



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

*Βέλτιστος έλεγχος ισχύος και διαχείριση κάλυψης σε
ασύρματα CDMA κυψελωτά δίκτυα δυο επιπέδων*

*(Optimal Joint Power Control and Coverage
Management in Two-Tier Femtocell Networks)*

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΤΑΜΑΤΙΝΑ ΛΑΜΠΡΙΝΑΚΟΥ

Επιβλέπων : Συμεών Παπαβασιλείου
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιούνιος 2012



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Βέλτιστος έλεγχος ισχύος και διαχείριση κάλυψης σε ασύρματα CDMA κυψελωτά δίκτυα δυο επιπέδων

(Optimal Joint Power Control and Coverage Management in Two-Tier Femtocell Networks)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΤΑΜΑΤΙΝΑ ΛΑΜΠΡΙΝΑΚΟΥ

Επιβλέπων : Συμεών Παπαβασιλείου
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 21 Ιουνίου 2012.

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

.....
Μιχαήλ Θεολόγου
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Ευστάθιος Συκάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιούνιος 2012

.....

Σταματίνα Λαμπρινάκου

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

Copyright © 2012 – Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξολοκλήρου 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

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάσαμε τη διαχείριση της ισχύος και την κατανομή της στην κάτω ζεύξη από τους Σταθμούς Βάσης (ΣΒ) ενός CDMA δικτύου δυο επιπέδων που αποτελείται από μια μακροκυψέλη και φεμτοκυψέλες. Στόχος μας ήταν να αυξήσουμε το συνολικό ρυθμό μετάδοσης κάτω ζεύξης των χρηστών μειώνοντας τις παρεμβολές στους χρήστες μέσω της μείωσης της συνολικής κατανάλωσης ισχύος στους ΣΒ του δικτύου. Σε αντίθεση με όλες τις προηγούμενες μελέτες που έχουν εκπονηθεί πάνω σ' αυτό το πρόβλημα, εμείς το αναδιατυπώσαμε θεωρώντας ότι οι συνολικές ισχύεις που διαθέτουν οι ΣΒ στους χρήστες τους δεν είναι σταθερές αλλά μεταβάλλονται με τέτοιο τρόπο ώστε να αυξήσουν τη συνολική αποδοτικότητα του δικτύου πάντα όμως τηρώντας τους περιορισμούς ισχύος που επιβάλλονται από τις τεχνικές προδιαγραφές των ΣΒ του δικτύου. Συνεπώς, το υπό μελέτη πρόβλημα μας είναι ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης της αποδοτικότητας ενός CDMA δικτύου δυο επιπέδων ως προς το συνολικό ρυθμό μετάδοσης κάτω ζεύξης των χρηστών με μεταβλητές τις κατανομές ισχύος στις κυψέλες του δικτύου και τις συνολικές ισχύεις που διαθέτουν οι ΣΒ του δικτύου. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος θεωρήσαμε ότι κάθε χρήστης είναι ακίνητος και εξυπηρετείται από ένα και μόνο ΣΒ κάθε χρονική στιγμή.

Επιλύσαμε το πρόβλημα αυτό εφαρμόζοντας τη θεωρία διαχωρισμού (Decomposition Theory). Το υπό μελέτη πρόβλημα δεν είναι διαχωρίσιμο επειδή ο σηματοθορυβικός λόγος ενός χρήστη δεν είναι συνάρτηση μόνο της ισχύος που του αφιερώνεται από το ΣΒ που τον εξυπηρετεί και της συνολικής ισχύος που διαθέτει αυτός ο ΣΒ στους χρήστες του, αλλά αποτελεί συνάρτηση και των συνολικών ισχύων που διαθέτουν οι υπόλοιποι ΣΒ στους χρήστες τους. Θεωρώντας, όμως, ότι οι συνολικές ισχύεις που διαθέτουν οι ΣΒ στους χρήστες τους είναι σταθερές, δείξαμε ότι το πρόβλημα γίνεται διαχωρίσιμο με αποτέλεσμα να μπορεί να σπάσει σε τόσα υποπροβλήματα CLP (Cell Local Problem - CLP) όσες είναι οι κυψέλες του δικτύου συντονιζόμενα από ένα άλλο τύπου πρόβλημα MP (Master Problem - MP) σύμφωνα με τη θεωρία Διαχωρισμού. Συνεπώς, για κάθε κυψέλη το προκύπτον πρόβλημα CLP, το οποίο αποτελεί ένα πρόβλημα βέλτιστης διαχείρισης πόρων της

εκάστοτε κυψέλης θεωρώντας σταθερές τις συνολικές ισχύεις που διαθέτουν οι ΣΒ του δικτύου στους χρήστες τους, επιλύεται με τεχνικές Δυϊκού Διαχωρισμού (Dual Decomposition) καταλήγοντας σε ένα χαμηλής πολυπλοκότητας αλγόριθμο. Το πρόβλημα MP αναζητεί τις συνολικές ισχύεις που διαθέτουν οι ΣΒ στους χρήστες τους γνωρίζοντας τις βέλτιστες λύσεις όλων των προβλημάτων CLP με στόχο την αύξηση της συνολικής απόδοσης του δικτύου. Επιλέγοντας τη βαθμωτή μέθοδο (subgradient method) και αποδεικνύοντας τη σύγκλιση της εξασφαλίζουμε ότι κάθε ΣΒ θα αποφασίζει την ισχύ που θα διαθέσει στους χρήστες του (δηλαδή το πρόβλημα MP σπάει σε τόσα επιμέρους προβλήματα όσοι είναι οι ΣΒ του δικτύου). Συνοψίζοντας, σύμφωνα με τον προτεινόμενο αλγόριθμο μας κάθε κυψέλη αντιμετωπίζεται ως ένα κατανεμημένο πρόβλημα, το οποίο αναζητεί όχι μόνο τη συνολική ισχύ που θα διαθέσει στους χρήστες της, αλλά και πώς θα την κατανείμει με στόχο την αύξηση της συνολικής απόδοσης του δικτύου.

Προσομοιώνοντας σε Matlab τον προτεινόμενο αλγόριθμο μας αποδείξαμε την αποδοτικότητα του αλγορίθμου μας παρατηρώντας μέχρι και 56% αύξηση του συνολικού ρυθμού μετάδοσης κάτω ζεύξης των χρηστών του δικτύου ως άμεση συνέπεια της μείωσης κατανάλωσης ισχύος στους ΣΒ του δικτύου μέχρι και 70%.

Λέξεις κλειδιά: Κυψέλες, Φεμτοκυψέλες, Μακροκυψέλες, CDMA δίκτυα δυο επιπέδων, Διαχείριση ισχύος, Θεωρία διαχωρισμού, Δυϊκός διαχωρισμός, Βαθμωτή μέθοδος

Abstract

In this thesis we studied the power management and allocation in the downlink in a CDMA network consisting of a macrocell and femtocells. Our aim was to increase the overall downlink throughput decreasing the users' interferences through the decrease of the overall power consumption in the network's BSs. Contrary to all previous studies have been carried out on this problem, we reworded it considering that all overall powers provided by BSs to their users are not fixed, but changing in order to increase the overall network's efficiency always respecting the power's limitations imposed by the technical specifications of the network's BSs. Consequently, our under consideration problem is an optimization problem of a CDMA network's efficiency as to overall downlink throughput with variables the power allocations in the network's cells and the overall powers provided by the network's BSs. For the problem's solution we considered that every user is not in movement and is served by only one BS every moment.

We solved this problem utilizing the Decomposition Theory. The under consideration problem is not easily decomposable because the SINR of a user is not only function of the power devoted by the BS which serves him and the overall power provided by this BS to its users, but it is function of the overall powers provided by the other BSs to their users too. Considering fixed the overall powers provided by the BSs to their users, we proved that the problem becomes decomposable. As a result the problem can be divided into as CLP (Cell Local Problem - CLP) problems as the number of the network's cells coordinated by another problem type MP (Master Problem - MP) according to the Decomposition Theory. The corresponding problem CLP of each cell, which is an optimization problem of the downlink resources allocation considering that the overall powers provided by the network's BSs to their users are stable, is solved by applying the Dual Decomposition resulting in a low complexity algorithm. The problem MP is searching the overall powers provided by BSs to their users given that the best solutions of all problems CLP aiming at the increase of the overall network's efficiency. Choosing the subgradient method and proving its coverage we ensure

that every BS will determine the power provided to its users (In fact the problem MP breaks as problems as the number of network's BSs). Summarizing, according to our algorithm each cell is forced as a distributed problem which is searching the overall power will be provided to its users and the way of power allocation aiming at the overall network's efficiency.

Finally the performance of our algorithm is evaluated through simulating numerical results indicate up to 56% overall downlink throughput increase as a result of the power allocation decrease up to 70%.

Key words: Cells, Femtocells, Macrocells, Two-Tier Femtocell Networks, Power Management, Decomposition Theory, Dual Decomposition, Subgradient Method

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υπεύθυνο καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας, τον κύριο Συμεών Παπαβασιλείου, ο οποίος μου εμπιστεύτηκε αυτό το θέμα, καθώς και τα μέλη του εργαστήριου Διαχείρισης και Βέλτιστου Σχεδιασμού Δικτύων Τηλεματικής (NETMODE) στο οποίο εκπόνησα τη διπλωματική μου. Μέσω του θέματος αυτού μου δόθηκε η δυνατότητα να διευρύνω τους ορίζοντες μου γνωρίζοντας νέες τεχνολογίες και νέα μαθηματικά μοντέλα και έπαιξε σημαντικό ρόλο στην απόφαση μου να συνεχίσω τις σπουδές μου πάνω στα δίκτυα επικοινωνιών στις Η.Π.Α.

Τη διπλωματική αυτή εργασία θα ήθελα να την αφιερώσω σε όλους τους ανθρώπους που έχουν όνειρα, τα διεκδικούν με θεμιτά μέσα και ξεπερνούν τις δυσκολίες που εμφανίζονται στη ζωή τους αποκτώντας μόνο δύναμη και εμπειρία από αυτές.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1 Εισαγωγή	15
1.1 Φεμτοκυψέλες	16
1.2 Ανοικτά θέματα προς μελέτη	18
1.2.1 Η κατανομή φασματος συχνοτητων και η διαχειριση των παρεμβολων	18
1.2.2 Η πολιτική πρόσβασης στις φεμτοκυψέλες	21
1.2.3 Κλησεις εκτακτης αναγκης	21
1.3 Ο τρόπος αντιμετώπισης των φεμτοκυψελών στην παρούσα διπλωματική εργασία.....	
2 Μοντέλο συστήματος και περιγραφή προβλήματος	23
2.1 Μοντέλο συστήματος και περιγραφή προβλήματος	23
3 Μέθοδος επίλυσης του υπό μελέτη προβλήματος GPB	28
3.1 Ανάπτυξη του συλλογισμού της μεθόδου επίλυσης του προβλήματος GPB.....	28
3.2 Διαχωρισμός του προβλήματος GPB σε υποπροβλήματα	29
3.2.1 Έλεγχος διαχωρισιμότητας του προβλήματος GPB	29
3.2.2 Ο τρόπος επίτευξης της διαχωρισιμότητας του προβλήματος GPB σε υποπροβλήματα	30
3.2.3 Διαχωρισμός του προβλήματος GPB σε υποπροβλήματα	30
3.3 Επίλυση του προβλήματος GPB.....	32
3.3.1 Το πρόβλημα CLP	32
3.3.2 Το πρόβλημα MP	36
3.4 Παρατηρήσεις	41
3.5 Αλγόριθμος επίλυσης του προβλήματος GPB	42
4 Αριθμητικά αποτελέσματα και ανάλυση	45
4.1 Αποτελέσματα προσομοίωσης	48
4.1.1 Παραλλαγές του 1ου σεναρίου	52
5 Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα	61
6 Βιβλιογραφία	63

1

Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια η ραγδαία ανάπτυξη των πολυμέσων (βιντεοκλήσεις, πρόσβαση στο διαδίκτυο, ροές βίντεο, κτλ) κάνει όλο και πιο επιτακτική την ανάγκη για μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων στα ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών. Συμφώνα με πρόσφατες έρευνες, περισσότερο από το 50% των τηλεφωνημάτων και περισσότερο από το 70% των υπηρεσιών δεδομένων πραγματοποιούνται στο εσωτερικό των κτιρίων. Όμως, οι χρηστές στο εσωτερικό των κτιρίων δεν έχουν ικανοποιητική κάλυψη με αποτέλεσμα να στρέφονται στη σταθερή τηλεφωνία. Ως εκ τούτου, η ανάγκη παροχής υψηλών ρυθμών μετάδοσης δεδομένων στο εσωτερικό των χώρων από τους παρόχους κινητής τηλεφωνίας είναι πιο απαραίτητη από ποτέ.

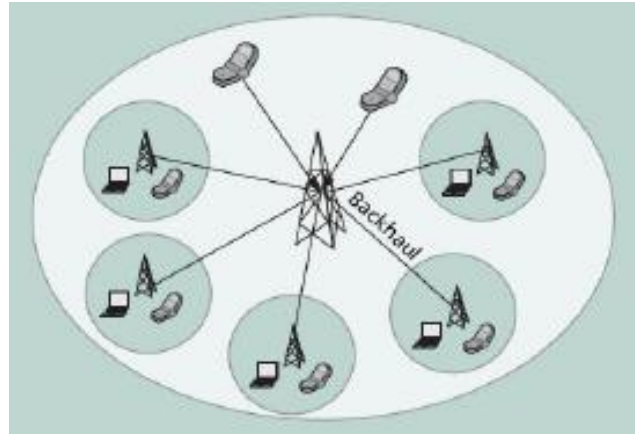
Η ανάγκη για μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων στα κυψελωτά συστήματα οδήγησε τους παρόχους στην αναζήτηση και εφαρμογή καινούριων τεχνολογιών. Ο ασφαλέστερος τρόπος για να αυξηθεί η συνολική χωρητικότητα (bps) ενός ασύρματου συστήματος επικοινωνιών είναι φέρνοντας πομπό και δέκτη όσο το δυνατόν πιο κοντά μεταξύ τους. Αυτός ο τρόπος σκέψης οδήγησε σε εφαρμογές, όπως οι μικροκυψέλες, κατανεμημένες κεραίες, αναμεταδότες και άλλα. Η πιο πρόσφατη λιγότερη ακριβή και πιο αποδοτική ως προς την αύξηση της συνολικής χωρητικότητας του δικτύου εφαρμογή που ικανοποιεί αυτόν τον τρόπο σκέψης είναι οι 'φεμτοκυψέλες' (femtocells) ή όπως αλλιώς καλούνται 'οικιακοί ΣΒ' [1].

Στην παρούσα ενότητα αρχικά αναπτύσσεται η έννοια της φεμτοκυψέλης και στη συνέχεια παρατίθενται τα πλεονεκτήματα των φεμτοκυψελών και η ανάγκη ύπαρξής τους. Κατόπιν παρουσιάζονται ορισμένα από τα ανοιχτά θέματα προς

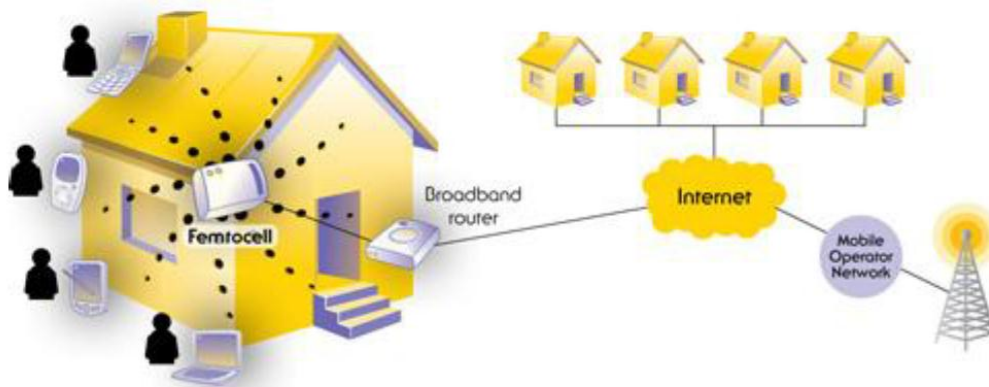
μελέτη στις φεμτοκυψέλες. Τέλος, γίνεται αναφορά στον τρόπο αντιμετώπισης των φεμτοκυψελών στην παρούσα διπλωματική.

1.1 Φεμτοκυψέλες

Οι φεμτοκυψέλες ή όπως αλλιώς καλούνται 'οικιακοί ΣΒ' είναι ασύρματα σημεία πρόσβασης (φέμτο-ΣΒ) χαμηλής ισχύος και μικρής ακτίνας κάλυψης, τα οποία λειτουργούν σε καθορισμένο φάσμα και εγκαθίστανται από τους ίδιους τους χρήστες. Επιτρέπουν στον πάροχο του δικτύου να βελτιώσει σημαντικά την κάλυψη του σε εσωτερικούς χώρους, ειδικά όπου η πρόσβαση είναι περιορισμένη ή ανύπαρκτη (κατοικίες, μετρό, εταιρείες, κτλ). Ακόμη συντελούν στην αποσυμφόρηση του φορτίου της μακροκυψέλης. Με το να εξυπηρετούνται οι χρήστες εντός των κτιρίων από τις φεμτοκυψέλες, μειώνεται ο αριθμός των χρηστών της μακροκυψέλης με αποτέλεσμα η μακροκυψέλη να αποδίδει τους πόρους της σε μικρότερο αριθμό χρηστών βελτιώνοντας σημαντικά την ποιότητα εξυπηρέτησης τους [1]. Συνεπώς, οι φεμτοκυψέλες δε συντελούν μόνο στη βελτίωση κάλυψης του δικτύου σε εσωτερικούς χώρους αλλά και στην αύξηση της συνολικής απόδοσης του δικτύου. Οι φεμτοκυψέλες συνδέονται με τον πάροχο του δικτύου με ευρυζωνική σύνδεση όπως DSL ή καλωδιακά. Οι φεμτοκυψέλες είναι συμβατές με τα κινητά μας τηλέφωνα, τους υπολογιστές μας και για γενικά με κάθε 3G συσκευή. Εξαιτίας της μικρής απόστασης πομπού και δέκτη οι φεμτοκυψέλες εκπέμπουν σε χαμηλή ισχύ. Η χαμηλή ισχύς οδηγεί σε μικρές παρεμβολές στους χρήστες και σε παράταση του χρόνου ζωής της μπαταρίας των τηλεφώνων μας καθώς και των συσκευών που εξυπηρετούνται από αυτές, όπως οι φορητοί υπολογιστές που τις χρησιμοποιούν για να έχουν πρόσβαση στο διαδίκτυο .



