



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ**

**Βέλτιστη Κατανομή Πόρων και Εξυπηρέτηση
Πολλαπλών Υπηρεσιών σε Ασύρματα Δίκτυα**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΕΙΡΗΝΗ ΕΛΕΝΗ ΤΣΙΡΟΠΟΥΛΟΥ

ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ & ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ, ΕΜΠ

Αθήνα, Απρίλιος 2014



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Βέλτιστη Κατανομή Πόρων και Εξυπηρέτηση Πολλαπλών Υπηρεσιών σε Ασύρματα Δίκτυα

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΕΙΡΗΝΗ ΕΛΕΝΗ ΤΣΙΡΟΠΟΥΛΟΥ

ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ & ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ, ΕΜΠ

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

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την

.....
Συμεών Παπαβασιλείου
Αναπλ. Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Βασίλειος Μάγκλαρης
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Μιχαήλ Θεολόγου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Δημήτριος Ασκούνης
Αναπλ. Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Μιλτιάδης Αναγνώστου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Ιάκωβος Βενιέρης
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Γεώργιος Π. Ευθύμογλου
Αναπλ. Καθηγητής Παν. Πειραιώς

Αθήνα, Απρίλιος 2014

.....
Ειρήνη Ελένη Τσιροπούλου

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

Copyright © Ειρήνη Ελένη Τσιροπούλου, 2014.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

*Αφιερώνεται στους Γονείς μου,
Ιωάννη και Ευρυδίκη,
ως ελάχιστο δείγμα ευγνωμοσύνης για την απεριόριστη αγάπη και
στήριξή τους...
και στον Άδερφό μου,
Γιώργο,
ο οποίος αποτελεί το φωτεινό μου παράδειγμα.*

*Στην Ιερή Σκιά των Προγόνων μου,
που η μνήμη τους με συνοδεύει.*

Περίληψη

Η παρούσα διδακτορική διατριβή πραγματεύεται το πρόβλημα της βέλτιστης κατανομής πόρων και εξυπηρέτησης πολλαπλών υπηρεσιών σε ασύρματα δίκτυα τρίτης, τέταρτης και επόμενης γενιάς. Ιδιαίτερη έμφαση δίδεται στη ζεύξη ανόδου και στην ικανοποίηση των κριτηρίων ποιότητας υπηρεσίας των χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου και υπηρεσίες δεδομένων, οι οποίες απαιτούν την τήρηση αυστηρών βραχυπρόθεσμων κριτηρίων καθυστέρησης και μακροπρόθεσμων κριτηρίων ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, αντίστοιχα. Λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω ιδιαιτερότητες, πραγματοποιείται μοντελοποίηση και επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης κατανομής των πόρων του δικτύου στους χρήστες καλύπτοντας το μέχρι τώρα ερευνητικό κενό στη διεθνή βιβλιογραφία.

Αρχικά εισάγεται το πρόβλημα της βέλτιστης κατανομής ισχύος εκπομπής στη ζεύξη ανόδου CDMA ασύρματων δικτύων με την εξυπηρέτηση υπηρεσιών πραγματικού χρόνου. Στη συνέχεια, το πρόβλημα γενικεύεται και έχει ως στόχο τη βέλτιστη κατανομή ισχύος εκπομπής με την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλαπλών υπηρεσιών (δηλαδή υπηρεσιών πραγματικού χρόνου και υπηρεσιών δεδομένων). Έπειτα στα δύο προγενέστερα προβλήματα εισάγεται η έννοια της κυρτής κοστολόγησης ως προς την ισχύ εκπομπής των χρηστών με στόχο τη βελτίωση της λύσης του προβλήματος, με γνώμονα το κοινωνικό όφελος των χρηστών. Επιπρόσθετα, μοντελοποιείται το πρόβλημα της συνδυαστικής κατανομής ισχύος εκπομπής και ρυθμού μετάδοσης στη ζεύξη ανόδου CDMA ασύρματων δικτύων με την εξυπηρέτηση πολλαπλών υπηρεσιών. Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται ως ένα διαπραγματικό πρόβλημα και καταλήγει στην εύρεση μοναδικού σημείου ισορροπίας και ως προς τους δύο πόρους του συστήματος που κατανέμονται στους χρήστες.

Η μελέτη επεκτείνεται σε ασύρματα δίκτυα τέταρτης και επόμενης γενιάς με χρήση τεχνολογίας SC-FDMA και προτείνεται ένας ευρεστικός αλγόριθμος συνδυαστικής κατανομής ισχύος εκπομπής και υποφερουσών στους χρήστες. Η προτεινόμενη προσέγγιση βελτιώνεται με τη χρήση μοντέλων διαπραγμάτευσης, τα οποία συνεισφέρουν στην αποδοτικότερη κατανομή των υποφερουσών στους χρήστες, ενώ έπειτα η ισχύς εκπομπής κατανέμεται στους χρήστες κατά το βέλτιστο τρόπο.

Τέλος, η έρευνα επεκτείνεται σε διεπίπεδα φεμτοκυβελωτά ασύρματα δίκτυα, όπου αρχικά επιτυγχάνεται η βέλτιστη κατανομή ισχύος εκπομπής στους χρήστες, λαμβάνοντας ταυτόχρονα υπόψη το είδος της υπηρεσίας που αυτοί αιτούνται, αλλά και το επίπεδο της αρχιτεκτονικής του δικτύου στο οποίο ανήκουν. Η έρευνα ολοκληρώνεται με την επίλυση του

προβλήματος της συνδυαστικής κατανομής ισχύος εκπομπής και ρυθμού μετάδοσης σε διεπίπεδα φεμτοκυβελωτά ασύρματα δίκτυα με την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλαπλών υπηρεσιών.

Λέξεις Κλειδιά

Ασύρματα Δίκτυα, Βέλτιστη Κατανομή Πόρων Δικτύου, Πολλαπλές Υπηρεσίες, Θεωρία Βελτιστοποίησης, Θεωρία Παιγνίων, Θεωρία Διαπραγματεύσεων.

Abstract

The PhD thesis addresses the problem of optimal resource allocation in the uplink of multi-service wireless networks of third, fourth and next generation. Particular emphasis is placed on the fulfillment of users' Quality of Service (QoS) prerequisites, either requesting real-time or non-real time services, which requires compliance with strict short-term and long-term delay and data rate constraints, respectively. Taking into account these restrictions, various optimization problems are modeled and solved aiming at allocating the resources to the users, covering the research gap in the recent literature.

Initially, the problem of utility-based optimal power control in CDMA wireless networks with real-time services is introduced. The problem is further generalized to the uplink power control in QoS-aware multi-service (i.e. real-time services and data services) CDMA wireless networks, while the concept of convex pricing of user's uplink transmission power is introduced in order to obtain a socially efficient power allocation. Then, the joint utility-based uplink power and rate control problem is addressed in the uplink of CDMA wireless networks with multiple services. The problem is treated as a two variable game and the unique equilibrium point considering both system resources is determined.

Furthermore, the study is extended to SC-FDMA wireless networks via proposing a heuristic utility-based uplink joint power and subcarrier allocation. The results of the proposed approach are improved by adopting the bargaining theory, which concludes to an energy-efficient subcarrier allocation in SC-FDMA wireless networks, while user's transmission power is allocated in an optimal way.

Finally, the research is extended to the two-tier femtocell wireless networks. Initially, the problem of efficient uplink power control in multi-service two-tier femtocell networks via a game theoretic approach was investigated via considering not only the type of service being requested, but also the two-tier architecture. The research is completed by addressing the combined power and rate allocation problem in multi-service two-tier femtocell networks via a game theoretic approach.

Keywords

Wireless Networks, Optimal Resource Allocation, Multiple Services, Optimization Theory, Game Theory, Bargaining Theory.

Ευχαριστίες

Η ολοκλήρωση της διδακτορικής διατριβής κατέστη δυνατή χάρη στην αμέριστη συμπαράσταση και την πολύτιμη βοήθεια ενός μεγάλου αριθμού ανθρώπων. Όλοι αυτοί, αλλά και ο καθένας τους ξεχωριστά, συνέβαλαν τα μέγιστα για την επιτυχημένη πορεία της ερευνητικής μου δραστηριότητας. Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να εκφράσω την απεριόριστη ευγνωμοσύνη μου και τις θερμές μου ευχαριστίες για την ηθική, πνευματική και έμπρακτη υποστήριξη που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια.

Αρχικά, θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς και εγκάρδιες ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα Αναπληρωτή Καθηγητή ΕΜΠ της διδακτορικής διατριβής μου, κ. Συμεών Παπαβασιλείου. Τον ευχαριστώ θερμά για τη μεγάλη εμπιστοσύνη με την οποία με περιέβαλε και την υποστήριξη που μου παρείχε καθ'όλη τη διάρκεια της προσπάθειάς μου, από τη στιγμή που έγινα δεκτή ως Υποψήφια Διδάκτορας έως σήμερα. Η άρτια επιστημονική καθοδήγηση, η διαρκής βοήθεια και οι στοχευμένες παρατηρήσεις του αποτέλεσαν απτή και απαραίτητη αρωγή για την ολοκλήρωση της διδακτορικής διατριβής μου. Η σημαίνουσα προσωπικότητά του στον επιστημονικό χώρο, το σπάνιο εύρος των γνώσεων και οι συμβουλές του με βοήθησαν να αξιοποιήσω αποτελεσματικά τις ικανότητές μου και να μπορέσω να ανταπεξέλθω στον απαιτητικό χώρο της επιστημονικής έρευνας. Το ενδιαφέρον του να με καταστήσει άρτια κοινωνό της επιστημονικής έρευνας, χαρακτηριστικά της οποίας είναι η σαφήνεια, η λιτότητα, η περιεκτικότητα και η ευκρίνεια ως προς την ανάλυση, συνέβαλε στην ολοκληρωμένη εκπαίδευσή μου κατά την αγωγική συνεργασία μας. Επιπλέον, θα ήθελα να τον ευχαριστήσω από βάθος καρδιάς για τις υψηλές πνευματικές και επιστημονικές αξίες που μου μετέδωσε, καθώς αυτές αποτελούν τη σημαντικότερη παρακαταθήκη μου για το μέλλον ως ικανής μηχανικού και άξιας επιστήμονα.

Ανάλογες ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω προς το σεβαστό μου Καθηγητή ΕΜΠ κ. Β. Μάγκλαρη. Θα ήθελα να επισημάνω το έντονο ενδιαφέρον του για την πρόοδο του επιστημονικού μου έργου και την ανυπολόγιστη αξία βοήθεια που μου προσέφερε φιλοξενώντας με στο χώρο του εργαστηρίου ΕΜΠ NETMODE, το οποίο ο ίδιος με προσωπικό ενδιαφέρον και κόπο έστησε, ανέδειξε και διατηρεί σε υψηλό επίπεδο το ερευνητικό έργο των ερευνητών που το αποτελούν. Ευχαριστώ θερμά τον κ. Β. Μάγκλαρη, διότι με μοναδικό τρόπο με έκανε να αισθανθώ μέρος και μέλος του παραδείσου της γνώσης.

Επιπρόσθετα, θα ήθελα να αποδώσω τις εγκάρδιες ευχαριστίες μου στα υπόλοιπα μέλη της επταμελούς εξεταστικής επιτροπής της διδακτορικής διατριβής μου: Καθηγητή ΕΜΠ κ. Μ. Θεολόγου, Καθηγητή ΕΜΠ κ. Μ. Αναγνώστου, Καθηγητή ΕΜΠ κ. Ι. Βενιέρη, Αναπληρωτή

Καθηγητή ΕΜΠ Δ. Ασκούνη και Αναπληρωτή Καθηγητή ΠΑΠΕΙ κ. Γ. Ευθύμογλου. Θα ήθελα να τους ευχαριστήσω για τη συνεργασία τους καθώς και για την τιμή που μου έκαναν αποδεχόμενοι να συμμετάσχουν στην επταμελή εξεταστική επιτροπή της διδακτορικής διατριβής μου. Η άρτια επιστημονική τους κατάρτιση και η αφοσίωση που χαρακτηρίζει το διδακτικό τους έργο μου ενέπνευσαν, ως προπτυχιακή και μεταπτυχιακή φοιτήτρια, την αγάπη για τη μάθηση και την έρευνα.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συναδέλφους μου από το εργαστήριο: Μαίρη Γραμματικού, Δημήτρη Καλογερά, Γιώργο Ανδρουλιδάκη, Χρύσα Παπαγιάννη, Βασίλη Καρυώτη, Τιμόθεο Καστρινογιάννη, Κώστα Τρούλο, Άγγελο Λένη, Γιώργο Αριστομενόπουλο, Στέλλα Καφετζόγλου, Κώστα Μαρίνο, Βασιλική Πουλή, Χρήστο Αργυρόπουλο, Αλέξανδρο Σιούγγαρη, Έλενα Στάη, Βαγγέλη Ανυφαντή, Άρη Λειβαδέα, Γιάννο Κρύφτη, Άγγελο Καπουκάκη, Μαίρη Γιατίλη και Κώστα Γιώτη για την άσπρη συνεργασία τους. Ιδιαίτερα, θα ήθελα από καρδιάς να ευχαριστήσω τους κοντινούς μου συνεργάτες Βασίλη Μερεκούλια, Γιώργο Κατσίνη και Πάνο Βαμβακά. Οι αμέτρητες ώρες κοινής δουλειάς που πολλές φορές κατέληγαν σε ολονύκτια εργασία, οι εντατικοί και εξαντλητικοί ρυθμοί που ακολουθήσαμε τα τελευταία χρόνια και οι κοινές θυσίες δικαιώθηκαν από τα λαμπρά αποτελέσματα που επιτύχαμε.

Επιπρόσθετα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φοιτητές από τη σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών ΕΜΠ, με τους οποίους συνεργάστηκα κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής τους εργασίας, Γ. Κατσίνη, Π. Βαμβακά, Α. Καπουκάκη, Χ. Παππά, Ι. Ζόμπολα και Α. Φίλιο. Η άριστη συνεργασία μας και η αφοσίωση στον κοινό μας στόχο είχε ως αποτέλεσμα μία άρτια ερευνητικά διπλωματική εργασία, η οποία ακολουθήθηκε από πλήθος δημοσιεύσεων σε διεθνή συνέδρια και περιοδικά.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς τους επιβλέποντες της διπλωματικής εργασίας μου στο διατμηματικό πρόγραμμα μεταπτυχιακών σπουδών «Τεχνο-Οικονομικά Συστήματα» (MBA), Αναπληρωτή Καθηγητή ΕΜΠ, κ. Δ. Ασκούνη και τον Επίκουρο Καθηγητή ΕΜΠ, κ. Γ. Ματσόπουλο. Το λαμπρό ερευνητικό τους έργο σε έναν τομέα διαφορετικό από τα ενδιαφέροντα της διδακτορικής διατριβής μου αποτέλεσε το κίνητρο και την αρωγή ώστε να διευρύνω τις ερευνητικές μου δραστηριότητες και να αποκτήσω τη γνώση της Επιχειρηματικής Διοίκησης.

Επιπρόσθετα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή ΕΜΠ, Ι. Βομβορίδη, ο οποίος ήταν αρωγός της προσπάθειάς μου κατά τη διάρκεια των φοιτητικών μου χρόνων, ως προπτυχιακή, αλλά και ως μεταπτυχιακή φοιτήτρια. Η πατρική του καθοδήγηση, η απεριόριστη αγάπη του, αλλά και το προσωπικό του ενδιαφέρον για την ερευνητική μου πρόοδο αποτέλεσαν συναισθηματικό στήριγμα όλα αυτά τα χρόνια. Αυτή τη στιγμή, όπου έφθασε η ώρα του

επίλογου της φοιτητικής μου πορείας θα ήθελα να εκφράσω τις εγκάρδιες ευχαριστίες μου που βοήθησε να γίνει πιο ευχάριστη αυτή η διαδρομή.

Σε προσωπικό επίπεδο, θα ήθελα από καρδιάς να ευχαριστήσω τους αδελφικούς μου φίλους και συναδέλφους, Βασίλη Παναγάκο, Πλάτωνα Σίψα και Τάσο Παναγή. Τα φοιτητικά χρόνια που ζήσαμε μαζί, οι αμέτρητες ώρες διαβάσματος, προετοιμασίας εργασιών, εξεταστικών περιόδων, τα κοινά μας ενδιαφέροντα και οι ανησυχίες μας, είχαν ως αποτέλεσμα να δεθούμε με μία βαθιά και ανεξίτηλη φιλία. Η εσωτερική μου ανάγκη να σας ευχαριστήσω για όλα αυτά τα χρόνια που μοιραστήκατε μαζί μου αγωνίες, επιτυχίες, αποτυχίες, προβληματισμούς και χαρές δεν μπορούν να περιοριστούν σε λίγες γραμμές. Θα είμαστε μαζί να ζήσουμε τα χρόνια που έρχονται, το ίδιο αγαπημένοι όπως είμαστε. Επίσης, θέλω να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στους κοντινούς μου φίλους: Θεοδώρα, Άννα, Γιώργο Σ., Βίκυ, Ανδρέα, Μαριέτα και Γιώργο Π., τόσο για αυτούς που άντεξαν τις δυσκολίες που περάσαμε αυτά τα χρόνια, αλλά και όσο για αυτούς που προχώρησαν σε άλλες επιλογές.

Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω την απεριόριστη αγάπη μου στο δάσκαλό μου Νίκο Κυριακόπουλο, ο οποίος μου εμφύσησε την αγάπη των μαθηματικών, αποτέλεσε παράδειγμα ηθικής, οργανωμένης εργασίας, αφοσίωσης στο στόχο, θετικής σκέψης και καλοσύνης. Η μνήμη του με συντροφεύει όλα αυτά τα χρόνια και η φράση του «Όποιος γεννήθηκε για να είναι πρώτος, θα ταλαιπωρείται μία ζωή» παραμένει ανεξίτηλη στη μνήμη μου και αποτελεί κίνητρο για να επιδιώκω την πρωτιά. Δάσκαλε σε ευχαριστώ για όλα όσα απλόχερα μου προσέφερες.

Από αυτές τις ευχαριστίες δε θα μπορούσαν να απουσιάζουν οι αγαπημένοι μου καθηγητές του Πρότυπου Πειραματικού Λυκείου Αναβρύτων, Φυσικός κ. Π. Ζερβός, Φυσικός κ. Γ. Ντούβαλης, Μαθηματικός κ. Σ. Μέτης, οι οποίοι αποτέλεσαν πρότυπο κατά τα μαθητικά μου χρόνια, αλλά και στη μετέπειτα πορεία μου. Στην αθώτητα των εφηβικών χρόνων μου διαπλάσατε μία μαθήτριά που ήθελε να πετύχει στο δύσκολο και εξοντωτικό σύστημα των Πανελλαδικών εξετάσεων. Η επιμονή στην τελειότητα, στην ακρίβεια του λόγου και των μαθηματικών αποδείξεων κληρονομήθηκε από τον κ. Π. Ζερβό. Ένας Δάσκαλος που δεν αρκέστηκε ποτέ στη μετριότητα και αναζητούσε από τον/την κάθε μαθητή/τρια ό,τι καλύτερο μπορούσε να αποδώσει. Η οργάνωση της εργασίας και η μεθοδικότητα που ενέπνεε ο άριστα οργανωμένος πίνακας του κ. Γ. Ντούβαλη δεν μπορούσε παρά να σε κάνει κοινωνό αυτής της οργάνωσης, σε κάθε επίπεδο, είτε ερευνητικό, είτε προσωπικό. Τέλος, η ευκολία με την οποία αντιμετώπιζε ο κ. Σ. Μέτης οποιαδήποτε άσκηση μαθηματικών (ακόμα και αν η δυσκολία της ήταν ιδιαίτερα αυξημένη), μου έδινε την εντύπωση ότι όλα αντιμετωπίζονται. Η φράση του «Τίποτα δεν είναι άλυτο, αρκεί να παρατηρείς με προσοχή τι σου δίδεται» ηχεί ακόμα στα αυτιά μου. Αποτέλεσμα αυτής της στάσης που μου κληροδότησε ήταν η ευκολία και η επιμονή με την οποία αντιμετώπισα όλα τα προβλήματα βελτιστοποίησης κατά τη διάρκεια

της διδακτορικής μου διατριβής. Σας ευχαριστώ πολύ από βάθος καρδιάς. Αποτελείτε υπόδειγμα δασκάλου, νιώθω τυχερή που μαθήτευσα δίπλα σας και έζησα τα μαθητικά μου χρόνια στο Πρότυπο Πειραματικό Λύκειο Αναβρύτων.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους μικρούς μου μαθητές, με τους οποίους συναναστράφηκα τα τελευταία 11 χρόνια. Η αγάπη τους, η αθωότητά τους, τα γλυκά τους πρόσωπα γεμάτα ερωτηματικά, ο κώδικας επικοινωνίας που αναπτύξαμε με τον καθένα ξεχωριστά, αποτέλεσαν σημαντικό αρωγό κατά τη διάρκεια των προπτυχιακών και μεταπτυχιακών μου σπουδών. Όλη η κούραση της επίπονης προσπάθειας του διαβάσματος εξαλειφόταν με μία αστεία φράση τους, με ένα τους χαμόγελο, με μία αγκαλιά, με το ενδιαφέρον τους για την πρόοδό μου. Μοιραστήκατε μαζί μου τις αγωνίες των εξεταστικών περιόδων, της προετοιμασίας μου για τα διεθνή συνέδρια, τη χαρά μου για τα βραβεία. Με κάνατε και σας έκανα περήφανους. Η πιο μεγάλη χαρά όμως που μου δώσατε ήταν η εισαγωγή σας μέσω του συστήματος των Πανελλαδικών εξετάσεων σε ανώτατες σχολές, μερικές από τις οποίες ήταν Ιατρική, Φαρμακευτική Αθηνών, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Μηχανολόγων Μηχανικών, Ναυπηγών Μηχανικών, Πολιτικών Μηχανικών & Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών ΕΜΠ. Σας ευχαριστώ πολύ.

Ολοκληρώνοντας τις ευχαριστίες μου, δεν είναι εύκολο να βρω τα λόγια για να εκφράσω την ευγνωμοσύνη και την αγάπη μου για την οικογένειά μου. Θέλω να ευχαριστήσω ολόψυχα τους γονείς μου, Ιωάννη και Ευρυδίκη, στους οποίους οφείλω την ύπαρξή μου και τον τρόπο που πορεύομαι. Λαμπροί επιστήμονες και οι δύο, μου μάθατε από μικρή ηλικία την αγάπη για τη μάθηση, τη γνώση, την προσπάθεια, την υπομονή, την επιμονή και την αφοσίωση στο στόχο. Με κάνατε κοινωνό των ηθικών αξιών, γνωστοποιώντας μου ότι πλούσιος είναι αυτός που κατέχει τη γνώση και όχι τα εφήμερα υλικά αγαθά. Η αγάπη με την οποία με περιβάλλατε, οι ανυπολόγιστες θυσίες σας για εμένα και η υπομονή σας στη δύσκολη καθημερινότητά μου και στο δύστροπο χαρακτήρα μου, μου δίνουν το θάρρος και την ικανότητα να προχωρώ μπροστά. Αποτελείτε υπόδειγμα γονέων, οι οποίοι όλα αυτά τα χρόνια με στηρίζετε, φροντίζετε για την άρτια εκπαίδευσή μου κάνοντας τις καλύτερες επιλογές σχολείων (από την παιδική μου ηλικία) και σχολής, ζήσαμε μαζί όλες τις χαρές και τις λύπες της έρευνας και πάντα προσπαθώ να είστε υπερήφανοι για την πρόοδό μου. Οι ηθικές αξίες που μου εμφυσήσατε και τα ψυχικά και συναισθηματικά εφόδια που μου παρέχετε καθημερινά, με βοηθούν να αφοσιώνομαι απερίσπαστη στο ερευνητικό μου έργο. Θέλω να τονίσω ότι αποτελείτε λαμπρό υπόδειγμα γονέων, στο οποίο εύχομαι κάποια στιγμή να ομοιάσω, διότι αφιερώσατε όλη σας την ύπαρξη σε εμένα και τον αδερφό μου. Επίσης, θέλω να εκφράσω την απεριόριστη αγάπη και θαυμασμό μου στον αδελφό μου και συνάδελφο Γιώργο. Ως μεγαλύτερος αδερφός αποτελούσε πάντα το παράδειγμα στο οποίο ήθελα να ομοιάσω και είχες βάλει τον πήχυ πάρα πολύ ψηλά. Η προσπάθεια μου να εισαχθώ

στους Ηλεκτρολόγους Μηχανικούς & Μηχανικούς Υπολογιστών ΕΜΠ, μη γνωρίζοντας τότε το μεγαλείο της σχολής, οφείλεται σε εσένα. Η διαρκής μου προσπάθεια να αριστεύσω στη σχολή, η επιλογή των μεταπτυχιακών σπουδών (MBA) και η επιλογή της τηλεπικοινωνιακής κατεύθυνσης και έπειτα του διδακτορικού οφείλεται αποκλειστικά σε εσένα. Ήσουν πάντοτε πρωτοπόρος και οι δρόμοι που άνοιγες ήταν πιο ευκολοδιάβατοι για εμένα. Αποτελείς το συναισθηματικό μου στήριγμα και η αγάπη σου είναι απλόχερη σε κάθε μου βήμα. Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω το καινούργιο μέλος της οικογένειάς μου, Ελισάβετ, της οποίας η καλοσύνη και η ανιδιοτελής αγάπη αποτελούν αρωγό των βημάτων μου.

Ολοκληρώνω αυτό το ευχαριστήριο σημείωμα με μία ευχή για το μέλλον της ερευνητικής μου πορείας, δανειζόμενη το στίχο του εθνικού μας ποιητή Οδυσσέα Ελύτη...

«Κάνε άλμα πιο γρήγορο από τη φθορά...»

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή.....	25
1.1	Συμβολή της Διατριβής.....	26
1.2	Διάρθρωση της Διατριβής.....	30
2	Βέλτιστη Κατανομή Ισχύος Εκπομπής σε CDMA Ασύρματα Κυψελωτά Δίκτυα κατά τη Ζεύξη Ανόδου: Υπηρεσίες Πραγματικού Χρόνου.....	32
2.1	Σχετική βιβλιογραφία.....	34
2.2	Μοντέλο Συστήματος & Σχετικές Πληροφορίες.....	35
2.3	Απαιτήσεις σε Ποιότητα της Υπηρεσίας.....	37
2.4	Ορισμός μη Συνεργατικού Παιγνίου Κατανομής Ισχύος Εκπομπής.....	40
2.5	Επίλυση του Παιγνίου & Προσδιορισμός του Σημείου Ισορροπίας κατά Nash.....	41
2.6	Μελέτη των Ιδιοτήτων του Σημείου Ισορροπίας κατά Nash.....	45
2.7	Αριθμητικά Αποτελέσματα.....	48
2.8	Συμπεράσματα & Ανακεφαλαίωση.....	50
3	Βέλτιστη Κατανομή Ισχύος Εκπομπής σε CDMA Ασύρματα Κυψελωτά Δίκτυα κατά τη Ζεύξη Ανόδου: Πολλαπλές Υπηρεσίες.....	52
3.1	Σχετική βιβλιογραφία.....	53
3.2	Συμβολή & Καινοτομία.....	54
3.3	Μοντέλο Συστήματος & Σχετικές Πληροφορίες.....	56
3.4	Ικανοποίηση Απαιτήσεων σε Ποιότητα της Υπηρεσίας.....	57
3.4.1	Υπηρεσίες Δεδομένων.....	58
3.4.2	Υπηρεσίες Πραγματικού Χρόνου.....	58
3.5	Μη-Συνεργατικό Παιγνιο Κατανομής Ισχύος Εκπομπής & Υποστήριξης Πολλαπλών Υπηρεσιών στη Ζεύξη Ανόδου.....	60
3.6	Επίλυση Παιγνίου Βέλτιστης Κατανομής Ισχύος Εκπομπής & Προσδιορισμός του Μοναδικού Σημείου Ισορροπίας κατά Nash.....	61
3.6.1	Ιδιότητες Συνάρτησης Επιτεύξιμου Ρυθμού Μετάδοσης.....	61
3.6.2	Ιδιότητες της Συνάρτησης Χρησιμότητας των Χρηστών.....	67
3.6.3	Υπαρξη και Μοναδικότητα του Σημείου Ισορροπίας κατά Nash.....	72
3.7	MSUPC Αλγόριθμος και Σύγκλιση.....	74

3.8	Αριθμητικά Αποτελέσματα	76
3.8.1	<i>Οι Ιδιότητες τους Σημείου Ισορροπίας κατά Nash</i>	78
3.8.2	<i>Σχέσεις ανάμεσα στην Ισχύ Έκπομπής των Χρηστών και στις Τιμές των Συναρτήσεων Χρησιμότητάς τους</i>	79
3.9	Ανακεφαλαιωτικά Συμπεράσματα	83
4	Κατανομή Ισχύος Έκπομπής στη Ζεύξη Ανόδου CDMA Ασύρματων Κυψελωτών Δικτύων με Χρήση Κοστολόγησης μέσω Συναρτήσεων Χρησιμότητας: Υπηρεσίες Πραγματικού Χρόνου 84	
4.1	Σχετική Βιβλιογραφία	85
4.2	Μοντέλο Συστήματος & Σχετικές Πληροφορίες.....	86
4.2.1	<i>Μοντελοποίηση & Επίλυση Παιγνίου Κατανομής Ισχύος (Uplink Power Control game - UPC)</i>	86
4.2.2	<i>Μη Αποδοτικότητα του Σημείου Ισορροπίας κατά Nash του Παιγνίου Κατανομής Ισχύος Έκπομπής χωρίς Χρήση Κοστολόγησης</i>	88
4.3	Παίγνιο Κατανομής Ισχύος Έκπομπής με Χρήση Κυρτής Πολιτικής Κοστολόγησης 89	
4.4	Μοντελοποίηση και Επίλυση του Παιγνίου	90
4.5	Αλγόριθμος Κατανομής Ισχύος με Χρήση Κυρτής Κοστολόγησης	92
4.6	Αριθμητικά Αποτελέσματα	93
4.7	Συμπεράσματα.....	98
5	Κατανομή Ισχύος Έκπομπής στη Ζεύξη Ανόδου CDMA Ασύρματων Κυψελωτών Δικτύων με Χρήση Κοστολόγησης μέσω ΣΧ: Πολλαπλές Υπηρεσίες	100
5.1	Σχετική Βιβλιογραφία	101
5.2	Συμβολή & Καινοτομία.....	102
5.3	Μοντέλο Συστήματος & Σχετικές Πληροφορίες.....	103
5.3.1	<i>Μοντέλο Συστήματος</i>	103
5.4	Απαιτήσεις σε Ποιότητα της Υπηρεσίας & Συναρτήσεις Χρησιμότητας των Χρηστών: Πολλαπλές Υπηρεσίες	105
5.5	Μη Συνεργατικό Παίγνιο Κατανομής Ισχύος Έκπομπής στη Ζεύξη Ανόδου με Υποστήριξη Πολλαπλών Υπηρεσιών	107
5.6	Μη Αποδοτικότητα του Σημείου Ισορροπίας κατά Nash του Παιγνίου Κατανομής Ισχύος Έκπομπής χωρίς Χρήση Κοστολόγησης.....	109

5.7	Μη Συνεργατικό Παίγνιο Κατανομής Ισχύος στη Ζεύξη Ανόδου με Χρήση Κυρτής Κοστολόγησης για την Υποστήριξη Πολλαπλών Υπηρεσιών (MSUPC-CP)	112
5.7.1	Μη Γραμμική Πολιτική Κοστολόγησης	112
5.7.2	Μοντελοποίηση Προβλήματος.....	113
5.8	Σύγκλιση του MSUPC-CP Παιγνίου.....	119
5.9	MSUPC-CP Αλγόριθμος.....	120
5.10	Αριθμητικά Αποτελέσματα & Συμπεράσματα	122
5.10.1	Ιδιότητες Σημείου Ισορροπίας κατά Nash του MSUPC-CP Παιγνίου.....	123
5.10.2	Κυρτή και Γραμμική Πολιτική Κοστολόγησης.....	127
5.10.3	Αυξανόμενο Πλήθος Χρηστών	127
5.11	Ανακεφαλαίωση	128
6	Συνδυαστική Κατανομή Ισχύος Εκπομπής και Ρυθμού Μετάδοσης στη Ζεύξη Ανόδου CDMA Ασύρματων Κυψελωτών Δικτύων	130
6.1	Εισαγωγή.....	130
6.2	Σχετική Βιβλιογραφία	131
6.3	Συνεισφορά Προτεινόμενης Προσέγγισης	134
6.4	Μοντέλο Συστήματος.....	136
6.5	Παίγνιο Συνδυαστικής Κατανομής Ισχύος Εκπομπής & Ρυθμού Μετάδοσης με Χρήση Συναρτήσεων Χρησιμότητας.....	138
6.6	Εύρεση Σημείου Ισορροπίας κατά Nash	139
6.7	JUPRA Αλγόριθμος & Σύγκλιση	142
6.7.1	Σύγκλιση του JUPRA παιγνίου.....	142
6.7.2	JUPRA Αλγόριθμος.....	143
6.8	Βελτίωση της Συνδυαστικής Ενεργειακά Αποδοτικής Κατανομής Πόρων μέσω Κοστολόγησης	144
6.9	Αριθμητικά Αποτελέσματα	145
6.10	Ανακεφαλαιωτικά Συμπεράσματα	149
7	Κατανομή Ισχύος Εκπομπής & Υποφερουσών σε SC-FDMA Ασύρματα Δίκτυα	150
7.1	Σχετική Βιβλιογραφία & Ανάλυση	150
7.2	Μοντέλο Συστήματος.....	151
7.3	Συνδυαστική Κατανομή Ισχύος και Υποφερουσών στη Ζεύξη Ανόδου.....	153
7.4	UPSA Αλγόριθμος.....	155

