθόδου, γ) την έλλειψη ανάγκης συγχρονισμού μεταξύ των κυψελών για την επίτευξη σύγκλισης, ειδικότερα δεδομένης της κατανεμημένης και ασύρματης φύσης του συστήματος, και τέλος δ) την πρακτική εκτίμηση του ρυθμού σύγκλισης [68].

Χρόνος Σύγκλισης. Μπορούμε εύκολα να παρατηρήσουμε πως το φράγμα του *Λήματος 3* εξαρτάται μόνο από τις αλγοριθμικές παραμέτρους του εφαρμοζόμενου συστήματος, δηλαδή τον αριθμό των κυψελών και των αντίστοιχων χρηστών τους στην περιοχή. Συνεπώς, όσο μεγαλύτερο είναι το υποκείμενο δίκτυο, τόσο περισσότερος χρόνος απαιτείται για τη σύγκλιση του αλγόριθμού μας, αποκαλύπτοντας έναν ακόμα συμβιβασμό μεταξύ της βελτιστότητας και της απόδοσης της προτεινόμενης κατανεμημένης αρχιτεκτονικής.

Σταθερότητα μεταξύ των Επιπέδων Αποσύνθεσης. Στόχος μας είναι η εξεύρεση μιας τοπικά και λειτουργικά αποσυνδεδεμένης λύσης, υποκινούμενη από την ιεραρχική αποσύνθεση του προβλήματος σε δύο επίπεδα, όπως αναλύσαμε στην παράγραφο 5.3. Όταν όμως συνυπάρχουν παραπάνω του ενός επιπέδου αποσύνθεσης, μεταξύ των οποίων εφαρμόζονται επαναληπτικές διεργασίες, όπως και στην περίπτωση της μεθόδου υποβαθμίδων, ζητήματα σύγκλισης και σταθερότητας εγείρονται. Όπως αναφέρεται στο [54], προκειμένου να εξασφαλιστεί η σταθερότητα, τα προβλήματα χαμηλότερων επιπέδων πρέπει να επιλύονται σε γρηγορότερη χρονική κλίμακα από

τα προβλήματα των ανωτέρων επιπέδων, έτσι ώστε σε κάθε επανάληψη του γενικού προβλήματος του ανώτερου επιπέδου, όλα τα προβλήματα που είναι σε χαμηλότερα επίπεδα να έχουν ήδη συγκλίνει. Στην περίπτωση μας, αυτή η αναγκαία προϋπόθεση ισχύει, καθώς είναι η σύγκλιση των υποπροβλημάτων **CLP** που καθορίζει το χρονικό πλαίσιο της επανάληψης του ανώτερου προβλήματος (όπως επίσης υπονοείται από την **ΥΠ4**). Με απλά λόγια, προκειμένου οι χρήστες να ανανεώσουν τα κόστη τους μ , οι κυψέλες της γειτονιά τους πρέπει πρώτα να έχουν επιλύσει τα ανεξάρτητα τοπικά υποπροβλήματα βελτιστοποίησης τους.

5.7. Εφαρμόζοντας το Προτεινόμενο Πλαίσιο

Σύμφωνα με την ανωτέρω ανάλυση, το προτεινόμενο πλαίσιο (δηλαδή το **GP**) και ο αντίστοιχος καταναμημένος αλγόριθμος MMRA επιτρέπει την άμεση ενσωμάτωση οποιασδήποτε ασύρματης τεχνολογίας, εφόσον τα ενδοκυψελικά προβλήματα διαμοιρασμού πόρων **CLP** ικανοποιούν τις υποθέσεις **ΥΠ1** και **ΥΠ2**. Σε αυτή την παράγραφο, θα περιγράψουμε πως μερικά από τα πιο δημοφιλή αλλά και πιο διαφορετικά προβλήματα ενδοκυψελικού διαμοιρασμού πόρων ποικίλων τεχνολογιών πρόσβασης, που ήδη υπάρχουν στην βιβλιογραφία, μπορούν να ενσωματωθούν στο προτεινόμενο πλαίσιο.

5.7.1. CDMA Κυψελωτά Δίκτυα

Υιοθετούμε τη μεθοδολογία που παρουσιάζεται στο [23], και συμφωνεί με τις υποθέσεις **ΥΠ1-ΥΠ3**. Σύμφωνα με τον ορισμό του $\widehat{\text{CLP}}$, ισχύει η ακόλουθη αντιστοίχιση, $\bar{w}_{c,k} \equiv \bar{p}_{c,k} \quad \forall k \in S_c$, που ορίζει την ισχύ εκπομπής της κυψέλης c που ανατίθεται στους συνδεδεμένους χρήστες της, και το $\sum_{k \in S_c} \bar{w}_{c,k} \leq W_c^{\max} \equiv \sum_{k \in S_c} \bar{p}_{c,k} \leq P_c^{\max}$, ορίζει τον συνολικό περιορισμό της

εκπεμπόμενης ισχύος. Επιπλέον, το αντίστοιχο πρόβλημα διαχείρισης ισχύος μπορεί να μοντελοποιηθεί σαν: $\max_{\bar{p}} \sum_{k \in S_c} a_k \Psi_k(\gamma_{c,k}(\bar{p}_{c,k})) - \bar{\mu}_k$ s.t. $\sum_{k \in S_c} \bar{p}_{c,k} \leq P_c^{\max}$, όπου $U \equiv \Psi$ και a_k είναι ένα βάρος σχετιζόμενο με τον χρήστη. Το παραπάνω πρόβλημα μπορεί να λυθεί άμεσα εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο υποβαθμίδων που προτείνεται στο [40]. Να σημειωθεί πως η παράμετρος $\bar{\mu}_k$ είναι ένας γνωστός βαθμωτός που υπολογίζεται από τον MMRA, του οποίου η ύπαρξη δε μεταβάλλει ούτε τις ιδιότητες, ούτε τη λύση του προβλήματος.

5.7.2. Τοπικά Ασύρματα Δίκτυα WLAN

Με αντίστοιχο τρόπο, στην περίπτωση των WLAN [47], το $\bar{w}_{c,k}$ ορίζει το ρυθμό μετάδοσης του σημείου πρόσβασης (access point - AP) c προς το χρήστη k , δηλαδή $\bar{w}_{c,k} \equiv \bar{s}_{c,k} \forall k \in S_c$ και το W_c^{\max} συμβολίζει τον αντίστοιχο περιορισμό μέγιστου ρυθμού μετάδοσης του σημείου πρόσβασης, δηλαδή το C_c^{\max} . Συνεπώς, το αντίστοιχο πρόβλημα ανάθεσης εύρους ζώνης μπορεί να μοντελοποιηθεί σύμφωνα με το $\widehat{\text{CLP}}$, σαν ένα πρόβλημα βέλτιστης ανάθεσης παραθύρων ανταγωνισμού, $\sum_{k \in S_c} U_k(\bar{s}_{c,k}) - \bar{\mu}_j$ υπό των κατάλληλων περιορισμών μέγιστης χωρητικότητας και να λυθεί σύμφωνα με το [47].

5.7.3. Κοψελωτά Δίκτυα Διαίρεσης Συχνότητας OFDM και IEEE 802.16/WiMAX

Οι δύο τεχνολογίες μπορούν να υποστηριχτούν από το σχήμα MMRA, χρησιμοποιώντας τη μεθοδολογία του [49], σύμφωνα με το οποίο, ο χρονοπρογραμματισμός και ο διαμοιρασμός πόρων σε ένα δίκτυο OFDM μοντελοποιείται σαν ένα κυρτό πρόβλημα μεγιστοποίησης (το πρόβλημα (7) στο [49]) και επιλύεται με χρήση μεθόδων αποσύνθεσης. Επίσης, το πρόβλημα ικανοποιεί

της υποθέσεις **ΥΠ1-ΥΠ3** και μπορεί να αντιστοιχιστεί στο \widehat{CLP} . Έτσι, με $\bar{w}_{c,j} \equiv \bar{p}_{c,j,k}$ συμβολίζουμε την ισχύ εκπομπής που ανατίθεται στον χρήστη j για την υποφέρουσα k και με $W_c^{\max} \equiv P_c^{\max}$ τη συνολική ισχύ της κυψέλης. Συνεπώς, το πρόβλημα μπορεί να μοντελοποιηθεί σαν

$$\max \sum_{j,k} a_j z_{c,j,k} \log \left(1 + \frac{\bar{p}_{c,j,k} \gamma_{c,j,k}}{z_{c,j,k} + \beta \bar{p}_{c,j,k} \gamma_{c,j,k}} \right) - \bar{\mu}_j, \text{ υποκείμενο στους περιορισμούς}$$

μέγιστης ισχύος, όπου το z_{jk} καθορίζει εάν στο χρήστη j ανατίθεται η υποφέρουσα k , β είναι ο παράγοντας θορύβου και \mathbf{a} είναι ένα διάνυσμα βαρών.

5.8. Αριθμητικά Αποτελέσματα

Σε αυτή τη παράγραφο παραθέτουμε ορισμένα αριθμητικά αποτελέσματα, ενδεικτικά της αποτελεσματικότητας της προτεινόμενης μεθόδου, προκειμένου να καταδείξουμε και να επισημάνουμε τα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες της, αλλά και επίσης να αποδείξουμε την εφαρμοσιμότητα της σε ενοποιημένα ετερογενή ασύρματα συστήματα. Προς αυτό το στόχο, εξετάζουμε δύο διαφορετικά ετερογενή συστήματα, α) ένα ενοποιημένο CDMA / WLAN πολυκυψελωτό σύστημα, και β) ένα CDMA / WLAN / WiMAX (OFDM) δίκτυο.

Σε κάθε περίπτωση, οι υιοθετούμενοι ενδοκυψελικοί μηχανισμοί διαμοιρασμού πόρων που επιλέγονται για κάθε διαφορετικό δίκτυο, είναι σύμφωνοι με τις υποθέσεις και την ανάλυση της προηγούμενης παραγράφου. Συγκεκριμένα, η ενδοκυψελική ανάθεση πόρων στην περίπτωση των CDMA και WiMAX (OFDM) δικτύων πραγματοποιείται σύμφωνα με τα [23] και [49] αντίστοιχα. Υποθέτουμε πως το εύρος ζώνης εξάπλωσης (spreading bandwidth) σε CDMA δίκτυα είναι $W = 10\text{MHz}$, η μέγιστη ισχύς εκπομπής είναι $P_{\max} = 10\text{ Watt}$ και ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης της

κάτω ζεύξης των χρηστών είναι $R_j^{\max} = 2 \cdot 10^3$ kbps. Στην περίπτωση του WiMAX (OFDM), υποθέτουμε πως το εύρος ζώνης εξάπλωσης είναι επίσης $W = 10\text{MHz}$, χωρισμένο σε 128 υποφέρουσες και $P_{\max} = 10$ Watt. Τέλος, στην περίπτωση των WLAN, υποθέτουμε ότι το σημείο πρόσβασης βρίσκεται στο κέντρο της περιοχής κάλυψης και ότι λειτουργεί στην μπάντα των 5GHz, με θεωρητικά μέγιστο ρυθμό μετάδοσης τα 54Mbit/s. Η πραγματική χωρητικότητα του WLAN υπολογίζεται δυναμικά με χρήση ενός προσομοιωτή που υλοποιεί το IEEE 802.11e πρότυπο, ενώ η ανάθεση των πόρων πραγματοποιείται σύμφωνα με το [47].

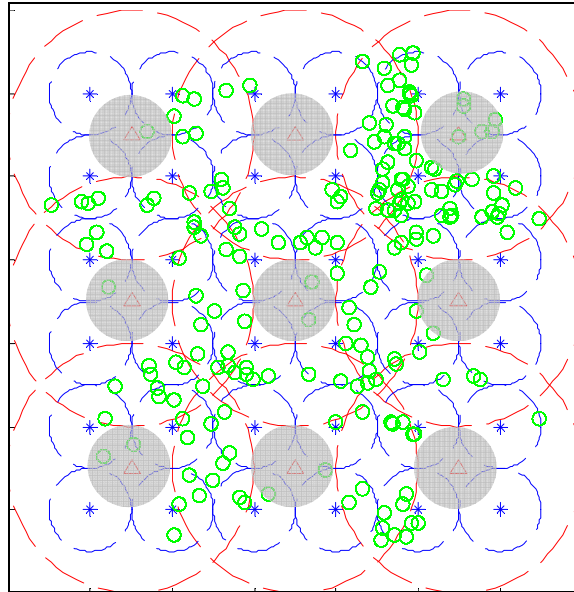
Μοντελοποιούμε το κέρδος μονοπατιού από το σταθμό βάσης (BS) ή το σημείο πρόσβασης (AP) στο χρήστη j ως $G_j = K_j / s_j^n$, όπου το s_j συμβολίζει την απόσταση που χωρίζει το χρήστη j από το BS/AP, n είναι ο παράγοντας απώλειας καναλιού ($n=4$) και το K_j είναι μια λογαριθμοκανονική κατανεμημένη μεταβλητή με μέσο όρο θ και διακύμανση $\sigma^2 = 8(\text{dB})$. Επίσης, χρησιμοποιούμε τεχνικές εκθετικού μέσου όρου προκειμένου να εξομαλύνουμε τα κανάλια που υπόκεινται σε φαινόμενα ταχείας διάλειψης. Σε κάθε χρήστη j στο ενοποιημένο σύστημα ανατίθεται μία κατάλληλη κοίλη συνάρτηση ικανοποίησης, που είναι συνάρτηση των ανατιθέμενων πόρων του R , $U_j(w_j) = (c + (aw_j)^b) / b$, σύμφωνα με την **ΥΠ2**. Ακόμα, προκειμένου να παράσχουμε δύο διαφορετικού τύπου υπηρεσίες, δηλαδή α) μία εφαρμογή βίντεο συνεχούς ροής (streaming video service), όπου οι χρήστες απαιτούν ένα σταθερό ρυθμό μετάδοσης (ServA) και β) μία υπηρεσία βέλτιστης προσπάθειας (best effort), παραδείγματος χάριν FTP (ServB), υιοθετούμε την ακόλουθη παραμετροποίηση. Για την ServA θέτουμε $(a,b,c) = (2, -1.8, 1)$, που αντιστοιχεί σε μία απόκριση αύξουσα συνάρτηση χρησιμότητας των ανατιθέμενων πόρων, ενώ για τη ServB, θέτουμε $(a,b,c) = (7, -0.5, 1)$, παίρνοντας μία ομαλά αυξανόμενη συνάρτηση της ικανοποίησης του χρήστη ως συνάρτηση των δεσμευμένων πόρων του. Αξίζει να τονίσουμε πως και

οι δύο συναρτήσεις είναι αρχικά εκφρασμένες ως συνάρτηση της πραγματικής ρυθμαπόδοσης του χρήστη, οι οποίες έπειτα υπόκεινται στην κατάλληλη αλλαγή μεταβλητής ανάλογα με τον τύπο του δικτύου, σύμφωνα με όσα περιγράφηκαν στην παράγραφο 5.7.

Τέλος, προκειμένου να κάνουμε εμφανή την αποδοτικότητα και ανωτερότητα του αλγόριθμου MMRA, συγκρίνουμε την απόδοση του με τρεις άλλες κοινώς χρησιμοποιούμενες τεχνικές επιλογής δικτύου πρόσδεσης, *i*) την **RSS (Radio Signal Strength)**, που επιλέγει την κατάλληλη κυψέλη για να συνδεθεί ο χρήστης με βάση την ποιότητα και ένταση του λαμβανόμενου σήματος [30], *ii*) την **SDiff (Service Differentiation)**, σύμφωνα με την οποία υπηρεσίες δεδομένων (ServB) εξυπηρετούνται από WLAN δίκτυα, ή WiMAX όταν δε υπάρχει κάλυψη WLAN, ενώ κίνηση σταθερού ρυθμού μετάδοσης (ServA) εξυπηρετείται από CDMA κυψέλες [40], και *iii*) την **MAXU, (Maximum Utility)**, στην οποία ένας χρήστης συνδέεται στην κυψέλη c από τις διαθέσιμες της γειτονιάς του που μεγιστοποιεί την απόδοση της συνάρτησης χρησιμότητας του, δεδομένων όλων των χρηστών στο S_c . Για λόγους δικαιοσύνης, η ενδοκυψελική ανάθεση πόρων παραμένει η ίδια ανεξαρτήτως του μηχανισμού επιλογής δικτύου πρόσδεσης, και πραγματοποιείται υιοθετώντας τους μηχανισμούς που περιγράφηκαν στην Παράγραφο 5.7, όπως και στην περίπτωση του MMRA.

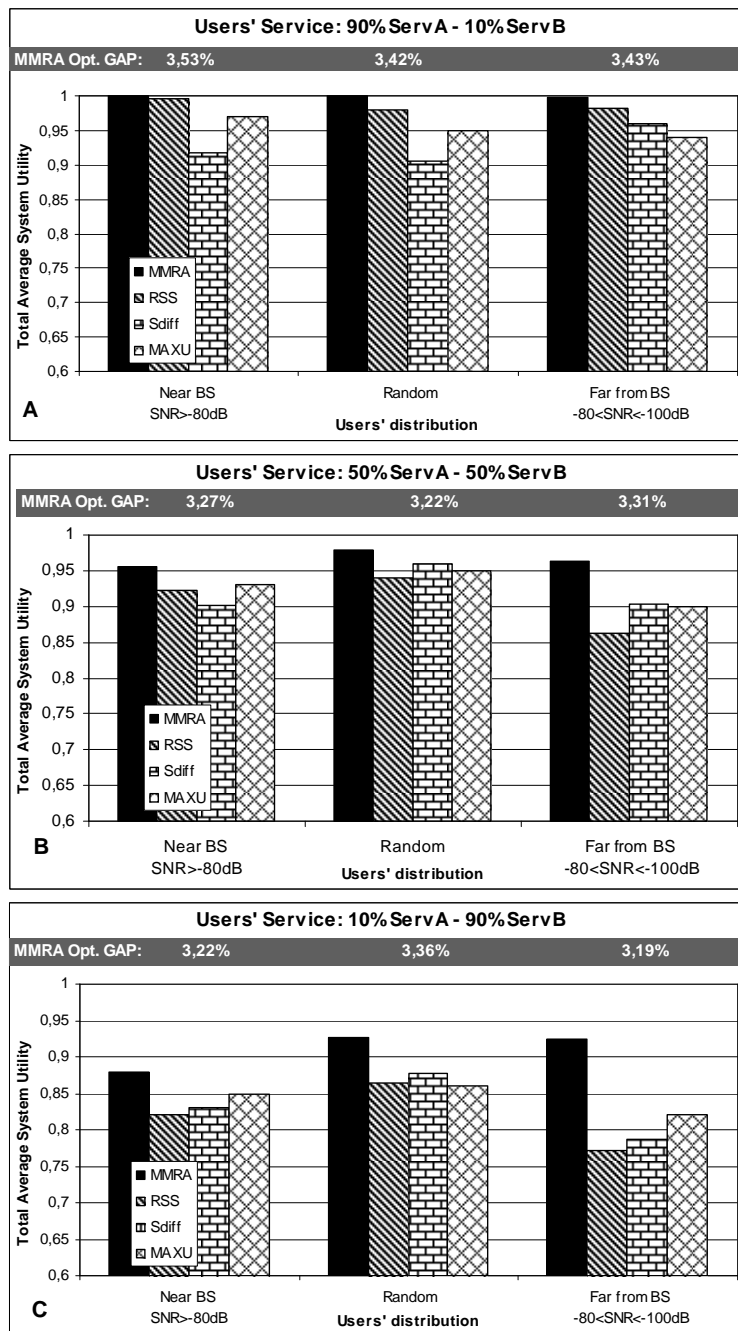
5.8.1. Ενοποιημένο Σύστημα CDMA/WLAN

Θεωρούμε ένα ετερογενές σύστημα CDMA/WLAN (IEEE 802.11e), με εννέα (9) CDMA κυψέλες (σημειωμένες κόκκινες) και τριάντα έξι (36) WLAN σταθμούς (σημειωμένους μπλε), όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 12. Στόχος μας είναι να κατανοήσουμε και να μελετήσουμε τα κύρια αρχιτεκτονικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά του προτεινόμενου μηχανισμού. Θεωρούμε 100 κινητούς χρήστες



Σχήμα 12: Το ενοποιημένο CDMA/WLAN σύστημα στην περίπτωση του “Far from BS”

(σημειωμένους πράσινους) στο σύστημα, οι οποίοι και αιτούνται υπηρεσίες και των δύο τύπων με έναν προκαθορισμένο τρόπο (δηλαδή αντίστοιχα ποσοστά των χρηστών ζητούν τις υπηρεσίες ServA και ServB). Παρουσιάζουμε τρεις διαφορετικές εκδοχές του συστήματος, ως συνάρτηση της γεωγραφικής κατανομής των χρηστών στο σύστημα με βάση το λαμβανόμενο σηματοθορυβικό λόγο SNR από τις κυψέλες. Συγκεκριμένα, παραθέτουμε αποτελέσματα για τις περιπτώσεις όπου το 90%, το 50% και το 10% των συνολικών χρηστών έχουν $SNR > 80dB$ (δηλαδή βρίσκονται στις γκρι περιοχές του Σχήματος 12), τι οποίες και ονοματίζουμε ως *Near BS*, *Random* και *Far from BS*, αντίστοιχα. Με αυτόν τον τρόπο, ουσιαστικά είμαστε ικανοί μελετήσουμε την απόδοση του συστήματος παρουσία διαφόρων συνθηκών, από συνωστισμένα κέντρα κυψελών (στα οποία οι χρήστες απολαμβάνουν καλή ποιότητα καναλιού), σε συνωστισμένα σύνορα των κυψελών, στα οποία οι χρήστες έχουν πολλαπλές επιλογές πρόσδεσης.



Σχήμα 13: Η συνολική απόδοση του CDMA/WLAN συστήματος εκφρασμένη με συναρτήσεις χρησιμότητας

Το Σχήμα 13 παρουσιάζει τη συνολική απόδοση του συστήματος εκφρασμένη μέσω των συναρτήσεων χρησιμότητας, ως συνάρτηση της γεωγραφικής κατανομής των χρηστών για διάφορα ποσοστά (%) των δύο τύπων αιτούμενων υπηρεσιών. Όλα τα αποτελέσματα αποτελούν τον μέσο όρο 10 επαναλήψεων. Τα αποτελέσματα αποδεικνύουν πως το σχήμα MMRA επιτυγχάνει τη μεγιστοποίηση της μέσης, ανά

χρήστη, ικανοποίησης (πάνω από 0.9 σε κάθε περίπτωση), υπερτερώντας σημαντικά των συγκρινόμενων μεθόδων σε κάθε περίπτωση. Όσο πιο μεγάλη η ποικιλομορφία του δικτυακού περιβάλλοντος, όσον αφορά είτε τη σποραδική κατανομή των χρηστών (βλέπε το δεξιό σει στηλών από κάθε Σχήμα), είτε τον τύπο των αιτούμενων υπηρεσιών (βλέπε το Σχήμα 13C όπου οι άπληστες υπηρεσίες δεδομένων μονοπωλούν το συνολικό φορτίο), τόσο μεγαλύτερη και η βελτίωση της απόδοσης στο MMRA. Συγκεκριμένα, ο μηχανισμός κόστους που ενσωματώνει ο MMRA, καθοδηγεί την επιλογή των δικτύων με τέτοιον τρόπο, διευθύνοντας την άνιση και ποικίλη κατανομή του φόρτου εργασίας στοχεύοντας στη συνολική μεγιστοποίηση των συναρτήσεων χρησιμότητας ολόκληρου του συστήματος, καταλήγοντας τελικά σε αυξημένη χρησιμοποίηση του συστήματος.

Το σχήμα RSS αποδίδει αρκετά καλά αναφορικά με την πολυπλοκότητά του στην περίπτωση χρηστών με καθεστώς υψηλού SNR (Σχήμα 13A), αλλά δεν είναι σε θέση να εκμεταλλευτεί την παρουσία πολλαπλών σημείων πρόσδεσης στις περιπτώσεις χρηστών χαμηλού SNR, καταλήγοντας έτσι σε χαμηλή συνολική απόδοση. Συγκεκριμένα, ένα μηχανισμός επιλογής δικτύου βασισμένος στην ένταση του λαμβανόμενου σήματος (RSS) αποτυγχάνει λόγω της μυωπικής και περιορισμένης πληροφορίας που μονάχα η τιμή της ποιότητας του σήματος προσφέρει ως προς α) την απόδοση και ικανοποίηση των κριτηρίων ΠτΥ των υπηρεσιών, (δηλαδή στη βελτιστοποίηση των συναρτήσεων χρησιμότητας των χρηστών) και β) τη συνολική απόδοση του δικτύου (δηλαδή τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος). Απεναντίας, ο εγγενής μηχανισμός κόστους του MMRA (δηλαδή οι πολλαπλασιαστές Lagrange που υπολογίζονται και ανανεώνονται σύμφωνα με τα αποτελέσματα των ενδοκυβελικών μηχανισμών βέλτιστου διαμοιρασμού πόρων) παρέχει μία πιο ολοκληρωμένη οπτική γωνία του συνολικού φόρτου του ενοποιημένου συστήματος.

Συνεπώς, η απόδοση του μηχανισμού MMRA υπερτερεί σημαντικά αυτής του RSS ειδικότερα σε περιπτώσεις που η ποικιλομορφία των χρηστών (δηλαδή οι διαφορετικές ποιότητες των καναλιών) ή των σημείων πρόσβασης (δηλαδή ο αριθμός των διαθέσιμων δικτύων πρόσβασης στην περιοχή του χρήστη) είναι υψηλά. Από την άλλη μεριά, όπως ήταν αναμενόμενο όταν η ποικιλομορφία του δικτύου είναι χαμηλή τότε οι μηχανισμοί MMRA και RSS επιτυγχάνουν παρόμοια απόδοση. Το παραπάνω επιβεβαιώνεται επίσης από τα αριθμητικά αποτελέσματα (όταν το 90% των χρηστών έχουν $SNR > 80dB$, βλέπε τις πρώτες στήλες των γραφημάτων του Σχήματος 13). Αντιθέτως, τα ανωτέρω οφέλη του MMRA επιτυγχάνονται υπό το κόστος της αυξημένης πολυπλοκότητας συγκριτικά με το RSS, όσον αφορά α) την υπολογιστική πολυπλοκότητα και β) την αυξημένη σηματοδοσία, όπως αναλύεται στην Παράγραφο 5.5.

Η μέθοδος MMRA είναι επίσης ικανή να διαχειριστεί την διαδικτυακή ετερογένεια, αναφορικά με το είδος των προσφερόμενων υπηρεσιών, ακόμα και στην περίπτωση που οι υπηρεσίες είναι άνισα κατανεμημένες στους χρήστες (Σχήμα 13C). Όσο μεγαλύτερη είναι η συμφόρηση του δικτύου (δηλαδή υπάρχει μεγάλη ζήτηση υπηρεσιών τύπου ServB), τόσο μεγαλύτερη και η βελτίωση της απόδοσης του δικτύου χρησιμοποιώντας τον MMRA. Συνεπώς, η θεώρηση μυωπικών μηχανισμών επιλογής δικτύου βασισμένων στον τύπο της υπηρεσίας, όπως ο SDiff, που υποχρεώνουν τους χρήστες να επιλέξουν συγκεκριμένο τύπο δικτύου πρόσβασης, έχει ως αποτέλεσμα τη μειωμένη απόδοση (Σχήμα 13C) λόγω της ανικανότητας τους να αντιστοιχήσουν τους διαθέσιμους πόρους στις απαιτήσεις ΠτΥ των υπηρεσιών των χρηστών. Τέλος, η άπληστη, καιροσκοπική φύση του MAXU αλγόριθμου, που βασίζεται μόνο στη μεγιστοποίηση της απόδοσης του εκάστοτε χρήστη,

αδιαφορώντας για το σύνολο, αποτυγχάνει να παράσχει καθολική βελτιστοποίηση, καταλήγοντας σε μειωμένη συνολική απόδοση.

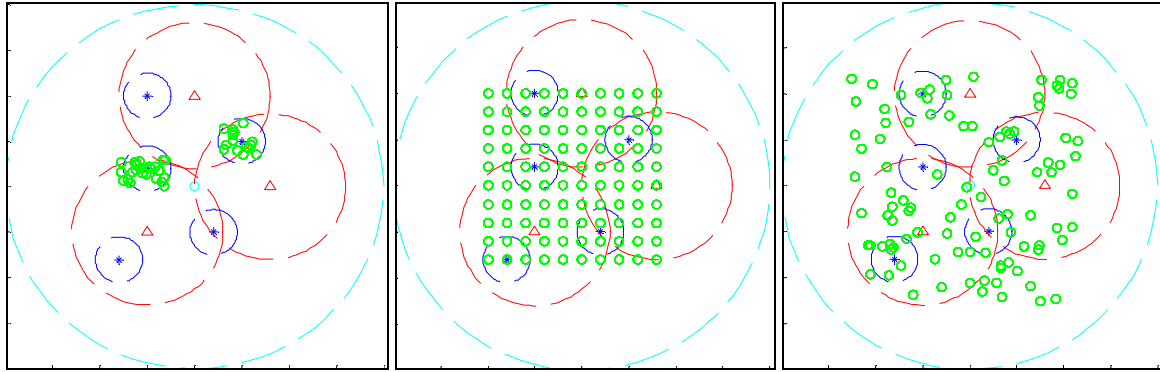
Προκειμένου να σχολιάσουμε και να αναδείξουμε την πλησιοβέλτιστη ιδιότητα του μηχανισμού MMRA, το Σχήμα 13 παρέχει επίσης για κάθε σενάριο το μέσο όρο του κενού βελτιστοποίησης υπολογισμένο από 10 διαφορετικές επαναλήψεις σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφηκε στην παράγραφο 5.6. Σε κάθε περίπτωση το κενό βελτιστοποίησης ($MMRA\ Opt.\ GAP = (UB-LB)/UB$ (%)) είναι μικρότερο από 4%, αποκαλύπτοντας την υψηλή ακρίβεια των αποτελεσμάτων που επιτυγχάνει ο MMRA, με την πραγματική βέλτιστη τιμή να απέχει ακόμα λιγότερο από την υπολογισθείσα λύση (**UB**). Σημειώνεται επίσης πως το κενό βελτιστοποίησης παρέχει ένα μέτρο της απόστασης μεταξύ της υπολογισθείσας και της βέλτιστης λύσης, η οποία (σ.σ. απόσταση) και είναι τελείως ανεξάρτητη της πραγματικά βέλτιστης και της υπολογισθείσας τιμής της απόδοσης. Τέλος, στον Πίνακα X παρατίθενται οι επαναλήψεις που απαιτήθηκαν προκειμένου το σύστημα να επιτύχει ένα σταθερό σημείο λειτουργίας (δηλαδή να συγκλίνει το προτεινόμενο σχήμα) ως συνάρτηση του συνολικού πληθυσμού, αποκαλύπτοντας μία επιθυμητή ασυμπτωτική τροχιά.