Σχήμα 1: Στην περιοχή κάλυψης της μακροκυψέλης έχουν εγκατασταθεί φεμτοκυψέλες με στοχο τη βελτίωση κάλυψης του δικτύου.



Σχήμα 2: Οι φεμτοκυψέλες είναι ασύρματα σημεία πρόσβασης χαμηλής ισχύος και μικρής ακτίνας κάλυψης που λειτουργούν σε καθορισμένο φάσμα και επιτρέπουν στον πάροχο του δικτύου να βελτιώσει την κάλυψη του με τον οποίο συνδέονται με DSL ή καλωδιακές ευρυζωνικές συνδέσεις.

Επιπλέον, έχουν θετικές επιπτώσεις στις κεφαλαιουχικές δαπάνες και στα λειτουργικά έξοδα. Μια πρόσφατη μελέτη έδειξε ότι τα έξοδα κλιμακώνονται από \$60000/χρονο/μακροκυψελη σε μόλις \$200/χρονο/φεμτοκυψελη. Η ανάπτυξη των φεμτοκυψελών θα μειώσει την ανάγκη για επιπρόσθετους μακροκυψέλες. Επιπρόσθετα, από άποψη εμπορικού ανταγωνισμού οι φεμτοκυψέλες είναι σημαντικές, γιατί οι πάροχοι κινητής τηλεφωνίας βελτιώνοντας σημαντικά την κάλυψη τους στο εσωτερικό των κτιρίων και προσφέροντας χαμηλότερες τιμές για κλήσεις ή υπηρεσίες δεδομένων από εσωτερικούς χώρους, προσπαθούν να

αντικαταστήσουν τη σταθερή τηλεφωνία και να ανταποκριθούν ανταγωνιστικά στις προσφορές WiFi και VoIP.

Ανάλογα με την πολιτική πρόσβασης που ακολουθείται σε μια φεμτοκυψέλη, οι φεμτοκυψέλες μπορεί να είναι [1]:

- **Φεμτοκυψέλη κλειστής πρόσβασης (Closed Access Femtocell):** Έχουν πρόσβαση μόνο οι εγγεγραμμένοι χρήστες σε αυτήν, όπως τα μέλη μιας οικογενείας, το προσωπικό μιας εταιρείας.
- **Φεμτοκυψέλη ανοικτής πρόσβασης (Open Access Femtocell):** Έχει πρόσβαση οποιοσδήποτε χρήστης βρίσκεται εντός της εμβέλειας της.
- **Φεμτοκυψέλη υβριδικού τύπου (Hybrid Access Femtocell):** Ένα μέρος των πόρων της διατίθεται για πρόσβαση κλειστού τύπου, δηλαδή στους εγγεγραμμένους χρήστες σε αυτήν, και το υπόλοιπο μέρος των πόρων για πρόσβαση ανοικτού τύπου, δηλαδή σε μη εγγεγραμμένους χρήστες που βρίσκονται στην εμβέλεια της.

1.2 Ανοικτά θέματα προς μελέτη

Σ' αυτή την ενότητα αναπτύσσουμε ορισμένα από τα ανοιχτά θέματα προς μελέτη σε δίκτυα δύο επιπέδων, δηλαδή σε δίκτυα που αποτελούνται από μακροκυψέλες και φεμτοκυψέλες, οι οποίες βρίσκονται στην περιοχή κάλυψης των μακροκυψελών.

1.2.1 Η κατανομή φασματος συχνοτήτων και η διαχείριση των παρεμβολών

Ένα μεγάλο ερώτημα που τίθεται είναι πως θα κατανεμηθεί το φάσμα συχνοτήτων ώστε να αξιοποιηθεί το διαθέσιμο φάσμα συχνοτήτων όσο το δυνατόν περισσότερο. Η μέγιστη αξιοποίηση του φάσματος επιτυγχάνεται όταν οι κυψέλες διαμοιράζονται το ίδιο εύρος ζώνης συχνοτήτων, δηλαδή όταν οι φεμτοκυψέλες εκπέμπουν στο ίδιο φάσμα συχνοτήτων που εκπέμπει και η μακροκυψέλη. Σ' αυτή την περίπτωση υπάρχουν δυο τύποι παρεμβολών,

- οι ενδοκυψελικές παρεμβολές (cross-tier interference), που δημιουργούνται μεταξύ των στοιχείων της ίδιας κυψέλης, και

- οι διακυψελικές παρεμβολές (co-tier interference), που δημιουργούνται μεταξύ διαφορετικών κυψελών. Όσο πιο απομακρυσμένες είναι οι κυψέλες, τόσο πιο ασθενείς είναι οι παρεμβολές αυτές.

Άρα το αμέσως επόμενο ερώτημα που γεννιέται είναι πως μπορούμε να μετριάσουμε τις παρεμβολές. Λόγω της μικρής απόστασης πομπού και δέκτη, οι φεμτοκυψέλες εκπέμπουν σε χαμηλή ισχύ με αποτέλεσμα να προκαλούν μικρές παρεμβολές.

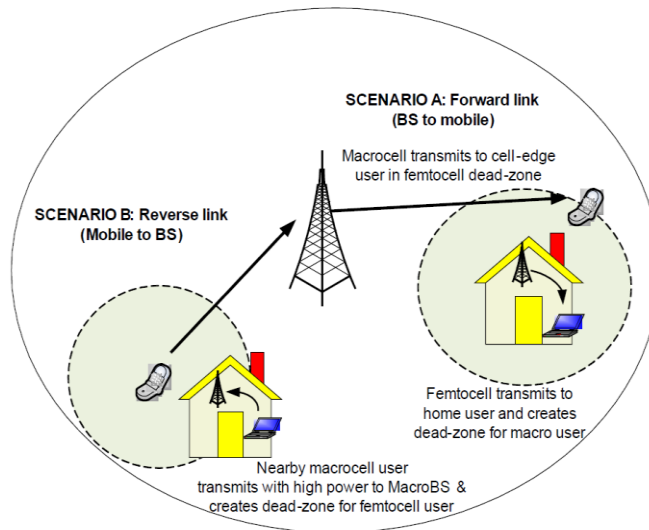
Στα δίκτυα δυο επιπέδων οι μεγάλοι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων οφείλονται στην αποδοτική επαναχρησιμοποίηση του φάσματος. Σ' αυτό συμβάλουν καθοριστικά οι μικρές παρεμβολές που προκαλούνται από τις φεμτοκυψέλες λόγω της χαμηλής ισχύος με την οποία εκπέμπουν.

1.2.2 Η πολιτική πρόσβασης στις φεμτοκυψέλες

Ένα άλλο θέμα που μελετάται είναι ποια πολιτική πρόσβασης πρέπει να ακολουθηθεί στις φεμτοκυψέλες.

- **Σε φεμτοκυψέλες κλειστού τύπου**, πρόσβαση έχουν μόνο οι εγγεγραμμένοι χρήστες σ' αυτές. Ένας μη εγγεγραμμένος χρήστης δεν μπορεί να έχει πρόσβαση σε μια φεμτοκυψέλη κλειστού τύπου ακόμη και αν μπορεί να του παρέχει καλύτερη κάλυψη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργούνται σε ορισμένες περιπτώσεις ισχυρές παρεμβολές στους χρήστες, οι οποίες να μην τους επιτρέπουν την κάλυψη τους από το δίκτυο (οι νεκρές ζώνες του δικτυού). Στο σχήμα 3 απεικονίζονται δυο περιπτώσεις χρηστών στους όποιους οι παρεμβολές είναι αρκετά ισχυρές με αποτέλεσμα να καθιστούν αδύνατη την κάλυψη τους από το δίκτυο. Και στις δυο περιπτώσεις ένας μη εγγεγραμμένος χρήστης (χρήστης μακροκυψέλης – macrocell user) βρίσκεται στην περιοχή εμβελείας μιας φεμτοκυψέλης. Το σενάριο Β αφορά την άνω ζεύξη (reverse link). Συγκεκριμένα, ο μη-εγγεγραμμένος χρήστης εκπέμπει με πολύ υψηλή ισχύ προς το μάκρο-ΣΒ με αποτέλεσμα να δημιουργεί πολύ μεγάλες παρεμβολές σε γειτονικούς εγγεγραμμένους χρήστες της φεμτοκυψέλης (χρήστες φεμτοκυψέλης – femtocell user) και κατ' επέκταση να μην είναι δυνατή η κάλυψη τους από το δίκτυο. Το σενάριο Α αφορά την κάτω ζεύξη (forward link). Συγκεκριμένα, ο φέμτο-ΣΒ εκπέμπει με πολύ μεγαλύτερη ισχύ σε σχέση με αυτή

που διαθέτει ο μάκρο-ΣΒ στον μη εγγεγραμμένο χρήστη με αποτέλεσμα να του δημιουργεί πολύ μεγάλες παρεμβολές και κατ' επέκταση να μην είναι δυνατή η κάλυψη του από το δίκτυο.



Σημια 3: Το σενάρια A και B αποτελούν δυο περιπτώσεις νεκρών ζωνών του δικτύου. Το σενάρια B αφορά την άνω ζεύξη (reverse link). Συγκεκριμένα, ο μη-εγγεγραμμένος χρήστης (macrocell user) εκπέμπει με πολύ υψηλή ισχύ προς το μάκρο-ΣΒ με αποτέλεσμα να δημιουργεί πολύ μεγάλες παρεμβολές σε γειτονικούς εγγεγραμμένους χρήστες της φεμτοκυψέλης (femtocell users) και κατ' επέκταση να μην είναι δυνατή η κάλυψη τους από το δίκτυο. Το σενάρια A αφορά την κάτω ζεύξη (forward link). Συγκεκριμένα, ο φέμτο-ΣΒ εκπέμπει με πολύ μεγαλύτερη ισχύ σε σχέση με αυτή που διαθέτει ο μάκρο-ΣΒ στον μη εγγεγραμμένο χρήστη με αποτέλεσμα να του δημιουργεί πολύ μεγάλες παρεμβολές και κατ' επέκταση να μην είναι δυνατή η κάλυψη του από το δίκτυο.

Επιπλέον με κλειστού τύπου πρόσβαση δεν οδηγούμαστε σε σημαντική αποσυμφόρηση του φορτίου της μακροκυψέλης. Αυτό έχει ως συνέπεια να οδηγούμαστε σε χαμηλότερο συνολικό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων δικτύου σε σχέση με τις άλλες πολιτικές πρόσβασης. Όμως, μ' αυτόν τον τύπο πρόσβασης δεν τίθενται θέματα ασφάλειας για τους χρήστες.

- Σε φεμτοκυψέλες ανοικτού τύπου πρόσβασης, πρόσβαση έχουν όλοι οι χρήστες που βρίσκονται στην εμβέλεια τους. Σ' αυτόν τον τύπο πρόσβασης ένας χρήστης συνδέεται στο ΣΒ που του προσφέρει την καλύτερη κάλυψη με

αποτέλεσμα να μην έχουμε τις νεκρές ζώνες που δημιουργούνται με την πολιτική πρόσβασης κλειστού τύπου. Επιπλέον μ' αυτή την πολιτική πρόσβασης οδηγούμαστε σε σημαντική αποσυμφόρηση του φορτίου της μακροκυψέλης και κατ' επέκταση σε υψηλότερο συνολικό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων δικτύου. Ωστόσο σε πρόσβαση ανοικτού τύπου τίθενται θέματα ασφάλειας των χρηστών. Επιπρόσθετα θα πρέπει να μεριμνούμε οι εγγεγραμμένοι χρήστες να εξυπηρετούνται πάντα από τους αντίστοιχους φέμτο-ΣΒ και να μην τους βρίσκουν ποτέ κατειλημμένους. Από τα παραπάνω γίνεται προφανές ότι για να γίνει η συγκεκριμένη πολιτική πρόσβασης ελκυστική από τους χρήστες του δικτύου θα πρέπει να είναι μικρότερο το πόσο που θα πρέπει να πληρώνουν στους παρόχους σε σχέση με την πολιτική κλειστής πρόσβασης που τους παρέχει μεγάλη ασφάλεια. Επιπλέον, αφού όλοι οι χρήστες μπορούν να έχουν πρόσβαση στις φεμτοκυψέλες, αυξάνεται ο αριθμός των διαπομπών (handovers) με αποτέλεσμα να αυξάνεται και η πιθανότητα μια διαπομπή να αποτύχει αν η λίστα των γειτονικών ΣΒ ενός χρήστη δεν ενημερώνεται σωστά και έγκαιρα. Ιδιαίτερο πρόβλημα εμφανίζεται όταν ο χρήστης κινείται με μεγάλη ταχύτητα και δεν προλαβαίνει τις απαραίτητες μεταβάσεις ανάμεσα στις φεμτοκυψέλες και στην μακροκυψέλη. Ο αριθμός των διαπομπών μπορεί να μειωθεί αν οι φεμτοκυψέλες μειώνουν τις ισχύεις εκπομπής τους όταν δεν έχουν κλήσεις ή υπηρεσίες δεδομένων να εξυπηρετήσουν.

- **Σε φεμτοκυψελες υβριδικού τύπου**, πρόσβαση έχουν όλοι οι χρήστες που βρίσκονται στην εμβέλεια τους. Ένα μέρος των πορών μιας φεμτοκυψέλης υβριδικού τύπου αφιερώνεται στους εγγεγραμμένους χρήστες της και το υπόλοιπο μέρος στους μη εγγεγραμμένους χρήστες της. Οι πάροχοι στρέφονται σ' αυτήν την πολιτική πρόσβασης γιατί εξασφαλίζεται κάθε στιγμή η εξυπηρέτηση των εγγεγραμμένων χρηστών καθώς και η αποσυμφόρηση του φορτίου της μακροκυψέλης.

1.2.3 Κλήσεις έκτακτης ανάγκης

Κατά τη διάρκεια κλήσεων έκτακτης ανάγκης οι κυψέλες θα πρέπει να ενημερώνουν τον πάροχο του δικτύου για τη γεωγραφική θέση του χρήστη που

πραγματοποιεί την κλήση ανάγκης. Το ερώτημα που εγείρεται από το γεγονός αυτό είναι πως οι φεμτοκυψέλες θα γνωρίζουν τις γεωγραφικές θέσεις των χρηστών. Ένας τρόπος είναι να διαθέτουν GPS. Επιπλέον, στις κλήσεις έκτακτης ανάγκης από μη εγγεγραμμένους χρήστες εγείρονται ερωτήματα, όπως αν θα πρέπει να εξυπηρετούνται από φεμτοκυψέλες κλειστού τύπου πρόσβασης σε περιπτώσεις μη επαρκής κάλυψης από την μακροκυψέλη.

1.3 Ο τρόπος αντιμετώπισης των φεμτοκυψελών στην παρούσα διπλωματική εργασία

Στην παρούσα διπλωματική εξετάζουμε ένα δίκτυο δυο επίπεδων που αποτελείται από μια μακροκυψέλη και φεμτοκυψέλες κλειστής πρόσβασης [1], οι οποίες βρίσκονται στην περιοχή κάλυψης της μακροκυψέλης. Για τη μέγιστη δυνατή αξιοποίηση του διαθέσιμου φάσματος θεωρούμε ότι η μακροκυψέλη και οι φεμτοκυψέλες διαμοιράζονται το ίδιο εύρος ζώνης συχνοτήτων. Στη συγκεκριμένη εργασία εξετάζουμε μόνο την κάτω ζεύξη. Για να μειώσουμε τις παρεμβολές των χρηστών στην κάτω ζεύξη, θεωρούμε ότι οι συνολικές ισχύεις που διαθέτουν οι ΣΒ του δικτύου δεν είναι σταθερές, αλλά μεταβάλλονται με στόχο της αύξηση του συνολικού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων του δικτύου [2].

2

Μοντέλο συστήματος και περιγραφή προβλήματος

Στο παρόν κεφάλαιο, αρχικά, θα περιγραφεί το μοντέλο συστήματος που υιοθετήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία. Στη συνέχεια, θα αναλυθεί ο σκοπός αυτής της εργασίας και θα οριστεί το υπό μελέτη πρόβλημα.