7.5	Αριθμητικά Αποτελέσματα	155
7.6	Συμπεράσματα & Παρατηρήσεις	157
8	Συνδυαστική Κατανομή Ισχύος Εκπομπής & Υποφερουσών σε SC-FDMA Ασύρματα Δίκτυα: Χρήση Μοντέλων Διαπραγμάτευσης.....	158
8.1	Σχετική Βιβλιογραφία	159
8.2	Συμβολή & Καινοτομία της Προτεινόμενης Προσέγγισης	160
8.3	Μοντέλο Συστήματος & Σχετικές Πληροφορίες.....	162
8.4	Μη Συνεργατικό Παίγνιο Συνδυαστικής Κατανομής Ισχύος Εκπομπής & Υποφερουσών σε SC-FDMA Ασύρματα Δίκτυα	163
8.5	Κατανομή Υποφερουσών με Βάση το Μοντέλο Διαπραγματεύσεων.....	165
8.6	Ενεργειακά Αποδοτική Κατανομή Ισχύος Εκπομπής	169
8.7	EUSPA Αλγόριθμος & Στρατηγικές Αντιστοίχισης Υποφερουσών	171
8.8	Σύγκλιση του EUSPA Αλγορίθμου	172
8.9	Αριθμητικά Αποτελέσματα	174
8.9.1	Λειτουργία & Απόδοση της Προτεινόμενης Προσέγγισης.....	174
8.9.2	Συγκριτική Μελέτη του Pure-EUSPA και του MGS-EUSPA Αλγορίθμου	176
8.9.3	Συσχέτιση Ισχύος Εκπομπής & Ρυθμού Μετάδοσης.....	178
8.9.4	Συγκριτική Μελέτη με Ευρεστικές Προσεγγίσεις.....	179
8.10	Ανακεφαλαιωτικά Συμπεράσματα	179
9	Βέλτιστη Κατανομή Ισχύος Εκπομπής στη Ζεύξη Ανόδου σε Διεπίπεδα Φεμτο-κυψελωτά Δίκτυα με Υποστήριξη Πολλαπλών Υπηρεσιών.....	181
9.1	Σχετική βιβλιογραφία	182
9.2	Μοντέλο Συστήματος & Σχετικές Πληροφορίες.....	184
9.3	Μη Συνεργατικό Παίγνιο Βέλτιστης Κατανομής Ισχύος Εκπομπής στη Ζεύξη Ανόδου σε Διεπίπεδα Φεμτο-κυψελωτά Δίκτυα με Υποστήριξη Πολλαπλών Υπηρεσιών.....	186
9.4	Προσδιορισμός Σημείου Ισορροπίας κατά Nash.....	187
9.5	UPC-MSF Αλγόριθμος.....	188
9.6	Αριθμητικά Αποτελέσματα	190
9.7	Συμπεράσματα.....	193
10	Συνδυαστική Κατανομή Ισχύος Εκπομπής & Ρυθμού Μετάδοσης στη Ζεύξη Ανόδου σε Διεπίπεδα Φεμτοκυψελωτά Δίκτυα με Υποστήριξη Πολλαπλών Υπηρεσιών.....	194
10.1	Σχετική βιβλιογραφία	195

10.2	Συμβολή & Καινοτομία.....	196
10.3	Μοντέλο Συστήματος & Συναρτήσεις Χρησιμότητας.....	197
10.4	Απαιτήσεις σε ΠτΥ Πολλαπλών Υπηρεσιών & Σχεδιασμός Συναρτήσεων Χρησιμότητας.....	199
10.5	Μη Συνεργατικό Παίγνιο Συνδυαστικής Κατανομής Ισχύος Εκπομπής & Ρυθμού Μετάδοσης στη Ζεύξη Ανόδου σε Διεπίπεδα Φεμτοκυψελωτά Δίκτυα με Υποστήριξη Πολλαπλών Υπηρεσιών.....	201
10.5.1	Μοντελοποίηση Προβλήματος.....	201
10.5.2	Σημείο Ισορροπίας κατά Nash του S-UPRA-MSF Παιγνίου.....	203
10.6	UPRA-MSF Αλγόριθμος.....	209
10.7	Αριθμητικά Αποτελέσματα.....	211
10.7.1	Ιδιότητες του Σημείου Ισορροπίας κατά Nash του UPRA-MSF παιγνίου.....	211
10.7.2	Αυξανόμενο Πλήθος Χρηστών.....	214
10.7.3	Αυξανόμενο Πλήθος Φεμτοκυψελών.....	215
10.8	Ανακεφαλαίωση & Συμπεράσματα.....	216
11	Συμπεράσματα & Μελλοντική Έρευνα.....	218
11.1	Συμπεράσματα.....	218
11.2	Μελλοντική Έρευνα.....	222
A.	Δημοσιεύσεις σε Διεθνή Περιοδικά.....	225
B.	Δημοσιεύσεις σε Διεθνή Συνέδρια.....	225
C.	Κεφάλαια σε Επιστημονικά Βιβλία.....	226

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1 Συνάρτηση απόδοσης f_i για διάφορα σχήματα διαμόρφωσης.....	37
Σχήμα 2 Συνάρτηση επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης $T_i(R_i^*)$ για χρήστες οι οποίοι αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου.....	39
Σχήμα 3 Μέση τιμή της συνάρτησης χρησιμότητας των χρηστών.....	49
Σχήμα 4 Μέση τιμή της ισχύος εκπομπής των χρηστών.....	49
Σχήμα 5 Μέση τιμή του επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης των χρηστών.....	49
Σχήμα 6 Η συνάρτηση επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης για διαφορετικές υπηρεσίες.....	57
Σχήμα 7. Σύγκλιση της ισχύος εκπομπής των χρηστών σε μία συγκεκριμένη χρονοσχισμή...79	
Σχήμα 8. Επιτεύξιμος ρυθμός μετάδοσης των χρηστών σε μία συγκεκριμένη χρονοσχισμή ..79	
Σχήμα 9. Τιμές των ΣΧ των χρηστών σε μία συγκεκριμένη χρονοσχισμή.....	79
Σχήμα 10 Μέση ισχύς εκπομπής των χρηστών (βηματική απόσταση 50m).....	81
Σχήμα 11 Μέσος επιτεύξιμος ρυθμός μετάδοσης των χρηστών (βηματική απόσταση 50m) ..81	
Σχήμα 12 Μέση τιμή της ΣΧ των χρηστών (βηματική απόσταση 50m).....	81
Σχήμα 13 Μέση ισχύς εκπομπής των χρηστών (βηματική απόσταση 100m).....	81
Σχήμα 14 Μέσος επιτεύξιμος ρυθμός μετάδοσης των χρηστών (βηματική απόσταση 100m) 82	
Σχήμα 15 Μέση τιμή της ΣΧ των χρηστών (βηματική απόσταση 100m).....	82
Σχήμα 16 Συνάρτηση επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης για υπηρεσίες πραγματικού χρόνου ...87	
Σχήμα 17 Κυρτή συνάρτηση κοστολόγησης ως προς την ισχύ εκπομπής.....	90
Σχήμα 18 Άθροισμα των τιμών της ΣΧ των χρηστών ως συνάρτηση του συντελεστή κοστολόγησης.....	94
Σχήμα 19 ΣΧ των χρηστών για το UPC παίγνιο και για το UPCP παίγνιο με επιλογή του βέλτιστου συντελεστή κοστολόγησης.....	95
Σχήμα 20 Ισχύς εκπομπής των χρηστών στο σημείο ισορροπίας κατά Nash για το UPC παίγνιο και το UPCP παίγνιο με την επιλογή του βέλτιστου συντελεστή κοστολόγησης	95
Σχήμα 21 Επιτεύξιμος ρυθμός μετάδοσης στο σημείο ισορροπίας κατά Nash για το UPC παίγνιο και το UPCP παίγνιο με επιλογή του βέλτιστου συντελεστή κοστολόγησης.....	95
Σχήμα 22 Ισχύς εκπομπής των χρηστών για το UPCP παίγνιο με χρήση κυρτής κοστολόγησης και κατανομή ισχύος με χρήση γραμμικής κοστολόγησης [22].....	97

Σχήμα 23 Τιμές των ΣΧ των χρηστών στο σημείο ισορροπίας κατά Nash του UPCP παιγνίου με χρήση κυρτής κοστολόγησης και της κατανομής ισχύος με χρήση γραμμικής κοστολόγησης [22].....	97
Σχήμα 24 Ισχύς εκπομπής στο σημείο ισορροπίας κατά Nash του UPCP παιγνίου με κυρτή και γραμμική κοστολόγηση ως προς την ισχύ εκπομπής.....	97
Σχήμα 25 Τιμές των ΣΧ των χρηστών στο σημείο ισορροπίας κατά Nash του UPCP παιγνίου με κυρτή και γραμμική κοστολόγηση ως προς την ισχύ εκπομπής.....	97
Σχήμα 26 Άθροισμα των τιμών των ΣΧ των χρηστών ως συνάρτηση του παράγοντα κοστολόγησης, c	125
Σχήμα 27 Μέση τιμή της ισχύος εκπομπής στο σημείο ισορροπίας για το MSUPC και το MSUPC-CP παίγνιο, με $c=c_{best}$	125
Σχήμα 28 Μέση τιμή των τιμών της ΣΧ στο σημείο ισορροπίας για το MSUPC και το MSUPC-CP παίγνιο, με $c=c_{best}$	125
Σχήμα 29 Σύγκλιση της ισχύος εκπομπής των χρηστών.....	125
Σχήμα 30 Μέση τιμή της ισχύος εκπομπής των χρηστών στο σημείο ισορροπίας κατά Nash του MSUPC-CP παιγνίου με χρήση κυρτής και γραμμικής κοστολόγησης.	126
Σχήμα 31 Μέση τιμή των τιμών των ΣΧ των χρηστών στο σημείο ισορροπίας κατά Nash του MSUPC-CP παιγνίου με χρήση κυρτής και γραμμικής κοστολόγησης.....	126
Σχήμα 32 Μέση τιμή της ισχύος εκπομπής (ανά χρήστη) στο σημείο ισορροπίας κατά Nash καθώς το πλήθος των χρηστών αυξάνεται.....	126
Σχήμα 33 Μέση τιμή της ισχύος εκπομπής στο σημείο ισορροπίας για διαφορετικά υπό μελέτη σενάρια.....	146
Σχήμα 34 Μέση τιμή του ρυθμού μετάδοσης στο σημείο ισορροπίας για διαφορετικά υπό μελέτη σενάρια.....	146
Σχήμα 35 Σύγκλιση της ισχύος εκπομπής των χρηστών για το JUPRA παίγνιο.....	149
Σχήμα 36 Μέση ισχύς εκπομπής και μέση τιμή της ΣΧ των χρηστών.....	156
Σχήμα 37 Μέση ισχύς εκπομπής για δύο κλάσεις χρηστών.....	156
Σχήμα 38 Βελτίωση της ισχύος εκπομπής των χρηστών μέσω του UPSA αλγορίθμου σε σχέση με την πολιτική μέγιστου κέρδους καναλιού.....	156
Σχήμα 39 Παίγνιο διαπραγματεύσεων μεταξύ δύο χρηστών.....	166
Σχήμα 40 Πλήθος κατανεμημένων υποφερουσών στους $N=20$ χρήστες, για διαφορετικές τιμές του συντελεστή έκπτωσης.....	175
Σχήμα 41 Συνολική ισχύς εκπομπής των χρηστών για διαφορετικές τιμές του συντελεστή έκπτωσης.....	176

Σχήμα 42 Συνολικός ρυθμός μετάδοσης των χρηστών για διαφορετικές τιμές του συντελεστή έκπτωσης.....	176
Σχήμα 43 Σύγκλιση της ισχύος εκπομπής των χρηστών.....	176
Σχήμα 44 Μέση ισχύς εκπομπής των χρηστών για τους MGS-N-EUSPA, Pure-EUSPA και MGS-F-EUSPA αλγορίθμους με συντελεστή έκπτωσης $\delta=0.95$	177
Σχήμα 45 Τιμές της συνάρτησης χρησιμότητας των χρηστών για τους MGS-N-EUSPA, Pure-EUSPA και MGS-F-EUSPA αλγορίθμους με συντελεστή έκπτωσης $\delta=0.95$	177
Σχήμα 46 Συσχέτιση ανάμεσα στην ισχύ εκπομπής και το ρυθμό μετάδοσης.....	178
Σχήμα 47 Συνολικός ρυθμός μετάδοσης ως συνάρτηση του πλήθους των χρηστών.....	178
Σχήμα 48 Τοπολογία δικτύου και τοποθέτηση χρηστών στο διεπίπεδο φεμοκυψελωτό δίκτυο.....	184
Σχήμα 49 Άθροισμα των τιμών των συναρτήσεων χρησιμότητας των χρηστών στο σημείο ισορροπίας ως συνάρτηση του συντελεστή κοστολόγησης c	191
Σχήμα 50 Σύγκλιση της ισχύος εκπομπής των μακροχρηστών.....	192
Σχήμα 51 Σύγκλιση της ισχύος εκπομπής των φεμοχρηστών.....	192
Σχήμα 52 Μέση τιμή της ισχύος εκπομπής των μακροχρηστών ως συνάρτηση του πλήθους των φεμοκυψελών.....	192
Σχήμα 53 Μέση τιμή της ισχύος εκπομπής των φεμοχρηστών ως συνάρτηση του πλήθους των φεμοκυψελών.....	192
Σχήμα 54 Μορφή της συνάρτησης χρησιμότητας του χρήστη j : (a) $j \in S_{MNRT} \cup S_{FNRT}$, (b) $j \in S_{MRT}$, όπου η μορφή της συνάρτησης χρησιμότητας του χρήστη $j \in S_{FRT}$ μπορεί να είναι είτε της μορφής (a) είτε (b), ανάλογα με την τιμή της παραμέτρου $d_j = \frac{WG_{jj}}{I}$	204
Σχήμα 55 Ημικοίλη συνάρτηση $v_j(x_j)$	204
Σχήμα 56 Τοπολογία του διεπίπεδου ασύρματου φεμοκυψελωτού δικτύου και κατανομή των χρηστών σε αυτό.....	212
Σχήμα 57 Σύγκλιση της ισχύος εκπομπής των μακροχρηστών και των φεμοχρηστών για τον UPRA-MSF αλγόριθμο.....	213
Σχήμα 58 Σύγκλιση του ρυθμού μετάδοσης των μακροχρηστών για τον UPRA-MSF αλγόριθμο.....	213
Σχήμα 59 Μέση ισχύς εκπομπής των χρηστών ως συνάρτηση του πλήθους των χρηστών για τρία συγκριτικά σενάρια.....	213
Σχήμα 60 Μέση τιμή του ρυθμού μετάδοσης ως συνάρτηση του πλήθους των χρηστών για τρία συγκριτικά σενάρια.....	214

Σχήμα 61 Μέση τιμή της ισχύος εκπομπής των μακροχρηστών ως συνάρτηση του πλήθους των φεμτοκυψελών.....	215
Σχήμα 62 Μέση τιμή της ισχύος εκπομπής των φεμτοχρηστών ως συνάρτηση του πλήθους των φεμτοκυψελών.....	216
Σχήμα 63 Μέση ενεργειακή απόδοση των χρηστών ως συνάρτηση του πλήθους των φεμτοκυψελών.....	216