ΠΙΝΑΚΑΣ X: Αριθμός επαναλήψεων του MMRA για σύγκλιση

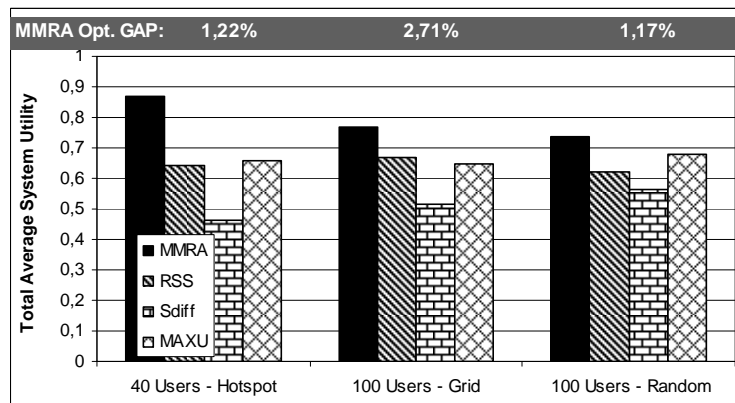
Αριθμός Χρηστών	50	100	150	200	250	300
Επαναλήψεις	50	104	132	170	210	230

5.8.2. Ενοποιημένο Σύστημα WIMAX(OFDM)/CDMA/WLAN

Στο δεύτερο σενάριο, θεωρούμε ένα πιο περίπλοκο ενοποιημένο CDMA/WLAN (IEEE 802.11e)/WiMAX (OFDM) σύστημα, με μία WiMAX κυψέλη (σημειωμένη γαλάζια), τρεις CDMA κυψέλες (σημειωμένες κόκκινες) και πέντε τοπικά ασύρματα



Σχήμα 14: Το ενοποιημένο OFDM/CDMA/WLAN σύστημα: α) Hotspot, β) Grid, γ) Random



Σχήμα 15: Η συνολική απόδοση του OFDM/CDMA/WLAN συστήματος εκφρασμένη με συναρτήσεις χρησιμότητας

WLAN (σημειωμένα μπλε) όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 14. Επιπλέον, για λόγους επίδειξης θεωρούμε τις εξής τρεις καταστάσεις τις οποίες διακρίνουμε ανάλογα με τη γεωγραφική κατανομή των χρηστών, : α) η περίπτωση Hotspot, όπου 40 χρήστες είναι συνωστισμένοι γύρω από κάποια σημεία, (π.χ. αναπαριστώντας διαισθητικά την περίπτωση πολυσύχναστων χώρων όπου διατίθεται WLAN σύνδεση), β) την περίπτωση πλέγματος (Grid), όπου 100 χρήστες είναι τοποθετημένοι σε ισαπέχοντα σημεία στο χάρτη (π.χ. μία αραιοκατοικημένη πόλη), και γ) μία τυχαία περίπτωση (Random), όπου οι χρήστες είναι τυχαία κατανεμημένοι στην περιοχή. Σε κάθε περίπτωση, οι χρήστες αιτούνται υπηρεσίες ServA και ServB με τυχαίο τρόπο.

Στο Σχήμα 15 παρουσιάζεται η συνολική απόδοση του συστήματος εκφρασμένη με χρήση συναρτήσεων χρησιμότητας για τις τρεις εξεταζόμενες τοπολογίες, καθώς

επίσης και το αντίστοιχο κενό βελτιστοποίησης. Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν πως για κάθε τοπολογία, παραδοσιακές μωπικές μέθοδοι επιλογής δικτύου, καταλήγουν σε ανεπαρκή διαχείριση των πόρων του ενοποιημένου ετερογενούς συστήματος και συνεπώς σε μειωμένη ικανοποίηση των χρηστών. Αντιθέτως, η μέθοδος MMRA, αναθέτοντας βέλτιστα χρήστες σε κυψέλες, και πόρους στους χρήστες, λαμβάνοντας υπόψη το φόρτο εργασίας της κάθε κυψέλης διαμέσου του εγγενούς μηχανισμού κόστους, επιτυγχάνει αυξημένα επίπεδα ικανοποίησης των κριτηρίων ΠτΥ των χρηστών, αλλά και της συνολικής απόδοσης του συστήματος.

5.9. Συμπερασματικά Σχόλια

Σε αυτό το κεφάλαιο αναπτύχθηκε και μελετήθηκε ένα πλαίσιο βέλτιστης ανάθεσης δικτύου εξυπηρέτησης και κατανομής πόρων για ετερογενή ασύρματα συστήματα. Μια από τις χαρακτηριστικές ιδιότητες του καινοτόμου σχεδιασμού του είναι η άμεση εφαρμογή και υιοθέτηση του σε μια πληθώρα ασύρματων δικτύων πρόσβασης που επιτυγχάνεται αφενός λόγω της χρησιμοποίησης ενός κοινού πλαισίου βασισμένο σε συναρτήσεις χρησιμότητας, και αφετέρου λόγω της κατανεμημένης φύσης του. Συνεπώς, στοχεύοντας στη συνολική βελτιστοποίηση του ενοποιημένου συστήματος, αποσυνθέτουμε το αντίστοιχο πρόβλημα ΜΧΔ σε δύο επίπεδα, επιτρέποντας την κατασκευή μιας αποσυνδεδεμένης λειτουργικά αλλά και χωρικά αρχιτεκτονικής. Παρουσιάστηκε λοιπόν ένας κατανεμημένος αλγόριθμος με εγγυημένη σύγκλιση, που επιτρέπει την ανανέωση των πολλαπλασιαστών Lagrange των χρηστών επιτυγχάνοντας αυξημένη απόδοση και χαμηλή πολυπλοκότητα.

Το προτεινόμενο πλαίσιο θεώρησε την ύπαρξη κοίλων συναρτήσεων χρησιμότητας, εκμεταλλευόμενο ιδιότητες της θεωρίας κυρτής βελτιστοποίησης (convex optimization). Μία ενδιαφέρουσα μελλοντική κατεύθυνση θα μπορούσε να

είναι η αντιμετώπιση μιας γενικευμένης μη-κυρτής εκδοχής του προβλήματος. Η μη-κυρτότητα μπορεί να είναι συνέπεια της αναγκαιότητας παροχής νέων υπηρεσιών πραγματικού χρόνου (π.χ. σιγμοειδείς συναρτήσεις χρησιμότητας θα οδηγήσουν σε μη-κυρτές αντικειμενικές συναρτήσεις), ή της παραδοχής παρουσίας διακυβελικής παρεμβολής (η παρεμβολή μεταξύ κυψελών της ίδιας τεχνολογίας θα οδηγήσει σε μη-κυρτά σύνολα περιορισμών).

6. Βέλτιστη Διαχείριση Πόρων και Περιοχής

Κάλυψης σε Ενοποιημένα Κυψελωτά Δίκτυα

Δύο Επιπέδων

Στην προσπάθεια να αντιμετωπίσουμε το θεμελιώδες πρόβλημα διαχείρισης πόρων σε ετερογενή ασύρματα δίκτυα (FP) στην προηγούμενη ενότητα προτείναμε μία μεθοδολογία για να αντιμετωπιστεί κατανεμημένα και με έναν θεωρητικά σωστό τρόπο, το πρόβλημα της βέλτιστης ανάθεσης χρηστών και διαχείρισης πόρων σε ένα ετερογενές σύστημα αποτελούμενο από μια πληθώρα δικτύων διαφόρων τεχνολογιών πρόσβασης. Σε αυτή τη παράγραφο θα προτείνουμε τρόπους και αλγόριθμους που θα είναι ικανοί να επιλύουν μία διαφορετική εκδοχή του προβλήματος FP, ελπίζοντας πως η εμπειρία καθώς και η συνδυασμένη γνώση που θα αποκτηθεί, θα οδηγήσει εν τέλει σε μία έγκυρη λύση του θεμελιώδους προβλήματος. Η σημαντικότερη θεώρηση που πρέπει να τονιστεί είναι πως σε αυτή την περίπτωση εξετάζουμε μόνο ετερογενή κυψελωτά δίκτυα που χρησιμοποιούν ίδια τεχνολογία πρόσβασης στο μέσο (π.χ CDMA macro and femto cells). Σε κάθε περίπτωση η μεθοδολογία που προτείνεται και ακολουθείται είναι συμβατή με τις αρχές της θεωρίας ΜΧΔ.

6.1. Τα δίκτυα φεμτοκυψελών

Τα τελευταία χρόνια, η δραματική ζήτηση για επαρκή ασύρματη κάλυψη σε εσωτερικούς χώρους, σε συνδυασμό με την ανάγκη υψηλών ρυθμών μετάδοσης και διασφάλισης κριτηρίων ΠτΥ, έχουν τονίσει τις αδυναμίες της λεγόμενης “παραδοσιακής” τοπολογίας μακροκυψελών, αναζητώντας νέες καινοτόμες λύσεις

εσωτερικής κάλυψης και διαχείρισης ισχύος. Επιδιώκοντας να δοθεί μία λύση στο πρόβλημα, έχει προταθεί η χρησιμοποίηση σταθμών βάσης φεμτοκυψελών (femtocell access points - FAP) [75]. Τα δίκτυα φεμτοκυψελών δημιουργούνται από σταθμούς βάσης χαμηλής ισχύος και χαμηλού κόστους που τοποθετούνται από τους τελικούς καταναλωτές σε εσωτερικούς χώρους, παρέχοντας υψηλής ποιότητας υπηρεσίες σε οικιακά ή επαγγελματικά περιβάλλοντα λειτουργώντας σε αδειοδοτούμενες ζώνες φάσματος.

Καθώς οι φεμτοκυψέλες μοιράζονται το ίδιο φάσμα με τις μακροκυψέλες, είναι απαραίτητη η ύπαρξη αποδοτικών μηχανισμών μετρίασης της διακυψελικής παρεμβολής μεταξύ των φέμτο- και μακροκυψελών, προκειμένου να διευκολυνθεί τόσο η κάλυψη, όσο και η απόδοση και των δύο. Ωστόσο, η διαχείριση ισχύος και πόρων σε περιβάλλοντα δύο επιπέδων αντιμετωπίζει αρκετές επιπλέον δυσκολίες συγκριτικά με περιβάλλοντα ενός επιπέδου. Αρχικά, οι παρεμβολές ανάμεσα στο ίδιο επίπεδο, δηλαδή η διακυψελική και η ενδοκυψελική παρεμβολή μεταξύ γειτνιαζόντων φεμτοκυψελών, σε συνδυασμό με την παρεμβολή ανάμεσα σε διαφορετικά επίπεδα, πρέπει να συνυπολογιστεί ταυτόχρονα στον υπολογισμό του σηματοθορυβικού λόγου (SNR), καταλήγοντας σε ένα μη-κυρτό πρόβλημα διαχείρισης ισχύος. Επιπλέον, η άναρχη κατανομή και αυθαίρετη τοποθέτηση των φεμτοκυψελών απαιτεί την ικανότητα της δυναμικής διαμόρφωσης και τροποποίησης των χαρακτηριστικών τους, (συνήθως τη μέγιστη ισχύ εκπομπής τους), προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η επικάλυψη με γειτονικές κυψέλες [76]. Συνεπώς, είναι αναγκαία όχι μόνο η βέλτιστη διαχείριση πόρων, αλλά και η αποδοτική και κατανεμημένη δυναμική διαχείριση της περιοχής κάλυψης.

Στην παρούσα διατριβή θα μελετήσουμε τη ταυτόχρονη βέλτιστη διαχείριση ισχύος και περιοχής κάλυψης παρουσία παρεμβολών μεταξύ ίδιων και διαφορετικών

επιπέδων σε ένα ασύρματο σύστημα CDMA δύο επιπέδων (macrocell/femtocell). Στόχος είναι η εξεύρεση του βέλτιστου σημείου λειτουργίας που μεγιστοποιεί τη συνολική ρυθμαπόδοση του δικτύου, σε σχέση με την ανατιθέμενη ισχύ εκπομπής στους χρήστες, αλλά και της συνολικής εκπεμπόμενης ισχύος των κυψελών (δηλαδή την περιοχή κάλυψης). Ο μεγάλος αριθμός των παραμέτρων που εισάγονται και η μη-κυρτή φύση του αντίστοιχου προβλήματος βελτιστοποίησης αποκαλύπτουν τη δυσκολία εξεύρεσης του προαναφερόμενου σημείου λειτουργίας.

6.1.1. Περιορισμοί στην υπάρχουσα βιβλιογραφία

Αντίστοιχα προβλήματα αντιμετωπίζονται τυπικά στην βιβλιογραφία με διάσπαση σε υποπροβλήματα, στοχεύοντας στην επίλυση των ανεξάρτητων στόχων του διεπίπεδου (φέμτο/μάκρο) προβλήματος, καταλήγοντας όμως σε μειωμένους βαθμούς ελευθερίας και υποβέλτιστες λύσεις. Παραδείγματος χάριν, για την αντιμετώπιση του προβλήματος διαχείρισης κάλυψης έχουν προταθεί αρκετές τεχνικές δυναμικής προσαρμογής των ακτινών κάλυψης των κυψελών [77]-[84], που εξασφαλίζουν αυξημένη συνολική χωρητικότητα στο δίκτυο, συγκρινόμενα με σχήματα χωρίς αναπροσαρμογή της ακτίνας. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της δυναμικής μεταβολής της μέγιστης ισχύς εκπομπής [77]-[79], ή της ισχύος του πιλοτικού σήματος (pilot signal) [81]-[84] με έναν βηματικό ευρετικό τρόπο, στοχεύοντας κάθε φορά σε έναν από τους ακόλουθους στόχους: α) εξασφάλιση ενός άνω ορίου στο SINR των χρηστών των φεμτοκυψελών [77], β) ελαχιστοποίηση της πιθανότητας “διαρροής²” της περιοχής κάλυψης (coverage leakage probability) των φεμτοκυψελών σε γειτονικές, (δηλαδή την πιθανότητα το SINR ενός χρήστη να είναι μεγαλύτερο από ένα κατώφλι, ελαχιστοποιώντας τις παρεμβολές σε γειτονικές μακροκυψέλες) [79], γ)

² Το φαινόμενο κατά το οποίο η περιοχή κάλυψης μίας κυψέλης υπερκαλύπτει την περιοχή κάλυψης μιας γειτονικής κυψέλης.

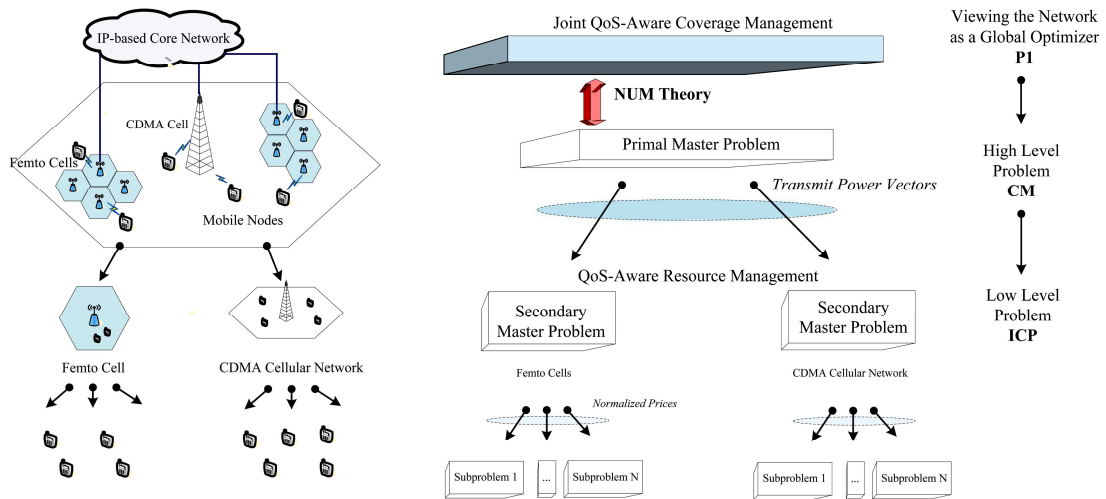
ελαχιστοποίηση του αριθμού των μεταπομπών μεταξύ των δύο επιπέδων [81], ή δ) ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ισχύος [83].

Επίσης, μία πληθώρα προβλημάτων αντιμετώπισης και μετρίασης της παρεμβολής σε διεπίεδα συστήματα έχουν προταθεί και μελετηθεί, στοχεύοντας σε ποικίλους στόχους, από την ελαχιστοποίηση της παρεμβολής [85]-[87], στη βελτιστοποίηση της συνολικής ρυθμαπόδοσης του συστήματος [88], και από την ελαχιστοποίηση της εκπεμπόμενης ισχύος υπό περιορισμών SINR [89], ΠτΥ [90] και ισχύος [91], σε ελαχιστοποίηση της πιθανότητας διακοπής λειτουργίας (outage probability minimization) [92] και βελτιστοποίηση με χρήση θεωρίας ΜΧΔ [93]-[94].

Πρόσφατα στο [95], προτάθηκε μία κατανεμημένη αυτό-οργανούμενη αρχιτεκτονική διαχείρισης φεμτοκυψελών στοχεύοντας στην ταυτόχρονη μετρίαση των παρεμβολών σε διεπίεδα συστήματα. Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική αποτελείται από τρεις βρόχους ελέγχου που καθορίζουν (α) τη μέγιστη ισχύ εκπομπής των φέμτο χρηστών, (β) το απαιτούμενο SINR των φέμτο χρηστών ώστε να επιτύχουν ισορροπία κατά Nash, και (γ) τη στιγμιαία ισχύ εκπομπής των χρηστών ώστε να επιτύχουν το απαραίτητο SINR. Παρόλο που στο [95] αντιμετωπίζεται τόσο η κατανομή ισχύος, όσο και η διαχείριση της περιοχής κάλυψης, η συσχέτιση τους περιορίζεται στην περιορισμένη ανταλλαγή μηνυμάτων μεταξύ των βρόχων ελέγχου, καταλήγοντας ξανά σε μία υποβέλτιστη ευρετική λύση.

6.2. Χαρακτηριστικά και μεθοδολογία της προτεινόμενης προσέγγισης

Η προηγούμενη ανάλυση υπογραμμίζει την έλλειψη μιας αποδοτικής και θεωρητικά τεκμηριωμένης μεθοδολογίας ικανής να αντιμετωπίσει ταυτόχρονα τη διαχείριση Κατανομής Ισχύος και Περιοχής Κάλυψης (Power Control and Coverage management - PCC), σε ενοποιημένα συστήματα μακροκυψελών/φεμτοκυψελών.



Joint Coverage Management & Resource Allocation in a Two-tier System

Σχήμα 16: Διαχείριση ισχύος και περιοχής κάλυψης σε διεπίπεδο σύστημα φέμτο/μάκρο κυψελών με χρήση τεχνικών αποσύνθεσης ΜΧΔ

Κάτι τέτοιο θα παρείχε αυξημένη ευελιξία, συνδυάζοντας τις ιδιότητες και ιδιαιτερότητες και των δύο μηχανισμών προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι παρεμβολές και να μεγιστοποιηθεί η συνολική απόδοση των χρηστών στο διεπίπεδο σύστημα. Αυτό το κεφάλαιο της διατριβής αναπτύσσει ένα καινοτόμο πλαίσιο βελτιστοποίησης που συμπληρώνει το παραπάνω κενό.

Προς αυτό το στόχο, αρχικά μοντελοποιούμε το αντίστοιχο μη-κυρτό πρόβλημα ταυτόχρονης διαχείρισης ισχύος και περιοχής κάλυψης (P1) και έπειτα, το μετατρέπουμε σε ένα αντίστοιχο κυρτό, το οποίο και αντιμετωπίζουμε με αποσύνθεση πρωτεύοντος-δευτικού προβλήματος (primal-dual decomposition), όπως φαίνεται στο Σχήμα 16, καταλήγοντας σε έναν καταναμημένο μηχανισμό που επιτυγχάνει βελτιστότητα. Στο κατώτερο επίπεδο αποσύνθεσης, ενδοκυψελικοί αλγόριθμοι διαμοιρασμού ισχύος (Intra-cell Power Control - IPC) εξάγουν το διάλυμα ισχύος που θα εκπέμψουν οι χρήστες επιτυγχάνοντας βέλτιστη ενδοκυψελική διαχείριση πόρων. Στο υψηλότερο επίπεδο, το πρόβλημα διαχείρισης κάλυψης (Coverage Management - CM) είναι υπεύθυνο για την δυναμική προσαρμογή της συνολικής ισχύος εκπομπής των κυψελών και άρα και της ακτίνας

κάλυψής τους, επιτυγχάνοντας έτσι τη βελτιστοποίηση ολόκληρου του συστήματος. Η διαχείριση κάλυψης κατορθώνεται χρησιμοποιώντας μία μέθοδο υποβαθμίδων (subgradient) που εκμεταλλεύεται τις τιμές φόρτου/συμφόρησης των κυψελών (δηλαδή τους πολλαπλασιαστές Lagrange των δυικών προβλημάτων των ICP), που τελικά είναι και οι βέλτιστες “διαστρωματικές” τιμές, καταλήγοντας σε μία κατανεμημένη λύση χαμηλής πολυπλοκότητας και σηματοδοσίας.

Εν συντομία, το προτεινόμενο πλαίσιο διαχείρισης ισχύος και κάλυψης καθώς και ο αντίστοιχος αλγόριθμος χαρακτηρίζονται από τις ακόλουθες ιδιότητες:

- **Άμεση Διαχείριση Κάλυψης.** Στο προτεινόμενο πλαίσιο, η μέγιστη ισχύς εκπομπής της κάθε φεμτοκυψέλης θεωρείται σαν μία μεταβλητή προς βελτιστοποίηση (περιορισμένη από άνω και κάτω όρια τιμών) που ενσωματώνεται στο συνολικό πρόβλημα βελτιστοποίησης ισχύος. Αυτό επιτρέπει τη διαχείριση της περιοχής κάλυψης των κυψελών στοχεύοντας στη συνολική βελτιστοποίηση της ρυθμαπόδοσης του δικτύου.
- **Συνολική Βελτιστοποίηση του Δικτύου.** Λόγω των παρεμβολών που εισάγονται μεταξύ των κυψελών των ίδιων αλλά και διαφορετικών επιπέδων, το αρχικό πρόβλημα διαχείρισης ισχύος και κάλυψης (PCC) είναι μη-κυρτό και συνεπώς δύσκολα επιλύσιμο, ειδικά όταν απαιτείται κατανεμημένος τρόπος επίλυσης. Έτσι, μέσω μιας καινοτόμας προσέγγισης, μετατρέπουμε το πρόβλημα σε κυρτό, επιτρέποντας την χρησιμοποίηση τεχνικών κυρτής βελτιστοποίησης, θέτοντας επιπλέον τις βάσεις για τον σχεδιασμό ενός κατανεμημένου αλγόριθμου που επιλύει βέλτιστα το πρόβλημα.
- **Κατανεμημένη Υλοποίηση & Σύγκλιση.** Το προτεινόμενο πλαίσιο εφαρμόζει έναν κατανεμημένο, χαμηλής πολυπλοκότητας αλγόριθμο υποβαθμίδων (subgradient). Αυτό εξασφαλίζει την χαμηλή σηματοδοσία και ευνοεί την

κλιμακοθετησιμότητα. Αποδεικνύεται η σύγκλιση του αλγόριθμου PCC στο βέλτιστο σημείο λειτουργίας, ενώ σχολιάζονται επίσης η ταχύτητα σύγκλισης και η εισαγόμενη σηματοδοσία στο σύστημα.

6.3. Μοντελοποίηση και καθορισμός του προβλήματος

Ακλουθώντας την σημειογραφία του Παραρτήματος I, θεωρούμε ένα διεπίπεδο δίκτυο μακροκυψελών/ φεμτοκυψελών αποτελούμενο από ένα σύνολο C από $|C|$ κυψέλες. Το σύστημα περιέχει μόνο μία κεντρική μακροκυψέλη C_0 και $|C|-1$ υποκείμενες φεμτοκυψέλες C_c , όπου $c=1, \dots, |C|-1$. Επιπλέον θεωρούμε ένα σύνολο J από $|J|$ ενεργούς χρήστες στην περιοχή που ορίζουν οι κυψέλες. Σε κάθε περίπτωση ένα χρήστης $j \in J$ μπορεί να είναι συνδεδεμένος σε μία κυψέλη $c \in C$ ανά πάσα χρονική στιγμή. Στην ανάλυση μας θεωρούμε πως έχουμε Κλειστή Πρόσβαση (Closed Access - CA) [75], που σημαίνει πως μόνον αδειοδοτημένοι χρήστες μπορούν να επικοινωνήσουν και να συνδεθούν στη φεμτοκυψέλη τους. Ορίζουμε σαν S_c το σύνολο των $|S_c|$ χρηστών που εξυπηρετούνται από το σταθμό βάσης c και συνεπώς το $J = S_0 \times \dots \times S_{|C|-1}$ είναι ένα Καρτεσιανό γινόμενο.

Θεωρούμε πως στο σύστημά μας εφαρμόζουμε πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης κώδικα (CDMA). Όλες οι κυψέλες χρησιμοποιούν το ίδιο κανάλι συχνοτήτων, δηλαδή διαμοιράζονται το ίδιο εύρος ζώνης εξάπλωσης W . Το κανάλι μεταξύ των σταθμών βάσης και των χρηστών μοντελοποιείται σαν ένα κανάλι πολλαπλής πρόσβασης προσθετικού θορύβου Gauss (AWGN). Επίσης, ορίζουμε με $G_{c,j}$ το κέρδος καναλιού μεταξύ της κυψέλης c και του χρήστη j , αντικατοπτρίζοντας την μακροχρόνια συμπεριφορά του κέρδους καναλιού. Φαινόμενα ταχείας διάλειψης μπορούν να ενσωματωθούν με χρήση κατάλληλων μέσων όρων [15]. Επικεντρωνόμαστε σε μία χρονοσχιστή υποθέτοντας πως το κέρδος καναλιού, ο

περιβάλλον θόρυβος και η παρεμβολή σε κάθε κινητό χρήστη παραμένουν αμετάβλητα για αυτή την περίοδο [16], [19]. Συνεπώς, η έννοια του χρόνου παραλείπεται από τους ορισμούς των μεταβλητών.

Στη διάρκεια μιας χρονοσχισμής, κάθε χρήστης $j \in S_c$ επικοινωνεί με τον αντίστοιχο σταθμό βάσης και λαμβάνει δεδομένα με μία συγκεκριμένη ισχύ εκπομπής $P_{c,j}$. Επιπλέον, θεωρώντας τη συνολική εκπομπή της κάτω ζεύξης της κυψέλης c , υπάρχει ένα μέγιστο όριο της συνολικής ισχύος εκπομπής $P_{c,max}$, που μπορεί να ανατεθεί στους συνδεδεμένους χρήστες, (δηλαδή, το άθροισμα της ισχύος που ανατίθεται σε όλους τους χρήστες δεν μπορεί να ξεπερνά ένα όριο), και συνεπώς $\sum_{j \in S_c} P_{c,j} \leq P_{c,max}$, όπου το $\bar{P}_c = (P_{c,1}, \dots, P_{c,|S_c|})$ ορίζει το διάνυσμα ανάθεσης ισχύος της κυψέλης c στους χρήστες και $\bar{P} = (\bar{P}_0, \bar{P}_1, \dots, \bar{P}_{|C|-1})$ ορίζει το συνολικό διάνυσμα ανάθεσης στο διεπίπεδο σύστημα. Σε αυτή τη διατριβή, και προκειμένου να διαχειριστούμε αποδοτικά την περιοχή κάλυψης των κυψελών, αλλά και να μετριάσουμε τις παρεμβολές, θεωρούμε πως η συνολική ισχύς εκπομπής της κάθε κυψέλης c , $P_{c,max}$, δεν είναι σταθερή, αλλά μπορεί να προσαρμοστεί δυναμικά. Φυσικά, είναι άνω και κάτω φραγμένη από $P_c^{Min} \leq P_{c,max} \leq P_c^{Max} \quad \forall c \in C$, λόγω φυσικών περιορισμών. Ορίζουμε ως $\gamma_{c,j}$ το σηματοθορυβικό λόγο του χρήστη j από το σταθμό βάσης c :

$$\gamma_{c,j} = \frac{G_{c,j} P_{c,j}}{G_{c,j} \sum_{\substack{j' \in S_c \\ j' \neq j}} P_{c,j'} + \sum_{\substack{c' \in C \\ c' \neq c}} G_{c',j} (\sum_{k \in S_{c'}} P_{c',k}) + n_0} \quad (34)$$

όπου ο παρανομαστής ενσωματώνει ενδοκυψελικές και διακυψελικές παρεμβολές μεταξύ ιδίων και διαφορετικών επιπέδων, καθώς και περιβάλλοντα θόρυβο αντίστοιχα.