2.1 Μοντέλο συστήματος και περιγραφή προβλήματος

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζουμε τη διαχείριση της ισχύος και την κατανομή της στην κάτω ζεύξη από τους ΣΒ ενός ετερογενές CDMA ασύρματου δικτύου δύο επιπέδων, που αποτελείται από μία μακροκυψέλη (macrocell) και $|C|$ φεμτοκυψέλες (femtocells). Σε κεντρικό σημείο κάθε κυψέλης c , $c=0,1,2,\dots,|C|$ βρίσκεται ένας Σταθμός Βάσης c (ΣΒ c). Συγκεκριμένα, από εδώ και στο εξής, με τον όρο μακροκυψέλη ($c=0$) θα εννοούμε την περιοχή κάλυψης του μάκρο-ΣΒ ($c=0$), ενώ με τον όρο φεμτοκυψέλη ($c \neq 0$) την περιοχή κάλυψης του εκάστοτε φέμτο-ΣΒ $c, c \neq 0$. Ο ΣΒ κάθε κυψέλης c εξυπηρετεί $|S_c|$ χρήστες, οι οποίοι αποτελούν τους χρήστες της κυψέλης c . Σ' αυτό το πρόβλημα θεωρούμε πως κάθε χρήστης εξυπηρετείται από ένα μόνο ΣΒ ανά χρονική στιγμή. Θεωρούμε επίσης, πως η περιοχή κάλυψης των $|C|$ φεμτοκυψελών εμπεριέχεται στην περιοχή κάλυψης της μακροκυψέλης. Συνεπώς, ένας χρήστης που εξυπηρετείται από την φεμτοκυψέλη k θα βρίσκεται και στην περιοχή κάλυψης της μακροκυψέλης. Αντίστοιχα, ένας χρήστης της μακροκυψέλης μπορεί να βρίσκεται και στην περιοχή κάλυψης ενός φέμτο-ΣΒ k . Επιπλέον, θεωρούμε πως όλοι οι χρήστες είναι στατικοί, δηλαδή παραμένουν ακίνητοι σε ολόκληρη τη διάρκεια που εξετάζουμε. Για την επικοινωνία στην κάτω ζεύξη, ο ΣΒ κάθε κυψέλης c εκπέμπει με ισχύ μέγιστη

δυνατής τιμής $P_{c,\max}$, την οποία και διαμοιράζει στους χρήστες του. Συνεπώς το άθροισμα των κατανεμημένων ισχύων στους χρήστες της κάθε κυψέλης c δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερο από το $P_{c,\max}$. Επίσης, η μέγιστη αυτή ισχύς εκπομπής $P_{c,\max}$ δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερη από την ανώτατη ισχύ P_c^{MAX} με την οποία ο ΣΒ της κυψέλης c μπορεί να εκπέμψει σύμφωνα με τις τεχνικές προδιαγραφές του. Σε κάθε χρήστη j αναθέτουμε μία συνάρτηση ευχαρίστησης $u_{c,j}$ (το utility του χρήστη $j \in c$), η οποία και αντιπροσωπεύει με ένα κανονικοποιημένο τρόπο, $u_{c,j} \in (0,1)$, την ευχαρίστηση του χρήστη από το δίκτυο με βάση την ποιότητα εξυπηρέτησης (Quality of Service - QoS) του [3], [4]. Υποθέτουμε ότι η συνάρτηση ευχαρίστησης $u_{c,j}$ έχει τις ακόλουθες ιδιότητες:

1. $u_{c,j}$ είναι κυρτή, αύξουσα συνάρτηση του ρυθμού μετάδοσης της κάτω ζεύξης της κυψέλης c προς τον χρήστη j .
2. $u_{c,j}$ είναι δύο φορές συνεχώς διαφορίσιμη.
3. $u_{c,j}(0) = 0$.
4. $u_{c,j}$ οριοθετείται παραπάνω.

Επιπλέον, η συνάρτηση ευχαρίστησης $u_{c,j}$ ορίζεται ως εξής $u_{c,j} = R_{c,j}^{MAX} \cdot f_{c,j}(\gamma_{c,j}(P_{c,j}))$, όπου $R_{c,j}^{MAX}$ είναι ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης κάτω ζεύξης, $f_{c,j}$ η συνάρτηση επιτυχούς μετάδοσης του πακέτου, $\gamma_{c,j}$ ο σηματοθορυβικός λόγος του χρήστη j της κυψέλης c και $P_{c,j}$ είναι η ισχύς που κατανέμεται στο χρήστη $j \in c$.

Ο σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι να βρούμε την συνολική κατανομή ισχύος σε ολόκληρο το ενοποιημένο σύστημα $\bar{P} = (\bar{P}_0, \bar{P}_1, \dots, \bar{P}_c, \dots, \bar{P}_{|C|})$, δηλαδή εκείνη τη μέγιστη ισχύς εκπομπής των κυψελών του δικτύου $\bar{P}_{\max} = (P_{0,\max}, P_{1,\max}, \dots, P_{c,\max}, \dots, P_{|C|,\max})$, και εκείνη την ανάθεση ισχύων στους χρήστες της κάθε κυψέλης $\bar{P}_c = (P_{c,1}, P_{c,2}, \dots, P_{c,|S_c|})$, που μεγιστοποιεί το άθροισμα των συναρτήσεων ευχαρίστησης όλων των χρηστών του συστήματος (δηλ. το άθροισμα των συναρτήσεων ευχαρίστησης των χρηστών όλων των κυψελών). Το πρόβλημα αυτό (Global Problem A - GPA) ορίζεται ως εξής:

GPA:

$$\begin{aligned} \max_P \quad & \sum_{c \in C} \sum_{j \in S_c} w_{c,j} u_{c,j}(\gamma_{c,j}(P_{c,j})) \\ \text{s.t} \quad & \sum_{j \in S_c} P_{c,j} \leq P_{c,\max} \quad , \forall c \in C \\ & 0 \leq P_{c,\max} \leq P_c^{MAX} \quad , \forall c \in C \end{aligned}$$

όπου $\overline{P}_c = (P_{c,1}, P_{c,2}, \dots, P_{c,|S_c|})$ είναι η κατανομή ισχύος στους χρήστες της κυψέλης c και w_j είναι μια μεταβλητή η οποία αντικατοπτρίζει τις διάφορες πολιτικές τις οποίες μπορεί να εισάγει είτε ο πάροχος του δικτύου (π.χ το προφίλ του χρήστη (χρυσός χρήστης,...),.....) είτε ο ίδιος ο κόμβος (π.χ διάρκεια μπαταρίας,.....).

Υπόθεση 1: Σύμφωνα με την πρόταση 1 της μελέτης [5], η βέλτιστη λύση του προβλήματος ανάθεσης πόρων στην κάτω ζεύξη ενός CDMA δικτύου, δηλαδή η μεγιστοποίηση του αθροίσματος των συναρτήσεων ευχαρίστησης των χρηστών μιας κυψέλης c , παρατηρείται όταν ο ΣΒ c εκπέμπει με την μέγιστη ισχύς εκπομπής $P_{c,\max}$.

Γι' αυτό το λόγο ορίζουμε ότι κάθε ΣΒ $c \in C$ θα διαθέτει στους χρήστες του ισχύ ίση με $P_{c,\max}$. Με την παραδοχή αυτή, στο υπόλοιπο κείμενο θα αναφερόμαστε στις ισχύεις $P_{c,\max}$, $c \in C$ ως τις συνολικές ισχύεις που διαθέτουν οι ΣΒ στους χρήστες τους.

Θεωρούμε πως στο σύστημα 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 Γκαουσιανού θορύβου (AWGN). Επίσης, ορίζουμε με $G_{c,j}$ το κέρδος καναλιού μεταξύ της κυψέλης c και του χρήστη j , αντικατοπτρίζοντας την μακροχρόνια συμπεριφορά του κέρδους του καναλιού. Φαινόμενα ταχείας διάλειψης μπορούν να ενσωματωθούν με χρήση κατάλληλων μέσων όρων [6]. Επικεντρωνόμαστε σε μία χρονοσχημή υποθέτοντας πως το κέρδος καναλιού, ο περιβάλλον θόρυβος και η παρεμβολή σε κάθε κινητό χρήστη

παραμένουν αμετάβλητα για αυτή την περίοδο [5], [11]. Συνεπώς, ο σηματοθορυβικός λόγος $\gamma_{c,j}$ θα δίνεται ως εξής:

$$\gamma_{c,j} = \frac{G_{c,j}P_{c,j}}{G_{c,j}(P_{c,\max} - P_{c,j}) + \sum_{c' \in C, c' \neq c} G_{c',j}P_{c',\max} + n_o} \Rightarrow \gamma_{c,j} = \frac{G_{c,j}P_{c,j}}{-G_{c,j}P_{c,j} + G_{c,j}P_{c,\max} + \sum_{c' \in C, c' \neq c} G_{c',j}P_{c',\max} + n_o} \Rightarrow$$

$$\gamma_{c,j} = \frac{G_{c,j}P_{c,j}}{-G_{c,j}P_{c,j} + \sum_{c \in C} G_{c,j}P_{c,\max} + n_o} \Rightarrow \gamma_{c,j} = \frac{G_{c,j}P_{c,j}}{-G_{c,j}P_{c,j} + I_{c,j}(P_{\max})} \Rightarrow \gamma_{c,j} = \gamma_{c,j}(P_{c,j}, \overline{P_{\max}})$$

όπου το διάνυσμα $\overline{P_{\max}} = (P_{0,\max}, P_{1,\max}, \dots, P_{c,\max}, \dots, P_{|C|,\max})$ περιγράφει το σύνολο των συνολικών ισχύων που διαθέτουν οι ΣΒ στους χρήστες τους, $G_{c,j}$ και $I_{c,j}(\overline{P_{\max}}) = \sum_{c \in C} G_{c,j}P_{c,\max} + n_o$ είναι οι παρεμβολές στο χρήστη $j \in c$. Επιπλέον, το

GPA παίρνει την εξής μορφή (Global Problem B - GPB):

$$\mathbf{GPB:} \quad \max_{\overline{P}} \sum_{c \in C} \sum_{j \in S_c} w_{c,j} u_{c,j}(\gamma_{c,j}(P_{c,j})) \quad (1)$$

$$\mathbf{s.t} \quad \sum_{j \in S_c} P_{c,j} = P_{c,\max}, \forall c \in C \quad (2)$$

$$0 \leq P_{c,\max} \leq P_c^{MAX}, \forall c \in C \quad (3)$$

Υπόθεση 2: Δεδομένης της Υπόθεσης 1, ότι η ισχύς μετάδοσης των κυψελών είναι σταθερή και ίση με $P_{c,\max}$, υποθέτουμε πως οι μεταβλητές $\overline{P_{\max}}$ και \overline{P} δεν είναι αλληλοεξαρτώμενες και άρα το πρόβλημα **GPB** είναι κυρτό ως προς την ισχύ των χρηστών.

Τέλος, ολοκληρώνοντας αυτό το κεφάλαιο είναι σημαντικό να παρατηρήσουμε ότι :

1. Οι μεταβλητές του υπό μελέτη προβλήματος GPB είναι τα διανύσματα κατανομής ισχύος στις κυψέλες του συστήματος, $\overline{P} = (\overline{P}_0, \overline{P}_1, \dots, \overline{P}_c, \dots, \overline{P}_{|C|})$ και οι συνολικές ισχύεις που διαθέτουν οι ΣΒ στους χρήστες τους, $\overline{P_{\max}} = (P_{0,\max}, P_{1,\max}, \dots, P_{c,\max}, \dots, P_{|C|,\max})$.

2. Ο σηματοθορυβικός λόγος και κατ' επέκταση η συνάρτηση ευχαρίστησης του χρήστη j της κυψέλης c εξαρτάται όχι μόνο από την ισχύ που του κατανέμεται $P_{c,j}$, αλλά και από τις συνολικές ισχύεις $\overline{P_{\max}} = (P_{0,\max}, P_{1,\max}, \dots, P_{c,\max}, \dots, P_{|C|,\max})$ που διαθέτουν οι ΣΒ του δικτύου στους εκάστοτε χρήστες τους .

3. Στοχεύοντας στην μεγιστοποίηση του αθροίσματος των συναρτήσεων ευχαρίστησης όλων των χρηστών του συστήματος ουσιαστικά στοχεύουμε στην αύξηση του συνολικού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων κάτω ζεύξης του δικτύου , αφού η $u_{c,j}$ είναι κυρτή, αύξουσα συνάρτηση του ρυθμού μετάδοσης της κάτω ζεύξης της κυψέλης c προς τον χρήστη j .

Στο επόμενο κεφάλαιο θα αναλυθεί η μέθοδος επίλυσης του υπό μελέτη προβλήματος GPB. Αρχικά, θα δοθεί συνοπτικά ο μέχρι τώρα τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος και στη συνέχεια θα αναπτυχθεί ο δικός μας προτεινόμενος αλγόριθμος επίλυσης του.

3

Μέθοδος επίλυσης του υπό μελέτη προβλήματος GPB

Σ' αυτό το κεφάλαιο, αρχικά, παρουσιάζεται ο μέχρι τώρα τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος τονίζοντας την πολυπλοκότητα του. Στη συνέχεια, αναλύεται ο δικός μας κατανεμημένος αλγόριθμος επίλυσης του, που βασίζεται στο διαχωρισμό του προβλήματος σε υποπροβλήματα. Συγκεκριμένα, δίνεται με λεπτομέρεια πρώτα ο τρόπος σκέψης μας ώστε να καταλήξουμε σ' αυτή τη μέθοδο επίλυσης, κατόπιν ο τρόπος που δείξαμε ότι το πρόβλημα είναι διαχωρίσιμο και τέλος η επίλυση του.

3.1 Ανάπτυξη του συλλογισμού της μεθόδου επίλυσης του προβλήματος GPB

Προκειμένου να λυθούν τέτοια προβλήματα βέλτιστης διαχείρισης πόρων σε CDMA ασύρματα δίκτυα έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία διάφορες τεχνικές. Μια τεχνική που χρησιμοποιείται ευρέως λέει ότι το σύστημα μπορεί να λυθεί μ' ένα κεντρικοποιημένο τρόπο. Σύμφωνα με τον τρόπο αυτό, θα μπορούσαμε να έχουμε ένα Κεντρικό Σημείο Εξυπηρέτησης (ΚΣΕ), το οποίο θα συλλέγει ολόκληρη την πληροφορία όλου του συστήματος και θα αποφασίζει βέλτιστα ποια πολιτική θα πρέπει να ακολουθηθεί. Είναι προφανές ότι ένας τέτοιος τρόπος επίλυσης θα απαιτεί μια συνεχή επικοινωνία του ΚΣΕ με τους ΣΒ καθώς και με τους χρήστες του δικτύου, με αποτέλεσμα να σπαταλάται ένα μεγάλο μέρος των πόρων του δικτύου για την επικοινωνία αυτή. Επιπλέον, το ΚΣΕ θα έχει να επεξεργαστεί ένα μεγάλο όγκο πληροφορίας. Για να είναι μικρός αυτός ο χρόνος επεξεργασίας, το ΚΣΕ θα πρέπει να διαθέτει πολύ γρήγορους επεξεργαστές και πολύ γρήγορες μνήμες. Η

δέσμευση μεγάλου μέρους των πόρων του δικτύου για την επικοινωνία του ΚΣΕ με τους ΣΒ και τους χρήστες του δικτύου καθώς και οι γρήγοροι επεξεργαστές και οι γρήγορες μήμες αυξάνουν το κόστος λύσης. Συνεπώς, ο κεντροκοποιημένος τρόπος επίλυσης εμφανίζει ένα πολύ μεγάλο βαθμό πολυπλοκότητας και είναι αρκετά δαπανηρός. Επιπλέον, τα ασύρματα δίκτυα είναι από τη φύση τους κατανεμημένα δίκτυα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ύπαρξη ενός ΚΣΕ να μην είναι συχνά εφικτή.

Η κατανεμημένη φύση των CDMA ασύρματων δικτύων μας ωθεί να ψάξουμε να βρούμε ένα κατανεμημένο τρόπο επίλυσης. Στην προσπάθεια μας να βρούμε ένα τέτοιο τρόπο λύσης σκεφτόμαστε πως μπορούμε να εκμεταλλευτούμε την ποιότητα συνεργασίας που γίνεται ήδη σε μια κυψέλη για να παράγουμε μια γενικότερη λύση. Γι' αυτό το λόγο σκεφτόμαστε να δούμε κάθε κυψέλη c ως ένα υποπρόβλημα (Cell Local Problem - CLP), το οποίο είναι ανεξάρτητο από τις άλλες κυψέλες. Αυτός ο τρόπος σκέψης μας οδηγεί να δούμε το αρχικό πρόβλημα GPB ως ένα σύνολο $|C|+1$ ίδιου τύπου υποπροβλημάτων (τύπου CLP) ανεξάρτητων μεταξύ τους, τα οποία θα συντονίζονται από ένα άλλο διαφορετικού τύπου πρόβλημα (Master Problem - MP) [12].

3.2 Διαχωρισμός του προβλήματος GPB σε υποπροβλήματα

Στη συγκεκριμένη παράγραφο δίνεται λεπτομερώς ο διαχωρισμός του αρχικού προβλήματος GPB σε ανεξάρτητα μεταξύ τους υποπροβλήματα καθώς και ο τρόπος με τον οποίο καθίσταται δυνατός αυτός ο διαχωρισμός.

3.2.1 Έλεγχος διαχωρισιμότητας του προβλήματος GPB

Ο διαχωρισμός του αρχικού προβλήματος GPB σε $|C|+1$ υποπροβλήματα ανεξάρτητα μεταξύ τους είναι εφικτός αν και μόνο αν το αρχικό πρόβλημα GPB είναι διαχωρίσιμο (decomposable). Για να είναι το αρχικό πρόβλημα GPB διαχωρίσιμο πρέπει και η κύρια συνάρτηση ($\max_{\vec{P}} \sum_{c \in C} \sum_{j \in S_c} w_{c,j} u_{c,j}(\gamma_{c,j}(P_{c,j}))$) και οι

περιορισμοί ($\sum_{j \in S_c} P_{c,j} = P_{c,\max} \forall c \in C, 0 \leq P_{c,\max} \leq P_c^{MAX} \forall c \in C$) να είναι διαχωρίσιμα.

Είναι προφανές ότι και οι δυο περιορισμοί αφορούν μόνο ισχύεις της εκάστοτε κυψέλης c και είναι ανεξάρτητοι από τις ισχύεις των άλλων κυψελών. Συνεπώς, οι περιορισμοί είναι διαχωρίσιμοι.

Όμως, η κύρια συνάρτηση δεν είναι διαχωρίσιμη γιατί ο σηματοθορυβικός λόγος $\gamma_{c,j}(P_{c,j}, \overline{P_{\max}})$ και κατ' επέκταση η συνάρτηση ευχαρίστησης $u_{c,j}$ του χρήστη j της κυψέλης c δεν είναι συνάρτηση μόνο ισχύων της εκάστοτε κυψέλης c ($P_{c,j}, P_{c,\max}$) αλλά και των συνολικών ισχύων των υπόλοιπων κυψελών του δικτύου ($P_{c',\max}, c' \in C$ και $c' \neq c$). Άρα, το πρόβλημα GPB δεν είναι διαχωρίσιμο.

Συνεπώς, πρέπει να βρούμε έναν τρόπο να διαχωρίσουμε το πρόβλημα. Στην επόμενη παράγραφο μελετάμε τους τρόπους και τους περιορισμούς που εισάγονται προκειμένου να το επιτύχουμε.