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Τιμές των παραμέτρων προσομοίωσης.....	77
Πίνακας 2 Απαιτήσεις σε ΠτΥ των χρηστών της κλάσης 1(NRT users)	77
Πίνακας 3 Απαιτήσεις σε ΠτΥ των χρηστών της κλάσης 2(RT users)	77
Πίνακας 4 Παράμετροι προσομοίωσης	123
Πίνακας 5 Παράμετροι Υπηρεσιών Πραγματικού Χρόνου	123
Πίνακας 6 Παράμετροι Υπηρεσιών Δεδομένων μη Πραγματικού Χρόνου	123
Πίνακας 7 Παράμετροι Προσομοιώσεων	212

Κατάλογος Συντμήσεων

Ποιότητα της Υπηρεσίας	ΠτΥ
Συναρτήσεις Χρησιμότητας	ΣΧ
Μεγιστοποίηση της Χρησιμότητας του Δικτύου	ΜΧΔ
Θεωρία Παιγνίων	ΘΠ
Code Division Multiple Access	CDMA
Single Carrier – Frequency Division Multiple Access	SC-FDMA
Σταθμός Βάσης	ΣΒ
Uplink Power Control game	UPC game
Συνάρτηση Χρησιμότητας	ΣΧ
Signal to Interference plus Noise Ratio	SINR
Uplink Power Control Algorithm	UPC Algorithm
Elasticity Factor	EF
Uplink Power Control mechanism	UPC mechanism
independent and identically distributed	i.i.d.
Multi- Service Uplink Power Control	MSUPC
Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio	SINR
Non-Real Time	NRT
Real Time	RT
Margin Factor	MF
(Weierstrass) Extreme Value Theorem	E.V.T.
Packet Success Rate	PSR
Binary Phase Shift Keying	BPSK
Uplink Power and Subcarrier Allocation	UPSA
Third Generation Partnership Project-Long Term Evolution	3GPP-LTE
Energy-efficient Utility-based Subcarrier and Power Allocation	EUSPA
Equal-Bit-Equal-Power	EBEP
Joint Utility-based uplink Power and Rate Allocation	JUPRA
Joint Uplink Power and Rate Allocation game with Pricing	JUPRA-P

Peak-to-Average Power Ratio	PAPR
Energy-efficient Utility-based Subcarrier and Power Allocation	EUSPA
Maximum Gain Selection EUSPA	MGS-EUSPA
Max Gain Selection-Far-EUSPA	MGS-F-EUSPA
Max Gain Selection-Near-EUSPA	MGS-N-EUSPA
Macrocell users	MUs
Femtocell users	FUs
Access Point	AP
Uplink Power Control algorithm in Multi-Service two-tier Femtocells	UPC-MSF
Utility-based uplink Power and Rate Allocation game in Multi-Service two-tier Femtocell networks	UPRA-MSF
Single variable Utility-based uplink Power and Rate Allocation game in Multi-Service two-tier Femtocell networks	S-UPRA-MSF

1 *Εισαγωγή*

Τις τελευταίες δεκαετίες έχει παρατηρηθεί ραγδαία αύξηση των απαιτήσεων των χρηστών σε Ποιότητα της Υπηρεσίας (ΠτΥ) στα ασύρματα δίκτυα εξαιτίας της πληθώρας των εφαρμογών και υπηρεσιών με τις οποίες έχει κατακλυστεί η τηλεπικοινωνιακή αγορά των ασύρματων δικτύων. Οι απαιτήσεις των χρηστών σε ΠτΥ παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία και πολλές φορές είναι αντικρουόμενες, δεδομένης της ποικιλομορφίας που παρουσιάζουν οι υπηρεσίες των ασύρματων δικτύων. Συνεπώς, στα τρίτης, τέταρτης και επόμενης γενιάς δίκτυα έχει προκύψει ως άμεση ανάγκη, η αποδοτική κατανομή των πόρων του συστήματος (π.χ. ισχύς εκπομπής, ρυθμός μετάδοσης, υποφέρουσες κ.ά.), με απώτερο στόχο την ορθή και λελογισμένη χρήση των πολύτιμων αλλά και περιορισμένων πόρων του συστήματος και την εξυπηρέτηση του μέγιστου δυνατού πλήθους χρηστών με την ταυτόχρονη κάλυψη των απαιτήσεών τους σε ΠτΥ.

Την περασμένη δεκαετία, η ερευνητική κοινότητα είχε δώσει ιδιαίτερη έμφαση στη μελέτη του προβλήματος κατανομής των πόρων των ασύρματων δικτύων κατά τη ζεύξη καθόδου. Σε αυτή την περίπτωση, ο σταθμός βάσης μεταδίδει δεδομένα προς τους ασύρματους χρήστες που βρίσκονται εντός της κυψέλης και τα εμφανιζόμενα προβλήματα χαρακτηρίζονταν από κεντροκοιμημένες μοντελοποιήσεις, όπου το εν λόγω πρόβλημα βελτιστοποίησης κατανομής των πόρων του δικτύου επιλυόταν στο σταθμό βάσης με ελάχιστους φυσικούς και τεχνικούς περιορισμούς που έθετε το υλισμικό του. Η παρούσα διδακτορική διατριβή εστιάζει στο πρόβλημα της κατανομής των πόρων ασύρματων δικτύων κατά τη ζεύξη ανόδου με την ταυτόχρονη υποστήριξη πολλαπλών ειδών υπηρεσιών δεδομένων και πολυμέσων. Κίνητρο για την ενδελεχή έρευνα του προβλήματος με έμφαση στη ζεύξη ανόδου ήταν η αντιμετώπιση του χρήστη ως μοναδική οντότητα, ο οποίος μεταδίδει δεδομένα προς το σταθμό βάσης, αιτείται μία συγκεκριμένου τύπου υπηρεσία, εισάγει πολλαπλούς περιορισμούς στο πρόβλημα λόγω του υλισμικού του και απαιτεί την εξασφάλιση με κατάλληλη πολιτική κατανομής των πόρων του δικτύου της αιτούμενης ΠτΥ του.

Με σκοπό την αποδοτική κατανομή των πόρων του δικτύου πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των υπηρεσιών που αιτούνται οι χρήστες. Οι υπηρεσίες που υποστηρίζονται από τα ασύρματα δίκτυα μπορούν να διακριθούν σε δύο βασικές κατηγορίες: (α) υπηρεσίες πραγματικού χρόνου και (β) υπηρεσίες δεδομένων (μη πραγματικού χρόνου). Αναφορικά με τις υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, το χαρακτηριστικό τους γνώρισμα είναι οι βραχυπρόθεσμες και αυστηρές απαιτήσεις σε ΠτΥ, με την ταυτόχρονη εξασφάλιση ενός κατώτατου επιθυμητού ρυθμού μετάδοσης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα υπηρεσιών πραγματικού χρόνου αποτελούν οι υπηρεσίες φωνής, βίντεο κλήσεων, τηλεδιάσκεψης, και

άλλες. Από την άλλη πλευρά, οι υπηρεσίες δεδομένων χαρακτηρίζονται από άπληστη ζήτηση ρυθμού μετάδοσης από το ασύρματο δίκτυο και εμφανίζουν μεγαλύτερη ανοχή σε χρονικές καθυστερήσεις μετάδοσης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα υπηρεσιών δεδομένων είναι η μετάδοση δεδομένων, η ανταλλαγή ηλεκτρονικών μηνυμάτων, και άλλες.

Επιπρόσθετα, εκτός από το είδος της υπηρεσίας που αιτείται ο χρήστης εντός του ασύρματου δικτύου, προκύπτει άμεσα η ανάγκη μοντελοποίησης των απαιτήσεών του σε κατάλληλα σχεδιασμένες Συναρτήσεις Χρησιμότητας (ΣΧ), με απώτερο στόχο τον ορισμό αντιπροσωπευτικών προβλημάτων μεγιστοποίησης των ΣΧ κάτω από ένα ενιαίο πρίσμα αντιμετώπισής τους, τα οποία θα έχουν ως αποτέλεσμα τη Μεγιστοποίηση της Χρησιμότητας του Δικτύου (ΜΧΔ) και την αποδοτική κατανομή των πόρων του συστήματος. Εστιάζοντας στην επίλυση των προβλημάτων αυτών έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία ποικίλες τεχνικές και μέθοδοι βελτιστοποίησης, με επικρατούσα εκείνη της Θεωρίας Παιγνίων (ΘΠ). Η θεωρία παιγνίων δίνει τη δυνατότητα αντιμετώπισης του εκάστοτε προβλήματος βελτιστοποίησης κατανομής πόρων, ως ένα παίγνιο, όπου οι χρήστες του δικτύου αντικαθιστούν τους παίκτες του παιγνίου, οι προς διαμοιρασμό πόροι του δικτύου αποτελούν τις δυνατές στρατηγικές των παικτών/χρηστών και η αντικειμενική συνάρτηση εκφράζει το αποτέλεσμα της στρατηγικής των χρηστών.

1.1 Συμβολή της Διατριβής

Όπως προαναφέρθηκε, η παρούσα διδακτορική διατριβή πραγματεύεται το πρόβλημα της βέλτιστης κατανομής πόρων ενός ασύρματου δικτύου και της ταυτόχρονης εξυπηρέτησης πολλαπλών υπηρεσιών, εστιάζοντας στη ζεύξη ανόδου των ασύρματων δικτύων τρίτης, τέταρτης γενιάς, καθώς επίσης και μεταγενέστερων γενεών ασύρματης δικτύωσης. Έμφαση δίδεται στη μελέτη του προβλήματος για ετερογενή ασύρματα δίκτυα, τα οποία υιοθετούν διαφορετικού τύπου τεχνολογίες Code Division Multiple Access – CDMA (τρίτης γενιάς ασύρματα δίκτυα) και Single Carrier – Frequency Division Multiple Access – SC-FDMA (τέταρτης και επόμενης γενιάς ασύρματα δίκτυα). Η παρούσα μελέτη προτείνει, μοντελοποιεί, αναλύει, τεκμηριώνει θεωρητικά, επιλύει με μαθηματικές μεθόδους και επιβεβαιώνει πειραματικά, βέλτιστες λύσεις και αντίστοιχους επαναληπτικούς κατανεμημένους αλγόριθμους κατανομής πόρων των ασύρματων δικτύων για την επίτευξη του ανωτέρου περιγραφέντος στόχου και επικεντρώνεται στη θεωρητική και πρακτική αρτιότητα του αποτελέσματος. Το σύνολο της μελέτης επικεντρώνεται σε τρεις βασικούς άξονες με κριτήριο την υιοθετούμενη τεχνολογία του ασύρματου δικτύου, καθώς επίσης και στην επίλυση των αντίστοιχων προβλημάτων βελτιστοποίησης που ανακύπτουν:

1. Βέλτιστη κατανομή πόρων και εξυπηρέτηση πολλαπλών υπηρεσιών σε CDMA ασύρματα κυψελωτά δίκτυα,

2. Βέλτιστη κατανομή πόρων και εξυπηρέτηση πολλαπλών υπηρεσιών σε SC-FDMA ασύρματα κυψελωτά δίκτυα,
3. Βέλτιστη κατανομή πόρων και εξυπηρέτηση πολλαπλών υπηρεσιών σε διεπίπεδα φεμτο-κυψελωτά ασύρματα δίκτυα.

Συγκεκριμένα, με στόχο τη βέλτιστη κατανομή πόρων και εξυπηρέτηση πολλαπλών υπηρεσιών σε CDMA ασύρματα κυψελωτά δίκτυα, αρχικά μελετάται, μοντελοποιείται και επιλύεται το πρόβλημα κατανομής ισχύος εκπομπής σε ασύρματα CDMA κυψελωτά δίκτυα τα οποία υποστηρίζουν στην πρώτη φάση της μελέτης υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, ευαίσθητων ως προς την καθυστέρηση. Το πρόβλημα μελετάται και μοντελοποιείται με τη χρήση της Θεωρίας Μειστοποίησης Χρησιμότητας (ΜΧΔ) και επιλύεται με τη χρήση της Θεωρίας Παιγνίων (ΘΠ). Εν συνεχεία, με βάση τη γνώση που αποκομίστηκε από το προηγούμενος περιγραφέν πρόβλημα, αναδεικνύεται η ανάγκη μελέτης και αντιμετώπισης του συνθετότερου και πολυπλοκότερου προβλήματος βέλτιστης κατανομής ισχύος εκπομπής κατά τη ζεύξη ανόδου σε CDMA ασύρματα κυψελωτά δίκτυα στα οποία εδρεύουν χρήστες αντικρουόμενων απαιτήσεων και ποικίλων υπηρεσιών, δηλαδή υπηρεσιών πραγματικού χρόνου και υπηρεσιών δεδομένων. Το πρόβλημα ορίζεται ως ένα ομογενοποιημένο παίγνιο μειστοποίησης της λαμβανόμενης ικανοποίησης των χρηστών από το διαμοιρασμό των πόρων του συστήματος και αποδεικνύεται τόσο αναλυτικά με χρήση της ΜΧΔ και της ΘΠ όσο και αλγοριθμικά, η σύγκλισή του σε μοναδικό σημείο ισορροπίας, στο οποίο η ικανοποίηση των χρηστών δε δύναται να βελτιωθεί έτι περισσότερο. Ακολούθως, αναδεικνύεται και τεκμηριώνεται θεωρητικά (καθώς επίσης και με αναλυτικά και αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα) η αναποτελεσματικότητα και η ανεπάρκεια του σημείου ισορροπίας στο οποίο καταλήγουν τα προβλήματα που μοντελοποιήθηκαν προηγούμενος, δεδομένης της εγωιστικής και αντικοινωνικής συμπεριφοράς των χρηστών. Με σκοπό την αντιμετώπιση της αναποτελεσματικότητας του εξαγόμενου της επίλυσης των προηγούμενων προβλημάτων προτείνεται και εισάγεται η καινοτόμος ιδέα της κυρτής κοστολόγησης ως προς την ισχύ εκπομπής των χρηστών. Το ιδιαίτερα σύνθετο και περίπλοκο πρόβλημα επιλύεται αναλυτικά και παρατίθενται συγκριτικά αποτελέσματα του σύνθετου αυτού προβλήματος σε σχέση με τα προηγούμενα προβλήματα που αντιμετωπίστηκαν στην παρούσα διδακτορική διατριβή, καθώς επίσης και με προτεινόμενα προβλήματα όμοιων στόχων της διεθνούς βιβλιογραφίας, αναδεικνύοντας κατά αυτόν τον τρόπο την επίτευξη των στόχων που τέθηκαν, την ανωτερότητα της μοντελοποίησης και επίλυσης του προβλήματος και την καινοτομία της προτεινόμενης προσέγγισης, στην οποία κατέληξε σταδιακά η διδακτορική διατριβή.

Στη συνέχεια, μελετάται το πρόβλημα της βέλτιστης συνδυαστικής κατανομής πόρων σε CDMA ασύρματα κυψελωτά δίκτυα κατά τη ζεύξη ανόδου. Σύμφωνα με το συγκεκριμένο πρόβλημα, η προηγούμενη μελέτη επεκτείνεται στη συνδυαστική κατανομή της ισχύος

εκπομπής των χρηστών και του ρυθμού μετάδοσής τους. Η πολυπλοκότητα του προτεινόμενου προβλήματος είναι ιδιαίτερα αυξημένη, δεδομένης της αντικρουόμενης επίδρασης των πόρων του συστήματος στη λαμβανόμενη ικανοποίηση των χρηστών. Ο χρήστης ιδανικά επιθυμεί υψηλές τιμές ρυθμού μετάδοσης και αντίστοιχες χαμηλές τιμές ισχύος εκπομπής. Το πρόβλημα μοντελοποιείται ως ένα μη συνεργατικό παίγνιο στο οποίο ο χρήστης επιθυμεί να ελέγξει ταυτόχρονα δύο ελεύθερες μεταβλητές, δηλαδή την ισχύ εκπομπής του και το ρυθμό μετάδοσής του με σκοπό τη μεγιστοποίηση της λαμβανόμενης ευχαρίστησής του από το διαμοιρασμό των συγκεκριμένων πόρων. Το προτεινόμενο πρόβλημα επιλύεται με αναλυτική μέθοδο βελτιστοποίησης και καταλήγει σε σημείο ισορροπίας, λαμβάνοντας υπόψη ταυτόχρονα την ισχύ εκπομπής και το ρυθμό μετάδοσης των χρηστών. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο τρόπος αντιμετώπισης του συγκεκριμένου προβλήματος έχει βασικές διαφορές από τα προηγούμενα προβλήματα που αντιμετωπίζονται έως τώρα στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής, δεδομένου ότι αποτελεί ένα διπαραμετρικό πρόβλημα βελτιστοποίησης και οι συναρτήσεις χρησιμότητας των χρηστών είναι πολυδιάστατες με περισσότερα του ενός σημεία καμπής, γεγονός που αυξάνει τη δυσκολία επίλυσης του προτεινόμενου προβλήματος. Επιπρόσθετα, προτείνεται επαναληπτικός κατανεμημένος αλγόριθμος, του οποίου η σύγκλιση στο σημείο ισορροπίας αποδεικνύεται αναλυτικά και τα αντιπροσωπευτικά και συγκριτικά αριθμητικά αποτελέσματα αναδεικνύουν την ανωτερότητα και την ορθότητα της προτεινόμενης προσέγγισης.