Σε κάθε χρήστη j ανατίθεται μία μονότονη αυστηρά κοίλη συνάρτηση χρησιμότητας $U_j(\gamma_{c,j})$ του συνολικά λαμβανόμενου σηματοθορυβικού λόγου που εκφράζει τη ρυθμαπόδοση του χρήστη. Στόχος είναι η μεγιστοποίηση του αθροίσματος των συναρτήσεων χρησιμότητας των χρηστών και στα δύο επίπεδα, υπό κατάλληλους περιορισμούς, ή πιο απλά η μεγιστοποίηση της συνολικής ρυθμαπόδοσης. Συνεπώς, και προκειμένου να ενσωματώσουμε πολλαπλές διαμορφώσεις του καναλιού, η U_j εκφράζεται σαν μία καθολική, μη γραμμική συνάρτηση του διανύσματος ανάθεσης ισχύος και της κατάστασης του καναλιού [96], δηλαδή ,

$$U_j(\gamma_{c,j}(\bar{P})) = \frac{1}{T} \log_2(1 + K\gamma_{c,j}(\bar{P}))$$

όπου η σταθερά T είναι το σύμβολο της περιόδου, που μπορεί να θεωρηθεί ένα (1) χωρίς βλάβη της γενικότητας, και η σταθερά $K = (-\phi_1)/\log(\phi_2 BER)$, όπου ϕ_1 και ϕ_2 είναι σταθερές που εξαρτώνται από την εκάστοτε διαμόρφωση τους καναλιού, ενώ BER είναι ο απαιτούμενος λόγος σφαλμάτων ψηφίων (bit-error rate) [97]. Τέλος, υποθέτουμε καθεστώς υψηλού SINR (δηλαδή το $K\gamma_{c,j}(\bar{P})$ είναι πολύ μεγαλύτερο της μονάδας), που υιοθετείται συχνά στη διαχείριση ισχύος [14], [58]. Με βάση τα προηγούμενα, η U_j μπορεί να προσεγγιστεί με χρήση λογαριθμικών συναρτήσεων:

$$U_j(\gamma_{c,j}(\bar{P})) = \log(\gamma_{c,j}(\bar{P})) \quad (35)$$

Η παραπάνω προσέγγιση ευσταθεί είτε όταν η ισχύς του σήματος είναι πολύ μεγαλύτερη της λαμβανόμενης παρεμβολής (όπως στην περίπτωση ενός συστήματος φεμτοκυψελών, λόγω της εγγύτητας του σταθμού βάσης), είτε όταν το κέρδος εξάπλωσης είναι μεγάλο. Στην εξίσωση (35), για απλότητα η παράμετρος K έχει ενσωματωθεί και απορροφηθεί στο $G_{c,j}$. Τέλος, πρέπει να τονίσουμε πως παρόλο που η U_j είναι μη γραμμική μη-κοίλη συνάρτηση του \bar{P} , μπορεί να μετατραπεί σε μία

κοίλη συνάρτηση μέσω μιας λογαριθμικής αλλαγής μεταβλητών, επιτυγχάνοντας την επιθυμητή ιδιότητα της κυρτότητας του προβλήματος που θα εγγυηθεί τελικά την καθολικά επιτυγχανόμενη βελτιστοποίηση.

6.4. Διατύπωση προβλήματος και μετασχηματισμοί

Σύμφωνα με τα όσα περιγράψαμε στην προηγούμενη παράγραφο, το πρόβλημα της ταυτόχρονης ανάθεσης ισχύος και διαχείρισης περιοχής κάλυψης στο διεπίπεδο φέμτο/μάκρο σύστημα αποτελούμενο από $|C|$ κυψέλες και $|J|$ χρήστες, ανάγεται στην εύρεση της βέλτιστης ισχύος εκπομπής των κυψελών $P_{c,\text{var}}, \forall c \in C$ και του αντίστοιχου διανύσματος κατανομής πόρων ισχύος στους χρήστες \bar{P} που θα μεγιστοποιήσει την συνολική ρυθμαπόδοση του συστήματος. Το παραπάνω πρόβλημα μπορεί να μοντελοποιηθεί ως εξής:

$$(P1) \quad \max_{\bar{P}, \bar{P}_{\max}} \sum_{j \in J} U_j(\gamma_{c,j}(\bar{P})) \quad (36)$$

$$s.t. \quad \sum_{j \in S_c} P_{c,j} \leq P_{c,\max} \quad \forall c \in C \quad (37)$$

$$P_c^{\text{Min}} \leq P_{c,\max} \leq P_c^{\text{Max}} \quad \forall c \in C \quad (38)$$

όπου εν τέλει ο υπολογισμός των διανυσμάτων $\bar{P} = (\bar{P}_0, \bar{P}_1, \dots, \bar{P}_{|C|-1})$ και $\bar{P}_{\max} = (P_{0,\max}, P_{1,\max}, \dots, P_{|C|-1,\max})$ θα επιτρέψει τη βέλτιστη διαχείριση περιοχής κάλυψης του συστήματος, διαμέσου του συνολικού προβλήματος ανάθεσης ισχύος και μετριάσμου παρεμβολών. Συνεπώς, στόχος είναι η ταυτόχρονη μεγιστοποίηση της συνολικής απόδοσης του δικτύου (δηλαδή της συνολικής αναμενόμενης ρυθμαπόδοσης του συστήματος) και η εξεύρεση της βέλτιστης περιοχής κάλυψης, αναφορικά με τη μέγιστη ισχύ εκπομπής των κυψελών, με περιορισμούς την συνολική μεταδιδόμενη ισχύ των κυψελών προς τους χρήστες (ο περιορισμός (37)) καθώς και τη μέγιστη ισχύ εκπομπής των κυψελών λόγω φυσικών περιορισμών (περιορισμός (38)).

6.4.1. Μία αναγκαία συνθήκη προς την βελτιστότητα (I^{95} μετασχηματισμός)

Προκειμένου να επιλύσουμε το πρόβλημα (P1) με έναν αποδοτικό και καταναμημένο τρόπο μέσω τεχνικών αποδόμησης (decomposition), είναι απαραίτητο αρχικά να υπερβούμε την πολυπλοκότητα που εισάγεται λόγω της συσχέτισης των μεταβλητών βελτιστοποίησης στην αντικειμενική συνάρτηση εξαιτίας της φύσης του SINR. Συνεπώς, προτείνουμε το ακόλουθο.

Πρόταση 1: Απαραίτητη προϋπόθεση για την επίτευξη της μέγιστης συνολικής χρησιμότητας στο διεπίπεδο σύστημα, είναι όλοι οι σταθμοί βάσης $c \in C$ να μεταδίδουν με τη μέγιστη διαθέσιμη ισχύ τους $P_{c,\max}$, για κάθε εφικτό \bar{P}_{\max} (δηλαδή όταν στον περιορισμό (38) ισχύουν οι ισότητες).

Απόδειξη: Βασιζόμαστε α) στη μονοτονικότητα της συνάρτησης χρησιμότητας του χρήστη ως συνάρτηση του λαμβανόμενου SINR και β) στη φύση του SINR στην κάτω ζεύξη ενός διεπίπεδου συστήματος, για οποιοδήποτε \bar{P}_{\max} . Έτσι, ακολουθούμε και επεκτείνουμε την ανάλυση του [[16], Πρόταση 1], όπου ένα αντίστοιχο πρόβλημα βελτιστοποίησης επιλύεται για την περίπτωση μιας μόνο κυψέλης.

Για κάθε εφικτό διάνυσμα \bar{P}_{\max} και για κάθε κυψέλη $w \in C$, ορίζουμε ως $\bar{P} = (\bar{P}_0, \dots, \bar{P}_w, \dots, \bar{P}_{|C|-1})$ ένα διάνυσμα ανάθεσης ισχύος τέτοιο ώστε $\sum_{j \in S_w} P_{w,j} < P_{w,\max}$. Υπογραμμίζουμε πως για τις υπόλοιπες κυψέλες του συστήματος δεν γίνεται καμία υπόθεση, (δηλαδή, το ακόλουθο ισχύει ανεξαρτήτως των διανυσμάτων ανάθεσης ισχύος των υπόλοιπων κυψελών, αρκεί να είναι εφικτά). Αρκεί να δείξουμε πως υπάρχει πάντα μία άλλη ανάθεση ισχύος $\bar{P}' = (\bar{P}'_0, \dots, \bar{P}'_w, \dots, \bar{P}'_{|C|-1})$ τέτοια ώστε $\sum_{j \in S_w} P'_{w,j} = P_{w,\max}$, που βελτιώνει την απόδοση του ενδοκυψελικού διαμοιρασμού ισχύος.

Εάν $\sum_{j \in S_w} P_{w,j} < P_{w,\max}$, τότε πάντα υπάρχει τουλάχιστον ένας αριθμός $h > 1$ τέτοιος ώστε $\sum_{j \in S_w} P_{w,j} < h \sum_{j \in S_w} P_{w,j} = P_{w,\max}$ για κάθε κυψέλη c στο σύστημα. Συνεπώς μπορούμε αμέσως να ορίσουμε $P'_{w,j} = h \cdot P_{w,j} \quad \forall j \in S_w$ και από την (34) έχουμε:

$$\begin{aligned} \gamma_{w,j}(\bar{P}) &= \frac{G_{w,j} P'_{w,j}}{G_{w,j} \sum_{\substack{j' \in S_w \\ j' \neq j}} P'_{w,j'} + \sum_{\substack{c' \in C \\ c' \neq w}} G_{c',j} (\sum_{k \in S_{c'}} P_{c',k}) + n_0} = \\ &= \frac{h \cdot G_{w,j} P_{w,j}}{h \cdot G_{w,j} \sum_{\substack{j' \in S_w \\ j' \neq j}} P_{w,j'} + \sum_{\substack{c' \in C \\ c' \neq w}} G_{c',j} (\sum_{k \in S_{c'}} P_{c',k}) + n_0} > \\ &= \frac{h \cdot G_{w,j} P_{w,j}}{h \cdot G_{w,j} \sum_{\substack{j' \in S_w \\ j' \neq j}} P_{w,j'} + h \cdot \sum_{\substack{c' \in C \\ c' \neq w}} G_{c',j} (\sum_{k \in S_{c'}} P_{c',k}) + h \cdot n_0} = \gamma_{w,j}(\bar{P}') \end{aligned}$$

Επομένως, $\forall j \in S_w$ ισχύει πως $U_j(\gamma_{w,j}(\bar{P}')) > U_j(\gamma_{w,j}(\bar{P}))$ λόγω της μονοτονικότητας της U ως συνάρτησης του γ , και άρα, $\sum_{j \in S_w} U_j(\gamma_{c,j}(\bar{P}')) > \sum_{j \in S_w} U_j(\gamma_{c,j}(\bar{P}))$.

Σύμφωνα με τα προηγούμενα, προκειμένου κάθε κυψέλη να επιτυγχάνει τη μεγιστοποίηση της ενδοκυψελικής της απόδοσης πρέπει να μεταδίδει με τη μέγιστη δυνατή ισχύ της $\bar{P}_{w,\max}$ ανεξαρτήτως της κατάστασης των γειτόνων της. Γενικεύοντας το παραπάνω, και στοχεύοντας στη μεγιστοποίηση της συνολικής απόδοσης του συστήματος, κάθε κυψέλη πρέπει να μεταδίδει στο δικό της μέγιστο όριο ισχύος, ή αντίστροφα, το διάνυσμα $\bar{P}_{\max} = (\bar{P}_{1,\max}, \dots, \bar{P}_{w,\max}, \dots, \bar{P}_{|C|-1,\max})$ εξασφαλίζει τη συνολικά μέγιστη απόδοση του διεπίπεδου συστήματος. Αυτό ολοκληρώνει την απόδειξη. ■

Άρα, από εδώ και στο εξής, θα υποθέτουμε πως $\sum_{j \in S_c} P_{c,j} = P_{c,\max} \quad \forall c \in C$. Αυτό μας επιτρέπει να ξαναγράψουμε την σχέση του SINR του χρήστη (εξίσωση (34)) ως συνάρτηση μόνο *i*) της ανατιθέμενης ισχύος του και *ii*) του αντίστοιχου διανύσματος

μέγιστης διαθέσιμης ισχύος εκπομπής όλων των κυψελών του συστήματος \bar{P}_{\max} , όπως φαίνεται παρακάτω:

$$\gamma_{c,j}(\bar{P}) = \frac{G_{c,j}P_{c,j}}{G_{c,j}(P_{c,\max} - P_{c,j}) + \sum_{\substack{c' \in C \\ c' \neq c}} G_{c',j}P_{c',\max} + n_0} = \frac{G_{c,j}P_{c,j}}{\sum_{c' \in C} G_{c',j}P_{c',\max} + n_0 - G_{c,j}P_{c,j}} =$$

$$\frac{P_{c,j}}{\sum_{c' \in C} \frac{G_{c',j}}{G_{c,j}} P_{c',\max} + \frac{n_0}{G_{c,j}} - P_{c,j}} = \frac{P_{c,j}}{I_{c,j}(\bar{P}_{\max}) - P_{c,j}} \triangleq \gamma_{c,j}(P_{c,j}, \bar{P}_{\max}) \quad (39)$$

όπου το $I_{c,j}(\bar{P}_{\max})$ διαισθητικά αναπαριστά το περιβάλλον εκπομπής μεταξύ του κινητού χρήστη j και του σταθμού βάσης c , για μία δεδομένη διαμόρφωση του συστήματος. Συνεπώς, αναδιατυπώνουμε την αναμενόμενη ρυθμαπόδοση του κινητού χρήστη j που ορίζεται στην (35) σαν $U_j(\gamma_{c,j}(\bar{P})) = U_j(\gamma_{c,j}(P_{c,j}, \bar{P}_{\max}))$. Σύμφωνα με τα παραπάνω, το αρχικό μας πρόβλημα διαχείρισης κατανομής πόρων και περιοχής κάλυψης (P1) μπορεί να ξαναγραφεί ως ακολούθως, αθροίζοντας όλους τους συνδεδεμένους χρήστες $j \in \mathcal{S}_c$ της κάθε κυψέλης $c \in C$ στο σύστημα. Αναφερόμαστε σε αυτό ως (P2):

$$(P2) \quad \max_{\bar{P}, \bar{P}_{\max}} \sum_{c \in C} \sum_{j \in \mathcal{S}_c} U_j(\gamma_{c,j}(P_{c,j}, \bar{P}_{\max})) \quad (40)$$

$$s.t. \quad \sum_{j \in \mathcal{S}_c} P_{c,j} \leq P_{c,\max} \quad \forall c \in C \quad (41)$$

$$P_c^{Min} \leq P_{c,\max} \leq P_c^{Max} \quad \forall c \in C \quad (42)$$

Στόχος αυτού του κεφαλαίου είναι η παράθεση ενός αλγόριθμου ταυτόχρονης ανάθεσης ισχύος και διαχείρισης περιοχής κάλυψης (Power Control and Coverage management - PCC) που επιτυγχάνει την καθολικά βέλτιστη λύση $(\bar{P}^*, \bar{P}_{\max}^*)$ του

προβλήματος (P2) και άρα και του (P1) με έναν *κατανεμημένο τρόπο*. Ωστόσο, αρχικά πρέπει να υπερβούμε τις ακόλουθες δύο προκλήσεις:

- *Μη-κυρτότητα (Non-convexity)*. Παρόλο που οι περιορισμοί του προβλήματος (P2) είναι κυρτοί και διατηρούν την ανεξαρτησία τους στις εκάστοτε κυψέλες, οι μεταβλητές \bar{P} και \bar{P}_{\max} είναι συσχετισμένες καθολικά σε ολόκληρο το σύστημα, όπως φαίνεται από τους προσθετέους της αντικειμενικής συνάρτησης (40), λόγω του (39). Έτσι, το πρόβλημα (P2) είναι γενικά μη-κυρτό και άρα δύσκολο στην επίλυση.

Αντιμετώπιση: Με χρήση ενός λογαριθμικού μετασχηματισμού [60], [98], μετατρέπουμε το πρόβλημα (P2) σε ένα αντίστοιχο κυρτό πρόβλημα βελτιστοποίησης (P3) (βλέπε παράγραφο 6.4.2). Αυτό επιτρέπει στον προτεινόμενο αλγόριθμο PCC τις ακόλουθες ιδιότητες: α) καθολική σύγκλιση στη βέλτιστη λύση $(\bar{P}^*, \bar{P}_{\max}^*)$, β) ελεγχόμενο συμβιβασμό μεταξύ πολυπλοκότητας και απόδοσης, και γ) γεωμετρικό ρυθμό σύγκλισης

- *Κατανεμημένη Επίλυση*. Το μη-γραμμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης (P2) μπορεί εύκολα να λυθεί κεντριοποιημένα χρησιμοποιώντας ήδη γνωστές τεχνικές επίλυσης κυρτών προβλημάτων (π.χ. Γεωμετρικό Προγραμματισμό [99]). Ωστόσο, σε ένα ασύρματο δίκτυο όπως το εξεταζόμενο, ένας κατανεμημένος αλγόριθμος είναι απαραίτητος προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η σηματοδοσία και να αυξηθεί η απόδοση.

Αντιμετώπιση: Το αντίστοιχο κυρτό πρόβλημα του (P2) (δηλαδή το πρόβλημα (P3)) επιλύεται με χρήση τεχνικών αποδόμησης δύο επίπεδων, πρωτεύοντος-δευτικού (βλέπε παράγραφο 6.5). Έτσι, προτείνονται και αναλύονται δύο κατανεμημένοι αλγόριθμοι που επιτυγχάνουν α) βέλτιστη διαχείριση περιοχής κάλυψης και β) βέλτιστη ενδοκυψελική ανάθεση ισχύος.

6.4.2. Στοχεύοντας στην Κυρτότητα (2^{ος} μετασχηματισμός)

Σύμφωνα με την προηγούμενη παράγραφο, προκειμένου να αντιμετωπίσουμε την μη-κυρτότητα του προβλήματος (P2), εφαρμόζουμε την ακόλουθη αλλαγή μεταβλητών $P_{c,i} = e^{p_{c,i}}$ και $P_{c,\max} = e^{p_{c,\max}} \forall j \in J, \forall c \in C$ στο αρχικό πρόβλημα. Μετά από κάποιες μαθηματικές πράξεις το πρόβλημα (P2) μπορεί να ξαναγραφεί ως:

$$(P3) \quad \max_{\bar{p}, \bar{p}_{\max}} \sum_{c \in C} \sum_{j \in S_c} U_j(\gamma_{c,j}(p_{c,j}, \bar{p}_{\max})) \quad (43)$$

$$s.t. \quad \sum_{j \in S_c} \exp(p_{c,j} - p_{c,\max}) \leq 1 \quad \forall c \in C \quad (44)$$

$$P_c^{Min} \exp(-p_{c,\max}) \leq 1 \quad \forall c \in C \quad (45)$$

$$(P_c^{Max})^{-1} \exp(p_{c,\max}) \leq 1 \quad \forall c \in C \quad (46)$$

Οι μετασχηματισμένοι περιορισμοί είναι κυρτοί στο $\bar{p} = (\bar{p}_0, \bar{p}_1, \dots, \bar{p}_{|C|-1})$ και $\bar{p}_{\max} = (p_{0,\max}, p_{1,\max}, \dots, p_{|C|-1,\max})$ καθώς όλα τα αριστερά μέρη είναι συνθέσεις μη αρνητικών αθροισμάτων εκθετικών όρων, οι οποίοι είναι πάντα κυρτές συναρτήσεις όπως δείχνεται στο [58]. Αυτό που απομένει είναι να αποδειχθεί η κυρτότητα της αντικειμενικής συνάρτησης (43) στο \bar{p} και \bar{p}_{\max} . Από την (43) έχουμε,

$$\begin{aligned} & \sum_{c \in C} \sum_{j \in S_c} U_j(\gamma_{c,j}(p_{c,j}, \bar{p}_{\max})) = \\ & \sum_{c \in C} \sum_{j \in S_c} \log \frac{G_{c,j} \exp(p_{c,j})}{\sum_{c' \in C} G_{c',j} \exp(p_{c',\max}) - G_{c,j} \exp(p_{c,j}) + n_0} = \\ & \sum_{c \in C} \sum_{j \in S_c} \left[\log(\exp(p_{c,j} + \ln(G_{c,j}))) \right. \\ & \quad \left. - \log\left(\sum_{c' \in C} \exp(p_{c',\max} + \ln G_{c',j}) - \exp(p_{c,j} + \ln(G_{c,j})) + \exp(\ln n_0)\right) \right]. \end{aligned}$$

Ο πρώτος όρος στην αγκύλη είναι γραμμικός σε σχέση με το \bar{p} και \bar{p}_{\max} , καθώς είναι γραμμικός ως συνάρτηση του $p_{c,j}$. Ο δεύτερος όρος είναι ένα λογαριθμικό

άθροισμα των εκθετικών γραμμικών συναρτήσεων του \bar{p} και \bar{p}_{\max} , το οποίο είναι κυρτό όπως αποδεικνύεται στα [60], [96]. Τέλος, καθώς η αντικειμενική συνάρτηση του (P3) είναι ένα άθροισμα κυρτών όρων, συμπεραίνουμε πως το (P3) είναι ένα κυρτό πρόβλημα βελτιστοποίησης.

6.5. Διαχείριση Κατανομής Ισχύος και Περιοχής Κάλυψης σε Ενοποιημένα

Κυβελωτά Δίκτυα Δύο Επιπέδων

Το κυρτό πρόβλημα βελτιστοποίησης (P3) έχει δύο ιδιότητες που διευκολύνουν την κατανεμημένη επίλυσή του. Αρχικά, η (43) είναι ένα άθροισμα του συνόλου των συναρτήσεων χρησιμότητας των $|S_c|$ χρηστών των $|C|$ κυβελών, που εξαρτώνται μόνο από τις μεταβλητές \bar{p}_c και \bar{p}_{\max} . Δεύτερον, οι περιορισμοί (44)-(46) επίσης εξαρτώνται μόνο από τα \bar{p}_c και \bar{p}_{\max} . Βασιζόμενοι σε αυτήν ακριβώς την ιδιότητα, σε αυτή την παράγραφο θα αναπτύξουμε και θα παρουσιάσουμε έναν αλγόριθμο βασισμένο σε τεχνικές Lagrange, ικανό να εξευρίσκει τη λύση του προβλήματος (P1), επιλύοντας το πρόβλημα (P3), δηλαδή εξευρίσκοντας τα \bar{p}_c^* και \bar{p}_{\max}^* .

Εφαρμόζοντας τη μεθοδολογία αποσύνθεσης πρωτεύοντος-δυνικού προβλήματος [54] στο (P3), όπως απεικονίζεται και στο Σχήμα 17, έχουμε:

I. $|C|-1$ ανεξάρτητα υποπροβλήματα Ενδοκυβελικής Κατανομής Ισχύος (Intra-cell Power Control - IPC). Θεωρώντας την αποσύνθεση πρωτεύοντος προβλήματος του (P3) και κρατώντας σταθερή τη μεταβλητή \bar{p}_{\max} (δηλαδή, για μία δεδομένη περιοχή κάλυψης του συστήματος), το πρόβλημα (P3) σπάει σε $|C|-1$ ανεξάρτητα υποπροβλήματα ενδοκυβελικής κατανομής ισχύος (IPC), καθένα εκ των οποίων είναι υπεύθυνο για τον υπολογισμό του βέλτιστου διανύσματος ενδοκυβελικής κατανομής

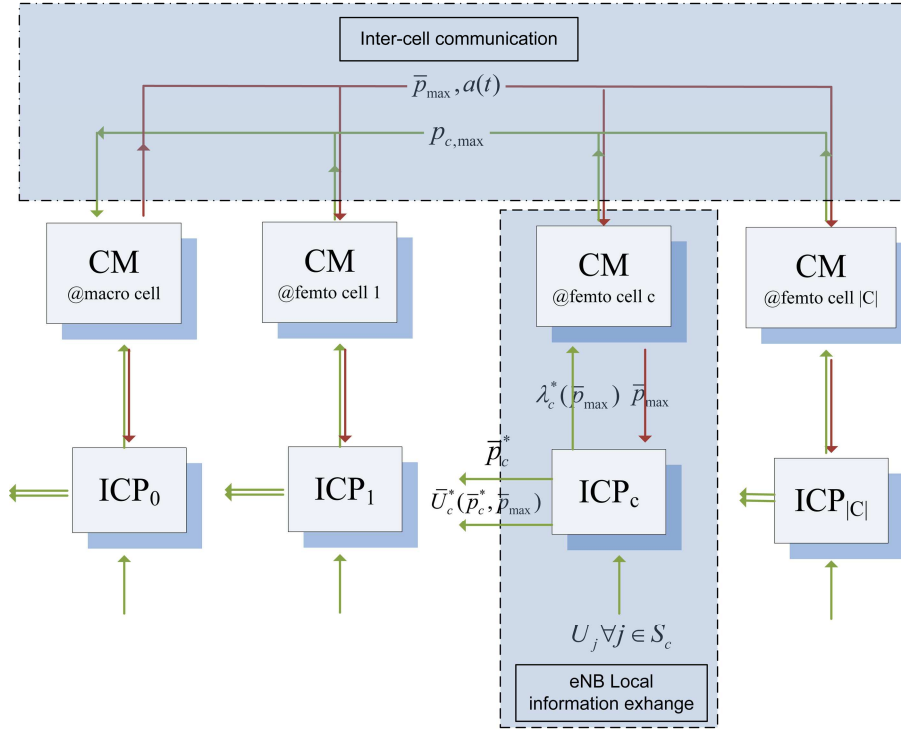
ισχύος \bar{p}_c^* δεδομένης μία ανάθεσης \bar{p}_{\max} . Η λύση των προβλημάτων IPC δίδεται την παράγραφο 6.5.1.

II. Ένα κυρίαρχο (*master*) πρόβλημα, υπεύθυνο για την ανανέωση των τιμών της μεταβλητής \bar{p}_{\max} προς τη βέλτιστη τιμή \bar{p}_{\max}^* . Αυτό το κυρίαρχο πρόβλημα ουσιαστικά εκπληρώνει τη διαχείριση της Περιοχής Κάλυψης (θα αναφερόμαστε σε αυτό ως Coverage Management - CM πρόβλημα) ρυθμίζοντας την τιμή του διανύσματος μέγιστης ενδοκυψελικής εκπομπής ισχύος, και συνεπώς την περιοχή κάλυψης της κάθε κυψέλης στο ενοποιημένο σύστημα. Προκειμένου να επιλύσουμε το πρόβλημα (CM), καταφεύγουμε σε μία μέθοδο υποβαθμίδων (subgradient) που αξιοποιεί την πληροφορία που φέρουν οι πολλαπλασιαστές Lagrange $\lambda_c^* \quad \forall c \in C$ που υπολογίζονται από τα IPC και συνδέονται με τον περιορισμό (44), όπως αναλύεται στην παράγραφο 6.5.2.

Αξίζει να τονίσουμε πως αφού το πρόβλημα (P3) είναι ένα κυρτό πρόβλημα βελτιστοποίησης, τόσο το κυρίαρχο πρόβλημα (CM), όσο και τα υποπροβλήματα (IPC) είναι επίσης κυρτά προβλήματα βελτιστοποίησης [11]. Ακολουθούν οι λύσεις των προβλημάτων IPC και CM, αντίστοιχα.

6.5.1. Επιλύοντας τα ανεξάρτητα υποπροβλήματα Ενδοκυψελικής Κατανομής Ισχύος (IPC)

Κρατώντας σταθερό το διάνυσμα μέγιστης ισχύος εκπομπής \bar{p}_{\max} , το πρόβλημα (P3) γίνεται διαχωρίσιμο και μετασχηματίζεται σε $|C|-1$ ανεξάρτητα υποπροβλήματα Ενδοκυψελικής Κατανομής Ισχύος για κάθε κυψέλη c . Το κάθε ένα από αυτά είναι ανεξάρτητα επιλύσιμο, καθώς, α) η αντικειμενική συνάρτηση είναι σύνθεση $|C|-1$ ανεξάρτητων αθροισμάτων που εξαρτώνται μόνο από το $\bar{p}_c \quad \forall c \in C$, β) το σύνολο των περιορισμών είναι επίσης διαχωρίσιμο στο C , και γ) το $J = S_0 \times S_1 \times \dots \times S_{|C|-1}$



Σχήμα 17: Σηματοδοσία του αλγόριθμου διαχείρισης ενδοκυψελικών πόρων και περιοχής κάλυψης είναι ένα Καρτεσιανό γινόμενο, καθώς θεωρούμε Κλειστή Πρόσβαση³. Συνεπώς ορίζουμε το πρόβλημα Ενδοκυψελικής Κατανομή Ισχύος ως:

$$(IPC_c) \quad \max_{\bar{P}_c} U_c(\bar{P}_c) \equiv \sum_{j \in S_c} U_j(\gamma_{c,j}(p_{c,j})) \quad (47)$$

$$s.t. \quad \sum_{j \in S_c} \exp(p_{c,j} - p_{c,\max}) \leq 1 \quad (48)$$

Το πρόβλημα (IPC_c) εξευρίσκει το διάνυσμα βέλτιστης ενδοκυψελικής κατανομής πόρων \bar{P}_c^* στην κυψέλη c , δοθέντος του διανύσματος μέγιστης ισχύος εκπομπής \bar{P}_{\max} . Προκειμένου να επιλύσουμε το (IPC_c) χρησιμοποιούμε την μεθοδολογία που παρουσιάζεται για την επίλυση του προβλήματος (11) στο [23]. Το Πρόβλημα (11) είναι επίσης ένα λογαριθμικά τροποποιημένο πρόβλημα ενδοκυψελικής διαχείρισης ισχύος υπό συνολικών περιορισμών ισχύος. Επιπλέον, οι συναρτήσεις χρησιμότητας που υιοθετούμε (όπως παρουσιάζονται στα (35) και (43)) είναι υποπεριπτώσεις των συναρτήσεων που θεωρεί το [23]. Συνεπώς για την επίτευξη της λύσης των

³ Μόνον αδειοδοτημένοι χρήστες μπορούν να επικοινωνήσουν και να συνδεθούν στη φεμτοκυψέλη τους

υποπροβλημάτων (IPCs) μπορούμε να εφαρμόσουμε απευθείας τον αλγόριθμο βαθμωτής προβολής (gradient projection) με σταθερό βήμα που προτείνεται στο [35] (Κεφάλαιο IV), ο οποίος χαρακτηρίζεται από ιδιότητες αποδεδειγμένης σύγκλισης και βελτιστότητας. Ο αλγόριθμος IPC_c , δέχεται συνεπώς σαν είσοδο οποιοδήποτε διάνυσμα \bar{p}_{\max} και παρέχει ως έξοδο το αντίστοιχο βέλτιστο διάνυσμα ανάθεσης πόρων \bar{p}_c^* .