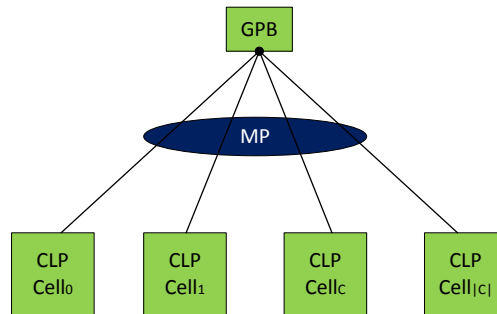
3.2.2 Ο τρόπος επίτευξης της διαχωρισιμότητας του προβλήματος GPB σε υποπροβλήματα

Υποθέτοντας ότι οι συνολικές ισχύεις $\overline{P_{\max}} = (P_{0,\max}, P_{1,\max}, \dots, P_{c,\max}, \dots, P_{|C|,\max})$ που διαθέτουν όλοι οι ΣΒ του δικτύου στους χρήστες τους είναι σταθερές, ο σηματοθορυβικός λόγος $\gamma_{c,j}$ και κατ' επέκταση η συνάρτηση ευχαρίστησης $u_{c,j}$ του χρήστη $j \in c$ είναι συνάρτηση μόνο της ισχύς $P_{c,j}$ που του κατανέμεται. Έτσι, θεωρώντας $P_{c,\max} = \text{σταθ.}, \forall c \in C$, η κύρια συνάρτηση γίνεται διαχωρίσιμη και κατ' επέκταση το πρόβλημα GPB διαχωρίσιμο.

3.2.3 Διαχωρισμός του προβλήματος GPB σε υποπροβλήματα

Θεωρώντας λοιπόν σταθερές τις συνολικές ισχύεις $\overline{P_{\max}}$ που διαθέτουν όλοι οι ΣΒ του δικτύου στους χρήστες τους, το αρχικό πρόβλημα GPB γίνεται διαχωρίσιμο και μπορεί να σπάσει σε $|C|+1$ ανεξάρτητα μεταξύ τους υποπροβλήματα CLP τα οποία θα συντονίζονται από ένα πρόβλημα MP [12]. Στο σχήμα 1 απεικονίζεται αυτός ο διαχωρισμός. Υπενθυμίζουμε ότι το αρχικό πρόβλημα GPB έχει δυο μεταβλητές, τα διανύσματα κατανομής ισχύος στις

κυψέλες του συστήματος $\overline{P} = (\overline{P}_0, \overline{P}_1, \dots, \overline{P}_c, \dots, \overline{P}_{|C|})$ καθώς και τις συνολικές ισχύεις που διαθέτουν οι ΣΒ στους χρήστες τους $\overline{P}_{\max} = (P_{0,\max}, P_{1,\max}, \dots, P_{c,\max}, \dots, P_{|C|,\max})$.



Σχήμα 4: Το αρχικό πρόβλημα GPB μπορεί να σπάσει σε $|C|+1$ ανεξάρτητα μεταξύ τους υποπροβλήματα CLP τα οποία συντονίζονται από ένα πρόβλημα MP.

Κάθε πρόβλημα CLP ψάχνει εκείνη την κατανομή ισχύος $\overline{P}_c = (P_{c,1}, P_{c,2}, \dots, P_{c,|S_c|})$ που μεγιστοποιεί το άθροισμα των συναρτήσεων ευχαρίστησης των χρηστών της εκάστοτε κυψέλης c , θεωρώντας σταθερές τις συνολικές ισχύεις \overline{P}_{\max} που διαθέτουν οι ΣΒ στους χρήστες τους. Στη συνέχεια, το εκάστοτε πρόβλημα CLP ενημερώνει το πρόβλημα MP για τη βέλτιστη επίλυση του.

Αντίστοιχα, το πρόβλημα MP ψάχνει εκείνες τις συνολικές ισχύεις $\overline{P}_{\max} = (P_{0,\max}, P_{1,\max}, \dots, P_{c,\max}, \dots, P_{|C|,\max})$ που οδηγούν στη μεγιστοποίηση του αθροίσματος των συναρτήσεων ευχαρίστησης των χρηστών όλων των κυψελών, δεδομένου των βέλτιστων επιλύσεων όλων των προβλημάτων CLP.

Η παραπάνω διαδικασία λειτουργεί επαναληπτικά με το κάθε πρόβλημα να ανατροφοδοτεί το άλλο, έως ότου καταλήξουμε στο διάνυσμα \overline{P}_{\max}^* που οδηγεί στη μεγιστοποίηση του αθροίσματος των συναρτήσεων ευχαρίστησης όλων των χρηστών του δικτύου.

3.3 Επίλυση του προβλήματος GPB

3.3.1 Το πρόβλημα CLP

Κάθε πρόβλημα CLP ψάχνει εκείνη την κατανομή ισχύος $\overline{P}_c = (P_{c,1}, P_{c,2}, \dots, P_{c,|S_c|})$ στην εκάστοτε κυψέλη c , η οποία μεγιστοποιεί το άθροισμα των συναρτήσεων ευχαρίστησης των χρηστών της υπό τον περιορισμό $\sum_{j \in S_c} P_{c,j} = P_{c,\max}$ και θεωρώντας σταθερές τις συνολικές ισχύεις \overline{P}_{\max} που διαθέτουν οι ΣΒ του δικτύου στους χρήστες τους. Συγκεκριμένα, το πρόβλημα CLP ορίζεται ως εξής:

$$\text{CLP:} \quad \max_{P_c} \sum_{j \in S_c} w_{c,j} u_{c,j}(\gamma_{c,j}(P_{c,j})) \quad (4)$$

$$\text{s.t} \quad \sum_{j \in S_c} P_{c,j} = P_{c,\max}, \forall c \in C \quad (5)$$

3.3.1.1 Αναζήτηση τρόπου επίλυσης του προβλήματος CLP

Διάφοροι τρόποι επίλυσης του παραπάνω προβλήματος έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία με χρήση διαφόρων τεχνικών. Στη μελέτη μας θα θεωρήσουμε την επίλυση σύμφωνα με το [5], η οποία επιλύει το πρόβλημα CLP βέλτιστα με χρήση Θεωρίας Μεγιστοποίησης Δικτύου και Λαγκρασιανών πολλαπλασιαστών.

Η μελέτη [5], εξετάζει την κατανομή ισχύος στην κάτω ζεύξη σ' ένα CDMA ασύρματο δίκτυο και εστιάζει σε μια μόνο κυψέλη. Συγκεκριμένα, αναζητεί εκείνη την κατανομή ισχύος στην κυψέλη που μεγιστοποιεί το άθροισμα των συναρτήσεων ευχαρίστησης των χρηστών της, όπως και ένα πρόβλημα CLP. Όμως, το υπό μελέτη δίκτυο στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι ένα ετερογενές CDMA ασύρματο δίκτυο δυο επιπέδων, που αποτελείται από μια μακροκυψέλη και $|C|$ φεμτοκυψέλες. Παρόλα αυτά, και σύμφωνα με το Λήμμα 1, η προτεινόμενη λύση του [5], μπορεί να εφαρμοστεί και στην περίπτωση ενός δι-επίπεδου ασύρματου CDMA συστήματος.

Λήμμα 1: Η μεθοδολογία βέλτιστης ανάθεσης πόρων στην κάτω ζεύξη ενός CDMA κελιού που προτείνεται στο [5], μπορεί να εφαρμοστεί για την μελέτη και επίλυση του CLP.

Απόδειξη:

Τόσο στη μελέτη [5], όσο και σ' ένα πρόβλημα CLP η συνάρτηση ευχαρίστησης ενός χρήστη είναι συνάρτηση μόνο του σηματοθορυβικού λόγου του. Θα δείξουμε ότι μπορούμε να εφαρμόσουμε τη μελέτη [5], για να επιλύσουμε ένα πρόβλημα CLP αποδεικνύοντας ότι ο σηματοθορυβικός λόγος του χρήστη και στις δυο περιπτώσεις έχει την ίδια μορφή.

- **1^η περίπτωση:** Το υπό μελέτη δίκτυο της μελέτης [5]

Σ' αυτή την περίπτωση, το δίκτυο αποτελείται από μια μόνο κυψέλη c . Σε κεντρικό σημείο της κυψέλης c βρίσκεται ένας ΣΒ (ΣΒ c). Ο ΣΒ c εξυπηρετεί $|S_c|$ χρήστες (οι χρήστες της κυψέλης c) και διαθέτει ισχύ $P_{c,max}$ στους χρήστες του. Επιπλέον, όλοι οι χρήστες εξυπηρετούνται από το μοναδικό ΣΒ c του δικτύου. Με βάση τα παραπάνω υπάρχουν δυο είδη παρεμβολών στους χρήστες, ο θόρυβος (n_o) και οι ενδοκυψελικές παρεμβολές ($G_{c,j}(P_{c,max} - P_{c,j})$) που οφείλονται στην ισχύ που αφιερώνει ο ΣΒ στους υπόλοιπους χρήστες του. Συνεπώς, ο σηματοθορυβικός λόγος ενός χρήστη j της κυψέλης c είναι:

$$\gamma_{c,j} = \frac{\text{χρήσιμη_ισχύς}}{\text{παρεμβολές}} = \frac{G_{c,j}P_{c,j}}{G_{c,j}(P_{c,max} - P_{c,j}) + n_o} = \gamma_{c,j}(P_{c,j}) \quad (6)$$

Δεδομένου ότι έχουν θεωρηθεί $P_{c,max}$, $G_{c,j}$, n_o σταθερά, ο σηματοθορυβικός λόγος $\gamma_{c,j}$ ενός χρήστη j της κυψέλης c είναι συνάρτηση μόνο της ισχύς $P_{c,j}$ που του αποδίδεται.

- **2^η περίπτωση:** Το υπό μελέτη δίκτυο της παρούσας διπλωματικής εργασίας

Σ' αυτή την περίπτωση, το δίκτυο αποτελείται από μια μακροκυψέλη και $|C|$ φεμτοκυψέλες. Σε κεντρικό σημείο κάθε κυψέλης c βρίσκεται ένας ΣΒ (ΣΒ c). Κάθε

ΣΒ c εξυπηρετεί $|S_c|$ χρήστες (οι χρήστες της κυψέλης c) και διαθέτει ισχύ $P_{c,\max}$ στους χρήστες του. Επιπλέον κάθε χρήστης του δικτύου εξυπηρετείται από ένα μόνο ΣΒ. Με βάση τα παραπάνω, υπάρχουν τρία είδη παρεμβολών στους χρήστες μιας κυψέλης c , ο θόρυβος (n_o), οι ενδοκυψελικές παρεμβολές ($G_{c,j}(P_{c,\max} - P_{c,j})$) που οφείλονται στην ισχύ που αφιερώνει ο ΣΒ c στους υπόλοιπους χρήστες του και οι διακυψελικές παρεμβολές ($\sum_{c' \in C, c' \neq c} G_{c',j} P_{c',\max}$) που οφείλονται στις ισχύεις των άλλων ΣΒ του δικτύου. Συνεπώς, σ' αυτή την περίπτωση ο σηματοθορυβικός λόγος ενός χρήστη j της κυψέλης c είναι:

$$\gamma_{c,j} = \frac{\text{χρήσιμη_ισχύς}}{\text{παρεμβολές}} = \frac{G_{c,j} P_{c,j}}{G_{c,j}(P_{c,\max} - P_{c,j}) + \sum_{c' \in C, c' \neq c} G_{c',j} P_{c',\max} + n_o} = \gamma_{c,j}(P_{c,j}) \quad (7)$$

Δεδομένου ότι έχουν θεωρηθεί $n_o, P_{c,\max}, G_{c,j} \forall c \in C$ σταθερά και σ' αυτή την περίπτωση ο σηματοθορυβικός λόγος ενός χρήστη j της κυψέλης c είναι συνάρτηση μόνο της ισχύς $P_{c,j}$ που του αποδίδεται.

Από τις δυο παραπάνω περιπτώσεις προκύπτει ότι και οι δυο σηματοθορυβικοί λόγοι **(6), (7)** έχουν την ίδια μορφή. Συγκεκριμένα, ο αριθμητής είναι η ισχύς που αποδίδεται στο χρήστη j της κυψέλης c και ο παρανομαστής είναι οι παρεμβολές στο χρήστη $j \in c$. Επιπλέον, και οι δυο σηματοθορυβικοί λόγοι είναι συναρτήσεις μόνο της ισχύος που αποδίδεται στο χρήστη $j \in c$ θεωρώντας ότι κάθε ΣΒ του δικτύου εκπέμπει με τη μέγιστη ισχύ $P_{c,\max}$ που του έχουμε ορίσει. Άρα, μπορούμε να εφαρμόσουμε τη λύση της μελέτης [5], για να λύσουμε ένα πρόβλημα CLP ■

3.3.1.2 Επίλυση προβλήματος CLP

Σύμφωνα με τη μελέτη [5],, ένα πρόβλημα CLP **(4)-(5)** επιλύεται με Δυϊκό Διαχωρισμό (Dual Decomposition).

Λήμμα 2: Ένα πρόβλημα CLP επιλέγεται να λυθεί με Δυϊκό Διαχωρισμό (Dual Decomposition).

Απόδειξη: Η κύρια συνάρτηση $\max_{\bar{P}_c} \sum_{j \in S_c} w_{c,j} u_{c,j}(\gamma_{c,j}(P_{c,j}))$ είναι μια κυρτή

συνάρτηση και ο περιορισμός $\sum_{j \in S_c} P_{c,j} = P_{c,\max}$ είναι μια γραμμική συνάρτηση. Άρα,

ένα πρόβλημα CLP είναι κυρτό. Το δυϊκό πρόβλημα (Dual Problem) του CLP είναι κυρτό, γιατί η λαγκρανσιανή (Lagrange) του προβλήματος CLP είναι γραμμική (δηλ. της μορφής $y=ax+b$) και κατ' επέκταση κυρτή. Εφόσον και το πρόβλημα CLP και το δυϊκό πρόβλημα του είναι κυρτά προβλήματα, η διαφορά μεταξύ της λύσης του προβλήματος CLP και του δυϊκού προβλήματος του είναι ίση με 0 (duality gap=primal solution - dual solution= 0). _____ ■

Στη συνέχεια επιλύουμε ένα πρόβλημα CLP **(4)-(5)** με Δυϊκό Διαχωρισμό (Dual Decomposition) [7].

Η λαγκρανσιανή του προβλήματος CLP είναι

$$L(\bar{P}_c, \lambda_c) = \sum_{j \in S_c} w_j u_j(\gamma_{c,j}(P_{c,j})) + \lambda_c (P_{c,\max} - \sum_{j \in S_c} P_{c,j}).$$

Το δυϊκό πρόβλημα (Dual Problem - **DP**) του CLP ορίζεται ως εξής:

$$\text{DP:} \quad \min_{\lambda_c} F(\lambda_c) = \min_{\lambda_c} \left\{ P_{c,\max} - \sum_{i=1}^{|S_c|} P_{c,j}(\lambda_c) \right\}$$

$$\text{s.t} \quad \bar{P}_c(\lambda_c) = \arg \max \{ L(\bar{P}_c, \lambda_c) \}$$

$$\sum_{j \in S_c} P_{c,j}(\lambda_c) = P_{c,\max}$$

Δηλαδή στο δυϊκό πρόβλημα του CLP (**DP**) ψάχνουμε εκείνο τον λαγκρανσιανό πολλαπλασιαστή λ_c^* που οδηγεί στην κατανομή ισχύος \bar{P}_c^* της κυψέλης c που μεγιστοποιεί το άθροισμα των συναρτήσεων ευχαρίστησης των χρηστών της ($U_c^* = \sum_{j \in S_c} w_{c,j} u_{c,j}(\gamma_{c,j}(P_{c,j}))$). Ο πολλαπλασιαστής λ_c^* διαισθητικά εκφράζει τη διαθεσιμότητα των πόρων του δικτύου. Συγκεκριμένα, όσο πιο μικρή είναι η τιμή του λ_c^* τόσο πιο πολλοί είναι οι διαθέσιμοι πόροι του δικτύου.

Όπως θα δούμε στην επόμενη παράγραφο ο πολλαπλασιαστής λ_c^* είναι η μοναδική παράμετρος που επηρεάζει και καθοδηγεί την επίλυση του συνολικού προβλήματος, επιτρέποντας στο MP να αποκτή μια εικόνα για την παρούσα κατάσταση της εκάστοτε κυψέλης c .

3.3.2 Το πρόβλημα MP

3.3.2.1 Ορισμός προβλήματος MP

Δεδομένης της βέλτιστης κατανομής ισχύος \overline{P}_c^* της κυψέλης $c \forall c \in C$ που υπολογίστηκαν σύμφωνα με την μεθοδολογία της προηγούμενης παραγράφου, το πρόβλημα MP ψάχνει εκείνες τις συνολικές ισχύεις των κυψελών $\overline{P}_{\max} = (P_{0,\max}, \dots, P_{|C|,\max})$ που μεγιστοποιούν το άθροισμα των συναρτήσεων ευχαρίστησης των χρηστών όλων των κυψελών υπό τον περιορισμό $0 \leq P_{c,\max} \leq P_c^{MAX}$, $\forall c \in C$ όπου το P_c^{MAX} είναι γνωστή σταθερά. Συγκεκριμένα, το πρόβλημα MP ορίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned} \text{MP:} \quad & \max_{\overline{P}_{\max}} \sum_{c \in C} U_c^*(\overline{P}_{\max}) \\ & \text{s.t} \quad 0 \leq P_{c,\max} \leq P_c^{MAX}, \forall c \in C, \end{aligned}$$

όπου $U_c^*(\overline{P}_{\max}) = \sum_{j \in \mathcal{S}_c} w_{c,j} u_{c,j}(\gamma_{c,j}(P_{c,j}^*))$ είναι το άθροισμα των συναρτήσεων ευχαρίστησης των χρηστών της κυψέλης c , η οποία αντιστοιχεί στην δεδομένη βέλτιστη κατανομή ισχύος \overline{P}_c^* .

Το πρόβλημα MP επιλύεται εφαρμόζοντας τη βαθμωτή μέθοδο (subgradient method). Στην επόμενη παράγραφο ορίζουμε την μέθοδο αυτή.