Εν συνεχεία, μελετάται το πρόβλημα της βέλτιστης κατανομής πόρων και εξυπηρέτησης πολλαπλών υπηρεσιών σε SC-FDMA ασύρματα κυψελωτά δίκτυα κατά τη ζεύξη ανόδου. Η τεχνολογία SC-FDMA έχει προταθεί από το 3GPP LTE (Third Generation Partnership Project-Long Term Evolution) και LTE-Advanced για τη ζεύξη ανόδου στα ασύρματα δίκτυα τέταρτης και μεταγενέστερης γενεάς. Η ιδιαιτερότητα του συγκεκριμένου προβλήματος έγκειται στο γεγονός ότι οι πόροι προς διαμοιρασμό στους χρήστες εμφανίζουν ετερογένεια ως προς την ποιότητα και το είδος τους. Συγκεκριμένα, οι υποψήφιοι προς διαμοιρασμό πόροι του συστήματος είναι η ισχύς εκπομπής των χρηστών, η οποία είναι ένα συνεχές μέγεθος και οι υποφέρουσες του συστήματος, οι οποίες είναι διακριτές και πεπερασμένες. Δεδομένης της ετερογένειας αυτής και της άμεσης αλληλοσυσχέτισης των πόρων, το πρόβλημα καθίσταται ιδιαίτερα πολύπλοκο και δύσκολα επιλύσιμο κατά το βέλτιστο τρόπο. Συνεπώς, ως μία πρώτη μέθοδος αντιμετώπισης του μοντελοποιημένου προβλήματος προτείνεται μία υποβέλτιστη ευρεστική προσέγγιση, σύμφωνα με την οποία οι υποφέρουσες κατανέμονται στους χρήστες με κριτήριο τη μεγιστοποίηση της ΣΧ των χρηστών, τη μετάδοση με τη βέλτιστη ισχύ εκπομπής και την ικανοποίηση των απαιτήσεων σε ΠτΥ των χρηστών, οι οποίοι αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου. Η αξιοπιστία και η ορθότητα της μοντελοποίησης επιβεβαιώνεται με αναλυτικά αριθμητικά αποτελέσματα, για τα οποία πραγματοποιείται επιπρόσθετη συγκριτική μελέτη με έγκριτες δημοσιεύσεις από τη σύγχρονη βιβλιογραφία.

Επιπρόσθετα, με σκοπό τη βελτίωση της προηγούμενης προσέγγισης για τη συνδυαστική κατανομή της ισχύος εκπομπής και των υποφερουσών στη ζεύξη ανόδου ασύρματων SC-FDMA δικτύων προτείνεται ένα μοντέλο διαπραγματεύσεων με βάση τη θεωρία του Rubinstein, σύμφωνα με το οποίο οι υποφερουσές κατανέμονται στους χρήστες και στη συνέχεια δεδομένης της κατανομής των υποφερουσών κατανέμεται κατά βέλτιστο τρόπο η ισχύς εκπομπής κάθε χρήστη ανά δεσμευμένη από αυτόν υποφερούσα. Σύμφωνα με το προτεινόμενο μοντέλο διαπραγματεύσεων διαμοιρασμού των υποφερουσών, οι χρήστες συμμετέχουν ως παίκτες σε ένα παίγνιο διαπραγματεύσεων στο οποίο γίνονται διαδοχικά από τους χρήστες προτάσεις διαμοιρασμού των υποφερουσών και αποδεικνύεται αναλυτικά ότι το παίγνιο καταλήγει σε σημείο ισορροπίας κατά Nash. Ακολούθως, δεδομένου του προσδιορισμού του πλήθους των υποφερουσών που δεσμεύονται από κάθε χρήστη, προτείνονται ορισμένες στρατηγικές αντιστοίχισης των συγκεκριμένων υποφερουσών στους χρήστες. Τέλος προτείνεται ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης για την κατανομή της ισχύος εκπομπής, ενώ αποδεικνύεται αναλυτικά η σύγκλιση του συνδυαστικού προβλήματος στο σημείο ισορροπίας. Η υπεροχή της προτεινόμενης προσέγγισης ως προς τη συνδυαστική κατανομή των πόρων του SC-FDMA ασύρματου δικτύου σε σχέση με παραπλήσιες προσεγγίσεις της διεθνούς βιβλιογραφίας αναδεικνύεται μέσω αναλυτικών συγκριτικών αριθμητικών αποτελεσμάτων.

Επιπρόσθετα, η μελέτη του προβλήματος κατανομής των πόρων του συστήματος επεκτείνεται σε διεπίεδα ασύρματα φεμτοκυψελωτά δίκτυα, όπου οι βασικοί παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι: (α) το επίπεδο της αρχιτεκτονικής του δικτύου στο οποίο ανήκει ο χρήστης και (β) το είδος της υπηρεσίας την οποία αιτείται, δηλαδή είτε υπηρεσίες πραγματικού χρόνου είτε υπηρεσίες δεδομένων. Συνεπώς, στο πλαίσιο της διδακτορικής διατριβής αρχικά μοντελοποιείται ένα πρόβλημα βέλτιστης κατανομής ισχύος εκπομπής στη ζεύξη ανόδου σε διεπίεδα φεμτοκυψελωτά ασύρματα δίκτυα με υποστήριξη πολλαπλών υπηρεσιών. Το πρόβλημα επιλύεται αναλυτικά με τη χρήση της θεωρίας μεγιστοποίησης της χρησιμότητας του δικτύου, ενώ κάθε χρήστης υιοθετεί μία αντιπροσωπευτική συνάρτηση χρησιμότητας, η μορφή της οποίας εξαρτάται από το επίπεδο της αρχιτεκτονικής του δικτύου από το οποίο εξυπηρετείται ο χρήστης (δηλαδή από τη μακροκυψέλη ή τη φεμτοκυψέλη) και από το είδος της υπηρεσίας που αιτείται (δηλαδή υπηρεσίες πραγματικού χρόνου ή υπηρεσίες δεδομένων). Στη συνέχεια, εξαιτίας της φύσης του προβλήματος, το πρόβλημα μοντελοποιείται ως ένα μη συνεργατικό κατανεμημένο παίγνιο και επιλύεται με χρήση της supermodular θεωρίας (η οποία ανήκει στη γενικότερη θεωρία της μεγιστοποίησης της χρησιμότητας του δικτύου) με σκοπό τον προσδιορισμό του σημείου ισορροπίας κατά Nash του παιγνίου. Ένας επαναληπτικός, κατανεμημένος και χαμηλής πολυπλοκότητας αλγόριθμος προσδιορίζει το σημείο ισορροπίας κατά Nash του

παιγνίου και αναλυτικά και συγκριτικά αριθμητικά αποτελέσματα αναδεικνύουν την εγκυρότητα και την υπεροχή της προτεινόμενης μοντελοποίησης.

Τέλος, μελετάται το συνδυαστικό πρόβλημα της βέλτιστης κατανομής ισχύος εκπομπής και ρυθμού μετάδοσης στη ζεύξη ανόδου διεπίπεδων φεμτοκυψελωτών δικτύων με υποστήριξη πολλαπλών υπηρεσιών, με τη χρήση της θεωρίας παιγνίων και των συναρτήσεων χρησιμότητας. Σε κάθε χρήστη αντιστοιχίζεται μία κατάλληλα σχεδιασμένη συνάρτηση χρησιμότητας, η οποία εκφράζει το βαθμό ικανοποίησης του χρήστη από το διαμοιρασμό των πόρων του συστήματος και εξαρτάται από την ισχύ εκπομπής του χρήστη και από το ρυθμό μετάδοσής του. Όμοια με προηγούμενως, η συνάρτηση χρησιμότητας του χρήστη διαφοροποιείται ανάλογα με το είδος της υπηρεσίας την οποία αιτείται, αλλά και από το επίπεδο αρχιτεκτονικής του δικτύου στο οποίο ανήκει ο χρήστης. Το διαπαραμετρικό πρόβλημα κατανομής πόρων μοντελοποιείται ως ένα μη συνεργατικό παίγνιο κατανομής ισχύος εκπομπής και ρυθμού μετάδοσης στο οποίο κάθε χρήστης στοχεύει στη μεγιστοποίηση της συνάρτησης χρησιμότητάς του με βάση τους περιορισμούς που θέτει το υλισμικό του. Επιπρόσθετα, αποδεικνύεται αναλυτικά η ύπαρξη και η μοναδικότητα του σημείου ισορροπίας κατά Nash του εν λόγω παιγνίου και ως προς τις δύο ελεύθερες μεταβλητές, καθώς επίσης και η σύγκλιση του σε αυτό.

1.2 Διάρθρωση της Διατριβής

Η παρούσα μελέτη δομείται ως ακολούθως. Στο *Κεφάλαιο 2* μελετάται το πρόβλημα της βέλτιστης κατανομής ισχύος εκπομπής στη ζεύξη ανόδου CDMA ασύρματων κυψελωτών δικτύων με σκοπό την εξυπηρέτηση υπηρεσιών πραγματικού χρόνου. Έπειτα, στο πρόβλημα εισάγεται η απαίτηση εξυπηρέτησης πολλαπλών υπηρεσιών, δηλαδή υπηρεσιών πραγματικού χρόνου και δεδομένων και το συγκεκριμένο πρόβλημα μελετάται στο *Κεφάλαιο 3*. Στη συνέχεια, στο *Κεφάλαιο 4* επιχειρείται η εισαγωγή της κυρτής κοστολόγησης στο αρχικό πρόβλημα και μελετάται το πρόβλημα της βέλτιστης κατανομής ισχύος εκπομπής στη ζεύξη ανόδου CDMA ασύρματων κυψελωτών δικτύων με σκοπό την εξυπηρέτηση υπηρεσιών πραγματικού χρόνου με χρήση κυρτής κοστολόγησης και την επίτευξη ενός περισσότερο «κοινωνικού» σημείου ισορροπίας, ενώ στο *Κεφάλαιο 5* αντιμετωπίζεται το αντίστοιχο πρόβλημα με σκοπό την εξυπηρέτηση πολλαπλών υπηρεσιών (πραγματικού χρόνου και δεδομένων). Επιπρόσθετα, στο *Κεφάλαιο 6* μελετάται το συνδυαστικό πρόβλημα της βέλτιστης κατανομής ισχύος εκπομπής και ρυθμού μετάδοσης στη ζεύξη ανόδου CDMA ασύρματων κυψελωτών δικτύων, με σκοπό τον ταυτόχρονο έλεγχο των δύο προς διαμοιρασμό πόρων του συστήματος.

Προσανατολίζοντας την ερευνητική μελέτη σε ασύρματα δίκτυα επόμενων γενεών, στο *Κεφαλαίο 7* μελετάται το πρόβλημα της κατανομής ισχύος εκπομπής και υποφερουσών στη

ζεύξη ανόδου SC-FDMA ασύρματων δικτύων αρχικά με χρήση μιας ευρεστικής αλλά αποτελεσματικής μεθόδου και επιπρόσθετα στο *Κεφάλαιο 8* επιτυγχάνεται η βέλτιστη κατανομή της ισχύος εκπομπής και των υποφερουσών με τη χρήση των μοντέλων διαπραγμάτευσης στη ζεύξη ανόδου των SC-FDMA ασύρματων κυψελωτών δικτύων.

Το ερευνητικό πεδίο της διδακτορική διατριβής ολοκληρώνεται με τη μελέτη της βέλτιστης κατανομής πόρων σε διεπίπεδα φεμτοκυψελωτά ασύρματα δίκτυα με την ταυτόχρονη υποστήριξη πολλαπλών υπηρεσιών. Αρχικά, στο *Κεφάλαιο 9* μελετάται το πρόβλημα της βέλτιστης κατανομής ισχύος εκπομπής στη ζεύξη ανόδου δειπίπεδων ασύρματων φεμτοκυψελωτών δικτύων με υποστήριξη πολλαπλών υπηρεσιών. Επιπλέον, στο *Κεφάλαιο 10* μελετάται το συνδυαστικό πρόβλημα της ταυτόχρονης κατανομής της ισχύος εκπομπής και του ρυθμού μετάδοσης στη ζεύξη ανόδου των διεπίπεδων φεμτοκυψελωτών δικτύων με την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλαπλών υπηρεσιών.

Τέλος, στο *Κεφάλαιο 11* πραγματοποιείται αρχικά μια σύντομη αναφορά στα κύρια συμπεράσματα της παρούσας διδακτορικής διατριβής, ενώ εν κατακλείδι αναφέρεται η μελλοντική ερευνητική θεματολογία, η οποία αποτελεί λογική εξέλιξη της παρούσας διδακτορικής διατριβής, επισημαίνεται η κρισιμότητα και η επικαιρότητά της και γίνεται αναφορά σε τρέχουσες ερευνητικές προσπάθειες οι οποίες βασίστηκαν, υιοθέτησαν ή εξέλιξαν τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης.

2 Βέλτιστη Κατανομή Ισχύος Εκπομπής σε CDMA Ασύρματα Κυψελωτά Δίκτυα κατά τη Ζεύξη Ανόδου: Υπηρεσίες Πραγματικού Χρόνου

Στα σύγχρονα ασύρματα κυψελωτά δίκτυα, η απαίτηση για ικανοποίηση της Ποιότητας της Υπηρεσίας (ΠτΥ) των χρηστών συνεχώς αυξάνεται, δεδομένου ότι το πλήθος των ασύρματων χρηστών ανά κυψέλη αυξάνεται, καθώς επίσης και οι ίδιες οι υπηρεσίες καθίστανται περισσότερο απαιτητικές σε πόρους του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, οι υπηρεσίες πραγματικού χρόνου (real-time services), π.χ. υπηρεσίες φωνής, υπηρεσίες τηλεδιάσκεψης, υπηρεσίες βίντεο κλήσεων και άλλες, είναι ιδιαίτερα απαιτητικές ως προς τη βραχυπρόθεσμη εξασφάλιση πόρων του συστήματος, δεδομένου ότι είναι απαραίτητη η διασφάλιση ενός σταθερού χρονικού ανωφλίου καθυστέρησης μετάδοσης δεδομένων κατά τη ζεύξη ανόδου, καθώς επίσης και η διασφάλιση ενός σταθερού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα των περιορισμών που τίθενται από την εξυπηρέτηση μίας υπηρεσίας πραγματικού χρόνου αποτελεί η υπηρεσία φωνής (voice service). Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη υπηρεσία, για την επιτυχή εξυπηρέτηση ενός ασύρματου χρήστη απαιτείται η διασφάλιση ανά χρονοσχισμή ($t=0.67ms$) σταθερού ρυθμού μετάδοσης ίσου με $64Kbps$. Σε αντίθετη περίπτωση η υπηρεσία καθίσταται ανεπαρκής για το χρήστη και το σύστημα αποτυγχάνει να εξυπηρετήσει το χρήστη και να καλύψει τις απαιτήσεις του σε ΠτΥ.

Σύμφωνα με τα ανωτέρω περιγραφέντα χαρακτηριστικά των απαιτήσεων σε ΠτΥ των υπηρεσιών πραγματικού χρόνου κρίνεται αναγκαία η αποδοτική κατανομή της ισχύος εκπομπής των χρηστών με απώτερο στόχο:

- 1) την εξοικονόμηση της «ενεργειακής ζωής» των ασύρματων χρηστών,
- 2) την ελαχιστοποίηση του συνολικού θορύβου εντός της κυψέλης, καθώς επίσης και προς τις γειτονικές κυψέλες, από τους ασύρματους χρήστες,
- 3) την κοινωνική συμπεριφορά των ασύρματων χρηστών εντός της κυψέλης στην οποία ανήκουν και
- 4) την ικανοποίηση των απαιτήσεων σε ΠτΥ των ασύρματων χρηστών.