6.5.2. Υπολογίζοντας τον Πολλαπλασιαστή Lagrange ενός (IPC)

Προτού προχωρήσουμε στην επίλυση του (CM), απαιτείται ο υπολογισμός του μοναδικού βέλτιστου Πολλαπλασιαστή Lagrange ($\lambda_c^*(\bar{p}_{c,\max})$) για κάθε (IPC), που συνδέεται με τους αντίστοιχους περιορισμούς (48). Ο υπολογισμός αυτών των πολλαπλασιαστών εγγυάται την κατανεμημένη επίλυση του (CM). Προς αυτό το στόχο, δεδομένου του διανύσματος \bar{p}_c^* και οποιουδήποτε $\bar{p}_{c,\max}$, αρχικά ορίζουμε την συνάρτηση Lagrange του προβλήματος:

$$L^c(\bar{p}_c, \bar{p}_{c,\max}, \lambda_c) \equiv \sum_{j \in S_c} U_j(\gamma_{c,j}(p_{c,j})) + \lambda_c \left[\exp(p_{c,\max}) - \sum_{j \in S_c} \exp(p_{c,j}) \right] \quad (49)$$

Επιπλέον, συνυπολογίζοντας τις απαραίτητες συνθήκες βελτιστότητας 2^{ης} τάξης [68], δηλαδή, $\nabla_{\bar{p}_c} L^c(\bar{p}_c, \bar{p}_{c,\max}, \lambda_c) \Big|_{\substack{\bar{p}_c = \bar{p}_c^* \\ \lambda_c = \lambda_c^*}} = 0$ και εφαρμόζοντας τις συναρτήσεις χρησιμότητας των χρηστών (35), ο μοναδικός πολλαπλασιαστής Lagrange ενός (ICP_c) (η μοναδικότητα προκύπτει από την κυρτότητα του προβλήματος (ICP)), δίνεται μετά από κάποιες πράξεις από:

$$\nabla_{\bar{p}_c} L^c(\bar{p}_c, \bar{p}_{c,\max}, \lambda_c) \Big|_{\substack{\bar{p}_c = \bar{p}_c^* \\ \lambda_c = \lambda_c^*}} = 0 \rightarrow \sum_{j \in S_c} \left\{ \frac{\partial U_j(\gamma_{c,j}(p_{c,i}))}{\partial p_{c,i}} - \lambda_c^* \exp(p_{c,i}) \right\} \Big|_{\bar{p}_c = \bar{p}_c^*} \rightarrow$$

$$\lambda_c^* = \frac{\sum_{j \in S_j} k/k - G_{c,j} \exp(p_{c,j}^*)}{\exp(p_{c,\max})} \quad (50)$$

όπου $k = \sum_{c \in C} G_{c,j} \exp(p_{c,\max}) + n_0$.

Συνοψίζοντας την ανάλυση, υπενθυμίζουμε πως ο αλγόριθμος (IPC_c) για μία κυψέλη $c \in C$, δέχεται ως είσοδο οποιοδήποτε διάνυσμα \bar{p}_{\max} και επιστρέφει α) το αντίστοιχο διάνυσμα \bar{p}_c^* , όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 6.5.1, β) τη βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης του (ICP_c), την $U_c^*(\bar{p}_{\max})$ δοθέντος του \bar{p}_{\max} (δηλαδή, $U_c^*(\bar{p}_{\max}) \equiv U_c(\bar{p}_c^*, \bar{p}_{\max}) = \sum_{j \in S_c} U_j(\gamma_{c,j}(p_{c,j}^*))$), καθώς και γ) τον πολλαπλασιαστική Lagrange λ_c^* .

6.5.3. *Επιλύοντας το Πρόβλημα Διαχείρισης Περιοχής Κάλυψης (κυρίαρχο πρόβλημα)*

Σύμφωνα με τα προηγούμενα, δοθέντος ενός διανύσματος ενδοκυψελικής ανάθεσης ισχύος $\bar{p}_c^* \forall c \in C$, το κυρίαρχο πρόβλημα διαχείρισης Περιοχής Κάλυψης (CM) μπορεί να οριστεί ως εξής:

$$(CM) \quad \underset{\bar{p}_{\max}}{\text{maximize}} \quad \sum_{c \in C} U_c^*(\bar{p}_{\max}) \quad (51)$$

$$s.t. \quad P_c^{Min} \exp(-p_{c,\max}) \leq 1 \quad \forall c \in C \quad (52)$$

$$(P_c^{Max})^{-1} \exp(p_{c,\max}) \leq 1 \quad \forall c \in C \quad (53)$$

Οι περιορισμοί (52) και (53) μπορούν να ενοποιηθούν σε μία ισοδύναμη αλλά πιο ευέλικτη μορφή ως:

$$(CM) \quad \underset{\bar{p}_{\max}}{\text{maximize}} \quad \sum_{c \in C} U_c^*(\bar{p}_{\max}) \quad (54)$$

$$s.t. \quad \log(P_c^{Min}) \leq p_{c,\max} \leq \log(P_c^{Max}) \quad \forall c \in C \quad (55)$$

όπου τα διανύσματα βέλτιστης ανάθεσης ισχύος \bar{p}_c^* είναι γνωστά, τα $\log(P_c^{Max})$ και $\log(P_c^{Min})$ είναι σταθερές και άρα ο μόνος άγνωστος είναι το βέλτιστο διάνυσμα μέγιστης ισχύος εκπομπής των σταθμών βάσης των κυψελών \bar{p}_{max}^* (ουσιαστικά δηλαδή η περιοχή κάλυψης των κυψελών).

Προκειμένου να επιλύσουμε το (CM), εφαρμόζουμε μία μέθοδο υποβαθμίδων βασισμένοι στο [11]. Η επιλογή μας υποκινείται αφενός από το γεγονός ότι η κλίση (gradient) της αντικειμενικής συνάρτησης του (CM) είναι δύσκολο να υπολογιστεί, και αφετέρου, από το γεγονός ότι στο [11] και [54] αποδεικνύεται πως οι υποβαθμίδες (subgradient) της κάθε $U_c^*(\bar{p}_{max})$ είναι ίσες με το βέλτιστο πολλαπλασιαστική Lagrange που αντιστοιχεί στον περιορισμό (48) στο (ICP_c). Συνεπώς $\nabla_c U_c^*(\bar{p}_{max}) = \lambda_c^*(p_{c,max})$, το οποίο υπολογίζεται από την (50). Άρα η συνολική τιμή της συνάρτησης subgradient υπολογίζεται ως:

$$\nabla_{\bar{p}_{max}} U_c^*(\bar{p}_{max}) = \sum_{c \in C} \lambda_c^*(\bar{p}_{max}).$$

Το κυρίαρχο πρόβλημα (CM) μπορεί συνεπώς να λυθεί με χρήση μεθόδων υποβαθμίδων (sub-gradients) ανανεώνοντας τα μέγιστα επίπεδα εκπομπής των κυψελών. Ο αλγόριθμος CM λειτουργεί σύμφωνα με τον παρακάτω κανόνα ανανέωσης:

$$\begin{bmatrix} p_{0,max}(t+1) \\ \dots \\ p_{|C|-1,max}(t+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{0,max}(t) \\ \dots \\ p_{|C|-1,max}(t) \end{bmatrix} + a(t) \begin{bmatrix} \lambda_0^*(\bar{p}_{max}(t)) \\ \dots \\ \lambda_{|C|-1}^*(\bar{p}_{max}(t)) \end{bmatrix}_P \quad (56)$$

όπου, το t δηλώνει τις επαναλήψεις του αλγόριθμου, το $a(t)$ το βήμα, και το $[\cdot]_P$ ορίζει την προβολή του στο κυρτό σύνολο εφικτών λύσεων:

$$P \triangleq \left\{ (p_{0,max}, \dots, p_{|C|-1,max}) : \log(P_c^{min}) \leq p_{c,max} \leq \log(P_c^{max}), \forall c \in C \right\}.$$

Η αναλυτική λειτουργία του αλγόριθμου CM παρουσιάζεται στον Πίνακα XI.

Προς ευκολία μας αυτό το σύνολο απολαμβάνει την ιδιότητα της πλήρους αποσύνθεσης σε ένα Καρτεσιανό γινόμενο για κάθε κυψέλη: $P = P_0 \times P_1 \times \dots \times P_{|c|-1}$. Συνεπώς, ο παραπάνω βηματικός αλγόριθμος μπορεί να εκτελεστεί σε κάθε κυψέλη ανεξάρτητα, γνωρίζοντας μόνον τους αντίστοιχους πολλαπλασιαστές Lagrange λ_c^* του προβλήματος (IPC), οι οποίοι με την σειρά τους είναι ανεξάρτητα υπολογίσιμοι από την κάθε κυψέλη διαμέσου του αλγόριθμου ICP_c .

Συνοψίζοντας λοιπόν, όλοι οι αλγόριθμοι που αποτελούν και άρα επιλύουν το πρόβλημα της βέλτιστης διαχείρισης κατανομής ισχύος και περιοχής κάλυψης (PCC), δηλαδή ο ICP και ο CM , επιλύονται κατανεμημένα από κάθε κυψέλη στο σύστημα. Η μόνη απαραίτητη πληροφορία που πρέπει να διαμοιραστεί μεταξύ των κυψελών του διεπίπεδου συστήματος είναι οι $\bar{p}_{\max}(t)$ και $a(t)$, επιφέροντας συνεπώς αμελητέα επιβάρυνση στο σύστημα.

6.6. Ένας κατανεμημένος αλγόριθμος βέλτιστης διαχείρισης κατανομής ισχύος και περιοχής κάλυψης

Σε αυτή την παράγραφο αναλύουμε τη λειτουργία και σχολιάζουμε τα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά του προτεινόμενου αλγόριθμου βέλτιστης διαχείρισης κατανομής ισχύος και περιοχής κάλυψης (PCC). Επιπλέον, αποδεικνύουμε τη σύγκλισή του στο συνολικά βέλτιστο σημείο λειτουργίας του συστήματος, καθώς επίσης και επιχειρηματολογούμε επί της απαιτούμενης ταχύτητας σύγκλισης και της προστιθέμενης σηματοδοσίας.

6.6.1. Σχεδίαση και Λειτουργία

Στοχεύοντας στην υλοποίηση ενός κοινού μηχανισμού, ενός κοινού αλγόριθμου διαχείρισης ισχύος και περιοχής κάλυψης, η συνεργασία των αλγορίθμων $ICPs$ και

CM είναι απαραίτητη. Συγκεκριμένα, οι αλγόριθμοι ICP , εβρισκόμενοι σε κάθε κυψέλη $c \in C$, είναι υπεύθυνοι για την επίλυση του εκάστοτε προβλήματος ενδοκυψελικής κατανομής ισχύος στους χρήστες της (φέμτο ή μάκρο) κυψέλης. Ο αλγόριθμος CM σε κάθε φεμτοκυψέλη ανανεώνει δυναμικά στη μέγιστη ισχύ εκπομπής, σύμφωνα με την (56), ενώ ο CM στην μακροκυψέλη εξασφαλίζει το συγχρονισμό μεταξύ των κυψελών συλλέγοντας και μεταδίδοντας το διάνυσμα $\bar{p}_{var}(t)$ και το βήμα $a(t)$. Είναι σημαντικό να τονίσουμε πως τόσο ο αλγόριθμος ICP όσο και ο CM βρίσκονται εσωτερικά στο Σταθμό Βάσης της κάθε κυψέλης και συνεπώς, όλη η ανταλλασσόμενη πληροφορία είναι τοπική και δεν επιφέρει κόστος σηματοδοσίας στο ασύρματο μέσο.

Ο συνολικός αλγόριθμος PCC υπεύθυνος για τη βέλτιστη διαχείριση της περιοχής κάλυψης της κάθε κυψέλης, αλλά και της κατανομής ενδοκυψελικών πόρων στους χρήστες συνοψίζεται στον Πίνακα XI. Επίσης, το Σχήμα 17 απεικονίζει τη συνολική λειτουργία του αλγόριθμου PCC , επικεντρώνοντας κυρίως στην απαιτούμενη σηματοδοσία και μεταφορά δεδομένων μεταξύ των επιμέρους αλγορίθμων, ενισχύοντας τους ισχυρισμούς μας για ελάχιστη προστιθέμενη σηματοδοσία.

ΠΙΝΑΚΑΣ XI: Αλγόριθμος Διαχείρισης Πόρων και Περιοχής Κάλυψης (PCC)

Αλγόριθμος Πρωτεύοντα-Δυικού Προβλήματος για την επίλυση του (P3):			
Αρχικοποίηση	Θέσε $t=0$ και $\bar{p}_{var}(0)$ ίσο με μία μη-αρνητική τιμή.		
Βήμα	Λειτουργία	Είσοδος	Έξοδος
1	Λύσε τα προβλήματα ICP σε κάθε κυψέλη θεωρώντας τις συναρτήσεις χρησιμότητας των χρηστών U_j και το διάνυσμα ισχύος $\bar{p}_{var}(t)$, σύμφωνα με τη δυική μέθοδο της Παραγράφου 6.5.1, υπολογίζοντας το βέλτιστο διάνυσμα χρησιμότητας $\bar{U}_c^*(\bar{p}_c^*, \bar{p}_{var})$, τον	$U_j \forall j \in S_j$ $\bar{p}_{var}(t)$	$\bar{U}_c^*(\bar{p}_c^*, \bar{p}_{var})$ $\lambda_c^*(\bar{p}_{var}(t))$ $\bar{p}_c^*(t)$ $\forall c \in C$

	κανονικοποιημένο πολλαπλασιαστή Lagrange $\lambda_c^*(\bar{p}_{\text{var}}(t))$, και την κατανομή ισχύος στους χρήστες για δεδομένο $\bar{p}_{\text{var}}(t)$.		
2	Κάθε κυψέλη c δυναμικά ανανεώνει τη μέγιστη ισχύ εκπομπής $p_{c,\text{var}}(t+1)$ σύμφωνα με τη σχέση (56). Αυτή η πληροφορία στέλνεται στη μακροκυψέλη με χρήση υπάρχουσας 3GPP σηματοδότησης.	$\lambda_c^*(\bar{p}_{\text{var}}(t))$ $a(t)$	$p_{c,\text{var}}(t+1)$ $\forall c \in \mathcal{C}$
3	Θέσε $t \leftarrow t+1$, στείλε τα $\bar{p}_{\text{var}}(t)$, $a(t)$ και πήγαινε στο Βήμα 1 (έως ότου ικανοποιηθεί η συνθήκη τερματισμού). Εάν το διάνυσμα βέλτιστης ενδοκυψελικής κατανομής πόρων έχει συγκλίνει, τότε και η περιοχή κάλυψης έχει υπολογιστεί και δίνεται από το $(\bar{p}_c^*, \bar{p}_{\text{var}}^*)$		$(\bar{p}_c^*, \bar{p}_{\text{var}}^*)$

6.6.2. Σύγκλιση και Βελτιστότητα

Σε αυτή τη παράγραφο σχολιάζουμε και επιχειρηματολογούμε υπέρ των ιδιοτήτων σύγκλισης και βελτιστότητας του προτεινόμενου αλγόριθμου διαχείρισης πόρων και περιοχής κάλυψης.

Αρχικά, επικεντρωνόμαστε στο βήμα ανανέωσης που έχει επιλεγεί για τον αλγόριθμο μας (56), που ουσιαστικά αποτελεί ένα φθίνον βήμα $a(t)$ με τις ακόλουθες ιδιότητες: $a(t) > 0$, $\lim_{t \rightarrow \infty} a(t) = 0$ και $\sum_{t=0}^{\infty} a(t) = \infty$. Σύμφωνα με το [68], καθώς το

\mathbb{C} είναι συμπαγές (compact) και μη κενό, και το (CM) είναι ένα κυρτό πρόβλημα βελτιστοποίησης, τότε χρησιμοποιώντας φθίνον βήμα, για παράδειγμα το

$a(t) = \frac{t}{\beta + t}$ όπου το $\beta > 1$ είναι μία σταθερά, ο αλγόριθμος (subgradient algorithm)

θα συγκλίνει, δηλαδή $\bar{p}_{\text{var}}(t) \rightarrow \bar{p}_{\text{var}}^*$ καθώς $t \rightarrow \infty$ και συνεπώς

$$\limsup \left\{ \sum_{c \in C} U_c^*(\bar{p}_{\text{var}}) \right\} \rightarrow U_{TOTAL}^* \triangleq \sum_{c \in C} U_c^*(\bar{p}_{\text{var}}). \text{ Επιπλέον, καθώς διάμεσο του (ICP}_c\text{)}$$

μπορούμε να υπολογίσουμε το $\bar{p}^*(\bar{p}_{\text{var}}) \forall \bar{p}_{\text{var}}$ η σύγκλιση του $\bar{p}_{\text{var}}(t)$ στην καθολικά βέλτιστη λύση συνεπάγεται αυτομάτως και την καθολική βελτιστότητα του $\bar{p}^*(\bar{p}_{\text{var}}^*)$.

Συνεπώς, συμπεράνουμε πως και τα δύο διανύσματα $(\bar{p}_c, \bar{p}_{\text{var}})$ συγκλίνουν στις καθολικά βέλτιστες τιμές $(\bar{p}_c^*, \bar{p}_{\text{var}}^*)$ οδηγώντας στη συνολική μεγιστοποίηση της ρυθμαπόδοσης του διεπίπεδου συστήματος.

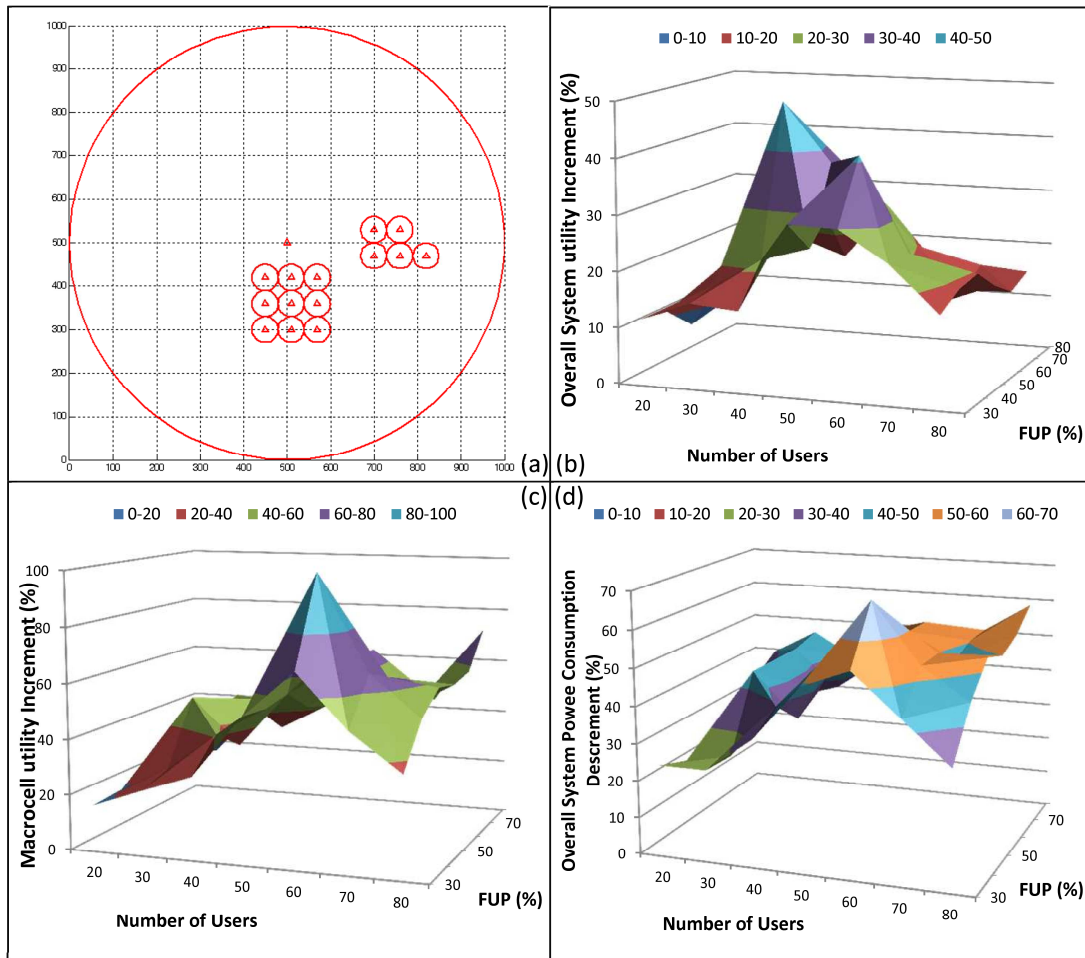
6.6.3. Σχολιασμοί και Σχεδιαστικά Χαρακτηριστικά

- Συγχρονισμός: η ύπαρξη του φθίνοντος βήματος $a(t)$ απαιτεί το συγχρονισμό μεταξύ των κυψελών του διεπίπεδου συστήματος για τον υπολογισμό του $\bar{p}_{\text{var}}(t+1)$. Συνεπώς απαιτείται όλες οι κυψέλες να διατηρούν την τιμή της τρέχουσας επανάληψης, καθώς και τις τιμές του διανύσματος μέγιστης ισχύος εκπομπής των κυψελών $\bar{p}_{\text{var}}(t)$. Με άλλα λόγια, είναι απαραίτητο να ανταλλάσσονται οι τιμές των $a(t)$ και $p_{c,\text{var}}(t)$ σε κάθε επανάληψη t . Αυτό είναι εφικτό, ειδικότερα αναλογιζόμενοι τη φύση του συστήματος καθώς α) το CDMA βασίζεται εκ φύσεως σε χρονοσχισμές και άρα ο συγχρονισμός είναι έμφυτος, και β) η μακροκυψέλη, ενεργώντας σαν υπερκείμενο δίκτυο, μπορεί να μεταδίδει τις τιμές $a(t)$ και $p_{c,\text{var}}(t)$ στο κανάλι ευρεκπομπής, μια κοινή πρακτική στο 3GPP LTE [41].
- Προστιθέμενη Σηματοδοσία: Σύμφωνα με την προηγούμενη ανάλυση, η εισαγόμενη σηματοδοσία είναι ελάχιστη και αποτελείται μόνο από $|C|+1$ πραγματικούς αριθμούς ανά επανάληψη ($a(t)$ και \bar{p}_{var}) οι οποίοι και μπορούν εύκολα να ενσωματωθούν στην ήδη υπάρχουσα σηματοδοσία του δικτύου.

- Ταχύτητα Σύγκλισης: Παρόλο που η σύγκλιση στην βέλτιστη τιμή είναι σίγουρη και αποδεδειγμένη, ο χρόνος κατά τον οποίο θα συμβεί αυτό δεν μπορεί να υπολογιστεί ή ακόμα και να φραχθεί με κάποιον εύκολο τρόπο. Στην πραγματικότητα, εξαρτάται από την ισορροπία (tradeoff) μεταξύ ακρίβειας και χρονικής πολυπλοκότητας, το οποίο με τη σειρά του εξαρτάται από την τιμή που έχει επιλεγεί για το κατώφλι τερματισμού ε , δηλαδή, εάν $\|\bar{p}_{\text{var}}(t+1) - \bar{p}_{\text{var}}(t)\| \leq \varepsilon$ και $\varepsilon < a(t)$ τότε τερματίζει. Ωστόσο, όπως θα δειχτεί στην Παράγραφο 6.7, τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν πως σε όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις ο αλγόριθμος συγκλίνει και τερματίζει σε λιγότερες από 30 επαναλήψεις.

6.7. Αριθμητικά Αποτελέσματα

Σε αυτή τη παράγραφο, παραθέτουμε ενδεικτικά αριθμητικά αποτελέσματα που αποδεικνύουν την αποδοτικότητα του προτεινόμενου αλγόριθμου διαχείρισης ισχύος εκπομπής και περιοχής κάλυψης (PCC), καθώς και επιβεβαιώνουν την εφαρμοσιμότητά του σε κυψελωτά περιβάλλοντα δύο επιπέδων. Τα αποτελέσματα επιδεικνύουν πως για πληθώρα τοπολογιών φέμτο/μάκρο κυψελών επιτυγχάνεται σημαντική βελτίωση της απόδοσης, δηλαδή αύξηση της συνολικής ρυθμαπόδοσης εκφρασμένης με χρήση συναρτήσεων χρησιμότητας, αλλά και μείωση της συνολικής κατανάλωσης ισχύος, συγκρινόμενα με κοινές πολιτικές κατανομής ισχύος εκπομπής (PC) που στοχεύουν μονάχα στην ενδοκυψελική βελτιστοποίηση της απόδοσης, χωρίς να εφαρμόζουν πολιτικές διαχείρισης κάλυψης.



Σχήμα 18: Αριθμητικά αποτελέσματα για 2 συστάδες φεμοκυψελών

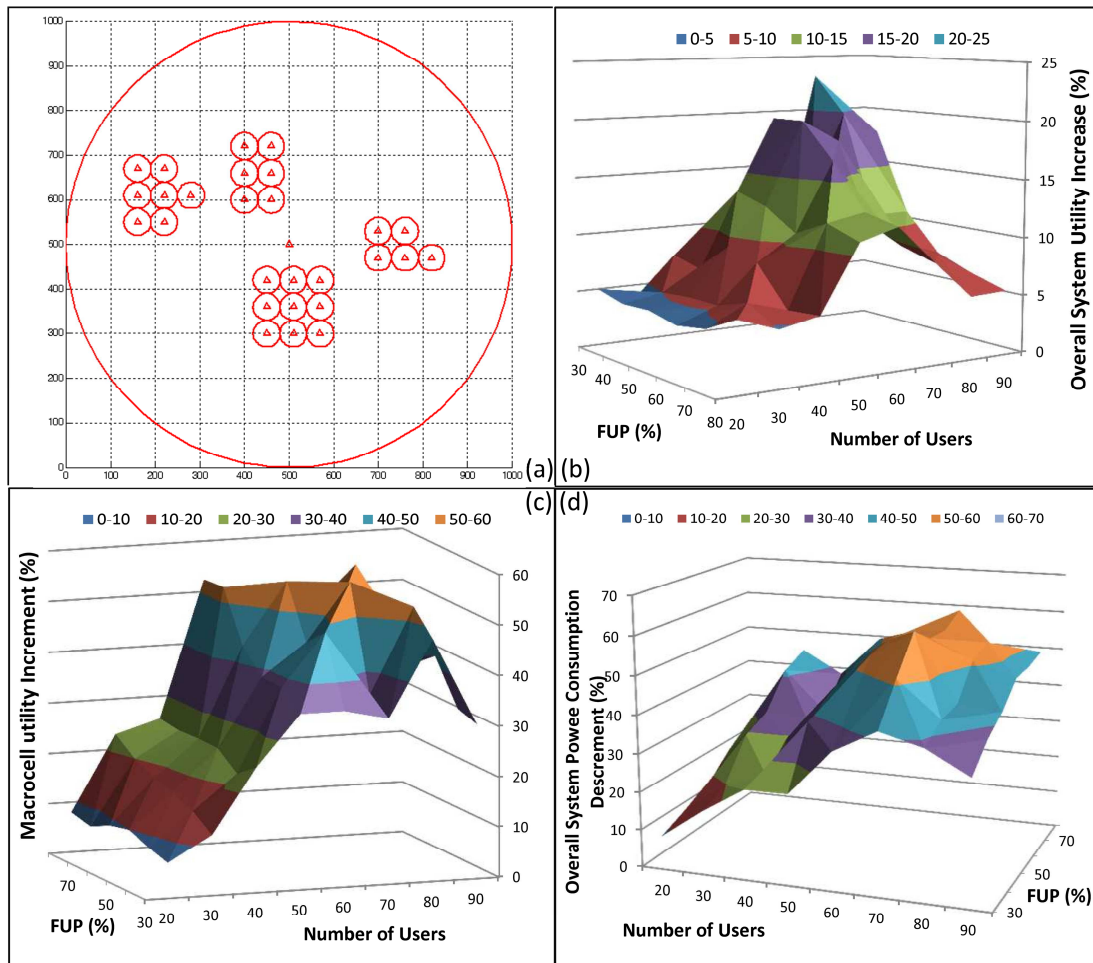
Θεωρούμε ένα διεπίπεδο δίκτυο αποτελούμενο από μία CDMA μακροκυψέλη και $|C|-1$ CDMA υποκείμενες φεμοκυψέλες ομαδοποιημένες σε συστάδες, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 18a και Σχήμα 19a, προσομοιώνοντας την εγκατάσταση φεμοκυψελών σε αστικές περιοχές [100]. Υποθέτουμε πως το εύρος ζώνης εξάπλωσης του CDMA είναι $W=10\text{ MHz}$, ενώ η μέγιστη ισχύς εκπομπής των μακροκυψελών και φεμοκυψελών λόγω φυσικών περιορισμών είναι $P_0^{\max} = 10\text{ Watt}$ και $P_c^{\max} = 3\text{ Watt}$ για $c=1, \dots, |C|-1$, αντίστοιχα [100], [101]. Υποθέτουμε επίσης πως η μέγιστη ισχύς εκπομπής της μακροκυψέλης παραμένει σταθερή και ίση με P_0^{\max} καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος. Επιπλέον, σε κάθε χρήστη ανατίθεται μία κατάλληλη συνάρτηση χρησιμότητας της λαμβανόμενης ρυθμαπόδοσης στην κάτω

ζεύξη συναρτήσει του λαμβανόμενου SINR σύμφωνα με την (35). Σε κάθε σενάριο υποθέτουμε διάφορες κατανομές του πληθυσμού των χρηστών μεταξύ των φέμτο και μακρο κυψελών. Το ποσοστό του συνολικού αριθμού των χρηστών που εξυπηρετείται από φεμτοκυψέλες σημειώνεται ως FUP (Femtocell Users' Percentage).