3.3.2.2 Ορισμός της βαθμωτής μεθόδου (subgradient method)

Θεωρούμε ότι ψάχνουμε εκείνο το διάνυσμα \overline{X} στο κυρτό σύνολο \mathcal{X} ($\overline{X} \in \mathcal{X}$) που μεγιστοποιεί την κυρτή και διαφορίσιμη συνάρτηση $f(\overline{X})$. Συγκεκριμένα, το πρόβλημα αυτό ορίζεται ως εξής:

$$\text{maximize } f(\bar{X})$$

$$\text{s.t } \bar{X} \in \mathcal{X}$$

Η βαθμωτή μέθοδος (subgradient method) [10], [8] παράγει μια ακολουθία δυνατών διανυσμάτων $\{\bar{X}(t)\}$ ως

$$\bar{X}(t+1) = \bar{X}(t) + a(t) * s(t),$$

όπου $s(t)$ είναι η κλίση της f στο $\bar{X}(t)$ και δηλώνει την κατεύθυνση στην οποία αναζητούμε τη βέλτιστη τιμή \bar{X} , δηλαδή το \bar{X} το οποίο μεγιστοποιεί τη συνάρτηση f . Το $a(t)$ είναι το βήμα και εκφράζει την ταχύτητα με την οποία κινούμαστε προς την κατεύθυνση αυτή. Επιπλέον, το βήμα καθορίζει την ακρίβεια του αποτελέσματος της βαθμωτής μεθόδου. Επιλέγοντας το κατάλληλο βήμα $a(t)$ ελαχιστοποιούμε το σφάλμα στη βέλτιστη τιμή που καταλήγει η μέθοδος αυτή (δηλ. τη διαφορά ανάμεσα στην πραγματική βέλτιστη τιμή του προβλήματος και στη βέλτιστη τιμή που καταλήγει η βαθμωτή μέθοδος).

3.3.2.3 Επίλυση προβλήματος MP με χρήση της βαθμωτής μεθόδου (subgradient method)

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, το πρόβλημα MP επιλύεται εφαρμόζοντας τη βαθμωτή μέθοδο. Εφαρμόζοντας τη βαθμωτή μέθοδο έχουμε:

$$\begin{bmatrix} P_{0,\max}(t+1) \\ P_{1,\max}(t+1) \\ \vdots \\ P_{c,\max}(t+1) \\ \vdots \\ P_{|C|,\max}(t+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{0,\max}(t) \\ P_{1,\max}(t) \\ \vdots \\ P_{c,\max}(t) \\ \vdots \\ P_{|C|,\max}(t) \end{bmatrix} - a(t) \begin{bmatrix} \lambda_o^*(P_{0,\max}(t)) \\ \lambda_1^*(P_{1,\max}(t)) \\ \vdots \\ \lambda_c^*(P_{c,\max}(t)) \\ \vdots \\ \lambda_{|C|}^*(P_{|C|,\max}(t)) \end{bmatrix} \Rightarrow$$

$$P_{c,\max}(t+1) = P_{c,\max}(t) - a(t)\lambda_c^*(P_{c,\max}(t)), \quad \forall c \in C \quad (8)$$

όπου $-\lambda_c^*(P_{c,\max}(t))$ είναι η κλίση της μεθόδου.

Λήμμα 2: Η μερική παράγωγος της U_c^* ως προς την ισχύ $P_{c,\max}$ είναι ίση με

$$\frac{dU_c^*(P_{c,\max})}{dP_{c,\max}} = -\lambda_c^*(P_{c,\max}(t)).$$

Απόδειξη:

Η λαγκρανσιανή συνάρτηση του προβλήματος CLP (4)-(5) ορίζεται ως εξής:

$$L(P_{c,\max}, \bar{P}_c, \lambda_c) = \sum_{c \in C} U_c(P_{c,\max}) + \lambda_c (P_{c,\max} - \sum_{j \in S_c} P_{c,j}).$$

Παραγωγίζοντας τη λαγκρανσιανή του προβλήματος CLP ως προς $P_{c,\max}$, θεωρώντας το διάνυσμα \bar{P}_c^* γνωστό και θέτοντας ίσο με 0, έχουμε [10]:

$$\frac{dL}{dP_{c,\max}} = \frac{dU_c(P_{c,\max})}{dP_{c,\max}} + \lambda_c = 0 \Rightarrow \frac{dU_c(P_{c,\max})}{dP_{c,\max}} = -\lambda_c \Rightarrow$$

$$\frac{dU_c^*(P_{c,\max})}{dP_{c,\max}} = -\lambda_c^*(P_{c,\max}(t))$$

Επίσης, δεδομένης της φύσης της βαθμωτής μεθόδου (8), υπάρχει περίπτωση η εκπεμπόμενη ισχύ των κυψελών να λάβει τιμές έξω από τα επιτρεπόμενα όρια τους. Για αυτό το λόγω φράσουμε το αποτέλεσμα της σχέσης (8) σύμφωνα με:

$$P_{c,\max}(t+1) = \min[\max[UPDATE, P_c^{MIN}], P_c^{MAX}] \tag{9}$$

όπου *UPDATE* είναι η τιμή που προκύπτει από τη σχέση (8) και P_c^{MIN} η ελάχιστη συνολική ισχύς που μπορεί να διαθέσει ο εκάστοτε ΣΒ *c* στους χρήστες του σύμφωνα με τις τεχνικές προδιαγραφές του.

3.3.2.4 Κατανόηση του προβλήματος MP

Σ' αυτή την παράγραφο θα προσπαθήσουμε να κατανοήσουμε τη λειτουργία του προβλήματος MP και να δώσουμε απαντήσεις σε ερωτήματα όπως <πού εκτελείται το πρόβλημα MP;>, και <πώς γίνεται η επικοινωνία με τους υπάρχοντες ΣΒ;>.

Από τη σχέση (8) φαίνεται ότι η συνολική ισχύς $P_{c.\max}(t+1)$ που θα διαθέσει ο εκάστοτε ΣΒ c στους χρήστες του τη χρονική στιγμή $(t+1)$ εξαρτάται από το βήμα $a(t)$ της βαθμωτής μεθόδου, τη συνολική ισχύ $P_{c.\max}(t)$ που διαθέτει ο ΣΒ c στους χρήστες του τη χρονική στιγμή t και τον λαγκρανσιανό πολλαπλασιαστή λ_c^* του δυικού προβλήματος CLP της κυψέλης c . Η συνολική ισχύς $P_{c.\max}(t)$ και ο πολλαπλασιαστής λ_c^* είναι πληροφορία γνωστή στον εκάστοτε ΣΒ c . Αυτό σημαίνει ότι ο ΣΒ c αν γνωρίζει και το βήμα $a(t)$ μπορεί να υπολογίσει τη συνολική ισχύ που θα διαθέσει στους χρήστες του τη χρονική στιγμή $(t+1)$. Άρα, επιτρέποντας στους ΣΒ του δικτύου να γνωρίζουν το βήμα $a(t)$ το πρόβλημα MP μπορεί να επιλυθεί στους ήδη υπάρχοντες ΣΒ του δικτύου. Αυτό σημαίνει ότι ο κάθε ΣΒ c μπορεί να υπολογίσει ανεξάρτητα την ισχύ που θα διαθέσει στους χρήστες του επιλύοντας την εξίσωση (8), μειώνοντας δραματικά την πολυπλοκότητα του προβλήματος και ενισχύοντας την κατανομημένη φύση του αλγορίθμου, απαιτώντας όμως το συγχρονισμό όλων των ΣΒ του δικτύου έτσι ώστε όλοι να αναφέρονται στο ίδιο t .

Για να κατανοήσουμε καλύτερα το MP μελετάμε τα 2 σενάρια που ακολουθούν.

1^ο σενάριο: Θεωρούμε ότι τη χρονική στιγμή t όλοι οι ΣΒ $c' \in C$, $c' \neq c$ του συστήματος εκτός από το ΣΒ c αυξάνουν τις συνολικές ισχύεις $P_{c',\max}(t)$ που διαθέτουν στους χρήστες τους και εξετάζουμε πως θα αντιδράσει ο ΣΒ c .

Αρχικά, στρεφόμαστε στο CLP της κυψέλης c . Η αύξηση στις ισχύεις $P_{c',\max}(t)$ που διαθέτουν οι άλλοι ΣΒ c' του συστήματος στους χρήστες τους έχει ως αποτέλεσμα να αυξηθούν οι διακυψελικές παρεμβολές στους χρήστες της κυψέλης c και κατ' επέκταση να μειωθούν οι σηματοθορυβικοί λόγοι των χρηστών της. Η μείωση των σηματοθορυβικών λόγων οδηγεί στη μείωση της ποιότητας εξυπηρέτησης (Quality Of Service – QoS) των χρηστών της κυψέλης c και κατ' επέκταση στη μείωση της συνολικής συνάρτησης ευχαρίστησης U_c^* και στην αύξηση του λαγκρανσιανού πολλαπλασιαστή λ_c^* της.

Εξετάζοντας το πρόβλημα MP, από τη σχέση **(8)** φαίνεται ότι ο ΣΒ c θα μειώσει τη συνολική ισχύ $P_{c,\max}$ που θα διαθέσει στους χρήστες του τη χρονική στιγμή $(t+1)$. Η μειωμένη ισχύς $P_{c,\max}$ θα δυσχεράνει τους χρήστες της κυψέλης c και θα ευνοήσει τους χρήστες των υπόλοιπων κυψελών. Συγκεκριμένα, θα μειωθεί ακόμη περισσότερο η ποιότητα εξυπηρέτησης των χρηστών της κυψέλης c και αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα στο να μειωθεί ακόμη περισσότερο η συνολική συνάρτηση ευχαρίστησης U_c^* της. Παράλληλα, όμως, θα μειωθούν οι διακυψελικές παρεμβολές στους χρήστες των υπόλοιπων κυψελών $c' \in C, c' \neq c$ και κατ' επέκταση θα αυξηθούν οι σηματοθορυβικοί λόγοι τους. Η αύξηση των σηματοθορυβικών λόγων θα οδηγήσει στην αύξηση των συνολικών συναρτήσεων ευχαρίστησης $U_{c'}$ των υπόλοιπων κυψελών $c' \in C, c' \neq c$. Δηλαδή ρίχνουμε τη συνολική συνάρτηση ευχαρίστησης της κυψέλης c και αυξάνουμε τη συνολική συνάρτηση ευχαρίστησης κάθε άλλης κυψέλης c' .

2^ο σενάριο: Θεωρούμε ότι τη χρονική στιγμή t , όλοι οι ΣΒ $c' \in C, c' \neq c$ του συστήματος εκτός από το ΣΒ c μειώνουν τις ισχύεις $P_{c',\max}(t)$ που διαθέτουν στους χρήστες του και εξετάζουμε πως θα αντιδράσει ο ΣΒ c .

Αρχικά, στρεφόμαστε στο CLP της κυψέλης c . Η μείωση στις ισχύεις $P_{c',\max}(t)$ που διαθέτουν οι άλλοι ΣΒ c' του συστήματος στους χρήστες τους έχει ως αποτέλεσμα να μειωθούν οι διακυψελικές παρεμβολές στους χρήστες της κυψέλης c και κατ' επέκταση να αυξηθούν οι σηματοθορυβικοί λόγοι των χρηστών της. Η αύξηση των σηματοθορυβικών λόγων οδηγεί στην αύξηση της ποιότητας εξυπηρέτησης (Quality Of Service – QoS) των χρηστών της κυψέλης c και κατ' επέκταση στην αύξηση της συνολικής συνάρτησης ευχαρίστησης U_c^* και στην μείωση του λαγκρανσιανού πολλαπλασιαστή λ_c^* της.

Στη συνέχεια, στρεφόμαστε στο πρόβλημα MP. Από τη σχέση **(8)** φαίνεται ότι ο ΣΒ c θα μειώσει τη συνολική ισχύ $P_{c,\max}$ που θα διαθέσει στους χρήστες του τη χρονική στιγμή $(t+1)$. Όμως, λόγω της πολύ μικρής τιμής του λ_c^* επεμβαίνουμε ελάχιστα στην κυψέλη c .

Συνοψίζοντας, από τα δυο παραπάνω σενάρια φαίνεται ότι το MP επεμβαίνει ελάχιστα σε μια κυψέλη c που προσφέρει καλή ποιότητα εξυπηρέτησης στους χρήστες της (μια τέτοια κυψέλη χαρακτηρίζεται από πολύ μικρό λαγκρανσιανό πολλαπλασιαστή λ_c^*). Αντίθετα, δυσχεραίνει μια κυψέλη που δεν προσφέρει καλή ποιότητα εξυπηρέτησης στους χρήστες της (μια τέτοια κυψέλη χαρακτηρίζεται από μεγάλο λαγκρανσιανό πολλαπλασιαστή λ_c^*) με σκοπό να ευνοήσει τους χρήστες των υπόλοιπων κυψελών.

3.4 Παρατηρήσεις

- Σύγκλιση

Κάθε ακολουθία $\{P_{c,\max}(t)\}$ συγκλίνει σε μια τιμή. Αυτό συμβαίνει γιατί

1. Η κύρια συνάρτηση του προβλήματος $\sum_{c \in C} U_c^*(P_{c,\max}) \forall c \in C$ είναι κυρτή.
2. Η λαγκρανσιανή συνάρτηση του προβλήματος CLP της εκάστοτε κυψέλης c είναι φθίνουσα συνάρτηση του λ_c^* .
3. Το βήμα $a(t)$ είναι ένα βήμα που μειώνεται με την πάροδο του χρόνου και $a(t) > 0$, $\lim_{t \rightarrow \infty} a(t) = 0$ και $\sum_{t=0}^{\infty} a(t) = \infty$.

Συνεπώς και σύμφωνα με το [10], ο αλγόριθμος συγκλίνει, δηλαδή $\bar{P}_{\max}(t) \rightarrow \bar{P}_{\max}^*$ καθώς το $t \rightarrow \infty$. Επίσης καθώς τα CLP προβλήματα επιλύονται βέλτιστα, δηλαδή $\bar{P}_c^*(\bar{P}_{\max}) \forall \bar{P}_{\max}$ η σύγκλιση του $\bar{P}_{\max}(t)$ στη βέλτιστη τιμή συνεπάγεται και την βελτιστότητα του $\bar{P}_c^*(\bar{P}_{\max}^*)$. Άρα καταλήγουμε πως και τα δύο διανύσματα $(\bar{P}_c, \bar{P}_{\max})$ συγκλίνουν στις βέλτιστες τιμές τους $(\bar{P}_c^*, \bar{P}_{\max}^*)$.

- Πολυπλοκότητα

Σύμφωνα με τα προηγούμενα σε κάθε χρονοσχισημή η εκάστοτε κυψέλη είναι υπεύθυνη να επιλύσει το πρόβλημα CLP, δηλαδή την εύρεση της βέλτιστης κατανομής ισχύος $\overline{P_c(t)}$ που μεγιστοποιεί τη συνολική συνάρτηση ευχαρίστησης της σύμφωνα με ήδη υπάρχουσες τεχνικές [5], επιφέροντας μηδενική επιπλέον πολυπλοκότητα και σηματοδοσία. Επίσης, δεχόμενη σαν είσοδο τα

αποτελέσματα του προβλήματος CLP και του βήματος $a(t)$ υπολογίζει ανεξάρτητα από τις άλλες κυψέλες την ισχύ $P_{c,\max}(t+1)$ που θα διαθέσει στους χρήστες του τη χρονική στιγμή $t+1$. Ο υπολογισμός αυτός είναι ουσιαστικά μία πράξη πραγματικών αριθμών και δεν αυξάνει την πολυπλοκότητα.

- **Συγχρονισμός και Σηματοδοσία**

Η ύπαρξη του συνεχώς μεταβαλλόμενου βήματος $a(t)$ επιβάλλει τον συγχρονισμό μεταξύ των κυψελών προκειμένου να υπολογιστεί το $\bar{P}_{\max}(t+1)$. Συνεπώς, οι κυψέλες πρέπει να γνωρίζουν την τιμή της τρέχουσας επανάληψης, δηλαδή την τιμή του $a(t)$, καθώς και το διάνυσμα ισχύων εκπομπής $\bar{P}_{\max}(t)$. Αυτό είναι εφικτό δεδομένης της φύσης του συστήματος, αφού α) τα δίκτυα CDMA απαιτούν εγγενή συγχρονισμό λόγω της ύπαρξης χρονοσχισμών, και β) αυτές οι τιμές μπορούν εύκολα να μεταδοθούν διαμέσου καναλιών ευρεκμπομπής [13]. Ο συνολικός αριθμός τιμών που πρέπει να μεταφερθούν ανά χρονισισμή είναι $|C|+1$ πραγματικοί αριθμοί ($a(t)$ και \bar{P}_{\max})

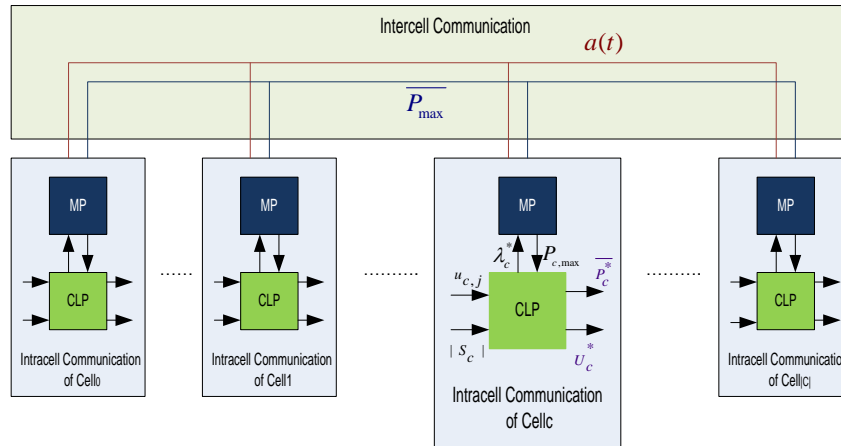
- **Τερματισμός αλγόριθμος επίλυσης προβλήματος GPB**

Ο αλγόριθμος επίλυσης του προβλήματος GPB τερματίζεται όταν τερματιστεί ο αλγόριθμος επίλυσης του MP, ο οποίος με τη σειρά του τερματίζεται όταν όλες οι ακολουθίες $\{P_{c,\max}(t)\}$ συγκλίνουν. Αν μια ή περισσότερες ακολουθίες $\{P_{c,\max}(t)\}$ συγκλίνουν, ενώ υπάρχουν ακολουθίες που δεν έχουν συγκλίνει ακόμη, οι κυψέλες των συγκλινουσών ακολουθιών δε σταματούν να συμμετέχουν στην επίλυση του αρχικού προβλήματος GPB αλλά συνεχίζουν έως ότου όλες οι ακολουθίες συγκλίνουν.