Προς την κατεύθυνση της αποδοτικής κατανομής ισχύος εκπομπής στους ασύρματους χρήστες που ανήκουν σε μία μοναδική κυψέλη υιοθετείται η θεωρία Μεγιστοποίησης της Χρησιμότητας του Δικτύου (ΜΧΔ) ορίζοντας και μοντελοποιώντας το πρόβλημα από τη

σκοπία των ασύρματων χρηστών. Πιο αναλυτικά, με σκοπό την ενιαία αντιμετώπιση σε ένα κοινό πρόβλημα βελτιστοποίησης κατανομής ισχύος εκπομπής των ποικίλων και ετερόκλητων χαρακτηριστικών και απαιτήσεων σε ΠτΥ των ασύρματων χρηστών οι οποίοι αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, προτείνεται και καθορίζεται μία κατάλληλα και αντιπροσωπευτικά σχεδιασμένη Συνάρτηση Χρησιμότητας (ΣΧ). Η ΣΧ αντιπροσωπεύει το επίπεδο της ικανοποίησης που λαμβάνει ο χρήστης από το διαμοιρασμό των πόρων του συστήματος, οι οποίοι του διατίθενται με σκοπό την ικανοποίηση της αιτούμενης ΠτΥ του. Το πρόβλημα κατανομής ισχύος εκπομπής των ασύρματων χρηστών επιλύεται με κατάλληλη μέθοδο βελτιστοποίησης και καταλήγει σε ένα σημείο ισορροπίας του συστήματος στο οποίο έχει προσδιοριστεί η ισχύς εκπομπής κάθε ασύρματου χρήστη, ώστε η ικανοποίησή του από τη λαμβανόμενη ΠτΥ να μεγιστοποιηθεί.

Συγκεκριμένα στο κεφάλαιο αυτό μοντελοποιείται και επιλύεται το πρόβλημα της βέλτιστης και αποδοτικής κατανομής ισχύος εκπομπής στη ζεύξη ανόδου ενός CDMA ασύρματου κυψελωτού δικτύου, με έμφαση στην υποστήριξη των απαιτήσεων ΠτΥ των ασύρματων χρηστών, οι οποίοι αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, ευαίσθητων σε χρονικές καθυστερήσεις. Το αντίστοιχο πρόβλημα διατυπώνεται ως ένα μη συνεργατικό παίγνιο ανάμεσα στους ασύρματους χρήστες, οι οποίοι εγωιστικά στοχεύουν στη μεγιστοποίηση της λαμβανόμενης από το δίκτυο ικανοποίησής τους, δεδομένων των φυσικών περιορισμών που επιβάλλονται από το δίκτυο. Η ικανοποίηση των χρηστών εκφράζεται μέσω κατάλληλα σχεδιασμένης ΣΧ, η οποία αντιπροσωπεύει το βαθμό ικανοποίησης του ασύρματου χρήστη σε συνάρτηση με το ρυθμό μετάδοσης που επιτυγχάνει ο χρήστης εντός της κυψέλης στην οποία ανήκει, την ικανοποίηση των απαιτήσεών του σε ΠτΥ, καθώς επίσης και την κατανάλωση ισχύος εκπομπής. Επιπρόσθετα αποδεικνύεται η ύπαρξη και η μοναδικότητα του σημείου ισορροπίας κατά Nash του προτεινόμενου προβλήματος ελέγχου ισχύος εκπομπής (Uplink Power Control game – UPC game). Στο σημείο ισορροπίας όλοι οι χρήστες επιτυγχάνουν να εκπέμπουν με τον επιθυμητό σηματοθορυβικό λόγο (Signal to Interference plus Noise Ratio - SINR) ή εκπέμπουν με τη μέγιστη ισχύ εκπομπής τους και κατά αυτόν τον τρόπο το σύστημα καταλήγει σε ένα ισορροπημένο δίκτυο ως προς τον σηματοθορυβικό λόγο. Παράλληλα, μελετούνται οι ιδιότητες του σημείου ισορροπίας κατά Nash στο αμιγές πρόβλημα βελτιστοποίησης που προτείνεται, καθώς επίσης και η συσχέτιση ανάμεσα στην ικανοποίηση που λαμβάνει ο χρήστης από τον επιτευξιμό ρυθμό μετάδοσης που επιτυγχάνει και τη διασφάλιση των απαιτήσεών του σε ΠτΥ, σε σχέση με τους συνολικούς πόρους που δαπανώνται (ισχύς εκπομπής). Η παραπάνω θεώρηση αποτελεί καινοτομία του συγκεκριμένου προβλήματος που προτείνεται στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής, καθώς οι μέχρι τώρα ερευνητικές προσπάθειες είχαν ως μοναδικό γνώμονα προσδιορισμού της λαμβανόμενης ικανοποίησης ενός χρήστη τον επιτευξιμό ρυθμό μετάδοσης σε συνάρτηση με την καταναλισκόμενη ισχύ εκπομπής, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το είδος της υπηρεσίας και

οι απαιτήσεις σε ΠτΥ του χρήστη. Στο τέλος του παρόντος κεφαλαίου, προτείνεται ένας κατανεμημένος επαναληπτικός αλγόριθμος με σκοπό τον προσδιορισμό του σημείου ισορροπίας κατά Nash του εν λόγω προβλήματος/παιγνίου και η αποτελεσματικότητά του προσδιορίζεται και αναδεικνύεται μέσω προσομοιώσεων και αναλυτικών αριθμητικών αποτελεσμάτων.

2.1 Σχετική βιβλιογραφία

Σημαντικές ερευνητικές προσπάθειες έχουν αφιερωθεί στην ενδελεχή μελέτη του ανωτέρω περιγραφέντος προβλήματος και υπάρχει μία αρκετά πλούσια βιβλιογραφία σε σχέση με το πρόβλημα αυτό. Δεδομένης της εγωιστικής συμπεριφοράς των ασύρματων χρηστών ως προς την απόκτηση των πόρων του ασύρματου κυψελωτού δικτύου, καθώς επίσης και της ανάγκης για υποστήριξη διαφορετικών απαιτήσεων ως προς την ΠτΥ των ασύρματων χρηστών, κρίνεται αναγκαία η διατύπωση του προβλήματος κατανομής της ισχύος εκπομπής των ασύρματων χρηστών στη ζεύξη ανόδου ενός ασύρματου κυψελωτού δικτύου, το οποίο χρησιμοποιεί πολυπλεξία διαίρεσης κώδικα (Code Division Multiple Access - CDMA), ως ένα μη συνεργατικό παίγνιο [1], [2]. Στην κατάσταση του προβλήματος, οι ασύρματοι χρήστες αντιστοιχίζονται στους παίκτες του εν λόγω παιγνίου, οι οποίοι εγωιστικά ανταγωνίζονται μεταξύ τους, με σκοπό τον προσδιορισμό της βέλτιστης ισχύος εκπομπής, σύμφωνα με την οποία μεγιστοποιείται η λαμβανόμενη από το σύστημα ικανοποίησή τους. Η ικανοποίηση των χρηστών μοντελοποιείται μέσω μίας κατάλληλα σχεδιασμένης και αντιπροσωπευτικής συνάρτησης χρησιμότητας και το πρόβλημα βελτιστοποίησης λύνεται υιοθετώντας τη Θεωρία Παιγνίων, η οποία προτείνεται από τη βιβλιογραφία ως η καταλληλότερη επιλογή, δεδομένης της μη συνεργατικής φύσης του εν λόγω προβλήματος [3].

Ο κατάλληλος σχεδιασμός της ΣΧ των χρηστών είναι καίριας σημασίας για τον αποδοτικό αντικατοπτρισμό των απαιτήσεων σε ΠτΥ των χρηστών σε αντιπροσωπευτικές ΣΧ, η βελτιστοποίηση των οποίων θα οδηγήσει τελικά στην επιτυχή ικανοποίηση των απαιτήσεων των χρηστών. Συγκεκριμένα στη δημοσίευση [4] προτείνεται μία προσέγγιση βασισμένη στη ΣΧ με σκοπό την κατανομή ισχύος εκπομπής σε χρήστες οι οποίοι αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου στη ζεύξη ανόδου ενός CDMA ασύρματου κυψελωτού δικτύου. Παρόλα αυτά στη συγκεκριμένη προσέγγιση η ΣΧ των ασύρματων χρηστών εκφράζει απλοϊκά την ικανοποίηση που λαμβάνουν οι ασύρματοι χρήστες σε σχέση με τον επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσης που επιτυγχάνουν από τη συγκεκριμένη θέση που βρίσκονται μέσα στην κυψέλη έως το σταθμό βάσης στον οποίο ανήκουν, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η κατανάλωση ισχύος εκπομπής που απαιτείται για να επιτύχουν το συγκεκριμένο ρυθμό μετάδοσης. Για το λόγο αυτό είναι προφανές ότι ο συγκεκριμένος σχεδιασμός της ΣΧ των

χρηστών της κυψέλης είναι ιδιαίτερα αφηρημένος, γενικός και δεν αντικατοπτρίζονται τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των χρηστών σε απαιτήσεις ΠτΥ από το δίκτυο. Επιπρόσθετα, στη δημοσίευση [3], προτείνεται μία γραμμική ΣΧ σε συνάρτηση με τον επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσης των χρηστών και κατά αυτόν τον τρόπο οι απαιτήσεις των ασύρματων χρηστών σε ΠτΥ εκφράζονται ως στατιστικοί περιορισμοί καθυστέρησης. Ωστόσο όμως, μια τέτοιου είδους προσέγγιση δεν είναι πάντοτε αποτελεσματική, δεδομένου ότι, ακόμη και αν πληρούνται οι περιορισμοί καθυστέρησης που θέτει ένας ασύρματος χρήστης ο οποίος αιτείται υπηρεσία πραγματικού χρόνου δε διασφαλίζεται η μη υποβάθμιση της ΠτΥ του λόγω των πιθανώς κακών συνθηκών του καναλιού του, αλλά και των πιθανών διακυμάνσεων αυτού.

2.2 Μοντέλο Συστήματος & Σχετικές Πληροφορίες

Στο συγκεκριμένο πρόβλημα μελετάται η ζεύξη ανόδου ανά χρονοσχισμή t ενός CDMA ασύρματου κυψελωτού δικτύου το οποίο αποτελείται από μία κυψέλη και υποστηρίζει $N(t)$ χρήστες οι οποίοι έχουν να μεταδώσουν συνεχώς δεδομένα στο δίκτυο και το αντίστοιχο σύνολό τους συμβολίζεται με $S(t)$. Η χρονοσχισμή είναι ένα σταθερό χρονικό διάστημα ($t=1.67\text{ ms}$) στο οποίο μπορούν να αποστέλλονται ένα ή περισσότερα πακέτα. Λόγω των εγγενών ιδιομορφιών του ασύρματου περιβάλλοντος, η ποιότητα του καναλιού των χρηστών επηρεάζεται όχι μόνο από απώλειες διαδρομής αλλά και από φαινόμενα σκίασης, διαλείψεις πολλαπλών διαδρομών και βραχυπρόθεσμες διαλείψεις περιβάλλουσας. Οι παραπάνω ιδιότητες οδηγούν στη θεώρηση του κέρδους των καναλιών των χρηστών $G_i(t)$ για κάθε $i \in S$, ως τυχαίες στοχαστικές διαδικασίες, ανεξάρτητες μεταξύ τους. Επιπλέον, γίνεται η παραδοχή ότι η τιμή του κέρδους του καναλιού κάθε χρήστη παραμένει αμετάβλητη κατά τη διάρκεια κάθε χρονοσχισμής. Για το λόγο αυτό, στους ορισμούς και τις αναλύσεις που δίδονται στο υπόλοιπο κείμενο παραλείπεται ο όρος t , που υποδηλώνει τη χρονική εξάρτηση της κάθε μεταβλητής. Στην αρχή κάθε χρονοσχισμής t , ένας αλγόριθμος κατανομής ισχύος (Uplink Power Control Algorithm - UPC Algorithm) είναι υπεύθυνος για τη λήψη αποφάσεων με έναν κατανεμημένο τρόπο.

Στη συνέχεια της ανάλυσης, η ισχύς εκπομπής κάθε ασύρματου χρήστη i σε κάθε υπό μελέτη χρονοσχισμή συμβολίζεται με P_i και είναι φραγμένη λόγω των φυσικών και τεχνικών περιορισμών, $0 \leq P_i \leq P_i^{Max}$. Επιπρόσθετα ο σηματοθορυβικός λόγος που απολαμβάνει κάθε ασύρματος χρήστης συμβολίζεται με $\gamma_i \square E_b/I_o$ και με R_i ο ρυθμός μετάδοσης του χρήστη i . Σύμφωνα με τους παραπάνω συμβολισμούς μπορεί να ορισθεί αναλυτικά ο σηματοθορυβικός λόγος κάθε χρήστη ως ακολούθως:

$$\gamma_i(R_i, P_i, \bar{P}_{-i}) = \frac{W}{R_i} \frac{G_i P_i}{\theta \sum_{j=1}^N G_j P_j - \theta G_i P_i + I_0} = \frac{W}{R_i} \frac{G_i P_i}{I_{-i}(\bar{P}_{-i})} \quad (1)$$

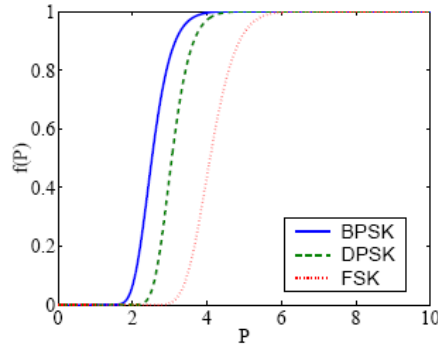
όπου με θ συμβολίζεται ο παράγοντας ορθογωνιότητας, με W το εύρος μετάδοσης του συστήματος, με \bar{P}_{-i} το διάνυσμα ισχύος εκπομπής όλων των χρηστών της κυψέλης εξαιρουμένου του χρήστη i και με I_0 ο θόρυβος από το υπόβαθρο και ο θόρυβος που προκαλείται εξαιτίας των προκαλούμενων παρεμβολών. Συνεπώς, ο παράγοντας $I_{-i}(\bar{P}_{-i})$ αναπαριστά το σύνολο των παρεμβολών στην κυψέλη και το θόρυβο από το υπόβαθρο που γίνεται αντιληπτός στο σταθμό βάσης όταν σε αυτόν καταφθάνουν δεδομένα από τον ασύρματο χρήστη i .

$$I_{-i}(\bar{P}_{-i}) = \theta \sum_{j=1}^N G_j P_j - \theta G_i P_i + I_0 \quad (2)$$

Με σκοπό την ενιαία έκφραση των απαιτήσεων σε ΠτΥ των ασύρματων χρηστών, οι οποίοι αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου σε μία ομογενοποιημένη ΣΧ και η αντιμετώπιση των απαιτήσεων αυτών κάτω από ένα ενιαίο πλαίσιο βελτιστοποίησης, αναδεικνύεται κρίσιμος ο παράγοντας προσεκτικού σχεδιασμού των Συναρτήσεων Χρησιμότητας (ΣΧ – Utility Functions). Στο προτεινόμενο πρόβλημα, η ΣΧ U_i του ασύρματου χρήστη $i \in S$ εκφράζει το βαθμό ικανοποίησής του σε συνάρτηση με την εξισορρόπηση ανάμεσα στον επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσης (ο οποίος μετράται στο σταθμό βάσης) και την αντίστοιχη κατανάλωση ισχύος εκπομπής σε κάθε χρονοσχισμή. Συνεπώς, η προτεινόμενη συνάρτηση χρησιμότητας μπορεί να οριστεί ως ακολούθως:

$$U(R_i^*, P_i, \bar{P}_{-i}) = \frac{T_i(R_i^*, P_i, \bar{P}_{-i})}{P_i} = \frac{T_i(R_i^F \cdot f_i(\gamma_i), P_i, \bar{P}_{-i})}{P_i} \quad (3)$$

όπου με $R_i^* \equiv R_i^F \cdot f_i(\gamma_i)$ συμβολίζεται ο επιτεύξιμος ρυθμός μετάδοσης του χρήστη $i \in S$ στην υπό μελέτη χρονοσχισμή, με R_i^F ο σταθερός ρυθμός μετάδοσης του κάθε χρήστη από τη θέση στην οποία αυτός βρίσκεται εντός της κυψέλης και με f_i η συνάρτηση απόδοσης. Η συνάρτηση απόδοσης αντιπροσωπεύει την πιθανότητα μιας επιτυχούς μετάδοσης πακέτου για το χρήστη $i \in S$ και είναι μία γνησίως αύξουσα συνάρτηση του σηματοθορυβικού του λόγου γ_i σε κάθε χρονοσχισμή. Η συνάρτηση απόδοσης ενός ασύρματου χρήστη, η οποία εκφράζει την επιτυχή μετάδοση ενός πακέτου, δεδομένων σταθερών ρυθμών μετάδοσης των χρηστών, εξαρτάται από τα σχήματα μετάδοσης (σχήματα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης) τα οποία χρησιμοποιούνται. Η συνάρτηση απόδοσης f_i μπορεί να αναπαρασταθεί ως μία σιγμοειδής συνάρτηση ως προς την ισχύ εκπομπής του χρήστη για διάφορα σχήματα διαμόρφωσης [1],



Σχήμα 1 Συνάρτηση απόδοσης f_i για διάφορα σχήματα διαμόρφωσης

όπως απεικονίζεται στο σχήμα 1. Ανακεφαλαιώνοντας, η συνάρτηση απόδοσης f_i του χρήστη $i \in \mathcal{S}$ έχει τις ακόλουθες ιδιότητες.