Αρχικά, θεωρούμε ένα διεπίπεδο σύστημα με δεκατέσσερις (14) φεμτοκυψέλες χωρισμένες σε δύο συστάδες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 18a. Η απόδοση του συστήματος σε σχέση με α) την συνολική αύξηση της χρησιμότητας (δηλαδή της ρυθμαπόδοσης), β) την αύξηση της χρησιμότητας (δηλαδή της ρυθμαπόδοσης) της μακροκυψέλης, και γ) την συνολική μείωση της κατανάλωσης ισχύος που επιτυγχάνεται με χρήση του αλγόριθμου PCC έναντι του PC, απεικονίζεται στα Σχήματα 18b –18d αντίστοιχα, για αυξανόμενες τιμές του πληθυσμού των ενεργών χρηστών (δηλαδή $|J|=20, 30, \dots, 80$), τυχαία τοποθετημένων στο σύστημα, και του ποσοστού των χρηστών φέμτοκυψέλων (δηλαδή $FUP=30, 40, \dots, 80$).

Τα αποτελέσματα δείχνουν πως κάτω από ρεαλιστικές συνθήκες κατανομής χρηστών (σύμφωνα με τα [100], [101]), δηλαδή αριθμού φεμτοκυψελών (14), συνολικού αριθμού χρηστών (από 40 έως 60) και ποσοστού χρηστών φέμτο 40-60%, που ουσιαστικά αντιστοιχεί κατά μέσο όρο σε 2 με 3 χρήστες ανά φεμτοκυψέλη (η πιο κοινή περίπτωση σε δίκτυα φέμτο), η συνολική χρησιμοποίηση του δικτύου, δηλαδή η συνολική ρυθμαπόδοση αυξάνεται έως και 50% με χρήση του προτεινόμενου αλγόριθμου PCC, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 18b.

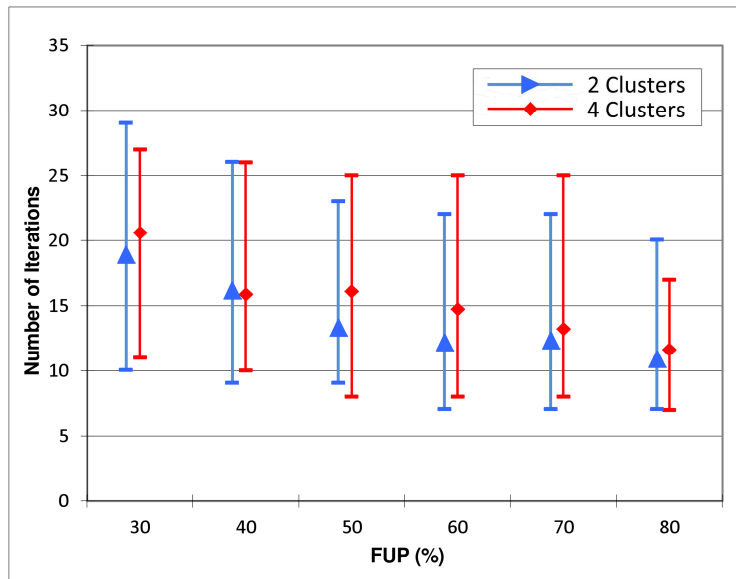
Ο κύριος λόγος που επιτυγχάνεται τόσο μεγάλη αύξηση με χρήση του PCC σχετίζεται με την τεράστια βελτίωση της απόδοσης των χρηστών της μακροκυψέλης, η οποία σε πολλές περιπτώσεις υπερβαίνει το 60%, δηλαδή αύξηση από 30 Mbps σε 48 Mbps (Σχήμα 18c), λόγω της αποδοτικής διαχείρισης περιοχής κάλυψης του αλγόριθμου PCC. Ειδικότερα, σύμφωνα με τον PCC, οι περιοχές κάλυψης των



Σχήμα 19: Αριθμητικά αποτελέσματα για 4 συστάδες φεμτοκυψελών

φεμτοκυψελών προσαρμόζονται με βέλτιστο τρόπο, ελαχιστοποιώντας την εκπεμπόμενη ισχύ, ενώ ταυτόχρονα διατηρούν βέλτιστη ενδοκυψελική απόδοση. Το γεγονός αυτό επιτρέπει στους χρήστες της μακροκυψέλης να λαμβάνουν χαμηλές παρεμβολές από γειτονικούς κόμβους, και συνεπώς να απολαμβάνουν υψηλές αυξήσεις της απόδοσης τους, συγκρινόμενα με την περίπτωση εφαρμογής μόνο βέλτιστης κατανομής ενδοκυψελικών πόρων.

Η ίδια συμπεριφορά επιβεβαιώνεται και από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο Σχήμα 18d, όπου χρησιμοποιώντας τον PCC η μείωση της καταναλισκόμενης ισχύος εκπομπής αγγίζει το 70% (δηλαδή από 55 Watt σε 17 Watt), σε σχέση με χρήση του PC. Αυτό επιτυγχάνεται λόγω της αποδοτικής διαχείρισης της



Σχήμα 20: Αριθμός επαναλήψεων που απαιτούνται για την σύγκλιση του αλγόριθμου PCC

ισχύος εκπομπής των κυψελών, σύμφωνα με την οποία η μέγιστη ισχύς εκπομπής των φεμτοκυψελών που θα διανεμηθεί στους συνδεδεμένους χρήστες της, μειώνεται στην ελάχιστη δυνατή τιμή που δεν προκαλεί πρόβλημα στην απόδοση των χρηστών. Αυτό όχι μόνο απαλείφει το πρόβλημα της υπερ-προσφοράς πόρων, αλλά οδηγεί και στη μείωση της διαρροής κάλυψης, και άρα και στον μετριασμό των παρεμβολών.

Ωστόσο, πρέπει να τονίσουμε πως τα οφέλη της κοινής διαχείρισης πόρων και σχεδιασμού περιοχής κάλυψης που επιτυγχάνονται με χρήση του PCC μετριάζονται καθώς πλησιάζουμε στα όρια των κατανομών του πληθυσμού των χρηστών ανάμεσα στα δύο επίπεδα. Ειδικότερα, για πολύ μικρά και πολύ μεγάλα ποσοστά χρηστών φέμτο (δηλαδή λιγότερο από 30% ή περισσότερο από 70%, που αντιστοιχούν σε λιγότερους από 2, ή περισσότερους από 5 χρήστες ανά φεμτοκυψέλη κατά μέσο όρο, η συνολική αύξηση της απόδοσης του συνολικού συστήματος μειώνεται, χωρίς όμως αυτό να σημαίνει πως οι χρήστες της μακροκυψέλης δεν απολαμβάνουν υψηλές βελτιώσεις της απόδοσης τους. Αυτή η συμπεριφορά είναι απόλυτα αναμενόμενη, καθώς στην πρώτη περίπτωση αρκετές φεμτοκυψέλες είναι σε καθεστώς υποχρησιμοποίησης (δηλαδή δεν έχουν ενεργούς χρήστες για να εξυπηρετήσουν), και

άρα δεν μπορεί να εφαρμοστεί καμία διαχείριση της περιοχής κάλυψής τους, ενώ στην δεύτερη περίπτωση οι περισσότερες φεμτοκυψέλες είναι συνωστισμένες και συνεπώς προκειμένου να εξυπηρετήσουν επιτυχώς όλους τους χρήστες τους διατηρούν υψηλά την ισχύ εκπομπής τους, αυξάνοντας όμως τις διακυψελικές παρεμβολές.

Το ίδιο μοτίβο παρατηρούμε ακόμα και αν αυξήσουμε την πολυπλοκότητα του συστήματος, προσθέτοντας ακόμα δύο συστάδες στο όπως παρατηρούμε στα Σχήματα 19a –19d. Συγκεκριμένα, παρατηρούνται μειώσεις της συνολικής δαπανώμενης ισχύος έως και 60%, εξοικονομώντας έως και 50 *Watts*, ενώ οι χρήστες της μακροκυψέλης απολαμβάνουν έως και 50% αύξηση στην απόδοσή τους, δηλαδή μία ώθηση 15Mbps στην συνολική ρυθμαπόδοση. Επιπλέον, αξίζει να τονίσουμε πως οι χαμηλές τιμές βελτίωσης της απόδοσης δεν σημαίνουν πως ο αλγόριθμος δεν αποδίδει, αλλά πως το σύστημα είναι ήδη κοντά στην βέλτιστη κατάσταση του, αφήνοντας λίγο χώρο για επιπλέον βελτίωση.

Τέλος, επικεντρωνόμαστε στις αλγοριθμικές ιδιότητες του προτεινόμενου αλγόριθμου PCC, και ειδικότερα στον ρυθμό σύγκλισης, καθώς αυτός επηρεάζει τόσο την προστιθέμενη σηματοδοσία στο διεπίπεδο δίκτυο, όσο και την πρακτικότητα και εφαρμοσιμότητα του. Στο Σχήμα 20 παρουσιάζεται ο ελάχιστος, μέγιστος και μέσος αριθμών επαναλήψεων που απαιτούνται ώστε ο αλγόριθμος PCC να μεταβεί σε ένα σταθερό σημείο λειτουργίας, (δηλαδή να συγκλίνει η (56)) σαν συνάρτηση του ποσοστού των χρηστών φέμτο FUP, για τα σενάρια των δύο (μπλε γραμμές με τρίγωνο) και τεσσάρων (κόκκινες γραμμές με κύκλο) συστάδων. Τα αποτελέσματα αποδεικνύουν πως η σύγκλιση του αλγόριθμου απαιτεί κατά μέσο όρο 15 επαναλήψεις, και ποτέ πάνω από 30. Πρακτικά, αυτό σημαίνει πως στην περίπτωση

ενός συστήματος HDR-CDMA του οποίου η χρονοσχισμή έχει διάρκεια $1,67 \text{ msec}$, ο απαιτούμενος χρόνος σύγκλισης του PCC δεν ξεπερνά τα 50 msec .

6.8. Συμπερασματικά Σχόλια

Στις προηγούμενες παραγράφους παρουσιάστηκε ένας βέλτιστος αλγόριθμος κατανομής πόρων και διαχείρισης περιοχής κάλυψης σε διεπίεδα CDMA ασύρματα δίκτυα μακρο/φέμτο κυψέλων παρουσία ενδοκυψελικών και διακυψελικών παρεμβολών, που στοχεύει στη μεγιστοποίηση της συνολικής ρυθμαπόδοσης της κάτω ζεύξης του δικτύου, ενώ ταυτόχρονα ελαχιστοποιεί την καταναλισκόμενη ισχύ εκπομπής, και άρα και τα επίπεδα παρεμβολών. Προς αυτό το στόχο, το ενοποιημένο δίκτυο αντιμετωπίζεται σαν ένας κοινός βελτιστοποιητής, και το αντίστοιχο πρόβλημα ΜΧΔ αντιμετωπίζεται με τεχνικές αποσύνθεσης πρωτεύοντος-δευτικού προβλήματος δύο επιπέδων, επιτρέποντας να ορίσουμε μία βέλτιστη αλλά και κατανεμημένη λύση. Αναπτύχθηκε ένας χαμηλής πολυπλοκότητας αλγόριθμος με αποδεδειγμένες ιδιότητες σύγκλισης, που εκμεταλλεύεται τη διαδικασία ενδοκυψελικής ανάθεσης πόρων εφαρμόζοντας ένα σχήμα υποβαθμίδων Lagrange. Τέλος, παρουσιάστηκαν αντιπροσωπευτικά αριθμητικά αποτελέσματα, επιδεικνύοντας μέχρι και 60% βελτίωση, τόσο στην αύξηση της συνολικής ρυθμαπόδοσης του διεπίεδου συστήματος, όσο και στην εξοικονόμηση ισχύος.

Αξίζει να τονίσουμε, πως παρόλο που η αρχιτεκτονική αποσύνθεσης δύο επιπέδων πρωτεύοντος-δευτικού προβλήματος παρουσιάστηκε και αναλύθηκε υπό το πρίσμα CDMA δικτύων, μπορεί να επεκταθεί καταλλήλως ώστε να υποστηρίξει διάφορα άλλα ασύρματα δίκτυα, με την προϋπόθεση της αποδεδειγμένης διαχωρισιμότητας και κυρτότητας της υποκείμενης συνάρτησης αλλά και των περιορισμών. Με αυτόν τον τρόπο, στο χαμηλότερο επίπεδο, τα ενδοκυψελικά προβλήματα κατανομής πόρων

(IPC) θα επιτυγχάνουν την βέλτιστη ανάθεση πόρων (π.χ. για ένα OFDM δίκτυο αυτό συνεπάγεται τον ορισμό των διανυσμάτων ισχύος εκπομπής και ανάθεσης υποφερουσών). Στο υψηλότερο επίπεδο ένα κυρίαρχο πρόβλημα διαχείρισης περιοχής κάλυψης (CM) είναι υπεύθυνο να υπολογίζει δυναμικά τη βέλτιστη περιοχή κάλυψης της κυψέλης που θα επιτύχει τη συνολική βελτιστοποίηση της απόδοσης ολόκληρου του δικτύου.

7. Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία

Η παρούσα διδακτορική διατριβή πραγματεύτηκε το πρόβλημα της βέλτιστης ανάθεσης χρηστών και διαμοιρασμού πόρων σε ενοποιημένα ετερογενή ασύρματα δίκτυα, στοχεύοντας όχι μόνο στη βελτιστοποίηση της συνολικής απόδοσης τέτοιων συστημάτων, αλλά ταυτόχρονα στην αποτελεσματική διασφάλιση των απαιτήσεων ΠτΥ των χρηστών με υπηρεσίες μη πραγματικού και πραγματικού χρόνου κατά τη ζεύξη καθόδου.

Η εκ φύσεως αυξημένη πολυπλοκότητα των υπό μελέτη συστημάτων καθιστά την μελέτη τους πολύ απαιτητική και την επίλυση των αναδυόμενων προβλημάτων εξαιρετικά δύσκολη. Συγκεκριμένα, αναλογιζόμενοι το ενιαίο ετερογενές περιβάλλον, η πληθώρα και διαφορετικότητα των εμπλεκόμενων στοιχείων, αναφορικά με την ταυτόχρονη παρουσία δικτύων διαφορετικής τεχνολογίας πρόσβασης, και χρηστών με πολλαπλά χαρακτηριστικά και απαιτήσεις, καθώς και οι ποικιλότροπες σχέσεις που αναπτύσσουν μεταξύ τους δεδομένου του διαμοιραζόμενου εύρου ζώνης και της γεωγραφικής κατανομής τους, εισάγουν πολλαπλές προκλήσεις. Χαρακτηριστικά, αναφέρουμε πως η ανάθεση ενός κινητού χρήστη σε ένα ασύρματο δίκτυο επιφέρει μια σειρά αλλαγών σε ολόκληρο το σύστημα καθώς επηρεάζει: α) την εσωτερική ενδοκυβελική κατανομή των πόρων στο σύστημα, β) την απόδοση των ήδη συνδεδεμένων χρηστών στο ίδιο δίκτυο λόγω παρουσίας ενδοκυβελικών παρεμβολών και γ) την απόδοση γεωγραφικά γειτνιαζόντων χρηστών που ανήκουν σε διαφορετικά δίκτυα λόγω παρουσίας διακυβελικών παρεμβολών. Τα παραπάνω με τη σειρά τους επιδρούν άμεσα στην απόδοση του συνολικού συστήματος και άρα και στη συνολική βελτιστότητα του.

Συνεπώς τέθηκε επιτακτική η ανάγκη ανάπτυξης και εφαρμογής καινοτόμων μεθόδων βελτιστοποίησης ικανές να αντιμετωπίσουν τις παραπάνω ιδιαιτερότητες των εμφανιζόμενων προβλημάτων σχεδίασης. Σε αυτή τη διατριβή βασιστήκαμε σε ένα κοινό πλαίσιο συναρτήσεων χρησιμότητας, που αντικατοπτρίζει τους διάφορους περιορισμούς και απαιτήσεις ΠτΥ για κάθε τύπο δικτύου με ένα μοναδικό, κανονικοποιημένο τρόπο, επιτρέποντας την αρραγή και αποδοτική ενοποίηση τους. Η συγχώνευση αυτή επιτυγχάνεται θέτοντας ένα κοινό στόχο ανεξαρτήτως του υποκείμενου δικτύου πρόσβασης, αυτόν της μεγιστοποίησης της συνολικής απόδοσης των υπηρεσιών των χρηστών σε σχέση με τη διασφάλιση των αντίστοιχων κριτηρίων ΠτΥ τους, η οποία εκφράζεται με χρήση συναρτήσεων χρησιμότητας. Συνεπώς, υιοθετήθηκε ένα κοινό πλαίσιο βασισμένο στη θεωρία Μεγιστοποίησης Χρησιμότητας Δικτύου και μέσω αυτού επικεντρωθήκαμε στην ανάλυση, τεκμηρίωση και αριθμητική επιβεβαίωση μιας σειράς καινοτόμων κατανομημένων βέλτιστων και αυτόνομων λύσεων που επιτυγχάνουν τον παραπάνω στόχο, καλύπτοντας ταυτόχρονα ορισμένα από τα σημαντικά κενά της υπάρχουσας διεθνούς βιβλιογραφίας.

Συγκεκριμένα καθόλη την πορεία της διατριβής αναγνωρίστηκαν, μοντελοποιήθηκαν και μεθοδεύτηκαν ανοιχτά προβλήματα και προκλήσεις που αντιμετωπίζουν τα σύγχρονα ετερογενή ασύρματα δίκτυα, ενώ ταυτόχρονα προτάθηκαν μέθοδοι και τεχνικές επίλυσής τους. Στη συνέχεια αναφέρουμε τις σημαντικότερες παρατηρήσεις, προκλήσεις και σημεία κλειδιά που διαδραμάτισαν σημαντικό ρόλο στην έρευνά μας, και σκιαγραφούμε τους προτεινόμενους τρόπους αντιμετώπισής τους, συνοψίζοντας ταυτόχρονα και τα σημαντικά σημεία συμβολής της παρούσας διατριβής στην σχετική διεθνή έρευνα και βιβλιογραφία:

Παρατήρηση 1: Ένα πολύπλοκο ετερογενές ασύρματο σύστημα είναι πιθανόν να ανήκει σε διαφορετικούς, μη συνεργαζόμενους παρόχους. Είναι εμφανές λοιπόν, πως μόνο ο κινητός κόμβος έχει μια ολοκληρωμένη άποψη της τρέχουσας κατάστασής του, όπως και του περιβάλλοντος του, σχετικά με τα διαθέσιμα σημεία πρόσβασης στη γειτονιά του, τους αντίστοιχους διαθέσιμους πόρους αυτών καθώς και τον τρόπο με τον οποίο αυτοί κατανέμονται. Παράλληλα, μελλοντικές αρχιτεκτονικές δικτύων θέλουν τα ασύρματα δίκτυα να απαρτίζονται από αυτόνομους αυτό-προσαρμοζόμενους κόμβους εμπλουτισμένους με δυνατότητες να αντιλαμβάνονται το περιβάλλον τους, και να αντιδρούν σε γεγονότα σχετιζόμενα με την κινητικότητα ή την παροχή ΠτΥ, βελτιστοποιώντας την απόδοσή τους.

Προτεινόμενη Λύση: Εκμεταλλευόμενοι τα ιδιαίτερα, μοναδικά, αλλά και αλληλοσυμπληρούμενα χαρακτηριστικά των διάφορων ασύρματων τεχνολογιών, προτείναμε την θεώρηση και αντιμετώπιση των συνολικών πόρων του δικτύου με ένα κοινό τρόπο. Αυτό, επιτρέπει στους κόμβους του δικτύου να λαμβάνουν αυτόνομα αποφάσεις χρησιμοποιώντας μόνον τοπικά διαθέσιμη πληροφορία. Αυτή η προσέγγιση μελετήθηκε για την περίπτωση ενός ενοποιημένου ασύρματου περιβάλλοντος, αποδεικνύοντας την εφαρμοσιμότητά της, και υποδεικνύοντας ένα υποψήφιο μονοπάτι εξέλιξης των μελλοντικών δικτύων. Συγκεκριμένα, προτάθηκαν οι μηχανισμοί *Αυτόνομης Διαχείρισης Κινητικότητας*, *Αυτόνομης Ενδοκυβελικής Διαχείρισης Ασύρματων Πόρων* και *Αποδοτικής Αυτόνομης Διακυβελικής Διαχείρισης Πόρων* που επιτρέπουν στους κινητούς κόμβους να αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον τους και να αντιδρούν αυτόνομα σε γεγονότα σχετιζόμενα με την κινητικότητα, και την ικανοποίηση των κριτηρίων ΠτΥ που λαμβάνουν, βελτιστοποιώντας τη συνολική απόδοσή τους.

Παρατήρηση 2: Στο πρόβλημα της εύρεσης μηχανισμών ανάθεσης χρηστών και διαμοιρασμού πόρων σε ενοποιημένα ασύρματα δίκτυα που οδηγούν στη μεγιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος η διεθνής ερευνητική κοινότητα είχε προτείνει διάφορους μηχανισμούς που όμως είτε δεν αντιμετώπιζαν το ενοποιημένο σύστημα ως ένα ενιαίο, είτε πρότειναν πολύπλοκους, μη ρεαλιστικούς μηχανισμούς υπό αμφίβολες (μη ρεαλιστικές) υποθέσεις. Αντιθέτως, η βέλτιστη επίλυση ενός τέτοιου προβλήματος απαιτεί την ταυτόχρονη θεώρηση του συνολικού ασύρματου περιβάλλοντος ως ένα κοινό πρόβλημα βελτιστοποίησης, και συνεπώς την ενιαία αντιμετώπιση των διαφορετικών τύπων δικτύων και των αντιστοιχών πόρων τους υπό ένα κοινό πλαίσιο βελτιστοποίησης.

Προτεινόμενη Λύση: Μοντελοποιήσαμε ένα γενικό θεμελιώδες πρόβλημα βέλτιστης διαχείρισης πόρων για ενοποιημένα ετερογενή συστήματα, το οποίο είναι αρκετά αφαιρετικό ώστε να μπορεί να υιοθετηθεί από πληθώρα περιπτώσεων ανεξαρτήτως τεχνολογίας πρόσβασης, αλλά και ταυτόχρονα πλήρες ώστε να περιλαμβάνει όλους τους πιθανούς περιορισμούς, φυσικούς ή μη, που θα χαρακτηρίζουν το εκάστοτε πρόβλημα. Με αυτόν τον τρόπο ανοίξαμε νέους ορίζοντες, σκιαγραφώντας νέα ανοιχτά προβλήματα που αναμένουν την προσοχή της επιστημονικής κοινότητας.

Παρατήρηση 3: Στο NP-Δύσκολο πρόβλημα της εξεύρεσης ενός καταναμημένου τρόπου βέλτιστης διαχείρισης πόρων, που αξιοποιεί ήδη υπάρχοντες ενδοκυψελικούς μηχανισμούς διαμοιρασμού πόρων προκειμένου να παράσχει μια διακυψελικά βέλτιστη λύση στο πρόβλημα της ανάθεσης χρηστών και πόρων σε ετερογενή ασύρματα δίκτυα, παρουσία πολλαπλών τεχνολογιών πρόσβασης, η διεθνής βιβλιογραφία είναι περιορισμένη.

Προτεινόμενη Λύση: Εκμεταλλευόμενοι τις μαθηματικές ιδιότητες των ενδοκυψελικών μηχανισμών ανάθεσης πόρων που λειτουργούν με βάση την Θεωρία Lagrange και την Θεωρία Μεγιστοποίησης Χρησιμότητας Δικτύου, προτείναμε μία τροποποιημένη εκδοχή του παραπάνω προβλήματος, ικανό να παράσχει έναν κατανεμημένο τρόπο ανάθεσης χρηστών σε δίκτυα. Η προσέγγιση μας μεγιστοποιεί τη συνολική απόδοση του ενοποιημένου συστήματος επιτυγχάνοντας παράλληλα αξιοσημείωτη απόδοση και επίδοση συγκρινόμενη με το αρχικό NP-Δύσκολο πρόβλημα. Ταυτόχρονα με χρήση τεχνικών διαστρωμάτωσης (cross layering) και αποσύνθεσης (decomposition methods) επιτύχαμε μία χωρικά και λειτουργικά αποσυνδεδεμένη λύση, πλησιοβέλτιστης απόδοσης και αποδεδειγμένης σύγκλισης.

Παρατήρηση 4: Η ανάγκη διαρκούς κάλυψης, σε συνδυασμό με την απαίτηση υψηλών ρυθμών μετάδοσης και διασφάλισης κριτηρίων ΠτΥ σε εσωτερικούς χώρους έχουν ευνοήσει τα τελευταία χρόνια την υιοθέτηση σταθμών βάσης χαμηλής ισχύος και χαμηλού κόστους, των λεγόμενων φεμτοκυψελών. Ωστόσο καθώς οι φεμτοκυψέλες μοιράζονται το ίδιο φάσμα με τις παραδοσιακές κυψέλες και η τοποθέτησή τους γίνεται άναρχα από τους τελικούς χρήστες, τα προβλήματα που σχετίζονται με τις διακυψελικές και ενδοκυψελικές παρεμβολές μεταξύ της ίδιας ή γειτνιαζόντων φεμτοκυψελών, είναι έντονα. Το παραπάνω έχει άμεση επίδραση στην απόδοση και ικανοποίηση των χρηστών, κρίνοντας αναγκαία όχι μόνο την βέλτιστη διαχείριση πόρων, αλλά και την αποδοτική και κατανεμημένη δυναμική διαχείριση της περιοχής κάλυψης των κυψελών.

Προτεινόμενη λύση: Μελετήσαμε τη ταυτόχρονη βέλτιστη διαχείριση ισχύος και περιοχής κάλυψης παρουσία παρεμβολών μεταξύ ίδιων και διαφορετικών επιπέδων

σε ένα ασύρματο σύστημα CDMA δύο επιπέδων (macrocell/femtocell). Συνδυάζοντας τις ιδιότητες και ιδιαιτερότητες και των δύο μηχανισμών προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι παρεμβολές στο διεπίπεδο σύστημα, προτείναμε έναν καταναμημένο μηχανισμό εξεύρεσης αφενός του βέλτιστου σημείου λειτουργίας που μεγιστοποιεί την συνολική ρυθμαπόδοση του δικτύου, σε σχέση με την ανατιθέμενη ισχύς εκπομπής στους χρήστες, και αφετέρου της εκπεμπόμενης ισχύος των κυψελών (δηλαδή την περιοχή κάλυψης). Ο μεγάλος αριθμός των παραμέτρων που εισάγονται και η μη-κυρτή φύση του προβλήματος βελτιστοποίησης αντιμετωπίστηκαν επιτυχώς εκμεταλλευόμενοι πάλι τεχνικές διαστρωμάτωσης (cross layering) και αποσύνθεσης (decomposition methods), καταλήγοντας σε μία βέλτιστη, καταναμημένη υλοποίηση με αποδειγμένες ιδιότητες σύγκλισης.

7.1. Ανοιχτά ερευνητικά θέματα

Ολοκληρώνοντας τη μελέτη μας, η παρούσα υποενοότητα αναδεικνύει, περιγράφει και προτείνει εναπομείναντα ανοιχτά θέματα και πιθανές ενδιαφέρουσες επεκτάσεις της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

Κυρίαρχο ανοιχτό πρόβλημα παραμένει η βέλτιστη ή πλησιοβέλτιστη καταναμημένη επίλυση του Θεμελιώδους Προβλήματος **FP**. Συνεπώς βασικός στόχος πρέπει να θεωρείται η απάλειψη των υποθέσεων που εφαρμόστηκαν στις προηγούμενες παράγραφους και διευκόλυναν την επίλυση του προβλήματος, ώστε να καταλήξουμε σε μία γενικευμένη λύση, που όχι μόνο θα έλυσε το Θεμελιώδες πρόβλημα, αλλά και θα έθετε τα θεμέλια και θα επιδείκνυε τρόπους και μηχανισμούς αντιμετώπισης μιας τεράστιας οικογένειας προβλημάτων βελτιστοποίησης. Προς αυτό το στόχο στη συνέχεια προτείνουμε μοντελοποιήσεις και μεθοδολογίες που θα

είναι ικανές να επιλύουν διάφορες απλουστευμένες εκδοχές του προβλήματος **FP**, ελπίζοντας πως η εμπειρία καθώς και η συνδυασμένη γνώση που θα αποκτηθεί, θα οδηγήσει εν τέλει σε μία έγκυρη λύση του θεμελιώδους προβλήματος.