3.5 Αλγόριθμος επίλυσης του προβλήματος GPB

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει το αρχικό πρόβλημα GPB διαχωρίζεται σε $|C|+1$ ανεξάρτητα μεταξύ τους υποπροβλήματα CLP τα οποία συντονίζονται από ένα πρόβλημα MP. Στους ακόλουθους πίνακες συνοψίζεται η λειτουργία του

αλγόριθμου, ενώ στο Σχήμα 5 απεικονίζεται όλη η μεταδιδόμενη σηματοδότηση εσωτερικά στις κυψέλες, αλλά και εξωτερικά διαμέσου αυτών.



Σχήμα 5: Ο τρόπος επικοινωνίας των προβλημάτων CLP με το πρόβλημα MP.

- **Ο αλγόριθμος επίλυσης κάθε προβλήματος CLP :**

Βήμα 1:	Σε κάθε κυψέλη, το πρόβλημα CLP δέχεται ως εισόδους τις συνολικές ισχύεις $\overline{P_{\max}}$ που διαθέτουν οι ΣΒ στους χρήστες τους, το πλήθος $ S_c $ των χρηστών της εκάστοτε κυψέλης c και τη συνάρτηση ευχαρίστησης $u_{c,j}$ που έχει ανατεθεί σε κάθε χρήστη $j \in c$.
Βήμα 2:	Επιλύεται το πρόβλημα CLP σύμφωνα με τις εξισώσεις (4)-(5).
Βήμα 3:	Ο λαγκρανσιανός πολλαπλασιαστής λ_c^* δίνεται ως είσοδος στο MP.
Βήμα 4:	Δέχεται την έξοδο του MP και επιστρέφει στο βήμα 1.

- Οι έξοδοι ενός προβλήματος CLP είναι ο λαγκρανσιανός πολλαπλασιαστής λ_c^* , η συνολική συνάρτηση ευχαρίστησης U_c^* και η κατανομή ισχύος $\overline{P_c^*}$ της εκάστοτε κυψέλης c .

- **Ο αλγόριθμος επίλυσης του προβλήματος MP στην κυψέλη c:**

<u>Βήμα 1:</u>	Το πρόβλημα MP στην κυψέλη c δέχεται ως εισόδους το βήμα $a(t)$ και τη συνολική ισχύ $P_{c,\max}$ που διαθέτει ο ΣΒ c στους χρήστες του μαζί με τον πολλαπλασιαστή λ_c^*
<u>Βήμα 2:</u>	Ανανεώνεται το $P_{c,\max}$ σύμφωνα με την εξίσωση (8) .
<u>Βήμα 3:</u>	Ελέγχεται αν $ \overline{P_{c,\max}}(t+1) - \overline{P_{c,\max}}(t) \leq \text{threshold}$, όπου threshold είναι μια τιμή που σχετίζεται με τη σύγκλιση της ακολουθίας. Αν ναι η κυψέλη c έχει συγκλίνει, αλλά συνεχίζει να συμμετέχει στον αλγόριθμο επίλυσης του προβλήματος GPB έως ότου συγκλίνουν όλες οι κυψέλες.
<u>Βήμα 4:</u>	Δέχεται την έξοδο του ως είσοδο και επιστρέφει στο βήμα 1.

- Η έξοδος του προβλήματος MP της εκάστοτε κυψέλης c είναι η συνολική ισχύς $\overline{P_{c,\max}}$ που θα διαθέσει ο ΣΒ c τη χρονική στιγμή $(t+1)$.

4

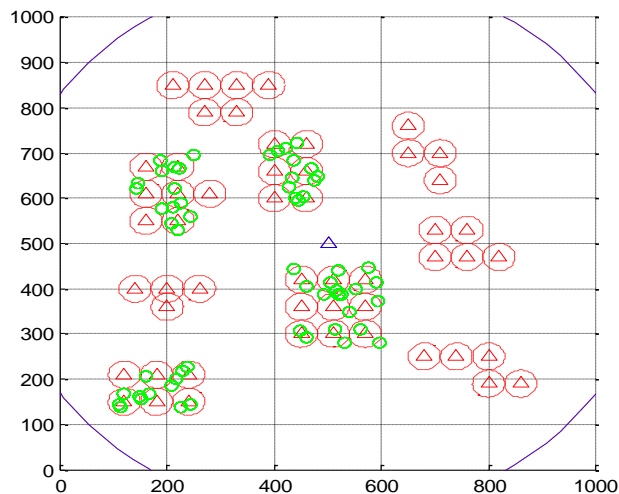
Αριθμητικά αποτελέσματα και ανάλυση

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστούν αποτελέσματα με τη μορφή τρισδιάστατων γραφημάτων που τεκμηριώνουν την αποδοτικότητα του προτεινόμενου αλγορίθμου για διαφορές περιπτώσεις (σενάρια) που διαφοροποιούνται ως προς την τοπολογία του δικτύου.

Σε σχέση με άλλους τρόπους επίλυσης του υπό μελέτη προβλήματος αυτής της εργασίας, εμείς έχουμε θεωρήσει τις συνολικές ισχύεις $P_{c,\max}$ που διαθέτουν όλοι οι ΣΒ του δικτύου ως μεταβλητές. Γι' αυτό η αποδοτικότητα του προτεινόμενου αλγορίθμου θα εξεταστεί σε σχέση με ένα μοντέλο στο οποίο οι συνολικές ισχύεις όλων των ΣΒ είναι σταθερές και ίσες με P_c^{MAX} και η κάθε κυψέλη αναλαμβάνει να βρει εκείνη την κατανομή ισχύος που οδηγεί στη μεγιστοποίηση της συνολικής συνάρτησης ευχαρίστησης της. Θεωρώντας ότι για $t=0$ οι συνολικές ισχύεις $P_{c,\max}$ όλων των ΣΒ του δικτύου είναι ίσες με τις μέγιστες ισχύεις P_c^{MAX} που μπορούν να διαθέσουν στους χρήστες τους σύμφωνα με τις τεχνικές προδιαγραφές τους, η πρώτη επανάληψη του αλγορίθμου ουσιαστικά προσομοιώνει το μοντέλο στο οποίο θεωρούμε ότι $P_{c,\max} = P_c^{MAX}$, $\forall c \in C$. Σε μορφή τρισδιάστατων γραφημάτων απεικονίζουμε το ποσοστό κέρδους που έχουμε με τον προτεινόμενο αλγόριθμο σε σχέση με το μοντέλο $P_{c,\max} = P_c^{MAX}$, $\forall c \in C$ ως προς i) τη συνολική συνάρτηση ευχαρίστησης του δικτύου, ii) τη συνολική συνάρτηση ευχαρίστησης των μάκρο-χρηστών καθώς και iii) τη συνολική κατανάλωση ισχύος στους ΣΒ του δικτύου σε σχέση με α) το ποσοστό των φέμτο-χρηστών (Femtocell Users

Percentage - FUP), όπου $FUP = \frac{\text{ο αριθμός φέμτο-χρηστών του δικτυου}}{\text{ο συνολικός αριθμος χρηστων του δικτυου}} * 100\%$ και β) με το συνολικό αριθμό των χρηστών (Number of Users - NU) του δικτύου.

Για την εξαγωγή αποτελεσμάτων προσομοιώσαμε σε matlab τον προτεινόμενο αλγόριθμο επίλυσης του προβλήματος GPB καθώς και ένα ετερογενές CDMA ασύρματο δίκτυο δυο επιπέδων, που αποτελείται από μια μακροκυψέλη και $|C|$ φεμτοκυψέλες ομαδοποιημένες σε συστάδες (clusters), όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα (σχήμα 6). Θεωρούμε πως στο κέντρο της περιοχής κάλυψης κάθε κυψέλης c βρίσκεται ο ΣΒ c . Επιπλέον, η περιοχή κάλυψης των φεμτοκυψελών εμπεριέχεται στην περιοχή κάλυψης της μακροκυψέλης. Ο ΣΒ κάθε κυψέλης c εξυπηρετεί $|S_c|$ χρήστες, οι οποίοι αποτελούν τους χρήστες της κυψέλης c , ενώ κάθε χρήστης εξυπηρετείται από έναν και μόνον ένα ΣΒ καθόλη τη διάρκεια του πειράματος, ο οποίος και είναι γνωστός εκ των προτέρων.



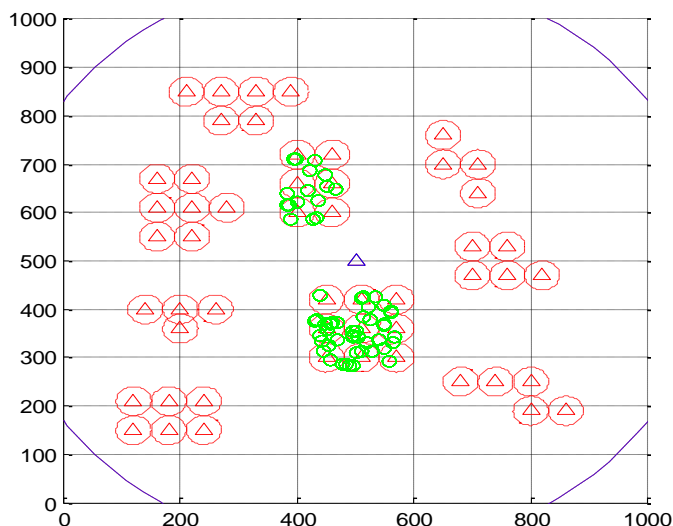
Σχήμα 6: Ένα ετερογενές CDMA ασύρματο δίκτυο δυο επιπέδων, που αποτελείται από μια μακροκυψέλη και $|C|$ φεμτοκυψέλες ομαδοποιημένες σε συστάδες. Η περιοχή κάλυψης των φεμτοκυψελών εμπεριέχεται στην περιοχή κάλυψης της μακροκυψέλης.

Στο παραπάνω σχήμα με πράσινους κύκλους απεικονίζονται οι χρήστες του δικτυού. Οι φεμτοκυψέλες παριστάνονται με κόκκινους κύκλους και οι φέμτο-ΣΒ με κόκκινα τρίγωνα. Η μακροκυψέλη απεικονίζεται με μπλε κύκλο και ο μάκρο-ΣΒ με μπλε τρίγωνο.

Υποθέτουμε ότι ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης κάτω ζεύξης του κάθε χρήστη είναι $R_{c,j}^{MAX} = 2.4 \text{ Mbps}$ καθώς και ότι το εύρος ζώνης του CDMA δικτύου είναι $W=10\text{MHz}$. Επιπλέον, θεωρούμε ότι σύμφωνα με τις τεχνικές προδιαγραφές των ΣΒ η μέγιστη συνολική ισχύς που μπορεί να διαθέσει ο μάκρο-ΣΒ στους χρήστες του είναι $P_0^{MAX} = 10W$ και η μέγιστη συνολική ισχύς που μπορεί να διαθέσει ο κάθε φέμτο-ΣΒ στους χρήστες του είναι $P_c^{MAX} = 3W, \forall c \neq 0$. Αρχικά θεωρούμε ότι οι συνολικές ισχύεις που διαθέτουν οι ΣΒ στους χρήστες τους είναι ίσες με τις μέγιστες ισχύεις που μπορούν να διαθέσουν σύμφωνα με τις τεχνικές προδιαγραφές τους, δηλαδή $P_{c,\max}(t=0) = P_c^{MAX}, \forall c \in C$. Θεωρούμε ότι η ισχύς $P_{0,\max}$ που διαθέτει ο μάκρο-ΣΒ του δικτύου στους χρήστες του δεν αποτελεί μεταβλητή του προβλήματος, διότι οι φέμτο-ΣΒ είναι πρόσθετοι σ' ένα δίκτυο που έχει σχεδιαστεί να εξυπηρετείται από τον ήδη υπάρχον μάκρο-ΣΒ και με την προσθήκη τους δε θέλουμε σε καμία περίπτωση να επηρεάσουμε αρνητικά την εξυπηρέτηση των μάκρο-χρηστών του δικτύου, αλλά αντίθετα να τους ενισχύσουμε. Ορίζουμε ότι το βήμα της βαθμωτής μεθόδου δίνεται από τη σχέση $a(t) = \frac{5 \cdot 10^3}{t}$. Μοντελοποιούμε το κέρδος $G_{c,j}$ του μονοπατιού από το ΣΒ της κυψέλης c προς το χρήστη j ως $G_{c,j} = \frac{k_j}{d_j^n}$, όπου d_j η απόσταση του χρήστη j από το ΣΒ c , n ο εκθέτης απωλειών διαδρομής ($n=4$) και k_j μια λογαριθμικά κατανομημένη τυχαία μεταβλητή με μέση τιμή 0 και απόσταση $\sigma^2 = 8dB$. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν και θα σχολιαστούν τα διάφορα σενάρια που μελετήσαμε.

4.1 Αποτελέσματα προσομοίωσης

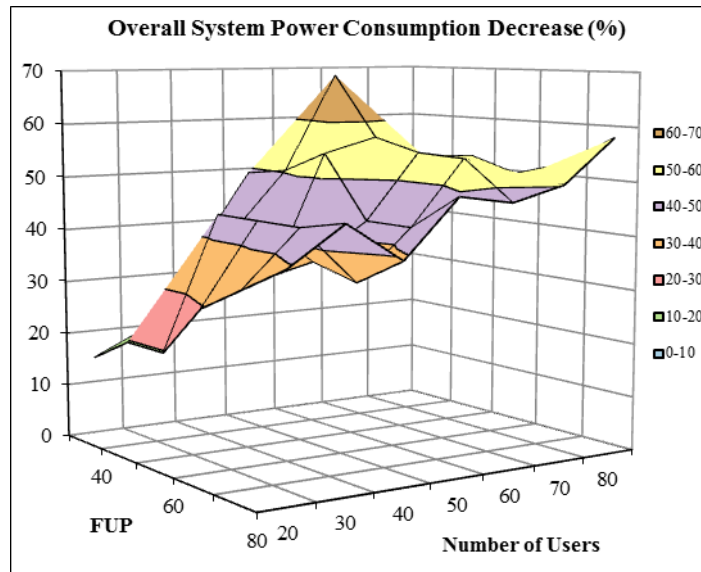
Θεωρούμε ότι η τοπολογία του δικτύου αποτελείται από μια μακροκυψέλη και 15 φέμτοκυψέλες ομαδοποιημένες σε δυο συστάδες (1^ο σενάριο), όπως φαίνεται στο σχήμα 7.



Σχήμα 7: Η τοπολογία του πρώτου σεναρίου αποτελείται από μια μακροκυψέλη και 15 φέμτοκυψέλες ομαδοποιημένες σε δυο συστάδες.

Ο συνολικός αριθμός των χρηστών του δικτύου μεταβάλλεται από 20 έως 80 και το ποσοστό των φέμτο- χρηστών του δικτύου από 30% έως 80%.

Στο σχήμα 8 απεικονίζεται το ποσοστό κέρδους που έχουμε με τον προτεινόμενο αλγόριθμο σε σχέση με το μοντέλο $P_{c,\max} = P_c^{MAX}, \forall c \in C$ ως προς τη συνολική κατανάλωση ισχύος στους ΣΒ του δικτύου σε σχέση με το ποσοστό των φέμτο-χρηστών (Femtocell Users Percentage - FUP) και με το συνολικό αριθμό των χρηστών (Number of Users) του δικτύου.

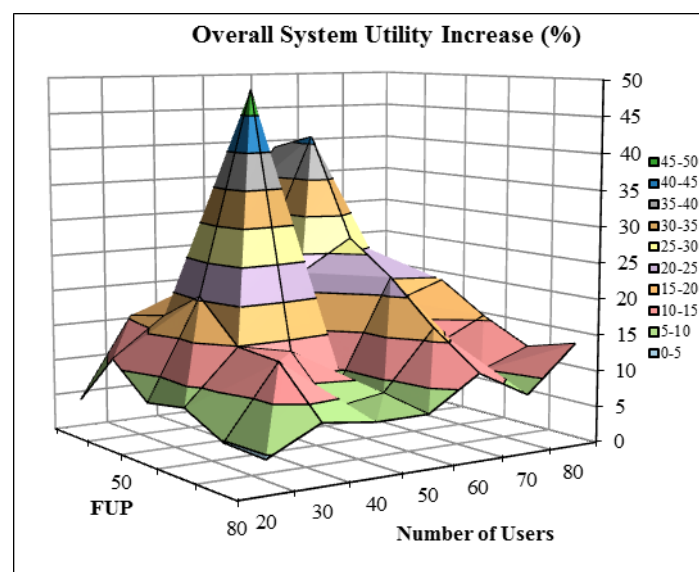


Σχήμα 8: Το ποσοστό κέρδους της συνολικής κατανάλωση ισχύος στους ΣΒ του δικτύου με τον προτεινόμενο αλγόριθμο σε σχέση με το ποσοστό των φέμτο-χρηστών (FUP) και με το συνολικό αριθμό των χρηστών (Number of Users) του δικτύου.