1. Η f_i είναι μια αύξουσα συνάρτηση του γ_i .
2. Η f_i είναι μια συνεχής, διπλά παραγωγίσιμη, σιγμοειδής συνάρτηση ως προς το γ_i .
3. Ισχύει $f_i(0)=0$ για να εξασφαλιστεί ότι $T_i=0$ και $U_i=0$ όταν $P_i=0$.
4. $f_i(\infty)=1$.

Η ορθότητα των παραπάνω ιδιοτήτων έχει αποδειχθεί σε διάφορα πρακτικά σενάρια με αρκετά μεγάλο μέγεθος των πακέτων δεδομένων M (δηλ. $M \geq 100bits$) [2], [3].

Επιπρόσθετα, η συνάρτηση $T_i(R_i^*, P_i, \bar{P}_i)$ είναι μία σιγμοειδής συνάρτηση ως προς τον επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσης $R_i^* \equiv R_i^F \cdot f_i(\gamma_i)$ και αντικατοπτρίζει το βαθμό ικανοποίησης του χρήστη σε σχέση με τις πραγματικές προσδοκίες του σε ρυθμό μετάδοσης και την ικανοποίηση των απαιτήσεών του σε ΠτΥ σε κάθε χρονοσχισμή.

Στην επόμενη ενότητα μελετούνται και προσδιορίζονται οι επιθυμητές ιδιότητες και απαιτήσεις σε ΠτΥ του ασύρματου χρήστη, ο οποίος αιτείται υπηρεσία πραγματικού χρόνου και ακολούθως αναλύεται η μεθοδολογία που προτείνεται στην παρούσα διδακτορική διατριβή, για την απεικόνιση του βαθμού ικανοποίησης των χρηστών, σε σχέση με την απόδοση της υπηρεσίας που αιτούνται, σε μία κατάλληλα σχεδιασμένη συνάρτηση επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης $T_i(R_i^*)$.

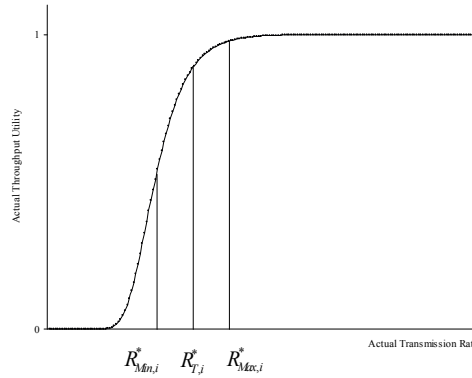
2.3 Απαιτήσεις σε Ποιότητα της Υπηρεσίας

Λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις σε ΠτΥ, όπως αυτές περιγράφηκαν στη δημοσίευση [4], υποθέτεται στο παρόν κεφάλαιο ότι οι απαιτήσεις σε ΠτΥ των χρηστών, οι οποίοι αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, εκφράζονται κυρίως ως ένας στόχος επίτευξης σταθερού ρυθμού μετάδοσης ανά χρονοσχισμή, λαμβάνοντας υπόψη την ύπαρξη ενός παράγοντα ελαστικότητας ως προς τον επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσης. Ο επιθυμητός ρυθμός

μετάδοσης $R_{T,i}^*$ εκφράζει την ιδανική τιμή του ρυθμού μετάδοσης του χρήστη ανά χρονοσχιμή, σύμφωνα με τον οποίο ικανοποιούνται οι απαιτήσεις του χρήστη σε ΠτΥ, ενώ ο παράγοντας ελαστικότητας (Elasticity Factor - EF) προσδιορίζει τα επιτρεπτά όρια διακύμανσης του επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης σε σχέση με τον επιθυμητό ρυθμό μετάδοσης για τον κάθε χρήστη.

Πιο αναλυτικά, ο παράγοντας ελαστικότητας προσδιορίζει τα ελάχιστα αποδεκτά και επιτρεπτά επίπεδα του επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης (δηλαδή $R_{Min,i}^* = R_{T,i}^* - EL_i$). Επιπρόσθετα γίνεται η υπόθεση ότι στην περίπτωση κατά την οποία ο επιτεύξιμος ρυθμός μετάδοσης παραμένει εντός του διαστήματος $[R_{Min,i}^*, R_{T,i}^*]$, η συνάρτηση επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης $T_i(R_i^*)$ του χρήστη είναι βραδέως φθίνουσα ως προς τον επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσης. Στην αντίθετη περίπτωση κατά την οποία ο επιτεύξιμος ρυθμός μετάδοσης βρίσκεται εντός του διαστήματος $[0, R_{Min,i}^*]$, τότε η συνάρτηση επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης $T_i(R_i^*)$ του χρήστη είναι ταχέως φθίνουσα, υποδεικνύοντας κατά αυτόν τον τρόπο την προτεραιότητα του χρήστη στη δέσμευση περισσότερων πόρων του συστήματος. Σύμφωνα με αυτόν τον προτεινόμενο σχεδιασμό της συνάρτησης επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης $T_i(R_i^*)$ των χρηστών παρέχεται η ευελιξία στους χρήστες να δύνανται να μειώσουν τον επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσής τους έως ένα επιτρεπτό κατώτατο όριο ($R_{Min,i}^*$), στην περίπτωση κατά την οποία εμφανισθούν παροδικά δυσμενείς συνθήκες καναλιού, χωρίς να αποκλείεται προσωρινά ο χρήστης από τη διαδικασία της μετάδοσης στη συγκεκριμένη χρονοσχιμή. Σε αντίθετη περίπτωση, εάν είχε υιοθετηθεί ως συνάρτηση επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης των χρηστών μία βηματική συνάρτηση ως προς τον επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσης με σκοπό να εκφράσει τη λαμβανόμενη από το δίκτυο ικανοποίηση του χρήστη, τότε ο χρήστης θα αποκλειόταν από τη διαδικασία της μετάδοσης, στην περίπτωση κατά την οποία τα επίπεδα του επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης κυμαίνονταν έστω και παροδικά σε τιμές χαμηλότερες από $R_{T,i}^*$.

Επιπρόσθετα, γίνεται η παραδοχή ότι μία περαιτέρω αύξηση του επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης του χρήστη $i \in S$ σε σχέση με τον επιθυμητό ρυθμό μετάδοσης $R_{T,i}^*$ δε συνεισφέρει σε αναλογική αύξηση των τιμών της συνάρτησης επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης. Για το λόγο αυτό, η συνάρτηση επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης $T_i(R_i^*)$ τείνει ασυμπτωτικά στη μέγιστή της τιμή (για $R_i^* \rightarrow \infty$ τότε $T_i(\infty) = 1$). Η παραπάνω παραδοχή δεν είναι αυθαίρετη διότι βασίζεται στην παρατήρηση σύμφωνα με την οποία όταν έχει επιτευχθεί ο επιθυμητός ρυθμός μετάδοσης (συνεπώς έχουν ικανοποιηθεί και οι απαιτήσεις σε ΠτΥ των χρηστών), μία περαιτέρω αύξηση του επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης δεν



Σχήμα 2 Συνάρτηση επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης $T_i(R_i^*)$ για χρήστες οι οποίοι αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου.

προκαλεί ειδοποιό διαφορά στη λαμβανόμενη από το χρήστη ικανοποίηση. Η γραφική παράσταση της συνάρτησης επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης, με τις ιδιότητες που περιγράφηκαν προηγουμένως, απεικονίζεται στο Σχήμα 2.

Επιπρόσθετα, ο άνω φραγμός του επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης ($R_{Max,i}^*$) ελαχιστοποιεί την κατασπατάληση των πόρων του συστήματος, για την περίπτωση κατά την οποία ορισμένοι χρήστες παρουσιάζουν προσωρινά ιδιαίτερα καλή κατάσταση καναλιού και προσπαθούν να οικειοποιηθούν περισσότερους πόρους του συστήματος σε σχέση με όσους πραγματικά χρειάζονται, για να καλύψουν τις απαιτήσεις τους σε ΠτΥ. Κατά αυτόν τον τρόπο, η περίσσεια των πόρων από τους ανωτέρω περιγραφέντες χρήστες μπορεί να ανακατανεμηθεί στους μη ευεργετημένους χρήστες, από την σκοπιά της ποιότητας του καναλιού, ώστε να αυξηθεί η ικανοποίησή τους, αλλά ταυτόχρονα να αυξηθεί και η χωρητικότητα της κυψέλης σε πλήθος χρηστών, οι οποίοι μπορούν ταυτόχρονα να εξυπηρετηθούν από το ασύρματο δίκτυο. Για πρακτικούς λόγους και εξαιτίας των περιορισμών που θέτει το υλισμικό (hardware) των χρηστών, θεωρούμε ότι η συνάρτηση επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης έχει φθάσει τη μέγιστη τιμή της, δηλαδή $T_i(R_{Max,i}^*) = 1 - \varepsilon$, όταν $R_{Max,i}^* = R_{T,i}^* + \varepsilon L_i$, όπου ο αριθμός ε είναι ένας αυθαίρετα μικρός θετικός αριθμός, π.χ. $\varepsilon = 5 * 10^{-5}$.

Σύμφωνα με την προηγούμενη ανάλυση η συνάρτηση επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης ενός χρήστη $i \in S$ έχει τις ακόλουθες ιδιότητες, όπως αυτές απεικονίζονται στο Σχήμα 2.

1. Η T_i είναι μια γνησίως αύξουσα συνάρτηση ως προς τον R_i^* .
2. Η T_i είναι μια συνεχής, διπλά παραγωγίσιμη, σιγμοειδής συνάρτηση ως προς τον επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσης R_i^* , με μοναδικό σημείο καμπής $R_{Inf,i}^*$, το οποίο προσδιορίζεται ως ακολούθως.

$$R_{Inf,i}^* = \left\{ R_i^* : \left. \frac{\partial^2 T_i(R_i^*)}{\partial (R_i^*)^2} \right|_{R_i^* = R_{Min,i}^*} = 0 \mid R_{Min,i}^* = R_{T,i}^* - EL_i \right\} \quad (4)$$

3. Ισχύει $T_i(0)=0$ ώστε να ικανοποιείται η απαίτηση $T_i=0$ όταν $R_i^*=0$.
4. Ισχύει $T_i(\infty)=I$.
5. Ισχύει $T_i(R_{Max,i}^*)=1-\varepsilon$, όπου $\varepsilon = 5*10^{-5}$.

Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψη τη σχέση (3) και αντικαθιστώντας $R_i^F = R_{Max,i}^*$ η συνάρτηση χρησιμότητας του χρήστη μπορεί να γραφεί ως ακολούθως:

$$U_i(P_i, \bar{P}_{-i}) = \frac{T_i(R_{Max,i}^* \cdot f_i(\gamma_i))}{P_i} \quad (5)$$

όπου $R_i^* \in [0, R_{Max,i}^*]$ και $f_i(\gamma_i) \in [0, 1] \quad \forall \gamma_i \geq 0$.

2.4 Ορισμός μη Συνεργατικού Παιγνίου Κατανομής Ισχύος Εκπομπής

Καθώς το σύστημα εξελίσσεται χρονικά, στην αρχή κάθε χρονοσχιμής ένας κατάλληλα σχεδιασμένος μηχανισμός κατανομής ισχύος εκπομπής στη ζεύξη ανόδου του CDMA ασύρματου κυψελωτού δικτύου (Uplink Power Control mechanism – UPC mechanism) είναι υπεύθυνος για τον προσδιορισμό της βέλτιστης ισχύος εκπομπής του κάθε ασύρματου χρήστη που εδρεύει εντός της κυψέλης, με στόχο τη μεγιστοποίηση της λαμβανόμενης ικανοποίησής του, η οποία εκφράζεται διαμέσου της συνάρτησης χρησιμότητάς του. Παράλληλα, οι περιορισμοί του υλισμικού του ασύρματου χρήστη, καθώς επίσης τα χαρακτηριστικά του συστήματος ανά χρονοσχιμή πρέπει να ληφθούν υπόψη. Σε αυτή λοιπόν την ενότητα, παρουσιάζονται και αναλύονται οι βασικοί στόχοι του μηχανισμού κατανομής ισχύος εκπομπής στη ζεύξη ανόδου ενός CDMA ασύρματου κυψελωτού δικτύου και ορίζεται το αντίστοιχο πρόβλημα κατανομής ισχύος εκπομπής ως ένα μη συνεργατικό παίγνιο ανάμεσα στους ασύρματους χρήστες που εδρεύουν εντός της κυψέλης, με στόχο τη μεγιστοποίηση της λαμβανόμενης από αυτούς ικανοποίηση από το διαμοιρασμό των πόρων του δικτύου.

Δεδομένου ότι κάθε ασύρματος χρήστης του δικτύου στοχεύει στη μεγιστοποίηση της μέσης τιμής της συνάρτησης χρησιμότητάς του ως προς το πλήθος των χρονοσχιμών, ο αντίστοιχος στόχος του προβλήματος βελτιστοποίησης κατανομής ισχύος εκπομπής μπορεί να ορισθεί ως η μεγιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος ως ακολούθως:

$$\begin{aligned} \max_{P_i} & E[U_i(P_i, \bar{P}_{-i})] \\ \text{s.t.} & 0 \leq P_i \leq P_i^{Max} \end{aligned} \quad (6)$$

Σε αυτό το σημείο πρέπει να γίνουν δύο βασικές παρατηρήσεις. Δεδομένου ότι τα κανάλια των τηλεπικοινωνιακών ζεύξεων θεωρούνται ανεξάρτητα και ταυτόσημα κατανεμημένα (independent and identically distributed - i.i.d.), η μεγιστοποίηση της μέσης τιμής της συνάρτησης χρησιμότητας κάθε χρήστη, όπως διατυπώθηκε στη σχέση (6), μπορεί να επιτευχθεί από τη μεγιστοποίηση της συνάρτησης χρησιμότητας κάθε χρήστη ανά χρονοσχιμή t . Επιπλέον, εξαιτίας της εγωιστικής συμπεριφοράς των ασύρματων χρηστών με σκοπό τη διατήρηση της βέλτιστης ισχύος εκπομπής των, ώστε να μεγιστοποιείται η λαμβανόμενη ικανοποίησή τους από το δίκτυο, το πρόβλημα κατανομής ισχύος εκπομπής στους ασύρματους χρήστες ανά χρονοσχιμή μπορεί να μοντελοποιηθεί ως ένα μη συνεργατικό παίγνιο κατανομής ισχύος (Uplink Power Control game – UPC game).

Στη συνέχεια της παρούσας ενότητας το προτεινόμενο μη συνεργατικό παίγνιο κατανομής ισχύος εκπομπής συμβολίζεται με $G = [S, \{A_i\}, \{U_i\}]$, όπου S είναι το σύνολο των χρηστών/παικτών και $A_i = [0, P_i^{Max}] \times \mathfrak{R}^N$ είναι το σύνολο στρατηγικών του χρήστη $i \in S$. Κάθε στρατηγική η οποία ανήκει στο σύνολο A_i μπορεί να γραφεί ως $a_i = (P_i)$. Συνεπώς, το προκύπτον ανά χρονοσχιμή πρόβλημα κατανομής ισχύος εκπομπής μπορεί να εκφραστεί ως το ακόλουθο πρόβλημα μεγιστοποίησης της αντικειμενικής συνάρτησης χρησιμότητας.

$$\max_{a_i} U_i = \max_{P_i} U_i(P_i, \bar{P}_{-i}) \quad \text{for } i = 1, \dots, N. \quad (7)$$

υπό τον περιορισμό της άνω φραγμένης και μη μηδενικής ισχύος εκπομπής των χρηστών.