7.1.1. Εύρεση Βέλτιστων Χωρητικοτήτων και Ανάθεσης Χρηστών

Το πρόβλημα της ταυτόχρονης βέλτιστης διαχείρισης ισχύος και περιοχής κάλυψης σε ένα ασύρματο σύστημα CDMA δύο επιπέδων αναλύθηκε και επιλύθηκε στο Κεφάλαιο 6. Ωστόσο, υποθέταμε Κλειστή Πρόσβαση, που σημαίνει πως μόνον αδειοδοτημένοι χρήστες μπορούν να επικοινωνήσουν και να συνδεθούν στη φεμτοκυψέλη τους. Μία ενδιαφέρουσα ερευνητική κατεύθυνση θα μπορούσε να προσεγγίσει το θέμα θεωρώντας άγνωστη την κατανομή των χρηστών στις κυψέλες, δηλαδή εφαρμόζοντας πολιτικές Υβριδικής ή Ανοιχτής Πρόσβασης. Αυτό θα εισήγαγε στο αρχικό πρόβλημα έναν επιπλέον δυαδικό περιορισμό ανάθεσης δικτύου, ενισχύοντας την πολυπλοκότητα και την μη-κυρτότητα του.

7.1.2. Ικανοποίηση Ελάχιστων Απαιτήσεων

Μια επιπλέον απλούστευση του θεμελιώδους προβλήματος και ένα επιπλέον βήμα στην ολική επίλυσή του είναι το παρακάτω πρόβλημα, όπου αναζητούμε τις βέλτιστες τιμές των χωρητικοτήτων των κυψελών που θα εγγυούνται την μέγιστη απόδοση του συστήματος, με εκ των προτέρων γνωστή την κατανομή των χρηστών στις κυψέλες, δεδομένου όμως ότι όλοι οι συνδεδεμένοι χρήστες εν τέλει θα λάβουν ένα ελάχιστο ποσό πόρων, είτε αυτό μπορεί να εκφραστεί με τη μορφή ελάχιστης ανατιθέμενης ισχύς εκπομπής, είτε με τη μορφή ελάχιστης απόδοσης των συναρτήσεων χρησιμότητας κτλ.

7.1.3. Αντιμετωπίζοντας το θεμελιώδες πρόβλημα

Η αξιολόγηση και η ανακάλυψη των δυνατών και αδύναμων σημείων της κάθε μεθοδολογίας για το κάθε υποπρόβλημα που προτάθηκε παραπάνω, πιθανολογείται πως θα μας δώσει όλα τα απαραίτητα εφόδια και γνώση προκειμένου να επιχειρήσουμε την κατανεμημένη επίλυση του θεμελιώδους προβλήματος διαχείρισης ασύρματων πόρων σε ετερογενή ασύρματα συστήματα πολλαπλής πρόσβασης. Η μελέτη των αριθμητικών αποτελεσμάτων που θα προκύψουν από τις προσομοιώσεις των διάφορων προτεινόμενων μοντέλων αναμένεται να επιβεβαιώσει τις προσδοκίες μας καθώς και την εφαρμοσιμότητα και επιλυσιμότητα του θεμελιώδους προβλήματος.

7.1.4. Παροχή Ποιότητας της Εμπειρίας σε Ετερογενή Ασύρματα Δίκτυα

Η σχέση μεταξύ του Διαδικτύου και της κοινωνίας είναι όχι μόνο πολύπλοκη, αλλά και αμφίδρομη, οδηγώντας στην από κοινού εξέλιξη και των δύο. Το Διαδίκτυο υπάρχει για να ικανοποιεί την ανάγκη δικτύωσης των ανθρώπων, ενώ η εξέλιξη του καθοδηγείται από τα ολοένα αυξανόμενα επίπεδα ζήτησή της. Ωστόσο, οι πραγματικές ανάγκες, απαιτήσεις και επιθυμίες ενός ανθρώπου ως προς την λαμβανόμενη υπηρεσία του, δεν μπορούν να περιγραφούν ή καθοριστούν με ένα στατικό τρόπο (π.χ. με τιμές και όρια), αλλά εξαρτώνται όχι μόνον από κοινές μετρήσιμες δικτυακές μετρικές, αλλά και από πληθώρα υποκειμενικών μετρικών, όπως η ψυχολογική διάθεση, ο περιβάλλον θόρυβος, το κοινωνικοπολιτικό επίπεδο, η μόρφωση, οι προσωπικές εμπειρίες, και η σημασία του περιεχομένου στο χρήστη. Τα παραπάνω αποκλίνουν από την παραδοσιακή σκοπιά ικανοποίησης κριτηρίων ΠτΥ δημιουργώντας την ανάγκη μιας δυναμικής συσχέτισης μεταξύ της εμπειρίας του χρήστη και της ΠτΥ.

Συνεπώς, υιοθετήθηκε η έννοια της Ποιότητας της Εμπειρίας - ΠτΕ (Quality of Experience - QoE) προκειμένου να καλύψει το κενό μεταξύ των πραγματικών

απαιτήσεων των χρηστών και της παρεχόμενης ΠτΥ, αναδεικνύοντας την υποκειμενικότητα και μοναδικότητα των χρηστών. Η ΠτΕ μπορεί να οριστεί με έναν εύλωτο τρόπο ως «ο βαθμός της απόλαυσης ή ενόχλησης του χρήστη μιας εφαρμογής ή υπηρεσίας. Πηγάζει από την ικανοποίηση των προσδοκιών του αναφορικά με την χρησιμότητα και/ή την απόλαυση της υπηρεσίας υπό το φως της προσωπικότητας και της κατάστασης του. Στο πεδίο των τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών, η ΠτΕ επηρεάζεται από την υπηρεσία, το περιεχόμενο, το δίκτυο, τη συσκευή, την εφαρμογή και το πλαίσιο χρήσης της [102].»

Συνεπώς, αντί να αντιμετωπίζουμε την ΠτΕ σαν ένα στατικό συσχετισμό μεταξύ της υποκειμενικής αντίληψης των χρηστών για την υπηρεσία τους και διαφόρων παραμέτρων του δικτύου, στόχος είναι να θεωρήσουμε την παροχή ΠτΕ σαν μία δυναμική διαδικασία που επιτρέπει στους χρήστες να εκφράσουν τις προτιμήσεις τους σχετικά με τη στιγμιαία επίδοση της υπηρεσίας τους: α) στον εξυπηρετητή πολυμεσικού περιεχομένου και β) στο μηχανισμό παροχής ασύρματων πόρων του υποκείμενου δικτύου. Άρα χρησιμοποιώντας και πάλι τεχνικές ΜΧΔ στόχος είναι να συσχετιστεί η ΠτΕ και οι αλληλεπιδράσεις του χρήστη με την εφαρμογή και με τις διαδικασίες παροχής ΠτΥ μέσω της δυναμικής τροποποίησης των συναρτήσεων χρησιμότητας των χρηστών.

Σύμφωνα με τα παραπάνω πρέπει να προταθούν τρόποι και λύσεις αντιμετώπισης των ακόλουθων ζητημάτων:

- **Αποδοτική συσχέτιση ΠτΥ και ΠτΕ.** Η εξεύρεση ενός ποιοτικού και ποσοτικού καθορισμού, εκείνων των δικτυακών παραμέτρων που επηρεάζουν την ΠτΕ πρέπει να πραγματοποιηθεί.
- **Δημιουργία μηχανισμών παροχής ΠτΕ σε ασύρματα ετερογενή δίκτυα.** Αναλυτικοί μέθοδοι και αλγόριθμοι πρέπει να μελετηθούν και να

παρουσιαστούν που να επιτρέπουν την άμεση ενσωμάτωση ενός δυναμικού μηχανισμού παροχής ΠτΕ στα υπάρχοντα δικτυακά πλαίσια και πρωτόκολλα (π.χ. 3GPP/LTE integrated networks). Δηλαδή είναι αναγκαία η εξεύρεση μηχανισμών οι οποίοι: α) θα επιτρέπουν και θα διαχειρίζονται τη δυναμική, ασύγχρονη μεταβολή της ΠτΕ των χρηστών, και β) την ικανοποίηση των κριτηρίων ΠτΕ των χρηστών υπό ένα κοινό πλαίσιο βελτιστοποίησης της συνολικής απόδοσης του δικτύου.

- **Μελέτη των οικονομοτεχνικών επιπτώσεων της ΠτΕ στο δίκτυο.** Η εφαρμογή ενός πλαισίου ΠτΕ σε ένα εμπορικό δίκτυο θα επιφέρει αλλαγές στον τρόπο που οι πάροχοι διαχειρίζονται και χρεώνουν τις υπηρεσίες τους. Συνεπώς απαιτείται συστηματική μελέτη των επιπτώσεων στα υπάρχοντα τιμολογιακά μοντέλα, καθώς και δημιουργία νέων που θα εκμεταλλεύονται τις ιδιαιτερότητες της ΠτΕ στοχεύοντας στην μεγιστοποίηση των κερδών των παρόχων.

8. Παράρτημα I - Σημειογραφία

Σύμβολο	Σημειογραφία
C	Σύνολο όλων των διαθέσιμων κελιών στο ετερογενές δίκτυο
c	Η κυψέλη $c \in C$ που μπορεί να ανήκει σε οποιοδήποτε δίκτυο πρόσβασης
C_c^{\max}	Μέγιστη πραγματική ρυθμαπόδοση του δικτύου $c \in C_{WLAN}$
C_{CDMA}	Σύνολο των CDMA κελιών
C_{WLAN}	Σύνολο των WLAN κελιών
$G_{c,j}$	Κέρδος μονοπατιού μεταξύ του κελιού c και του χρήστη j
$I_{c,i}$	Ποιότητα περιβάλλοντος εκπομπής συμπεριλαμβανομένου του θορύβου του περιβάλλοντος
J	Σύνολο όλων των χρηστών
N_c	Συνολικός αριθμός κελιών
N_{CDMA}	Συνολικός αριθμός των CDMA κελιών
N_{WLAN}	Συνολικός αριθμός των WLAN κελιών
$N_c = N_{c,CDMA} + N_{c,WLAN}$	
$p_{c,j}$	Η ισχύς που ανατίθεται στο χρήστη j από το κελί c
P_c^{\max}	Μέγιστη ισχύς εκπομπής του σταθμού βάσης $c \in C_{CDMA}$
\bar{p}_c	Διάνυσμα ανάθεσης ισχύος στην κυψέλη c
$r_{c,j}$	Αναμενόμενος ρυθμός μετάδοσης του χρήστη i στο κελί c
R_c^{\max}	Μέγιστη πραγματική ρυθμαπόδοση της κυψέλης $c \in C_{CDMA}$
$R_{F,i}$	Σταθερός ρυθμός μετάδοσης της κάτω ζεύξης του χρήστη i σε CDMA

	δίκτυα
T_s	Διάρκεια μιας χρονοσχισμής σε CDMA κυψέλες
T_f	Διάρκεια ενός χρονοπλαισίου WLAN
T_{AJONS}	Χρονοπλάισια αλγόριθμου AJONS
U_j	Η συνάρτηση χρησιμότητας του χρήστη j
$w_{c,j}$	Οι πόροι που αναθέτονται από το κελί c στον χρήστη j
W	Εύρος ζώνης εξάπλωσης (spreading bandwidth)
W_c^{\max}	Μέγιστη συνολική χωρητικότητα της κυψέλης c
W_c^{\min}	Ελάχιστη συνολική χωρητικότητα της κυψέλης c
$x_{c,j}$	Μεταβλητή επιλογής (είναι 1 όταν ο χρήστης j είναι συνδεδεμένος με το κελί c και 0 διαφορετικά)
$\gamma_{c,j}$	Λαμβανόμενο SINR του χρήστη j από το κελί c
$\Gamma_{j,\min}$	Ελάχιστο SINR που να εγγυάται την αρραγή συνδεσιμότητα του χρήστη j στο δίκτυο
θ	Παράγοντας ορθογωνιότητας
$\lambda_{c,i}^{\max}$	Πολλαπλασιαστής Lagrange που απεικονίζει την μέγιστη τιμή ανά μονάδα πόρων που ο χρήστης i είναι διατεθειμένος να «πληρώσει» στη κυψέλη c
$\lambda_{avg,c}^*$	Μακροπρόθεσμη τιμή ανά μονάδας πόρων στη κυψέλη c
$\hat{\lambda}_{c,i}$	Κανονικοποιημένο κέρδος ανά μονάδα πόρων που θα αποκτούσε ο χρήστης i εάν επέλεγε τη κυψέλη c για να συνδεθεί

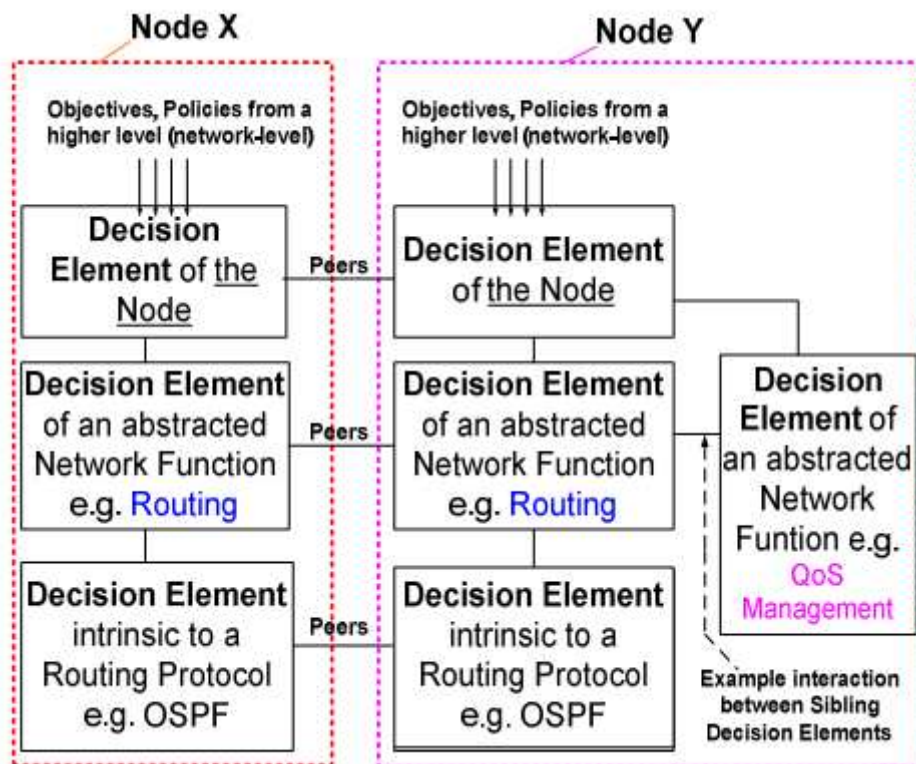
9. Παράρτημα II - Υλοποίηση του AJONS πάνω από μία Γενική Αυτόνομη Αρχιτεκτονική Δικτύων

Σε αυτή τη παράγραφο περιγράφουμε τον τρόπο με τον οποίο η προτεινόμενη αρχιτεκτονική αυτόνομης διαχείρισης κινητικότητας, ανάθεσης χρηστών και διαμοιρασμού ασύρματων πόρων σε ετερογενή ασύρματα δίκτυα μπορεί να ενσωματωθεί και να λειτουργήσει σύμφωνα με την Γενική Αυτόνομη Αρχιτεκτονική Δικτύων (Generic Autonomic Network Architecture – GANA) που αναπτύχθηκε και υλοποιήθηκε στα πλαίσια του έργου EC FP7 EFIPSANS [52], η οποία και παρέχει ένα συμπαγές και μεθοδικό αρχιτεκτονικό πλαίσιο για το σχεδιασμό αυτόνομων δικτυακών αρχιτεκτονικών. Παρακάτω, για λόγους πληρότητας, παρουσιάζουμε πρώτα συνοπτικά τη δομή και τα βασικά σχεδιαστικά χαρακτηριστικά της αρχιτεκτονικής GANA, και στην συνέχεια περιγράφουμε με λεπτομέρεια τον τρόπο ενσωμάτωσης και ενοποίησης σε αυτήν της προτεινόμενης αυτόνομης αρχιτεκτονικής διαχείρισης κινητικότητας και ασύρματων πόρων.

9.1.1. Η αρχιτεκτονική GANA

Η GANA είναι ένα εξελίξιμο αρχιτεκτονικό μοντέλο αναφοράς που στοχεύει στην εισαγωγή αυτονομίας στα διάφορα δικτυακά στοιχεία (κόμβους/συσκευές) αλλά και στις υπάρχουσες ή νέες δικτυακές αρχιτεκτονικές. Ο ακρογωνιαίος λίθος της αρχιτεκτονικής GANA είναι το Στοιχείο Λήψης Αποφάσεων (Decision-making-Element - DE). Ένα DE υλοποιεί τη λογική που καθοδηγεί και ελέγχει τη συμπεριφορά ενός βρόχου ελέγχου καθώς και τις πολιτικές που επιβάλλει πάνω από τις

"διαχειριστικές διεπαφές" στα δικτυακά στοιχεία που ελέγχει (δηλαδή έτερα DE, πόρους, κτλ). Συνεπώς, στην αρχιτεκτονική GANA αυτό-* λειτουργίες όπως η αυτό-διαμόρφωση και αυτό-βελτιστοποίηση υλοποιούνται από τα DE. Επιπλέον, τα DE σχεδιάζονται ακολουθώντας τις αρχές των σχέσεων "ιεραρχίας", "ομοτιμίας" και "συγγένειας" μεταξύ DE του ίδιου ή διαφορετικών κόμβων όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 21 (δηλαδή η GANA εισάγει φορμαλισμό στον τρόπο με τον οποίο πραγματοποιείται η επικοινωνία και η συνεργασία των DE). Με αυτό τον τρόπο, οι σχεδιαστικές ιδιότητες της GANA οδηγούν σε μία ιεραρχική δομή DE (δηλαδή βρόχων ελέγχου) που διευκολύνει τον αποδοτικό σχεδιασμό περίπλοκων αυτόνομων δικτύων μεγάλης κλίμακας λόγω α) του λογικού διαχωρισμού των περίπλοκων διαδικασιών λήψεων αποφάσεων, β) την ικανότητα να επιλύονται «διαμάχες» μεταξύ DE και γ) των εσωτερικών ιδιοτήτων ευστάθειας και κλιμακοθετησιμότητας.



Σχήμα 21: Ιεραρχικές, Ομότιμες και Συγγενικές σχέσεις και διεπαφές των DE στο μοντέλο GANA

Για κάθε είδος λειτουργικότητας εισάγονται τέσσερις τύποι DE, σε διάφορα επίπεδα.:

- *DE Επιπέδου Πρωτοκόλλου (Protocol Level DE)*: Το χαμηλότερο επίπεδο στην ιεραρχία της GANA, όπου η αυτονομία σχεδιάζεται εσωτερικά και σχετίζεται ουσιαστικά με τη λειτουργία του ίδιου του πρωτοκόλλου (είτε πρόκειται για μονολιθικό, είτε για αρθρωτό τύπο πρωτοκόλλου).
- *DE Επιπέδου Λειτουργίας (Function Level DE)*: Είναι υπεύθυνα για τον έλεγχο και συντονισμό των συνολικών λειτουργιών που απαιτούν την συνεργασία πολλαπλών DE του χαμηλότερου επιπέδου πρωτοκόλλου. Τα DE επιπέδου λειτουργίας παίζουν ένα σημαντικό ρόλο στην συνολική αρχιτεκτονική, λόγω του ότι η επικοινωνία και συνεργασία τους (εσωτερικά είτε μεταξύ κόμβων) εξασφαλίζει την αρραγή και βέλτιστη λειτουργία όλων των συστημάτων και λειτουργιών του συστήματος.
- *DE Επιπέδου Δικτύου (Network Level DE)*: Είναι υπεύθυνα για τη συγκέντρωση πολιτικών δικτύου (π.χ. που επιβάλλουν οι πάροχοι) και για την κατάλληλη μετάφραση και επικοινωνία τους στα αντίστοιχα στοιχεία χαμηλότερα στην ιεραρχία. Με μια τέτοια προσέγγιση ο πάροχος είναι ικανός να ελέγξει και να καθοδηγήσει τη συμπεριφορά του αυτόνομου δικτύου.
- *Κύριο DE Κόμβου (Main Node DE)*: Λαμβάνοντας τις πολιτικές που εισάγονται από το δίκτυο, το προφίλ του αυτόνομου χρήστη, καθώς και επιπλέον μετρικών (π.χ. κατάσταση μπαταρίας κτλ) οργανώνει και συντονίζει την συνολικής αυτόνομη συμπεριφορά του κόμβου.

9.1.2. Ενσωμάτωση στην αρχιτεκτονική GANA

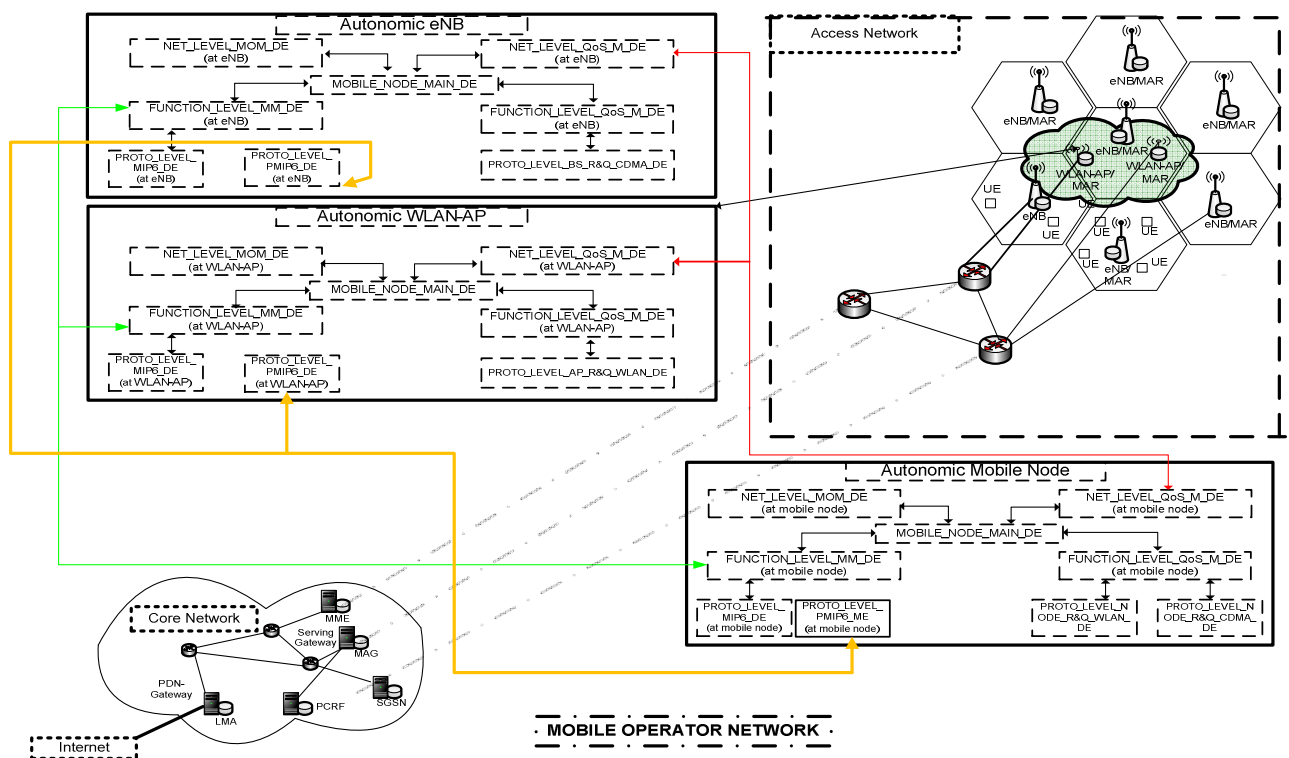
Σύμφωνα με τα παραπάνω, για την ενσωμάτωση της προτεινόμενης αυτόνομης αρχιτεκτονικής διαχείρισης κινητικότητας και διαμοιρασμού πόρων εισάγουμε ένα

DE για καθένα από τα λειτουργικά στοιχεία (κινητούς κόμβου, σταθμούς βάσης) της αρχιτεκτονικής. Το Σχήμα 22 απεικονίζει την προτεινόμενη ενοποιημένη αρχιτεκτονική από την οπτική ενός κινητού κόμβου σύμφωνα με το μοντέλο GANA. Συγκεκριμένα περιγράφονται τα εισαχθέντα DE σε διάφορα επίπεδα της ιεραρχίας καθώς και οι τρόπος αλληλεπίδρασης τους.

Αρχικά, παρατηρούμε τις δύο κύριες αυτόνομες υπό-αρχιτεκτονικές που απαρτίζουν τη συνολική αρχιτεκτονική, την αυτόνομη διαχείριση κινητικότητας και την αυτόνομη διαχείριση ασύρματων πόρων. Τα κύρια στοιχεία αυτών των υπο-αρχιτεκτονικών είναι τα αντίστοιχα DE επιπέδου λειτουργίας (δηλαδή τα FUNC_LEVEL_MM_DE και FUNC_LEVEL_QoS_M_DE αντίστοιχα) που είναι υπεύθυνα για την καθοδήγηση των λειτουργιών που σχετίζονται είτε την κινητικότητα είτε με την παροχή ΠτΥ σε κάθε αυτόνομο κόμβο (κινητό ή σταθμό βάσης). Η επικοινωνία και συνεργασία τους επιτρέπει την αξιοποίηση των πληροφοριών που πηγάζουν από τα αντίστοιχα πρωτόκολλα κινητικότητας (π.χ. γεγονότα και μετρήσεις) με στόχο την επαύξηση της απόδοσης των πρωτοκόλλων που σχετίζονται με τον διαμοιρασμό ασύρματων πόρων και αντιστρόφως. Συνεπώς και προκειμένου να επιτύχουν τους στόχους τους, κατευθύνουν τα αντίστοιχα στοιχεία που ελέγχουν (δηλαδή DE επιπέδου πρωτόκολλου) και εναρμονίζουν τη λειτουργία τους, δηλαδή τα PROTO_LEVEL_MIP6_DE και PROTO_LEVEL_PMIP6_ME στην περίπτωση του FUNC_LEVEL_MM_DE και τα PROTO_LEVEL_NODE_R&Q_WLAN_DE, PROTO_LEVEL_AP_R&Q_WLAN_DE, PROTO_LEVEL_NODE_R&Q_CDMA_DE και PROTO_LEVEL_BS_R&Q_CDMA_DE, στην περίπτωση του FUNC_LEVEL_QoS_M_DE. Κάθε DE επιπέδου πρωτοκόλλου εισάγει αυτόνομες ιδιότητες σε συγκεκριμένα κομμάτια της συνολικής αρχιτεκτονικής, όπως τον αυτόνομο διαμοιρασμό πόρων σε CDMA δίκτυα,

ή στο πρωτόκολλο Proxy MIPv6. Τέλος, τα δύο DE του επιπέδου λειτουργίας, εναρμονίζουν την λειτουργία τους σύμφωνα με τις πολιτικές που δέχονται (π.χ. από τους παρόχους) διαμέσου των αντίστοιχων DE επιπέδου δικτύου (δηλαδή NET_LEVEL_MOM_DE και NET_LEVEL_QoS_M_DE). Το Σχήμα 22 συνοψίζει επίσης όλα τα DE που συμμετέχουν στην προτεινόμενη αρχιτεκτονική καθώς και τον τρόπο που αυτά επικοινωνούν.

Στον Πίνακα XII, παρατίθενται η αναλυτική ονομασία του κάθε DE, καθώς και το αντίστοιχο στοιχείο της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής που παρουσιάστηκε στις προηγούμενες παραγράφους του οποίου τις λειτουργίες το κάθε DE ενσωματώνει.