Παρατηρούμε ότι με τον προτεινόμενο αλγόριθμο η συνολική κατανάλωση ισχύος στους ΣΒ του δικτύου μειώνεται έως και 69%. Συγκεκριμένα για πλήθος χρηστών 30-70 και ποσοστά φέμτο-χρηστών 30%-50%, τα οποία ερμηνεύονται σε 1-4 χρήστες ανά κυψέλη παρατηρείται μείωση 20%-69% που μεταφράζεται σε πραγματική μείωση της ισχύος 11W-37.95W. Η μείωση της συνολικής κατανάλωσης ισχύος του δικτύου οφείλεται στην μείωση των ισχύων $P_{c,max}$ που διαθέτουν οι φέμτο-ΣΒ του δικτύου στους χρήστες τους, αφού η ισχύς $P_{0,max}$ που διαθέτει ο μάκρο-ΣΒ του δικτύου στους χρήστες του δεν έχει θεωρηθεί ως μεταβλητή. Όταν ο αριθμός των χρηστών του δικτύου είναι μικρότερος από 30 δεν παρατηρείται σημαντική μείωση της κατανάλωσης ισχύος του δικτύου. Αυτό οφείλεται στο ότι η πλειοψηφία των φέμτοκυψελών δεν έχουν χρήστες με αποτέλεσμα να μη βρίσκει εφαρμογή ο αλγόριθμος μας (ο αλγόριθμος μας βρίσκει εφαρμογή σε φέμτοκυψέλες που έχουν χρήστες). Ομοίως, όταν ο αριθμός των χρηστών του δικτύου είναι μεγαλύτερος από 70 δεν παρατηρείται σημαντική μείωση της ισχύος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι υπάρχουν πολύ περισσότεροι από 4 χρήστες ανά φέμτοκυψέλη με αποτέλεσμα ο κάθε φέμτο-ΣΒ να μην μπορεί να μειώσει σημαντικά την ισχύ που διαθέτει στους χρήστες του συνεχίζοντας να τους εξασφαλίζει καλή ποιότητα εξυπηρέτησης. Η μικρή μείωση ισχύος που εμφανίζεται

στις περιοχές που χαρακτηρίζονται από πλήθος χρηστών είτε μικρότερο από 30 είτε μεγαλύτερο από 70 δεν σημαίνει ότι ο αλγόριθμος μας δεν έχει καλή απόδοση, αλλά ότι το μοντέλο με το οποίο τον συγκρίναμε εμφανίζει εξίσου καλά αποτελέσματα.

Στο σχήμα 9 παρουσιάζεται το ποσοστό κέρδους που επιτυγχάνεται με τον αλγόριθμο μας ως προς τη συνολική συνάρτηση ευχαρίστησης του δικτύου σε σχέση με το FUP και με το συνολικό αριθμό των χρηστών του δικτύου.

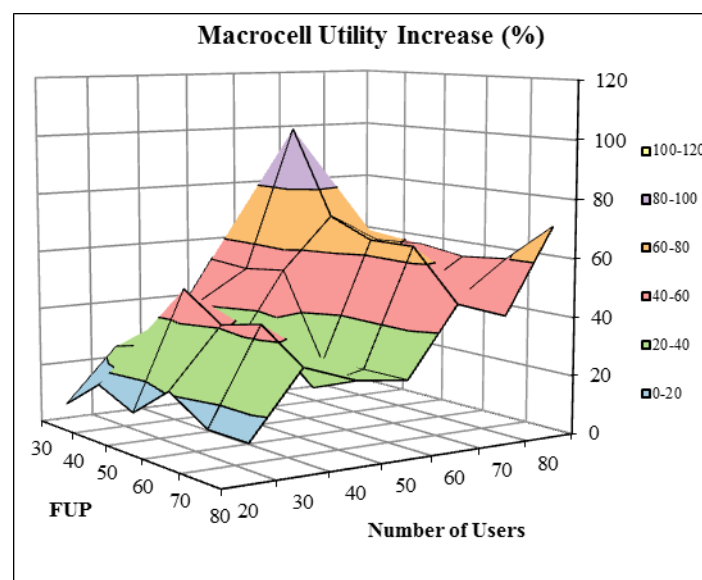


Σχήμα 9: Το ποσοστό κέρδους της συνολικής συνάρτησης ευχαρίστησης του δικτύου με τον προτεινόμενο αλγόριθμο σε σχέση με το FUP και με το συνολικό αριθμό των χρηστών του δικτύου.

Από το παραπάνω σχήμα φαίνεται ότι στις περιοχές ενδιαφέροντος (1-4 χρήστες ανά φεμτοκυψέλη) πετυχαίνεται αύξηση της συνολικής συνάρτησης ευχαρίστησης του δικτύου 15%-49%, η οποία ερμηνεύεται σε αύξηση του συνολικού ρυθμού μετάδοσης κάτω ζεύξης του δικτύου 11Mbps-59Mbps. Στις περιοχές αυτές οι ισχύεις $P_{c,max}$ που διαθέτουν οι φέμτο-ΣΒ του δικτύου στους χρήστες τους μειώνονται σημαντικά με αποτέλεσμα να μειώνονται σημαντικά οι παρεμβολές στους χρήστες. Η μείωση των παρεμβολών οδηγεί σε αύξηση των σηματοθορυβικών λόγων των χρηστών και κατ' επέκταση σε αύξηση των συναρτήσεων ευχαρίστησης τους που οδηγεί στην αύξηση της συνολικής συνάρτησης ευχαρίστησης του δικτύου. Στις σύνορα της περιοχής ενδιαφέροντος

(πλήθος χρηστών μικρότερο από 30 ή μεγαλύτερο από 70) παρατηρείται μικρή αύξηση. Αυτό οφείλεται στο ότι σ' αυτές τις περιοχές δεν έχουμε σημαντική μείωση των ισχύων $P_{c,max}$ που διαθέτουν οι φέμτο-ΣΒ στους χρήστες τους με αποτέλεσμα να μη μειώνονται σημαντικά οι παρεμβολές στους χρήστες. Η μικρή αύξηση που εμφανίζεται στα σύνορα δεν σημαίνει ότι ο αλγόριθμος μας δεν έχει καλή απόδοση, αλλά ότι το μοντέλο με το οποίο τον συγκρίναμε εμφανίζει εξίσου καλά αποτελέσματα.

Στο σχήμα 10 απεικονίζεται το ποσοστό κέρδους που έχουμε με τον προτεινόμενο αλγόριθμο ως προς τη συνολική συνάρτηση ευχαρίστησης των μάκρο-χρηστών του δικτύου σε σχέση με το FUP και με το συνολικό αριθμό των χρηστών του δικτύου.



Σχήμα 10: Το ποσοστό κέρδους της συνολικής συνάρτησης ευχαρίστησης των μάκρο-χρηστών του δικτύου με τον προτεινόμενο αλγόριθμο σε σχέση με το FUP και με το συνολικό αριθμό των χρηστών του δικτύου.

Από το σχήμα 10 φαίνεται ότι στην περιοχή ενδιαφέροντος (1-4 χρήστες ανά φέμτοκυψέλη) πετυχαίνεται αύξηση του συνολικού ρυθμού μετάδοσης κάτω ζεύξης των μάκρο-χρηστών του δικτύου 17.28Mbps-144Mbps η οποία αντιστοιχεί σε αύξηση της συνολικής συνάρτησης ευχαρίστησης των μάκρο-χρηστών του δικτύου 24%-100%. Η σημαντική αυτή αύξηση οφείλεται στη μείωση των

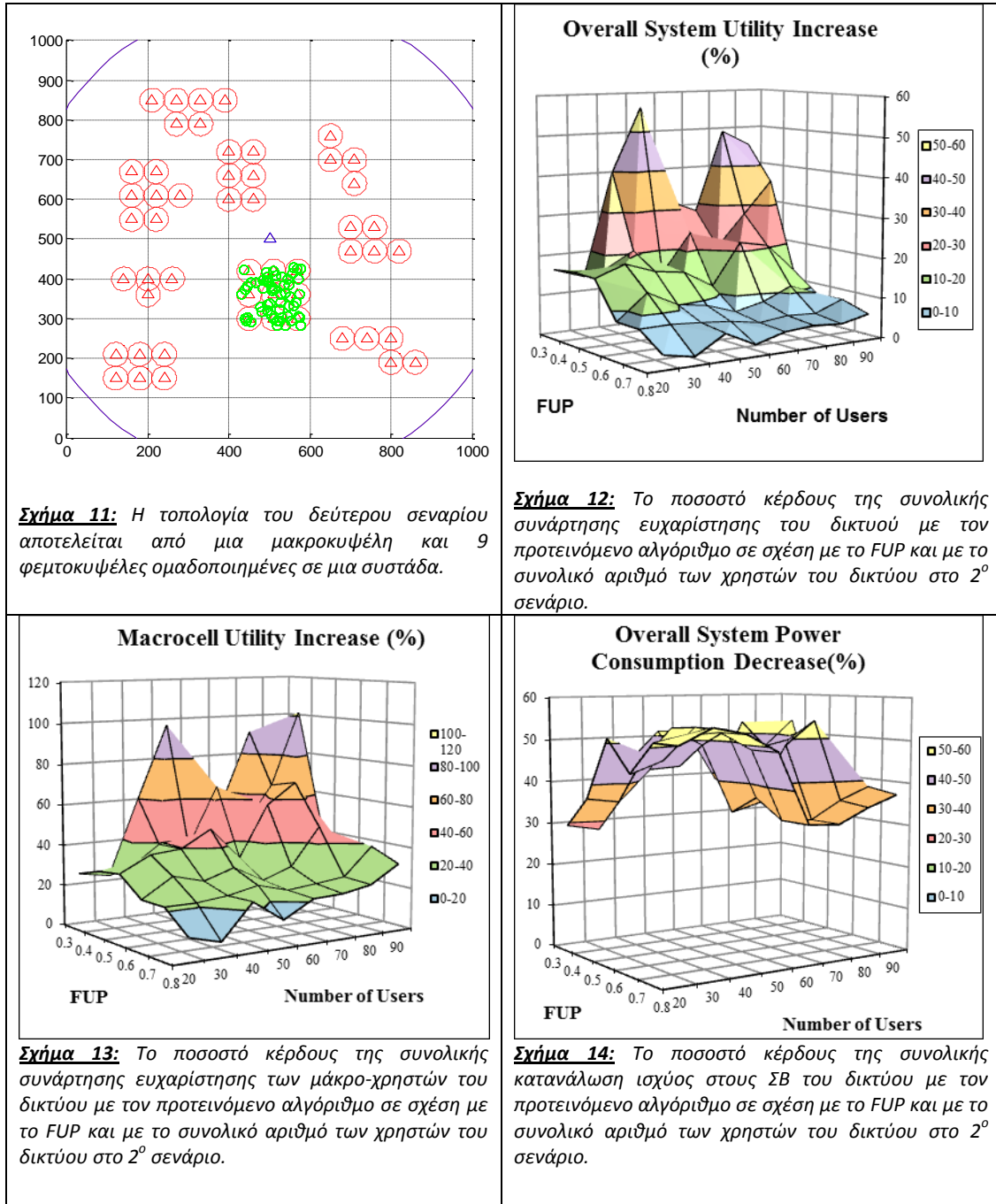
παρεμβολών στους μάκρο-χρήστες λόγω της σημαντικής μείωσης κατανάλωσης ισχύος που παρατηρείται στην περιοχή αυτή.

4.1.1 Παραλλαγές του 1ου σεναρίου

Στα σενάρια που ακολουθούν ο συνολικός αριθμός των χρηστών μεταβάλλεται από 20 έως 90 και το ποσοστό των φέμτο- χρηστών από 30% έως 80% και διαφοροποιούνται ως προς την τοπολογία τους. Σε κάθε σενάριο παρουσιάζονται με τη μορφή γραφημάτων το ποσοστό κέρδους που πετυχαίνεται με τον αλγόριθμο μας ως προς τη συνολική συνάρτηση ευχαρίστησης του δικτύου, τη συνολική συνάρτηση ευχαρίστησης των μάκρο-χρηστών και τη συνολική κατανάλωση ισχύος στους ΣΒ σε σχέση με το FUP και το συνολικό αριθμό των χρηστών του δικτύου.

4.1.1.1 Σενάριο 2^ο: 1 μακροκυψέλη και μια συστάδα φεμτοκυψελών

Τα γραφήματα που χαρακτηρίζουν το 2^ο σενάριο:

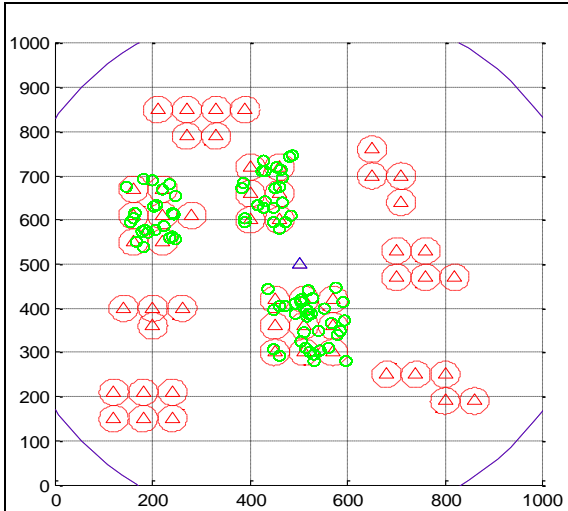


Από τα παραπάνω γραφήματα και ακολουθώντας το συλλογισμό του 1ου σεναρίου γίνεται αντιληπτό ότι στην περιοχή ενδιαφέροντος ισχύουν τα έξης:

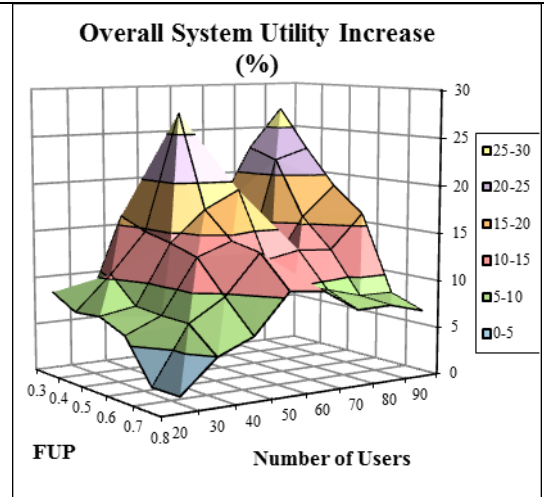
<u>Το υπό μελέτη μέγεθος:</u>	<u>Ποσοστό</u>	<u>Ερμηνεία Ποσοστού</u>
Η αύξηση της συνολικής συνάρτησης ευχαρίστησης του δικτύου:	14%-56%	10.08Mbps-67.2Mbps
Η αύξηση της συνολικής συνάρτησης ευχαρίστησης των μάκρο-χρηστών του δικτύου:	22%-97%	15.84Mbps-116.4Mbps
Η μείωση στη συνολική κατανάλωση ισχύος στους ΣΒ του δικτύου:	28%-54%	10.36W-19.98W

4.1.1.2 Σενάριο 3^ο: 1 μακροκυψέλη και τρεις συστάδες φεμτοκυψελών

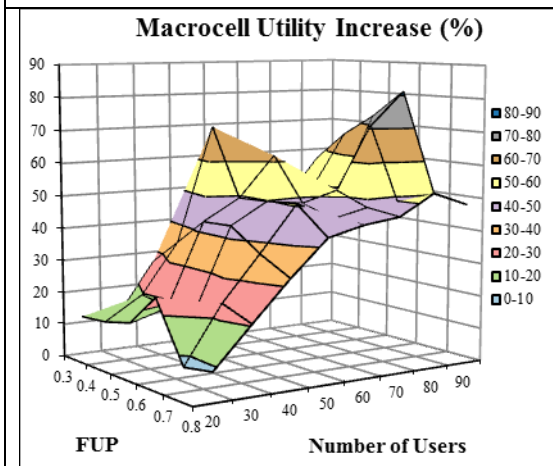
Τα γραφήματα που χαρακτηρίζουν το 3^ο σενάριο:



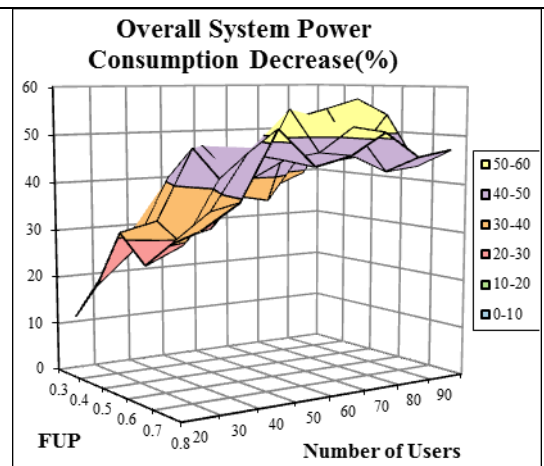
Σχήμα 15: Η τοπολογία του τρίτου σεναρίου αποτελείται από μια μακροκυψέλη και 21 φεμτοκυψέλες ομαδοποιημένες σε τρεις συστάδες.



Σχήμα 16: Το ποσοστό κέρδους της συνολικής συνάρτησης ευχαρίστησης του δικτύου με τον προτεινόμενο αλγόριθμο σε σχέση με το FUP και με το συνολικό αριθμό των χρηστών του δικτύου στο 3^ο σενάριο.



Σχήμα 17: Το ποσοστό κέρδους της συνολικής συνάρτησης ευχαρίστησης των μακρο-χρηστών του δικτύου με τον προτεινόμενο αλγόριθμο σε σχέση με το FUP και με το συνολικό αριθμό των χρηστών του δικτύου στο 3^ο σενάριο.