Σχήμα 22: Σύνοψη της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής σύμφωνα με το μοντέλο GANA

ΠΙΝΑΚΑΣ XII: Εισαχθέντα DE σύμφωνα με την αρχιτεκτονική GANA

Ακρωνύμιο DE	Όνομα DE	Στοιχείο που
--------------	----------	--------------

		αντιστοιχεί
Λειτουργίες Διαχείρισης Κινητικότητας		
NET_LEVEL_MOM_DE	Network-Level-Mobility-Management Decision-Element	
FUNC_LEVEL_MM_DE_MN	Function-Level-Mobility-Management Decision-Element (at the mobile node)	Βρόχος Ελέγχου Διαχείρισης Κινητικότητας στον Κινητό Κόμβο
FUNC_LEVEL_MM_DE_eNB	Function-Level-Mobility-Management Decision-Element (at eNB)	Βρόχος Ελέγχου Διαχείρισης Κινητικότητας στον κυψελωτό Σταθμό Βάσης
FUNC_LEVEL_MM_DE_AP	Function-Level-Mobility-Management Decision-Element (at WLAN-AP)	Βρόχος Ελέγχου Διαχείρισης Κινητικότητας στο WLAN AP
PROTO_LEVEL_MIP6_DE	Protocol-Level-Mobile-IPv6 Decision-Element	Πρωτόκολλο MIPv6
PROTO_LEVEL_PMIP6_DE_eNB/WLAN-AP	Protocol-Level-Network-Based- Mobility-Management Decision-Element	Πρωτόκολλο PMIPv6 στον Σταθμό Βάσης
PROTO_LEVEL_PMIP6_ME	Protocol-Level-Network-Based- Mobility-Management Managed-Entity (at mobile node)	Πρωτόκολλο MIPv6 στον κινητό κόμβο
QoS and Resource Allocation Related Functionalities		
NET_LEVEL_QoS_M_	Network-Level-Quality-Of-Service-	

DE	Management - (Wireless-Network) Decision-Element	
FUNC_LEVEL_QoS_M_DE_MN	Function-Level Quality-Of-Service Management (Wireless) (at the mobile node)	Βρόχος Ελέγχου AJONS στον Κινητό Κόμβο
FUNC_LEVEL_QoS_M_DE_eNB/AP	Function-Level Quality-Of-Service Management (Wireless) (at eNB/WLAN-AP)	Υποστηρικτικός Βρόχος Ελέγχου AJONS στο Σταθμό Βάσης
PROTO_LEVEL_NODE_R&Q_WLAN_DE	Protocol-Level Node's-Resource-Allocation-And-Quality-Of-Service-Management-In-WLAN-Networks Decision-Element	Αυτόνομος Βρόχος Ελέγχου Κινητού Κόμβου για ARRM σε WLAN δίκτυα
PROTO_LEVEL_AP_R&Q_WLAN_DE,	Protocol-Level Access-Point-Resource-Allocation-And-Quality-Of-Service-Management-In-WLAN-Networks Decision-Element	Αυτόνομος Βρόχος Ελέγχου Σταθμού Βάσης WLAN για ARRM
PROTO_LEVEL_NODE_R&Q_CDMA_DE	Protocol-Level Node's-Resource-Allocation-And-Quality-Of-service-Management-In-CDMA-Cellular-Networks Decision-Element	Αυτόνομος Βρόχος Ελέγχου Κινητού Κόμβου για ARRM σε κυψελωτά CDMA δίκτυα
PROTO_LEVEL_BS_R&Q_CDMA_DE	Protocol-Level-Base-Station-(eNodeB)-Resource-Allocation-And-Quality-Of-Service-Management-In-CDMA-Cellular-Networks Decision-Element	Αυτόνομος Βρόχος Ελέγχου Σταθμού Βάσης CDMA για ARRM

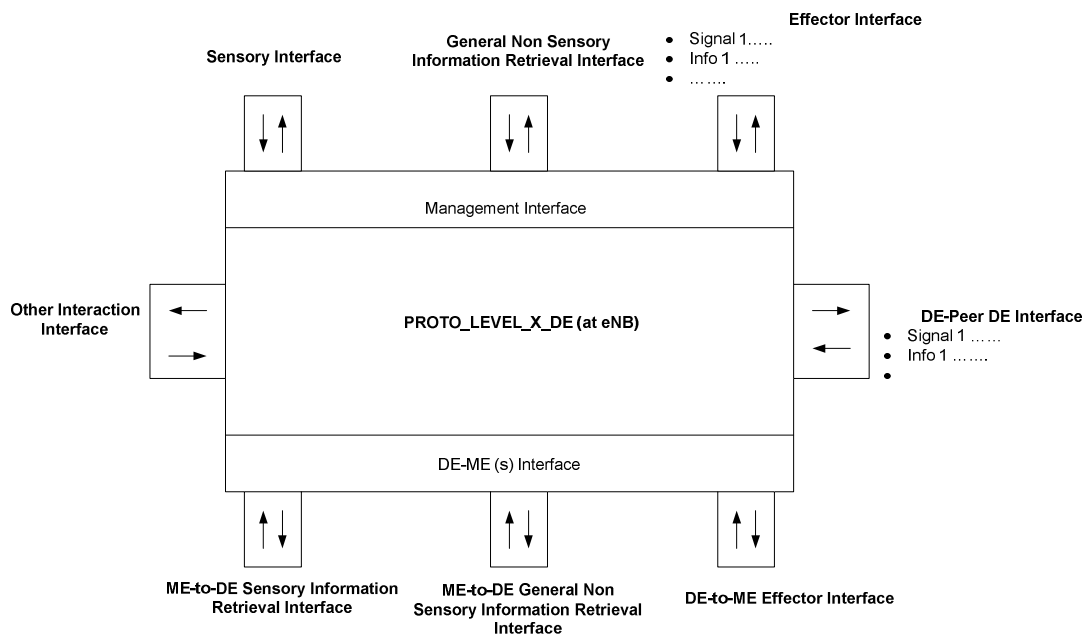
9.1.3. Εσωτερική Δομή των DE

Παρακάτω παραθέτουμε την εσωτερική δομή των DE σε σχέση με τις διεπαφές και τους διαθέσιμους τρόπους αλληλεπίδρασης με άλλα στοιχεία του συστήματος (DE), σύμφωνα με την αρχιτεκτονική GANA.

Οι διεπαφές ενός DE διακρίνονται στο Σχήμα 23 με τη μορφή κουτιών, ενώ με βέλη διπλής κατεύθυνσης απεικονίζεται η μεταφορά πληροφορίας και σηματοδότησης.

Τα κύρια χαρακτηριστικά των διεπαφών είναι τα ακόλουθα:

- **Sensory Interface:** παρέχει είσοδο σε DE υψηλότερου επιπέδου.
- **Effector Interface:** δέχεται είσοδο από DE ανωτέρων επιπέδων.
- **General Non Sensory Information Retrieval Interface:** μεταφέρει γενικές πληροφορίες μεταξύ αυτού του DE και των DE ανωτέρων επιπέδων.
- **DE-Peer-DE Interface:** μεταδίδει και δέχεται είσοδο σε/από τοπικά ή ομότιμα ή συγγενικά DE,

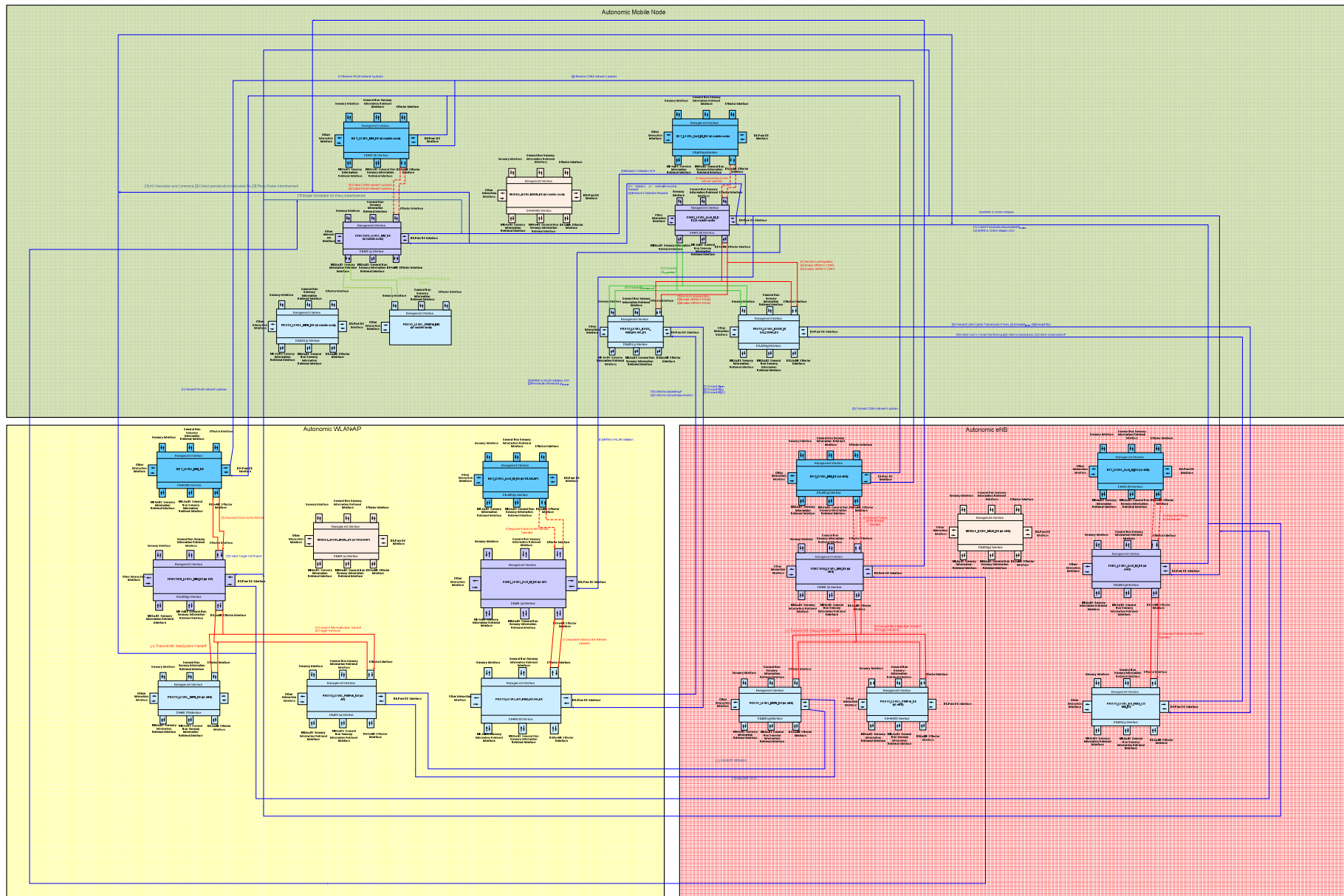


Σχήμα 23: Διεπαφές ενός γενικού DE σύμφωνα με το αρχιτεκτονικό μοντέλο GANA

- **DE-to-ME Effector Interface:** δέχεται είσοδο από τα DE που ελέγχει και βρίσκονται σε κατώτερα επίπεδα.

- **ME-to-DE Sensory Information Retrieval Interface:** παρέχει είσοδο στα DE που ελέγχει και βρίσκονται σε κατώτερα επίπεδα.
- **ME-to-DE General Non Sensory Information Retrieval Interface:** μεταφέρει γενικές πληροφορίες μεταξύ αυτού του DE και των DE κατωτέρων επιπέδων.
- **Other Interaction Interface:** Υπο-διεπαφή διαμέσου της οποίας πληροφορία ζητείται ή δίδεται από/σε συνεργαζόμενα DE.

Στο Σχήμα 24 παρουσιάζεται η εσωτερική δομή, οι διεπαφές και οι αλληλεπιδράσεις με άλλα στοιχεία του συστήματος, ενός κινητού κόμβου, καθώς και ενός σταθμού βάσης CDMA και ενός WLAN δικτύου. Τα αντίστοιχα διαγράμματα για σταθμούς βάσης άλλων τύπων δικτύων είναι απολύτως ανάλογα και παραλείπονται από αυτή τη διατριβή. Τα DE του επιπέδου πρωτοκόλλου είναι χρωματισμένα με γαλάζιο, τα DE του επιπέδου λειτουργίας με μωβ, και τα DE επιπέδου δικτύου με σκούρο μπλε. Επιπλέον ο τρόπος που ανταλλάσσεται η πληροφορία μεταξύ των διαφόρων διεπαφών στον ίδιο ή διαφορετικούς κόμβους απεικονίζεται με τα μπλε βέλη. Η πληροφορία που λαμβάνεται από τα ανωτέρου επιπέδου DE διαμέσου των Effector Interfaces παρουσιάζεται με κόκκινα βέλη, ενώ η πληροφορία που μεταδίδεται με πράσινα βέλη.



Σχήμα 24: Εσωτερική δομή κινητού κόμβου σύμφωνα με το αρχιτεκτονικό μοντέλο GANA

9.1.4. Ακολουθιακά διαγράμματα αυτόνομων λειτουργιών

Η απρόσκοπτη και επιτυχής λειτουργία των υποκείμενων λειτουργιών εξαρτάται από τη φορμαλιστική, ρητή και ξεκάθαρη λειτουργία των DE, η οποία περιγράφεται στα παρακάτω ακολουθιακά διαγράμματα. Η δομή του κάθε διαγράμματος απαρτίζεται από:

1. Τα DE που συμμετέχουν στην προτεινόμενη αυτόνομη λειτουργία
2. Την ακολουθία των ανταλλασσόμενων πληροφοριών μεταξύ τους (η ροή της πληροφορίας απεικονίζεται με κατευθυνόμενα βέλη μεταξύ των εμπλεκόμενων DE)
3. Τις αποφάσεις και τις ενέργειες που λαμβάνει το κάθε αυτόνομο στοιχείο (με τη μορφή κουτιών)

Για λόγους επίδειξης, αντί της περιγραφής περίπλοκων διαγραμμάτων, τα χωρίζουμε με βάση την εκτελούμενη λειτουργία. Οι βασικές αυτόνομες λειτουργίες που παρουσιάζονται είναι οι παρακάτω:

- Διαχείριση κινητικότητας (Σχήμα 25).
- Proxy Mobile IPv6 Fast Handover (Σχήμα 26).
- Αυτόνομος ενδοκυβελικός διαμοιρασμός πόρων στην κάτω ζεύξη ενός CDMA δικτύου (Σχήμα 27).
- Κάθετη μεταπομπή πυροδοτούμενη λόγω γεγονότων σχετιζόμενων με την ΠτΥ (Σχήμα 28).

Αντίστοιχα ακολουθιακά διαγράμματα μπορούν να παραχθούν και για τις παρακάτω λειτουργίες, οι οποίες όμως παραλείπονται από αυτή τη διατριβή.

- Αυτόνομος ενδοκυβελικός διαμοιρασμός πόρων στην κάτω ζεύξη ενός WLAN δικτύου.

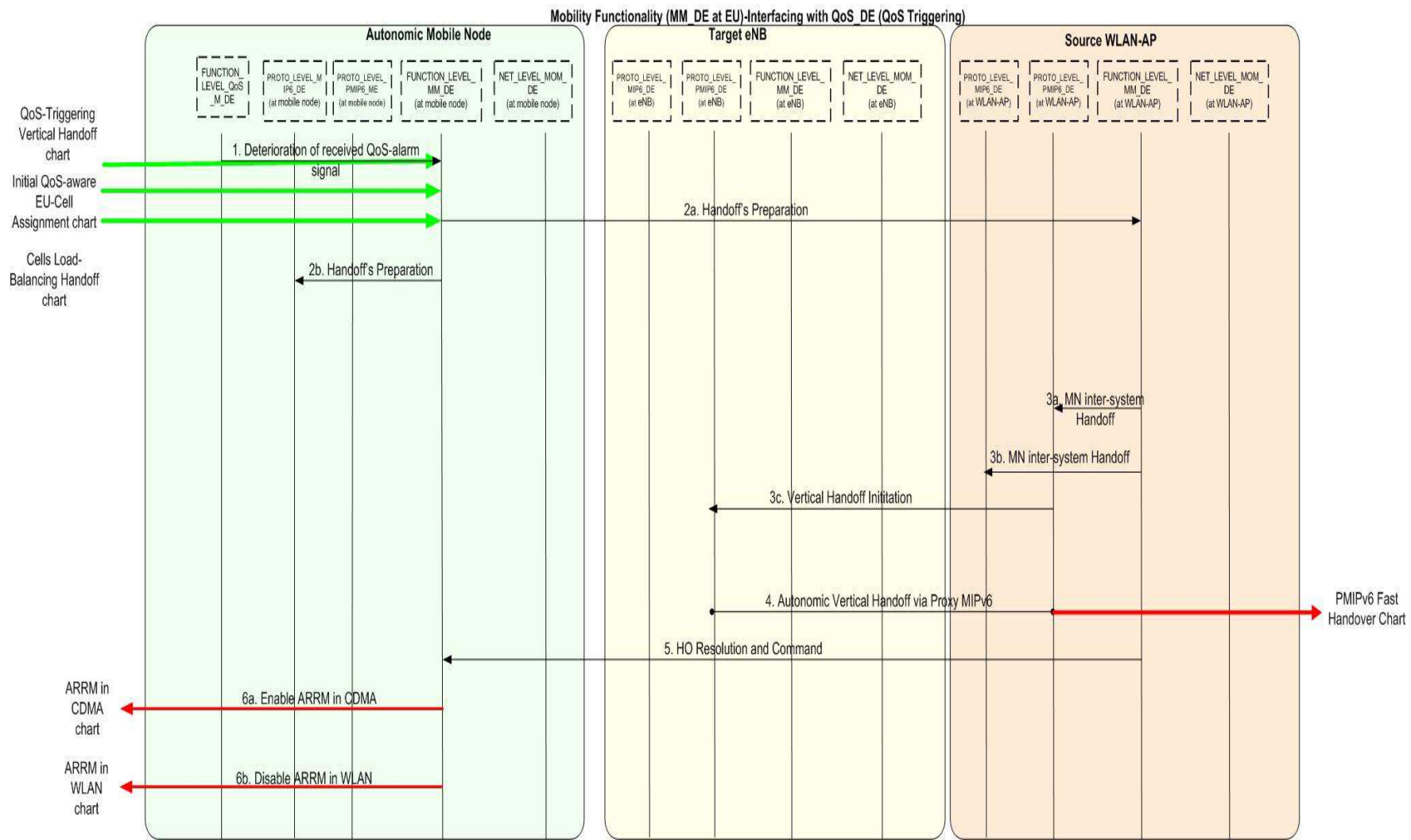
- Κάθετη μεταπομπή πυροδοτούμενη λόγω γεγονότων σχετιζόμενων με την κινητικότητα.
- Αρχική ανάθεση χρήστη σεβόμενη τα κριτήρια ΠτΥ.

Όλα τα ακολουθιακά διαγράμματα είναι διασυνδεδεμένα υποδεικνύοντας το σύνολο της ανταλλασσόμενης πληροφορίας καθώς και όλα τα δικτυακά στοιχεία που εμπλέκονται. Συγκεκριμένα, η είσοδος από κάποιο άλλο διάγραμμα απεικονίζεται με ένα πράσινο βέλος (σε συνδυασμό με την ένδειξη του αντίστοιχου διαγράμματος), ενώ η έξοδος με ένα κόκκινο βέλος (σε συνδυασμό με την ένδειξη του αντίστοιχου διαγράμματος).

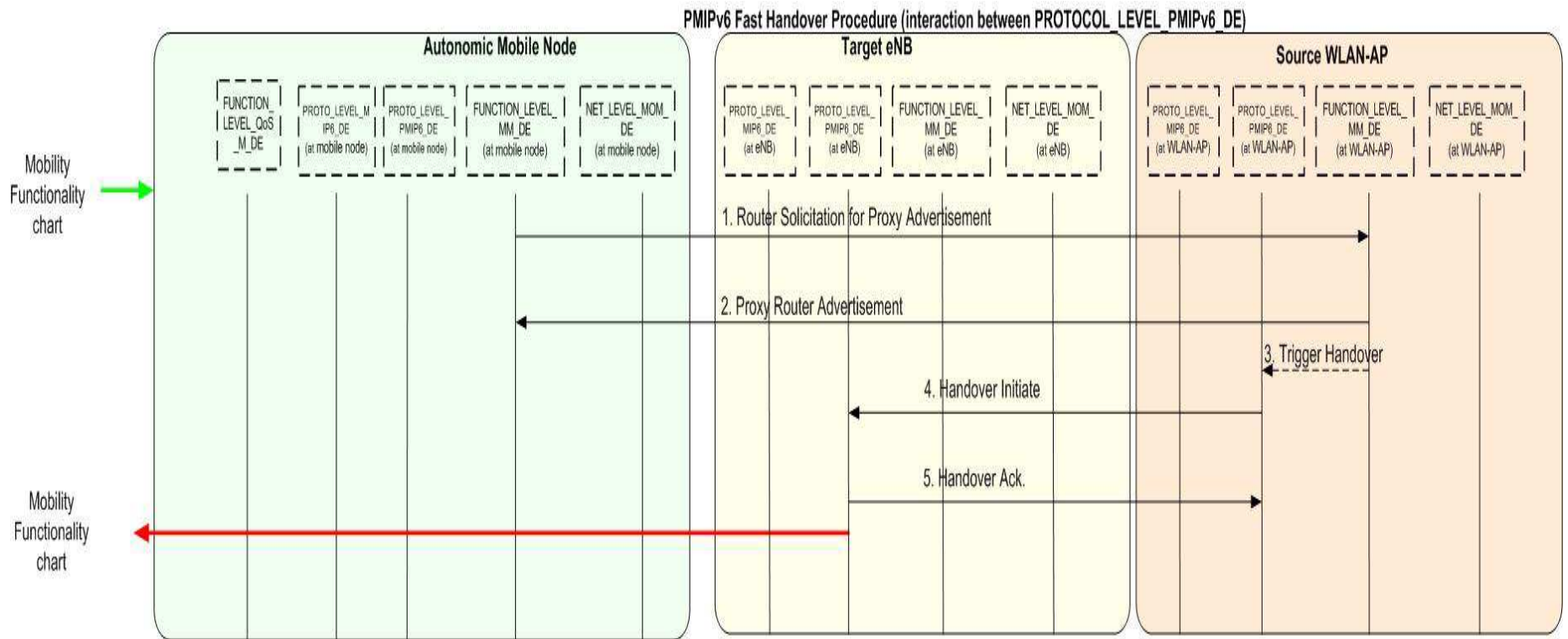
Αναλύουμε συνοπτικά το ακολουθιακό διάγραμμα του Σχήματος 28 ώστε να γίνει εμφανής η προσφορά του ιεραρχικού μοντέλου της προτεινόμενης αυτόνομης αρχιτεκτονικής, καθώς επίσης και για προσφέρουμε στον αναγνώστη να κατανοήσει και να αναλύσει όλα τα υπόλοιπα. Αρχικά παρατηρούμε πως ο κάθε φυσικός κόμβος του συστήματος απεικονίζεται ξεχωριστά, ενώ εσωτερικά σκιαγραφείται η εσωτερική δομή του καθενός αναφορικά με τους βρόχους ελέγχου που λαμβάνουν μέρος στην συγκεκριμένη διαδικασία. Στη διαδικασία κάθετης μεταπομπής πυροδοτούμενης λόγω γεγονότων σχετιζόμενων με την ΠτΥ, οι βρόχοι ελέγχου Επιπέδου Λειτουργίας διαχείρισης κινητικότητας και πόρων στον κινητό κόμβο αναλαμβάνουν και αναγνωρίζουν την ανάγκη κάθετης μεταπομπής προς ένα διαφορετικό δίκτυο λαμβάνοντας υπόψη την τρέχουσα κατάσταση του κόμβου καθώς και την κατάσταση των γειτονικών δικτύων. Στη συνέχεια, ενεργοποιούν τους κατάλληλους βρόχους ελέγχου Επιπέδου Πρωτοκόλλου ώστε να ξεκινήσουν την διαδικασία εύρεσης του βέλτιστου σημείου πρόσδεσης. Το αποτέλεσμα αυτό μεταφέρεται στο ΒΕ της διαχείρισης κινητικότητας ο οποίος και ξεκινά όλες τις απαραίτητες διαδικασίες πραγματοποίησης της μεταπομπής (βλέπε Σχήμα 26). Τέλος, μετά την ολοκλήρωση

της κάθετης μεταπομπής το DE διαχείρισης πόρων είναι υπεύθυνο για την απενεργοποίηση (ενεργοποίηση) των αντίστοιχων DE επιπέδου πρωτοκόλλου ενδοκυβελικής παροχής πόρων στο εκάστοτε δίκτυο.

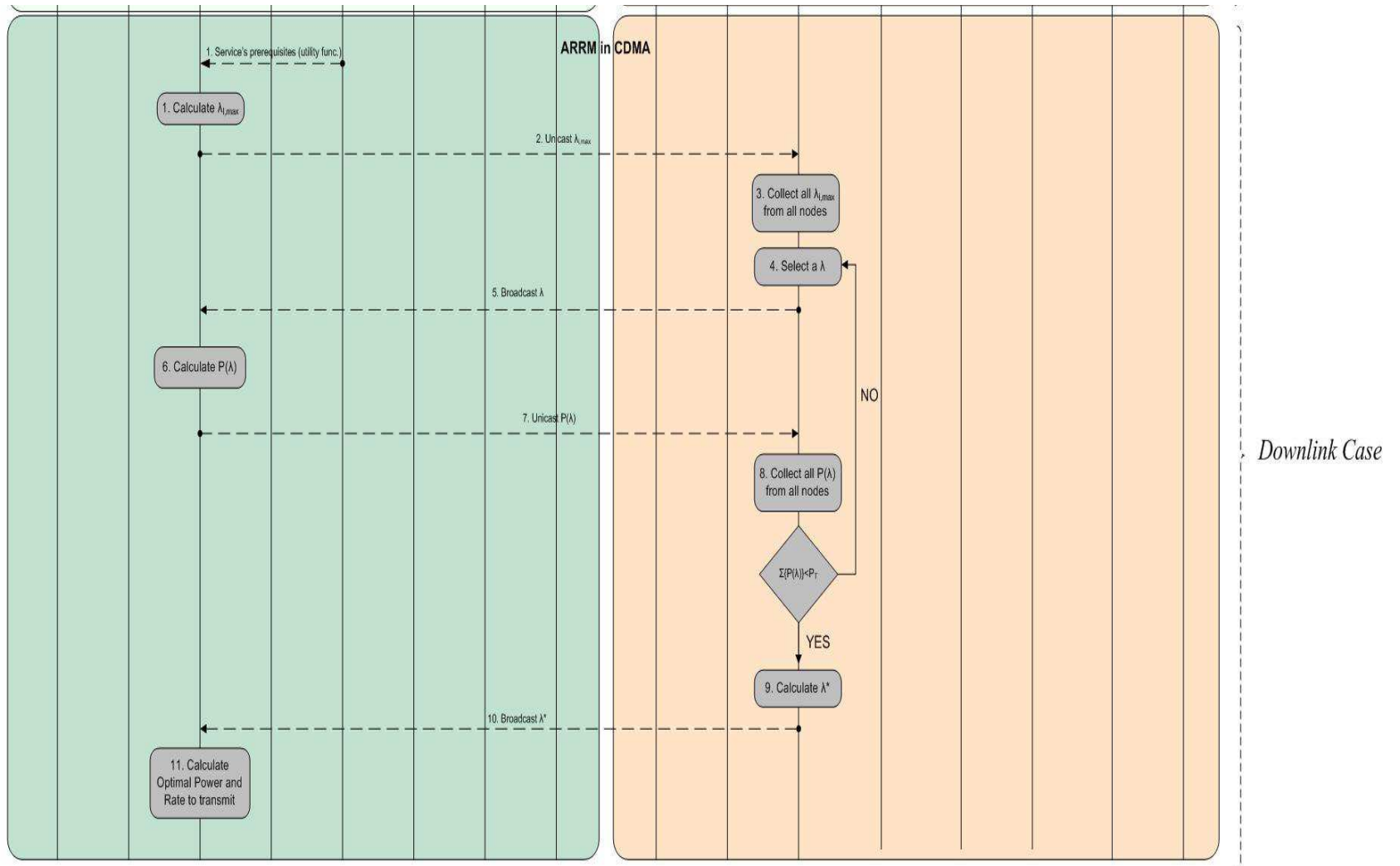
Σχολιάζοντας την απαιτούμενη σηματοδότηση για την πραγματοποίηση των λειτουργιών που περιγράφηκαν παραπάνω, μπορούμε να τη διαχωρίσουμε σε δύο κατηγορίες: α) τη σηματοδότηση στο εσωτερικό του κάθε κόμβου που πραγματοποιείται με κλήσεις συστήματος και διακοπών (interrupts) και δεν προκαλεί καθυστερήσεις και β) τη σηματοδότηση μεταξύ κόμβων η οποία έχει προσεχτικά σχεδιαστεί ώστε αφενός να είναι η ελάχιστη απαιτούμενη και αφετέρου να ενσωματώνεται όσο είναι δυνατόν στην υπάρχουσα σηματοδότηση του συστήματος. Γίνεται εμφανές λοιπόν, πως η προτεινόμενη αυτόνομη αρχιτεκτονική είναι όχι μόνο αρκετά ώριμη και πλήρης ώστε να μπορεί να διαχειριστεί επιτυχώς πληθώρα διαδικασιών που απαιτούνται σε περίπλοκα συστήματα, αλλά επίσης είναι αρκετά ευέλικτη, εύρωστη και εξελίξιμη ώστε να επιτρέπεται η σχεδίαση, υλοποίηση και ενσωμάτωση νέων διαδικασιών.



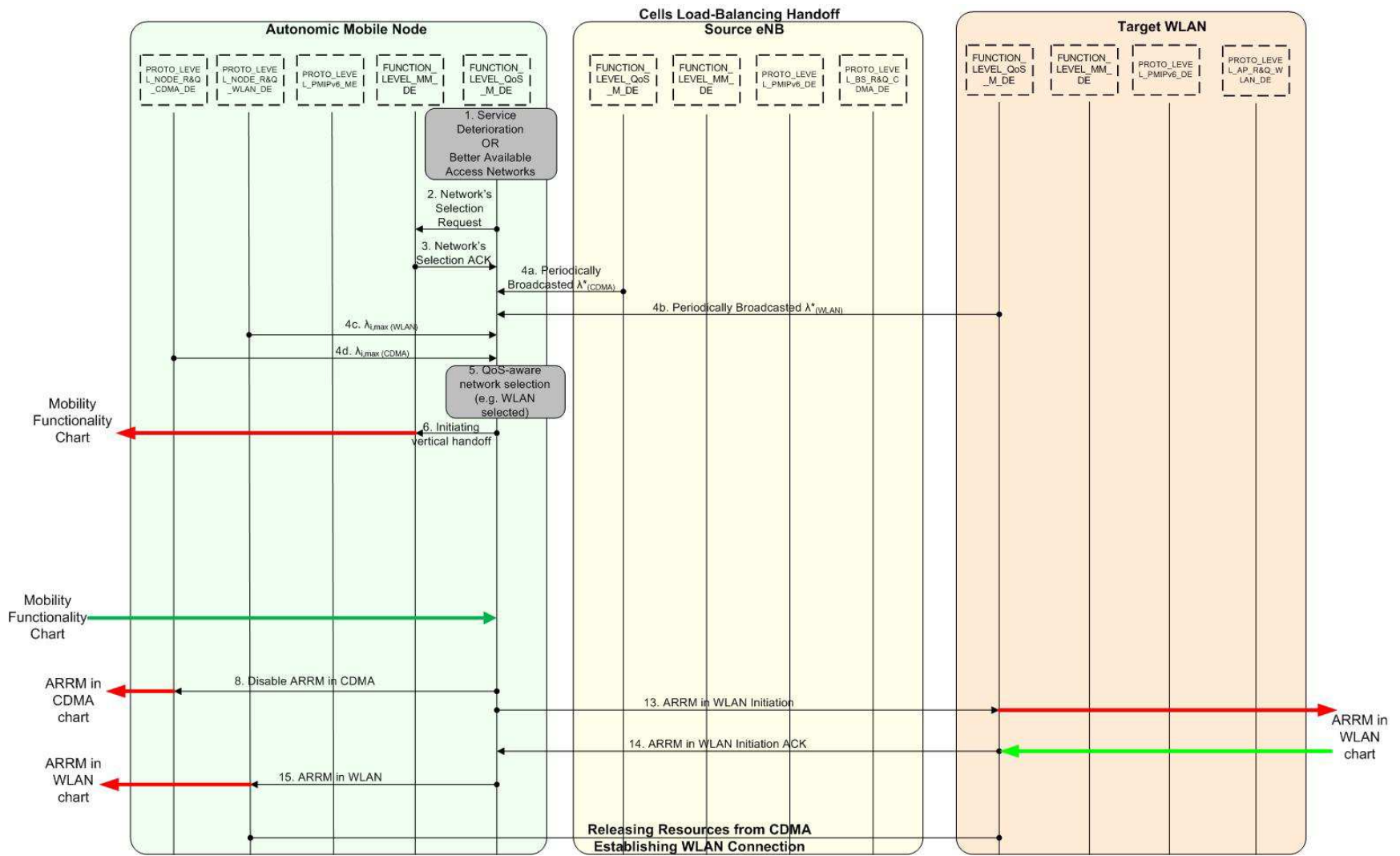
Σχήμα 25: Ακολουθιακό διάγραμμα διαχείρισης κινητικότητας



Σχήμα 26: Ακολουθιακό διάγραμμα Proxy Mobile IPv6 Fast Handover



Σχήμα 27: Ακολουθιακό διάγραμμα αυτόνομου ενδοκυβελικού διαμοιρασμού πόρων στην κάτω ζεύξη ενός CDMA δικτύου



Σχήμα 28: Ακολουθιακό διάγραμμα κάθετης μεταπομπής πυροδοτούμενη λόγω γεγονότων σχετιζόμενων με την ΠτΥ

10. Δημοσιεύσεις

Άρθρα σε Επιστημονικά Περιοδικά (με κρίση)

- [1] G. Aristomenopoulos, T. Kastrinogiannis and S. Papavassiliou, "*Multi-Access Multi-Cell Distributed Resource Management Framework in Heterogeneous Wireless Networks*", IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 61, issue 6, pp. 2636 - 2650, July 2012.
- [2] G. Aristomenopoulos, T. Kastrinogiannis, S. Lamprinakou and S. Papavassiliou, "*Optimal Power Control and Coverage Management in Two-Tier Femtocell Networks*", EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, Springer, doi: 10.1186/1687-1499-2012-329, Oct. 2012.
- [3] G. Aristomenopoulos, T. Kastrinogiannis, Z. Li and S. Papavassiliou, "*An Autonomic QoS-centric Architecture for Integrated Heterogeneous Wireless Networks*" Mobile Networks and Applications (MONET), Vol. 16, Number 4, 490-504, DOI: 10.1007/s11036-011-0319-1, Springer , February 2011.
- [4] L. Skorin-Kapov, K. Ivesic, G. Aristomenopoulos and S. Papavassiliou, "*Approaches for Utility-Based QoE-Driven Optimization of Network Resource Allocation for Multimedia Services*", to be published in "Data Traffic Monitoring and Analysis" book chapter, Computer Communications and Networks, Springer, 2013.

Δημοσιεύσεις σε Πρακτικά Διεθνών Επιστημονικών Συνεδρίων (με κρίση)

- [1] G. Aristomenopoulos, S. Papavassiliou, G. Katsaros and P. Vlahopoulos, "*User-centric Mobile Multimedia Service Delivery: From Theory to Experimentation to Prototyping*", accepted to appear in IEEE INFOCOM 2013 (demo session), Turin, April 2013.
- [2] C. Stathopoulos, G. Aristomenopoulos and S. Papavassiliou, "*Providing Throughput Guarantees in IEEE 802.11 Wireless Networks – An experimentally-driven Study*", in Proc. of the 4th International Conference on Ad Hoc Networks, ADHOCNETS '12, Paris, France, October 2012.
- [3] G. Aristomenopoulos et al., "*The QUEENS experiment through TEFIS platform*", TRIDENTCOM 2012 (demo session), vol. 44, p.g. 394-396, Thessaloniki, 2012
- [4] G. Aristomenopoulos, T. Kastrinogiannis, V. Kaldanis, G. Karantonis and S. Papavassiliou, "A Novel Framework for Dynamic Utility-Based QoE Provisioning in Wireless Networks" in Proc. of IEEE GLOBECOM 2010.
- [5] G. Aristomenopoulos, T. Kastrinogiannis, Z. Li, M. Wilson, J. M. Gonzales, J. A. Lozano-Lopez, Y. Li, V. Kaldanis and S. Papavassiliou, "Autonomic Mobility and Resource Management Over an Integrated Wireless Environment - A GANA Oriented Architecture" in Proc. of IEEE MENS 2010.
- [6] V. Merikoulias, V. Pouli, Y. Rebahi, S. Becker, K. Cabaj, G. Aristomenopoulos and S. Papavassiliou, "A Trust Management Architecture for Autonomic Future Internet" in Proc. of IEEE MENS 2010.
- [7] G. Aristomenopoulos, T. Kastrinogiannis, and S. Papavassiliou, "A Unified Approach for Efficient Network Selection in Multi-Service Integrated CDMA/WLAN Systems," in Proc. of 5th International Wireless

Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC 2009), June, 2009.

- [8] 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, May 2009.

11. Αναφορές

- [1] M. Buddhikot, G. Chandranmenon, S. Han, Y.W. Lee, S. Miller, and L. Salgarelli, "Integration of 802.11 and Third-Generation Wireless Data Networks," in *Proc. of INFOCOM '03*, vol.1, pp. 503-512, Apr. 2003.
- [2] L. Luo, R. Mukerjee, M. Dillinger, E. Mohyeldin, and E. Schulz, "Investigation of Radio Resource Scheduling in WLANs Coupled with 3G Cellular Network," *IEEE Comm. Magazine*, vol. 41, pp. 108-115, June 2003.
- [3] 3GPP TSG SA, 3GPP TR 36.913 V10.0.0. Requirements for further advancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) (LTE-Advanced) (Release 10).
- [4] Y. Xiao, K. K. Leung, Y. Pan and X. Du, "Architecture, mobility management, and quality of service for integrated 3G and WLAN networks", *Wireless Communications & Mobile Computing*, vol. 5, no. 7, pp. 805 – 823, Nov. 2005.
- [5] W. Song; H. Jiang; W. Zhuang; X. Shen, "Resource management for QoS support in cellular/WLAN interworking", *IEEE Network Magazine*, vol.19, no.5, pp. 12-18, Sept.-Oct. 2005.
- [6] F. Yu and V. Krishnamurthy, "Optimal Joint Session Admission Control in Integrated WLAN and CDMA Cellular Networks with Vertical Handoff" *IEEE Trans. on Mobile Computing*, vol. 6, no. 1, pp. 126-139, Jan. 2007.
- [7] K. S. Munasinghe, M. Rubaiyat Kibria, and A. Jamalipour, "Designing VoIP Session Management over Interworked WLAN-3G Cellular Networks," *IEEE Wireless Communications*, vol. 15, no. 4, pp. 86-94, Aug. 2008.
- [8] W. Song, W. Zhuang, and Y. Cheng, "Load balancing for cellular/WLAN integrated networks," *IEEE Networks*, vol. 21, no. 1, pp. 27-33, Jan.-Feb. 2007.
- [9] Y. Cheng, R. Farha, M. S. Kim, A. Leon-Garcia, and J. W. Hong, "A generic architecture for autonomic service and network management", *Computer Communications*, vol. 29, no. 18, pp. 3691-3709, 2006
- [10] 3GPP TS 36.902, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Self-configuring and self-optimizing network (SON) use cases and solutions", (Rel 9)
- [11] D. P. Palomar and M. Chiang, "A tutorial on decomposition methods for network utility maximization," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol.24, no.8, pp.1439-1451, Aug. 2006.
- [12] M. Shabany, K. Navaie, E. S. Sousa, "A Utility-Based Downlink Radio Resource Allocation for Multiservice Cellular DS-CDMA Networks", *EURASIP Journal on Wireless Comm.and Netw.* vol. 2007, ID 76193.
- [13] I. Koutsopoulos, L. Tassiulas, "Joint Optimal Access Point Selection and Channel Assignment in Wireless Networks," *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol. 15, no. 3, June 2007.
- [14] M. Chiang, P. Hande, T. Lan and C. W. Tan, "Power Control in Wireless Cellular Networks," *Foundations and Trends in Networking*, vol. 2, no 4, pp. 381-533, 2008.
- [15] A. Ganti, T. E. Klein, and M. Haner, "Base station assignment and power control algorithms for data users in a wireless multiaccess framework," *IEEE Trans. on Wireless Communications*, vol.5, no.9, p.p. 2493-2503, Sept. 2006.
- [16] J. Lee, R. Mazumdar, and N. Shroff, "Joint resource allocation and base-station assignment for the downlink in CDMA networks," *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol. 14, no. pp. 1–14, Feb., 2006.

- [17] U. O. Candogan, I. Menache, A. Ozdaglar, and Pablo A. Parrilo, "Near-Optimal Power Control in Wireless Networks: A Potential Game Approach," in *Proc. of Infocom 2010*, p.p. 1-9, San Diego, 2010.
- [18] A. Sang, X. Wang, M. Madhian, and R. D. Gitlin, "Coordinated Load Balancing, Handoff/Cell-site Selection, and Scheduling in Multi-cell Packet Data Systems," *Wireless Networks*, vol. 14, no. 1, Jan. 2008.
- [19] P. Hande, S. Rangan, M. Chiang, X. Wu, "Distributed uplink power control for optimal sir assignment in cellular data networks," *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol. 16, no. 6, pp. 1420-1433, 2008.
- [20] I. Viering, M. Dottling, and A. Lobinger, "A mathematical perspective of self-optimizing wireless networks," in *Proc. of IEEE Int. Conf. on Communications (IEEE ICC 2009)*, p.p. 1-6, Dresden, 2009
- [21] J. T. Wang, "SINR Feedback-Based Integrated Base-Station Assignment, Diversity, and Power Control for Wireless Networks," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 59, no. 1, Jan. 2010.
- [22] Y. Huang and D. P. Palomar, "A Dual Perspective on Separable Semidefinite Programming with Applications to Optimal Downlink Beamforming," *IEEE Trans. on Signal Proc.*, vol. 58, no. 8, Aug. 2010.
- [23] S. Stanczak, M. Wiczanowski, and H. Boche, "Distributed Utility-Based Power Control: Objectives and Algorithms," *IEEE Trans. on Signal Processing*, vol. 55, no. 10, Oct. 2007.
- [24] W. Yu and T. Lan, "Transmitter Optimization for the Multi-Antenna Downlink With Per-Antenna Power Constraints," *IEEE Trans. on Signal Processing*, vol. 55, no. 6, June 2007.
- [25] H. Dahrouj and W. Yu, "Coordinated Beamforming for the Multicell Multi-Antenna Wireless System," *IEEE Trans. on Wireless Communications*, vol. 9, no. 5, p.p. 1748-1759, May 2010.
- [26] A. Hasib and A. O. Fapojuwo, "Analysis of Common Radio Resource Management Scheme for End-to-End QoS Support in Multiservice Heterogeneous Wireless Networks," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 57, no. 4, July 2008.
- [27] Z. Sun and W. Wang, "Investigation of Cooperation Technologies in Heterogeneous Wireless Networks," *Journal of Computer Systems, Networks and Communications*, vol. 2010, ID 413987.
- [28] H. M. Shin and C. Y. Lee, "Optimal rate allocation and QoS-sensitive admission control in wireless integrated networks", *Wireless Networks, Springer*, vol. 17, no. 1, p.p. 231-246, Aug. 2010.
- [29] W. Shen and Q.-A. Zeng, "Resource Allocation Schemes in Integrated Heterogeneous Wireless and Mobile Networks," *Journal of Networks*, vol. 2, no 5, p.p. 78-86, Sept. 2007.
- [30] L. Liang, H. Wang, and P. Zhang, "Net Utility-Based Network Selection Scheme in CDMA Cellular/WLAN Integrated Networks", in *Proc. of IEEE Wireless Com. and Networking Conference, (WCNC 2007)*, pp. 3313-3317, March 2007.
- [31] W. Shen; Q. A. Zeng, " Cost-Function-Based Network Selection Strategy in Integrated Wireless and Mobile Networks", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 57, no. 6, pp. 3778 – 3788, 2008
- [32] W. Song; H. Jiang; W. Zhuang; X. Shen, "Resource Management for QoS Support in Cellular/WLAN Interworking", *IEEE Network Magazine*, vol.19, no.5, pp. 12-18, 2005
- [33] N. Blefari-Melazzi, D. Di Sorte, M. Femminella, G. Reali, "Autonomic control and personalization of a wireless access network", *Computer Networks*, Elsevier, Vol. 51, Iss. 10, pp. 2645-2676, July 2007.
- [34] P. Si, H. Ji, and F. R. Yu, "Optimal network selection in heterogeneous wireless multimedia networks," *Wireless Networks*, vol. 16, No. 5, p.p. 1277-1288, 2010.
- [35] A. Haji, A. B. Letaifa, and S. Tabbane, "Integration of WLAN, UMTS and Wimax in 4G," in *proc of 16th IEEE Int. Conf. on Electronics, Circuits, and Systems*, ICECS 2009, p.p. 307-310, Dec. 2009.

- [36] D. Niyato and E. Hossain, "A Cooperative Game Framework for Bandwidth Allocation in 4G Heterogeneous Wireless Networks," in *proc. of IEEE Int. Conference in Communications. (ICC '06)*, vol. 9, pp. 4357 – 4362. Istanbul 2006.
- [37] D. Niyato, E. Hossain, "Dynamics of Network Selection in Heterogeneous Wireless Networks: An Evolutionary Game Approach," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 58, no. 4, May 2009.
- [38] D. Niyato and E. Hossain, "A Noncooperative Game-Theoretic Framework for Radio Resource Management in 4G Heterogeneous Wireless Access Networks," *IEEE Trans. on Mobile Computing*, vol. 7, no. 3, p.p. 332-345, March 2008.
- [39] J.-M. Kang, H.-T. Ju, and J. W.-K. Hong, "Towards Autonomic Handover Decision Management in 4G Networks", *LNCS, Autonomic Manag.t of Mobile Multimedia Services*, vol.4267, pp.145-157, 2006.
- [40] P. Vidales, J. Baliosian, J. Serrat, G. Mapp, F. Stajano, and A. Hopper, "Autonomic System for Mobility Support in 4G Networks," *IEEE JSAC* vol. 23, no. 12, pp. 2288- 2304, Dec. 2005.
- [41] 3GPP TSG SA, 3GPP TS 23.402 V9.2.0. Architecture enhancements for non-3GPP accesses (Release 9)
- [42] S. Shenker, "Fundamental design issues for the future Internet," *IEEE JSAC*, vol. 13, no. 7, pp. 1176-1188, Sep. 1995.
- [43] F. P. Kelly, A. Maulloo, and D. Tan, "Rate control for communication networks: shadow prices, proportional fairness and stability," *Journal of Operations Research Society*, vol. 49, no. 3, pp.237-252, March 1998.
- [44] D. Raymer, S. Meer and J. Strassner, "From Autonomic Computing to Autonomic Networking: An Architectural Perspective", in *proc of Fifth IEEE Workshop on Engineering of Autonomic and Autonomous Systems*, EASE 2008, pp.174-183. 2008
- [45] J.-W. Lee, R. R. Mazumdar, and N. B. Shroff, "Downlink power allocation for multi-class wireless systems". *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 13, no. 4, p.p. 854-867, 2005
- [46] A. Banchs, X. Pérez-Costa, and D. Qiao, "Providing throughput guarantees in IEEE 802.11e wireless LANs", in *Proc. of the 18th Int. Teletraffic Congress (ITC18)*, Germany, 2003
- [47] Y. Yang, J. Wang, and R. Kravets, "Distributed Optimal Contention Window Control for Elastic Traffic in Single Cell Wireless LANs", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 15, no. 6, pp. 1373 – 1386, 2007
- [48] T. Kastrinogiannis and S. Papavassiliou, "A Utility Based Framework for Efficient Multimedia Service Support in WCDMA Wireless Networks", *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*. vol. 2010, Article ID 375410
- [49] J. Huang, V.G. Subramanian, R. Agrawal and R. Berry, "Downlink scheduling and resource allocation for OFDM systems", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 8, no. 1, pp. 288-296, 2009
- [50] M Kang, J. Strassner, S-s Seo, and J. W-K Hongm "Autonomic personalized handover decisions for mobile services in heterogeneous wireless networks". *Computer Networks*, Elsevier, doi:10.1016/j.comnet.2011.01.021, 2011
- [51] G. Aristomenopoulos, T. Kastrinogiannis, and S. Papavassiliou, "A Unified Approach for Efficient Network Selection in Multi-Service Integrated CDMA/WLAN Systems", in *Proc. of IWCMC 2009*, p.p. 1263-1268, 2009
- [52] EFIPSANS Project - <http://www.efipsans.org/>
- [53] M. Yagiura and T. Ibaraki, *Generalized Assignment Problem*, in *Handbook of Approximation Algorithms and Metaheuristics*, Computer & Information Science Series, Chapman & Hall/CRC, 2006.
- [54] M. Chiang, S. H. Low, A. R. Calderbank, and J. C. Doyle, "Layering as optimization decomposition: a mathematical theory of network architectures," *IEEE Proceedings*, vol. 95, no. 1, pp. 255–312, Jan. 2007.

- [55] K. Hirayama, T. Matsui, and M. Yokoo, "Adaptive price update in distributed Lagrangian relaxation protocol," in *Proc. of The 8th Int. Conf. on Aut. Agents and Multiagent Sys.*, p.p. 1033-1040, May, 2009.
- [56] D. P. Bertsekas, *Nonlinear Programming*, Belmont, MA: Athena Scientific, 1999.
- [57] S. Stanczak, M. Wiczanski, and H. Boche, *Resource Allocation in Wireless Networks: Theory and Algorithms*, Berlin, Germany: Springer, 2006.
- [58] N. Gatsis, A. Marques, and G. Giannakis, "Power control for cooperative dynamic spectrum access networks with diverse QoS constraints," *IEEE Trans. on Com.*, vol.58, no.3, pp.933-944, Mar. 2010.
- [59] W. Song and W. Zhuang, "Multi-service load sharing for resource management in the cellular/WLAN integrated network," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 8, no. 2, pp. 725-735, Feb. 2009.
- [60] M. Chiang, "Nonconvex optimization of communication systems," *Advances in Mechanics and Mathematics*, Special Volume on Strang's 70th Birthday, Ed., D. Gao and H. Sherali, Springer, October 2007
- [61] IEEE Std 802.16m Part 16: Air Interface for Broadcast Wireless Access Systems: Advanced Air Interface, IEEE Standard 802.16m, 2010.
- [62] 3GPP Long Term Evolution, LTE release 10 & beyond (LTE-Advanced), 2011.
- [63] H. Kim, G. de Veciana, X. Yang, and M. Venkatachalam, "Distributed α -Optimal User Association and Cell Load Balancing in Wireless Networks", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 20, no. 1, pp. 177-190, Feb. 2012.
- [64] Kyuho Son, Song Chong, and G. de Veciana, "Dynamic association for load balancing and interference avoidance in multi-cell networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 8, no. 7, pp. 3566-3576, July 2009.
- [65] K. Etemad and M.-Y. Lai, *WiMAX Technology and Network Evolution Piscataway, NJ: IEEE Press*, 2000.
- [66] 3GPP TR 25.814 v7.1.0, Physical layer aspect for evolved universal terrestrial radio access (UTRA), Sept. 2006.
- [67] S. H. Low and D. E. Lapsley, "Optimization flow control, I: Basic algorithm and convergence," *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 7, no. 6, pp. 861-874, Dec. 1999.
- [68] D. P. Bertsekas, A. Nedic, and A. Ozdaglar, *Convex Analysis and Optimization*, Belmont, MA: Athena Scientific, 2003.
- [69] D. P. Bertsekas and J. N. Tsitsiklis, *Parallel and Distributed Computation*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1989.
- [70] Hisatoshi Suzuki, "A generalized knapsack problem with variable coefficients," *Mathematical Programming*, 1978, Springer Berlin / Heidelberg, Mathematics and Statistics, DOI:10.1007/BF01609015.
- [71] J. Sachs and M. Olsson, "Access network discovery and selection in the evolved 3GPP multi-access system architecture," *European Transactions on Telecommunications*, vol. 21, pp. 544-557, 2010. (doi: 10.1002/ett.1410).
- [72] L. S. Lasdon, *Optimization theory for large systems*, Dover, 2002.
- [73] A. Nedic and A. Ozdaglar, "Approximate primal solutions and rate analysis for dual subgradient methods," *SIAM J. Optimization*, vol. 19, no. 4, pp. 1757-1780, 2009.
- [74] Y-Fu Wen and W. Liao, "Minimum power multicast algorithms for wireless networks with a Lagrangian relaxation approach", *Wireless Networks*, Springer, vol. 17, no. 6, p.p. 1401- 1421, 2011.
- [75] V. Chandrasekhar, J. G. Andrews, "Femtocell Networks: A Survey", *IEEE Communications Magazine*, vol. 46, no. 9, p.p. 59-67, 2008.
- [76] D. Calin, H. Claussen, H. Uzunalioglu, "On femto deployment architectures and macrocell offloading benefits in joint macro-femto deployments", *IEEE Communications Magazine*, vol.48, no.1, p.p 26-32, 2010.

- [77] F. Mhiri, K. Sethom, B. Reguiga, R. Bouallegue, G. Pujolle, "A Power Management Algorithm For Green Femtocell Networks", in *Proc. of the 10th IFIP Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop (Med-Hoc-Net) 2011*, 45-49, 2011.
- [78] P.Mach, Z. Becvar, "QoS-Guaranteed Power Control Mechanism Based on the Frame Utilization for Femtocells", *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2011, doi:10.1155/2011/259253.
- [79] H. Jo, C. Mun, J. Moon, J. Yook, "Self-Optimized Coverage Coordination in Femtocell Networks", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 9, no. 10, p.p. 2977-2982, 2010.
- [80] H. Jo, C. Mun, J. Moon, J. Yook, "Interference mitigation using uplink power control for two-tier femtocell networks", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 8, no. 10, p.p. 4906-4910, 2009.
- [81] H. Claussen, L. T. W. Ho, L. G. Samuel, "Self-optimization of coverage for femtocell deployments", in *Proc. of Wireless Telecommunications Symposium*, p.p. 278-285, 2008.
- [82] S. Y. Choi, T. Lee, M. Y. Chung, H. Choo, "Adaptive Coverage Adjustment for Femtocell Management in a Residential Scenario", in *Proc. of APNOMS 2009*, p.p. 221-230, 2009.
- [83] I. Ashraf, H. Claussen, L.T.W. Ho, "Distributed Radio Coverage Optimization in Enterprise Femtocell Networks", in *Proc. of the IEEE International Conference on Communications, ICC 2010*, p.p. 1-6, 2010.
- [84] Yalin Zhang, Yang Yang Li; E.S. Sousa, Qinyu Zhang, "Pilot Power Minimization in HSDPA Femtocells", in *Proc. of the IEEE Global Telecommunications Conference, GLOBECOM 2010*, p.p. 1-5, 2010.
- [85] M. Morita, Y. Matsunaga, K. Hamabe, "Adaptive Power Level Setting of Femtocell Base Stations for Mitigating Interference with Macrocells", in *Proc. of the 2010 IEEE 72nd Vehicular Technology Conference Fall, VTC 2010-Fall*, p.p. 1-5, 2010.
- [86] Min-Sung Kim, Hui Won Je, F.A. Tobagi, "Cross-Tier Interference Mitigation for Two-Tier OFDMA Femtocell Networks with Limited Macrocell Information", in *Proc. of the 2010 IEEE Global Telecommunications Conference, GLOBECOM 2010*, p.p. 1-5, 2010.
- [87] Shu-ping Yeh, S. Talwar, N. Himayat, K. Johnsson, "Power control based interference mitigation in multi-tier networks", in *Proc. of 2010 IEEE GLOBECOM (FEMnet Workshop)*, p.p. 701-705, 2010.
- [88] L. Kisong, J. Ohyun, Dong-Ho Cho, "Cooperative Resource Allocation for Guaranteeing Intercell Fairness in Femtocell Networks", *IEEE Communications Letters*, , vol. 15, no. 2, p.p. 214-216, 2011.
- [89] T. Akbudak, A. Czyliw, "Distributed power control and scheduling for decentralized OFDMA networks", in *Proc. of the 2010 International ITG Workshop on Smart Antennas*, p.p. 59-65, 2010.
- [90] Li Xiangfang, Q. Lijun, D. Kataria, "Downlink power control in co-channel macrocell femtocell overlay", in *Proc. of the 43rd Annual Conference on Inf. Sciences and Systems*, p.p. 383-388, 2009.
- [91] H. Kwanghun, C. Youngkyu, K. Dongmyoung, N. Minsoo, C. Sunghyun, H. Kiyoun, "Optimization of femtocell network configuration under interference constraints", in *Proc. of WiOPT 2009*, p.p. 1-7, 2009.
- [92] Chee Wei Tan, "Optimal Power Control in Rayleigh-fading Heterogeneous Networks", in *Proc. of INFOCOM 2011*, p.p. 2552 - 2560 , 2011.
- [93] V. Chandrasekhar, J.G. Andrews, T. Muharemovic, Zukang Shen, A. Gatherer, "Power control in two-tier femtocell networks", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 8, no. 8, p.p. 4316-4328, 2009.

- [94] Z. Jianmin, Z. Zhaoyang, W. Kedi, H. Aiping, Optimal Distributed Subchannel, "Rate and Power Allocation Algorithm in OFDM-Based Two-Tier Femtocell Networks", in *Proc. of 2010 IEEE 71st Vehicular Technology Conference, VTC 2010-Spring*, p.p. 1-5, 2010.
- [95] Ji-Hoon Yun, K.G. Shin, "Adaptive Interference Management of OFDMA Femtocells for Co-Channel Deployment", *IEEE Journal on Selected Areas in Communication*, vol. 29, no. 6, p.p. 1225-1241, 2011.
- [96] M. Chiang, "Balancing transport and physical Layers in wireless multihop networks: jointly optimal congestion control and power control", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 23, no. 1, p.p. 104- 116, 2005.
- [97] A. Goldsmith, *Wireless Communications*, Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, (2004).
- [98] D. Julian, M. Chiang, D. O'Neill, S. Boyd, "QoS and fairness constrained convex optimization of resource allocation for wireless cellular and ad hoc networks", in *Proc. of the IEEE Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communication Societies*, INFOCOM 2002, vol. 2, p.p. 477-486, (2002).
- [99] M. Chiang, S. Boyd, "Geometric programming duals of channel capacity and rate distortion", *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 50, no. 2, p.p. 245–258, 2004.
- [100] 3GPP TSG RAN WG4 R4-092042, Simulation Assumptions and Parameters for FDD HeNB RF Requirements, (2008).
- [101] 3GPP TS 36.213 V 8.8.0, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Layer Procedures (Release 8), (2009).
- [102] Qualinet White Paper on Definitions of Quality of Experience (QoE) (May 2012), available at <http://www.qualinet.eu/>.

Γεώργιος Αριστομενόπουλος - Συνοπτικό Βιογραφικό Σημείωμα

Γεννήθηκε στην Πάτρα το 1984. Έλαβε το πτυχίο του Μηχανικού Η/Υ και Πληροφορικής από τη Πολυτεχνική Σχολή του Πανεπιστημίου Πατρών το 2007 και το διδακτορικό του (Phd –Ing) στην κατεύθυνση των Ετερογενών Ασύρματων Δικτύων από τη Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιο Πολυτεχνείο το 2013. Εργάστηκε σαν ερευνητής στο εργαστήριο Διαχείρισης Δικτύων και Βέλτιστου Σχεδιασμού (NETMODE) του Ε.Μ.Π. από το 2007 έως το 2013, απασχολούμενος σε Ευρωπαϊκά Ερευνητικά Προγράμματα και αναλαμβάνοντας τον τεχνικό σχεδιασμό, συντονισμό και υλοποίηση διαφόρων Πακέτων Εργασίας. Έχει πάνω από 15 δημοσιεύσεις σε διεθνή περιοδικά και συνέδρια ενώ έχει διατελέσει μέλος της τεχνικής επιτροπής σε διάφορα συνέδρια των IEEE/ICST.