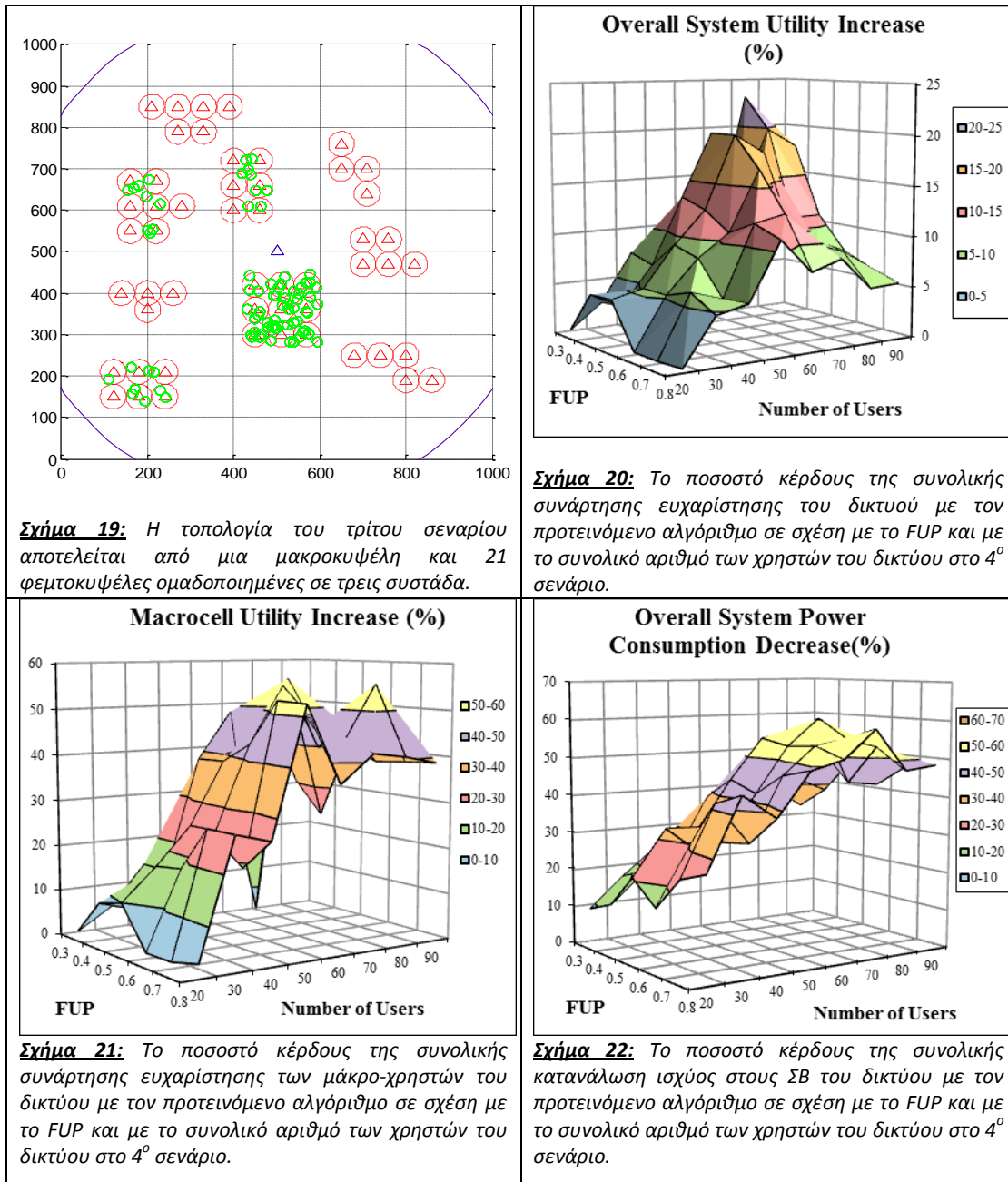
Σχήμα 18: Το ποσοστό κέρδους της συνολικής κατανάλωση ισχύος στους ΣΒ του δικτύου με τον προτεινόμενο αλγόριθμο σε σχέση με το FUP και με το συνολικό αριθμό των χρηστών του δικτύου στο 3^ο σενάριο.

Από τα παραπάνω γραφήματα φαίνεται ότι στην περιοχή ενδιαφέροντος ισχύουν τα έξης:

<i>Το υπό μελέτη μέγεθος:</i>	<i>Ποσοστό</i>	<i>Ερμηνεία Ποσοστού</i>
Η αύξηση της συνολικής συνάρτησης ευχαρίστησης του δικτύου:	7%-27%	5.04Mbps-32.4Mbps
Η αύξηση της συνολικής συνάρτησης ευχαρίστησης των μακρο-χρηστών του δικτύου:	11%-70%	7.92Mbps-89.28Mbps
Η μείωση στη συνολική κατανάλωση ισχύος στους_ΣΒ του δικτύου:	22%-55%	16.06W-40.15W

4.1.1.3 Σενάριο 4^ο: 1 μακροκυψέλη και τέσσερις συστάδες φεμτοκυψελών

Τα γραφήματα που χαρακτηρίζουν το 4^ο σενάριο:

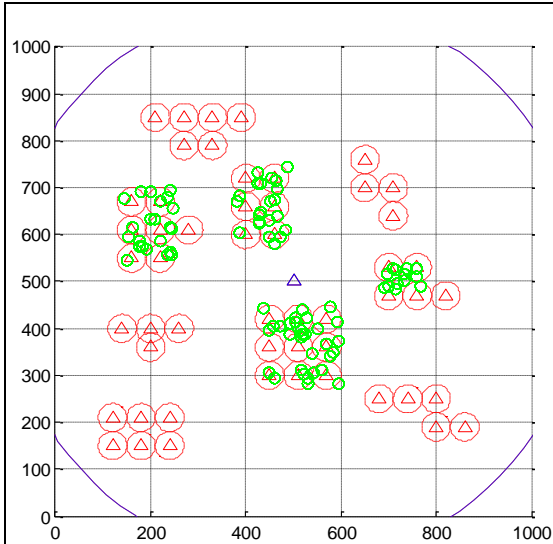


Από τα παραπάνω γραφήματα φαίνεται ότι στην περιοχή ενδιαφέροντος ισχύουν τα εξής:

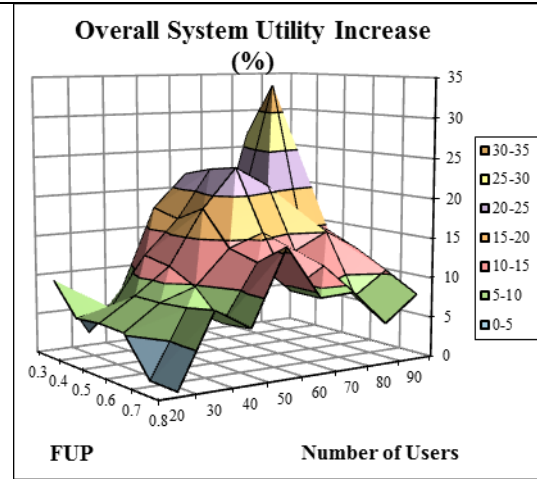
<u>Το υπό μελέτη μέγεθος:</u>	<u>Ποσοστό</u>	<u>Ερμηνεία Ποσοστού</u>
Η αύξηση της συνολικής συνάρτησης ευχαρίστησης του δικτύου:	3%-20%	2.16Mbps-30.24Mbps
Η αύξηση της συνολικής συνάρτησης ευχαρίστησης των μάκρο-χρηστών του δικτύου:	5%-56%	3.6Mbps-94.08Mbps
Η μείωση στη συνολική κατανάλωση ισχύος στους ΣΒ του δικτύου:	16%-60%	14.56W-54.6W

4.1.1.4 Σενάριο 5^ο: 1 μακροκυψέλη και τέσσερις συστάδες φεμτοκυψελών

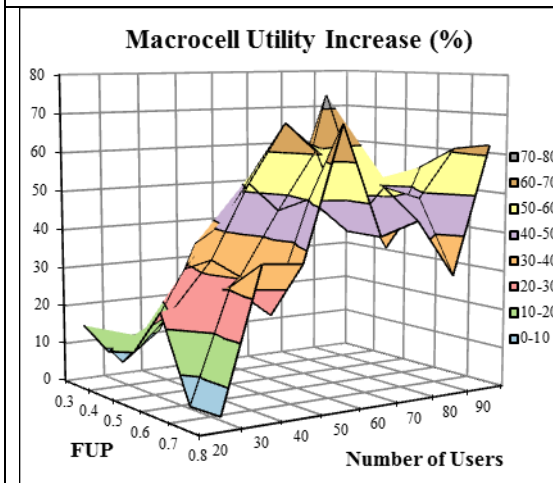
Τα γραφήματα που χαρακτηρίζουν το 5^ο σενάριο:



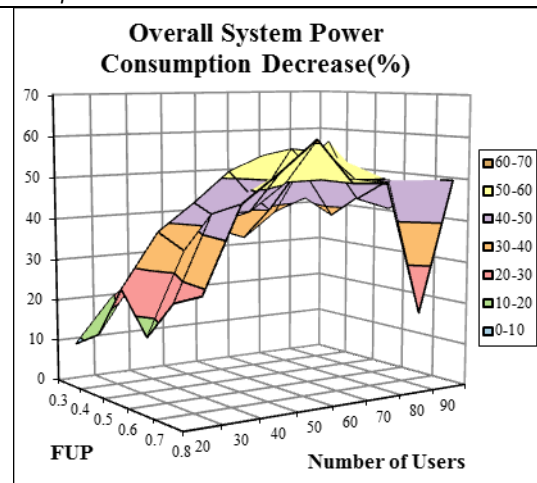
Σχήμα 23: Η τοπολογία του τρίτου σεναρίου αποτελείται από μια μακροκυψέλη και 25 φεμτοκυψέλες ομαδοποιημένες σε τέσσερις συστάδες.



Σχήμα 24: Το ποσοστό κέρδους της συνολικής συνάρτησης ευχαρίστησης του δικτύου με τον προτεινόμενο αλγόριθμο σε σχέση με το FUP και με το συνολικό αριθμό των χρηστών του δικτύου στο 5^ο σενάριο.



Σχήμα 25: Το ποσοστό κέρδους της συνολικής συνάρτησης ευχαρίστησης των μάκρο-χρηστών του δικτύου με τον προτεινόμενο αλγόριθμο σε σχέση με το FUP και με το συνολικό αριθμό των χρηστών του δικτύου στο 5^ο σενάριο.



Σχήμα 26: Το ποσοστό κέρδους της συνολικής κατανάλωσης ισχύος στους ΣΒ του δικτύου με τον προτεινόμενο αλγόριθμο σε σχέση με το FUP και με το συνολικό αριθμό των χρηστών του δικτύου στο 5^ο σενάριο.

Από τα παραπάνω γραφήματα φαίνεται ότι στην περιοχή ενδιαφέροντος ισχύουν τα εξής:

<u>Το υπό μελέτη μέγεθος:</u>	<u>Ποσοστό</u>	<u>Ερμηνεία Ποσοστού</u>
Η αύξηση της συνολικής συνάρτησης ευχαρίστησης του δικτύου:	2%-23%	1.44Mbps-35.28Mbps
Η αύξηση της συνολικής συνάρτησης ευχαρίστησης των μάκρο-χρηστών του δικτύου:	3%-67%	2.16Mbps-99.12Mbps
Η μείωση στη συνολική κατανάλωση ισχύος στους ΣΒ του δικτύου:	19%-57%	16.15W-48.45W

5

Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάσαμε τη διαχείριση της ισχύος και την κατανομή της στην κάτω ζεύξη από τους ΣΒ ενός CDMA δικτύου δυο επιπέδων, που αποτελείται από μια μακροκυψέλη και $|C|$ φεμτοκυψέλες κλειστής πρόσβασης (closed access). Στόχος του υπό μελέτη προβλήματος GPB ήταν να αυξήσουμε τη συνολική συνάρτηση ευχαρίστησης των χρηστών του δικτύου που ερμηνεύεται σε αύξηση του συνολικού ρυθμού μετάδοσης κάτω ζεύξης των χρηστών μειώνοντας τις παρεμβολές στους χρήστες μέσω της ελαχιστοποίησης της συνολικής κατανάλωσης ισχύος στους ΣΒ του δικτύου. Σύμφωνα με τον αλγόριθμο που προτείνουμε κάθε κυψέλη c αντιμετωπίζεται ως ένα κατανεμημένο πρόβλημα, το οποίο αναζητεί τη συνολική ισχύ που θα διαθέσει στους χρήστες της με στόχο την αύξηση της συνολικής απόδοσης του δικτύου καθώς και το πως θα την κατανείμει στους χρήστες της με στόχο την αύξηση του συνολικού ρυθμού μετάδοσης κάτω ζεύξης των χρηστών της. Στον προτεινόμενο αλγόριθμο μας κάθε κυψέλη c αποτελεί ένα πρόβλημα τύπου CLP το οποίο είναι ένα πρόβλημα βέλτιστης διαχείρισης πόρων της εκάστοτε κυψέλης c με στόχο την αύξηση του συνολικού ρυθμού μετάδοσης κάτω ζεύξης των χρηστών της και επιλύεται με Dual Decomposition με βάση τον προτεινόμενο αλγόριθμο της μελέτης [5]. Επιλέγοντας τη subgradient μέθοδο ως μέθοδο επίλυσης του MP, το οποίο αναζητεί τις συνολικές ισχύεις που θα διαθέσουν οι ΣΒ στους χρήστες τους με στόχο την αύξηση της συνολικής απόδοσης του δικτύου, και αποδεικνύοντας τη σύγκλιση της εξασφαλίζουμε ότι κάθε ΣΒ θα αποφασίζει την ισχύ που θα διαθέσει στους χρήστες του κάθε χρονική στιγμή (δηλαδή το πρόβλημα MP σπάει σε τόσα επιμέρους

προβλήματα όσοι είναι οι ΣΒ του δικτύου). Κάθε ΣΒ c αποκτά μια εικόνα για την παρούσα κατάσταση της κυψέλης c μέσω της λαγκρανσιανής μεταβλητής λ_c^* της εκάστοτε κυψέλης c και έτσι αποφασίζει την ισχύ που θα διαθέσει στους χρήστες του την επόμενη χρονική στιγμή. Για την επίλυση του αλγορίθμου μας οι κυψέλες θα πρέπει να γνωρίζουν το βήμα $a(t)$ και τις συνολικές ισχύεις $\overline{P_{\max}}$ που διαθέτουν οι ΣΒ στους χρήστες τους κάθε χρονική στιγμή t . Η ανάγκη συντονισμού όλων των κυψελών ώστε να αναφέρονται στο ίδιο t αυξάνει την πολυπλοκότητα του αλγορίθμου μας. Προσομοιώνοντας σε matlab ένα δίκτυο δυο επιπέδων και τον προτεινόμενο αλγόριθμο καταλήξαμε σε συμπεράσματα τα οποία αποδεικνύουν την αποδοτικότητα του αλγορίθμου μας. Συγκεκριμένα στο σενάριο 1 παρατηρήσαμε ότι στις περιοχές ενδιαφέροντος (1-4 χρήστες ανά φεμτοκυψέλη) (i) μειώνεται η συνολική κατανάλωση ισχύος στους ΣΒ του δικτύου μέχρι και 69% που μεταφράζεται σε μείωση της ισχύος μέχρι και 37.5W, (ii) αυξάνεται η συνολική συνάρτηση ευχαρίστησης των χρηστών του δικτύου μέχρι και 49%, που μεταφράζεται σε αύξηση του συνολικού ρυθμού μετάδοσης κάτω ζεύξης των χρηστών του δικτύου μέχρι και 59Mbps ,και (iii) αυξάνεται η συνολική συνάρτηση ευχαρίστησης των μακρο-χρηστών του δικτύου μέχρι και 100%, που μεταφράζεται σε αύξηση του συνολικού ρυθμού μετάδοσης κάτω ζεύξης των μακρο-χρηστών του δικτύου μέχρι και 144Mbps.

Ένα θέμα μελλοντικής έρευνας θα ήταν να μελετηθεί πως θα μπορούσαμε να εξαλείψουμε την ανάγκη συντονισμού μεταξύ των κυψελών ώστε να αναφέρονται στο ίδιο t . Μια ενδεχόμενη πιθανή λύση θα ήταν να θεωρήσουμε ένα σταθερό βήμα, δηλαδή ένα βήμα το οποίο δεν είναι συνάρτηση του χρόνου t . Ένα άλλο θέμα μελλοντικής έρευνας θα ήταν να μελετήσουμε το παρόν πρόβλημα της διπλωματικής με ανοιχτής-πρόσβασης ή υβριδικές φεμτοκυψέλες. Όμως, σ' αυτή την περίπτωση σε κάθε χρήστη j του δικτύου θα αντιστοιχεί μια επιπλέον μεταβλητή X_j η οποία θα καθορίζει από ποιον ΣΒ (είτε φέμτο-ΣΒ είτε μακρο-ΣΒ) θα εξυπηρετηθεί. Επιπλέον, θα μπορούσε να μελετηθεί το υπό μελέτη θέμα της εργασίας θεωρώντας ότι οι χρήστες είναι σε κίνηση και όχι ακίνητοι.

6

Βιβλιογραφία

- [1] V. Chandrasekhar, J. G. Andrews, “Femtocell Networks: A Survey”, IEEE Communications Magazine, September 2008
- [2] 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, 26-32, (2010).
- [3] T. Kastrinogiannis, and S. Papavassiliou, “A Dynamic Utility Adaptation Framework for Efficient Multimedia Service Support in CDMA Wireless Networks,” EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, vol. 2010, Article ID 375410, 20 pages, 2010. doi:10.1155/2010/375410.
- [4] T. Kastrinogiannis, and S. Papavassiliou, “Utility based Short-term Throughput Driven Scheduling Approach for Efficient Resource Allocation in CDMA Wireless Networks”, in Wireless Personal Communications Journal, Springer, volume 52, issue 3, page 517-535, 2010.
- [5] J.-W. Lee, R. R. Mazumdar, N. B. Shroff, “Downlink Power Allocation for Multi-Class Wireless Systems”, IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 13, no. 4, August 2005
- [6] A. Ganti, T. E. Klein, M. Haner, “Base station assignment and power control algorithms for data users in a wireless multiaccess framework” , IEEE Transactions on Wireless Communications, vol.5, no.9, 2493-2503, (2006).
- [7] D. P. Palomar, M. Chiang, “A Tutorial on Decomposition Methods for Network Utility Maximization ”, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 24, no. 8, August 2006
- [8] S. Stanczak, M. Wiczanowski, H. Boche, “Distributed Utility-Based Power Control: Objectives and Algorithms”, IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 55, no. 10, October 2007

- [9] V. Chandrasekhar, J. G. Andrews, T. Muharemovic, Z. Shen, A. Gatherer, "Power Control in Two-Tier Femtocell Networks", IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 8, No. 8, pp. 4316-4328, August 2009
- [10] D. P. Bertsekas, A. Nedic, A. Ozdaglar, Convex Analysis and Optimization, Belmont, MA: Athens Scientific, 2003
- [11] P. Hande, S. Rangan, M. Chiang, X. Wu, "Distributed uplink power control for optimal sir assignment in cellular data networks", IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 16, no. 6, 1420-1433, (2008).
- [12] M. Chiang, S. H. Low, A. R. Calderbank, J. C. Doyle, "Layering as optimization decomposition: a mathematical theory of network architectures", IEEE Proceedings, vol.95, no.1, 255–312, (2007).
- [13] 3GPP TSG SA, 3GPP TS 23.402 V9.2.0. Architecture enhancements for non-3GPP accesses (Release 9).