2.5 Επίλυση του Παιγνίου & Προσδιορισμός του Σημείου

Ισορροπίας κατά Nash

Στοχεύοντας την επίλυση του μη συνεργατικού παιγνίου που ορίστηκε στην προηγούμενη ενότητα υιοθετούμε τη Θεωρία Παιγνίων κατά Nash, η οποία είναι ευρέως διαδεδομένη για την αντιμετώπιση προβλημάτων που έγκεινται στη θεωρία παιγνίων. Το σημείο ισορροπίας κατά Nash είναι ένα διάνυσμα ισχύος εκπομπής όλων των χρηστών, τέτοιο ώστε κανένας χρήστης να μην έχει την επιθυμία να μεταβάλει την ισχύ εκπομπής του, δεδομένων των τιμών ισχύος εκπομπής των υπόλοιπων χρηστών που εδρεύουν εντός της κυψέλης.

Ορισμός 1: Το διάνυσμα ισχύος εκπομπής $\bar{P}^* = (P_1^*, \dots, P_N^*)$ αποτελεί σημείο ισορροπίας κατά Nash του παιγνίου κατανομής ισχύος UPC, εάν για κάθε χρήστη $i \in S$ ισχύει $U_i(P_i^*, \bar{P}_{-i}^*) \geq U_i(P_i, \bar{P}_{-i}^*)$ για όλες τις τιμές ισχύος εκπομπής $P_i^* \in A_i$.

Εν συνεχεία, πριν αποδειχθεί η ύπαρξη και η μοναδικότητα του σημείου ισορροπίας κατά Nash, μελετούνται οι ιδιότητες της συνάρτησης επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης T_i και της

συνάρτησης χρησιμότητας $U_i(P_i, \bar{P}_{-i})$ των χρηστών στα αντίστοιχα πεδία ορισμού τους. Το ακόλουθο λήμμα προσδιορίζει τη μορφή και τα χαρακτηριστικά της συνάρτησης επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης $T(R^*)$ ως προς το σηματοθορυβικό λόγο του χρήστη.

Λήμμα 1: Δεδομένων: α) της συνάρτησης απόδοσης $f(\gamma)$, η οποία είναι σιγμοειδής ως προς το σηματοθορυβικό λόγο γ και έχει μοναδικό σημείο καμπής γ_{Infl}^f και β) της συνάρτησης επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης $T(R^*)$, η οποία είναι σιγμοειδής ως προς τον επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσης R^* και έχει μοναδικό σημείο καμπής R_{Infl}^* , όπου $R^* \equiv R_{Max}^* \cdot f(\gamma)$, τότε η συνάρτηση $T(\gamma) \equiv T(R_{Max}^* \cdot f(\gamma))$ είναι επίσης σιγμοειδής ως προς το σηματοθορυβικό λόγο γ ($\gamma \geq 0$), με μοναδικό σημείο καμπής γ_{Infl}^T για το οποίο ισχύει:

$$\gamma_{Infl}^T : \begin{cases} f^{-1}\left(\frac{R_{Infl}^*}{R_{Max}^*}\right) \leq \gamma_{Infl}^T \leq \gamma_{Infl}^f & \text{when } f^{-1}\left(\frac{R_{Infl}^*}{R_{Max}^*}\right) \leq \gamma_{Infl}^f \\ \gamma_{Infl}^f \leq \gamma_{Infl}^T \leq f^{-1}\left(\frac{R_{Infl}^*}{R_{Max}^*}\right) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

όπου $f^{-1}(R_{Infl}^*/R_{Max}^*)$ είναι “1-1” η αντιστοίχιση του σημείου καμπής της συνάρτησης $T(R^*)$ σε τιμές σηματοθορυβικού λόγου γ .

Το Λήμμα 1 αναφέρει ότι η φωλιασμένη συνάρτηση επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης ως προς το σηματοθορυβικό λόγο $T(\gamma)$, η οποία προκύπτει από το συνδυασμό δύο σιγμοειδών συναρτήσεων, είναι επίσης σιγμοειδής συνάρτηση ως προς το σηματοθορυβικό λόγο γ . Επιπλέον, το σημείο καμπής της κυμαίνεται ανάμεσα στα σημεία καμπής των επιμέρους συναρτήσεων οι οποίες τη συνθέτουν. Όπως θα αναλυθεί εκτενώς στην επόμενη ενότητα, η προηγούμενη ιδιότητα διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στις ιδιότητες του σημείου ισορροπίας κατά Nash του UPC παιχνιδιού σε σχέση με την ικανοποίηση των απαιτήσεων σε ΠτΥ των ασύρματων χρηστών. Στο ακόλουθο λήμμα προσδιορίζεται το μοναδικό σημείο μεγίστου της συνάρτησης χρησιμότητας $U_i(P_i, \bar{P}_{-i})$ κάθε χρήστη.

Λήμμα 2: Η συνάρτηση χρησιμότητας (ΣΧ) $U_i(P_i, \bar{P}_{-i})$ του χρήστη $i \in S$ είναι ημι-κοίλη (quasi-concave) ως προς την ισχύ εκπομπής του χρήστη $P_i \in [0, P_i^{Max}]$. Επιπρόσθετα, θεωρώντας ότι οι τιμές της ισχύος εκπομπής των υπολοίπων χρηστών που εδρεύουν εντός της κυψέλης παραμένουν σταθερές κατά τη διάρκεια της υπό μελέτη χρονοσχισμής, η ΣΧ $U_i(P_i, \bar{P}_{-i})$ έχει μοναδικό ολικό σημείο μεγίστου:

$$P_i^* = \min \left\{ \frac{\gamma_i^* R_{Max,i}^* I_{-i}(\bar{P}_{-i})}{WG_i}, P_i^{Max} \right\} \quad (9)$$

εξασφαλίζοντας μία μοναδική τιμή σηματοθορυβικού λόγου γ_i^* , η οποία είναι η μοναδική θετική λύση της εξίσωσης $\frac{\partial T_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i} \cdot \gamma_i - T_i(\gamma_i) = 0$.

Η εξίσωση (9) υποδεικνύει ότι στην περίπτωση κατά την οποία η μέγιστη τιμή ισχύος εκπομπής του χρήστη δεν είναι επαρκής για την επίτευξη του σηματοθορυβικού λόγου γ_i^* , εξαιτίας της πιθανής κακής ποιότητας του καναλιού του, τότε η βέλτιστη στρατηγική είναι να μεταδώσει με τη μέγιστη δυνατή ισχύ εκπομπής του. Επιπρόσθετα, από το Λήμμα 2 εξάγεται το συμπέρασμα ότι ο στόχος του χρήστη να μεγιστοποιήσει τη λαμβανόμενη από το δίκτυο ικανοποίησή του, η οποία εκφράζεται μέσω των τιμών της ΣΧ του, μπορεί να μεταφραστεί ως μία συνεχή του προσπάθεια να επιτύχει μία συγκεκριμένη τιμή του σηματοθορυβικού λόγου στο σταθμό βάσης στον οποίο ανήκει, γεγονός το οποίο οδηγεί σε ένα ισορροπημένο σύστημα ως προς το σηματοθορυβικό λόγο γ .

Η ακόλουθη πρόταση δηλώνει την ύπαρξη και τη μοναδικότητα ενός σημείου ισορροπίας κατά Nash του προτεινόμενου παιγνίου κατανομής ισχύος εκπομπής (UPC) στη ζεύξη ανόδου ενός CDMA ασύρματου κυψελωτού δικτύου και προσδιορίζει το διάνυσμα ισχύος εκπομπής στο σημείο ισορροπίας κατά Nash όλων των χρηστών που εδρεύουν εντός της κυψέλης.

Πρόταση 1: Το σημείο ισορροπίας κατά Nash του μη συνεργατικού παιγνίου (7) δίδεται από την τιμή P_i^* , όπου $P_i^* = \min \left\{ \frac{\gamma_i^* R_{Max,i}^* I_{-i}(\bar{P}_{-i})}{WG_i}, P_i^{Max} \right\}$. Η τιμή γ_i^* προέρχεται από τη μοναδική

θετική λύση της εξίσωσης $\frac{\partial T_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i} \cdot \gamma_i - T_i(\gamma_i) = 0$. Επιπρόσθετα, το σημείο ισορροπίας κατά Nash υπάρχει και είναι μοναδικό.

Απόδειξη: Σύμφωνα με το λήμμα 2, η τιμή της ισχύος εκπομπής του χρήστη, η οποία μεγιστοποιεί τη λαμβανόμενη από το δίκτυο ικανοποίησή του, δεδομένων των τιμών της ισχύος εκπομπής των υπολοίπων χρηστών που εδρεύουν εντός της κυψέλης, ισούται με εκείνη την τιμή ισχύος εκπομπής, η οποία μεγιστοποιεί τη ΣΧ του χρήστη, όπως αυτή ορίστηκε στη σχέση (5). Συνεπώς, θεωρώντας δεδομένο το ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων του χρήστη, $R_i^F = R_{Max,i}^*$, η βέλτιστη τιμή της ισχύος εκπομπής του είναι $P_i^* = \min \left\{ \gamma_i^* R_{Max,i}^* I_{-i}(\bar{P}_{-i}) / WG_i, P_i^{Max} \right\}$, όπου η τιμή του σηματοθορυβικού λόγου γ_i^* είναι η μοναδική θετική λύση της εξίσωσης $\partial T_i(\gamma_i) / \partial \gamma_i \cdot \gamma_i - T_i(\gamma_i) = 0$.

Μέχρι αυτό το σημείο έχει αποδειχθεί ότι στο σημείο ισορροπίας κατά Nash (εάν αυτό υπάρχει), η ισχύς εκπομπής κάθε χρήστη εξασφαλίζει ένα σταθερό σηματοθορυβικό λόγο, η τιμή του οποίου εξαρτάται από το σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που υιοθετείται, το μέγεθος του πακέτου των δεδομένων τα οποία μεταδίδονται (οι τρεις αυτοί παράμετροι λαμβάνονται υπόψη στη συνάρτηση απόδοσης f_i), αλλά και από τις απαιτήσεις σε ΠτΥ των χρηστών που αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου (οι οποίες εκφράζονται μέσω της συνάρτησης επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης).

Βασίζοντας την προτεινόμενη απόδειξη στις δημοσιεύσεις [2], [3], η ύπαρξη του σημείου ισορροπίας κατά Nash του παιγνίου (7) μπορεί να αποδειχθεί χρησιμοποιώντας την προσέγγιση της ημι-κοίλης συνάρτησης χρησιμότητας του χρήστη ως προς την ισχύ εκπομπής του. Καθώς αποδείχθηκε στο λήμμα 2, η ΣΧ του χρήστη $i \in S$ είναι ημι-κοίλη ως προς την ισχύ εκπομπής του $P_i \in [0, P_i^{Max}]$ και για το λόγο αυτό εξασφαλίζεται η ύπαρξη του σημείου ισορροπίας κατά Nash.

Επιπρόσθετα, δεδομένης της σιγμοειδούς μορφής της συνάρτησης επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης T_i ως προς το σηματοθορυβικό λόγο γ_i , η εξίσωση $\partial T_i(\gamma_i) / \partial \gamma_i \cdot \gamma_i - T_i(\gamma_i) = 0$ έχει μία μοναδική θετική λύση γ_i^* , η τιμή της οποίας αποτελεί το μοναδικό ολικό μέγιστο της συνάρτησης χρησιμότητας του χρήστη $i \in S$. Συνεπώς, δεδομένης της μοναδικής τιμής γ_i^* και της «1-1» σχέσης ανάμεσα στην ισχύ εκπομπής του χρήστη και στον αντίστοιχο σηματοθορυβικό του λόγο, το ανωτέρω προσδιορισθέν σημείο ισορροπίας κατά Nash είναι μοναδικό. ■

Ολοκληρώνοντας αυτή την ενότητα, προτείνεται ένας επαναληπτικός καταναμημένος και χαμηλής πολυπλοκότητας αλγόριθμος κατανομής ισχύος, με σκοπό την εξεύρεση του σημείου ισορροπίας κατά Nash του UPC παιγνίου G , ανά χρονοσχισμή.

UPC Αλγόριθμος

Βήμα 1^ο: Στην αρχή κάθε χρονοσχισμής t , ο κάθε χρήστης i εκπέμπει με τη μέγιστη τιμή της ισχύος εκπομπής του. Θέσε $k=0$ και $P_i^{*(0)} = P_i^{Max} \quad \forall i \in S$.

Βήμα 2^ο: Δεδομένης της ισχύος εκπομπής των υπολοίπων χρηστών, η οποία εμμέσως αναφέρεται από το σταθμό βάσης μέσω ευρυεκπομπής (broadcasting) όταν υπολογίζεται ο συνολικός θόρυβος εντός της κυψέλης $I^{(k)}(\bar{P}^{(k)})$, κάθε χρήστης υπολογίζει το θόρυβο που αντιλαμβάνεται εξαιτίας της εκπομπής των υπολοίπων χρηστών $I_{-i}^{(k)}(\bar{P}_{-i}^{(k)})$ και επαναπροσδιορίζει την ισχύ εκπομπής του, $P_i^{*(k+1)}$ σύμφωνα με τη σχέση (9).

Βήμα 3^ο: Εάν οι τιμές της ισχύος εκπομπής όλων των χρηστών συγκλίνουν, δηλαδή $|P_i^{*(k+1)} - P_i^{*(k)}| \leq 10^{-5}$ τότε ο αλγόριθμος σταματά.

Βήμα 4^ο: Θέσε $k=k+1$ και επέστρεψε στο βήμα 2.

2.6 Μελέτη των Ιδιοτήτων του Σημείου Ισορροπίας κατά Nash

Σε αυτή την ενότητα αναλύονται και μελετώνται οι ιδιότητες του σημείου ισορροπίας κατά Nash του παιγνίου κατανομής ισχύος εκπομπής UPC για χρήστες οι οποίοι αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου υπό το πρίσμα των τιμών της ισχύος εκπομπής των χρηστών στο σημείο ισορροπίας, του ρόλου των φυσικών περιορισμών που υφίστανται, του επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης και της λαμβανόμενης ικανοποίησης των χρηστών από το δίκτυο. Η ανάλυση που ακολουθεί αναδεικνύει ότι οι χρήστες μπορούν αυτόνομα να ελέγξουν τη βελτιστοποίηση της ικανοποίησης που λαμβάνουν από την κάλυψη των απαιτήσεών τους σε ΠτΥ, με την προϋπόθεση ότι τους παρέχεται η αυτονομία να ελέγξουν το σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησής τους και την ισχύ εκπομπής τους.

Λαμβάνοντας υπόψη την ανάλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης που προηγήθηκε, αρχικά επισημαίνεται ότι η τιμή του σηματοθορυβικού λόγου γ_i^* , η οποία αντιστοιχεί στη μεγιστοποίηση της ΣΧ U_i του χρήστη $i \in S$, πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την τιμή του σηματοθορυβικού λόγου $\gamma_{Infl,i}^T$, η οποία αντιστοιχεί στο σημείο καμψής της συνάρτησης επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης ως προς το σηματοθορυβικό λόγο. Για τιμές σηματοθορυβικού λόγου μεγαλύτερες από την τιμή $\gamma_{Infl,i}^T$ επισημαίνεται ότι η συνάρτηση $T_i(\gamma_i)$ είναι κοίλη. Συνεπώς, ισχύει:

$$\gamma_{Infl,i}^T < \gamma_i^* \quad (10)$$

Επιπρόσθετα, λαμβάνοντας υπόψη το λήμμα 1, εξάγεται το συμπέρασμα ότι το σημείο καμψής $\gamma_{Infl,i}^T$ της συνάρτησης $T_i(\gamma_i)$ κυμαίνεται πάντα μεταξύ των τιμών των σημείων καμψής των γεννητόρων συναρτήσεων, δηλαδή της συνάρτησης απόδοσης $f_i(\gamma_i)$ και της συνάρτησης επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης $T_i(R_i^*)$ ως συνάρτηση του επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης R_i^* . Ως εκ τούτου, από τις σχέσεις (8) και (10), είναι προφανές ότι η ακόλουθη ιδιότητα ισχύει όσον αφορά το σηματοθορυβικό λόγο γ_i^* :

$$\gamma_i^* = \begin{cases} f_i^{-1}\left(\frac{R_{Infl,i}^*}{R_{Max}^*}\right) < \gamma_i^* & \text{when } f_i^{-1}\left(\frac{R_{Infl,i}^*}{R_{Max,i}^*}\right) \leq \gamma_{Infl,i}^f \\ \gamma_{Infl,i}^f < \gamma_i^* & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

Λαμβάνοντας υπόψη την προηγούμενη ανάλυση, η ακόλουθη πρόταση προσδιορίζει την επιρροή του σχήματος διαμόρφωσης και κωδικοποίησης στην απόδοση της υπηρεσίας πραγματικού χρόνου που αιτείται ο ασύρματος χρήστης.

Πρόταση 2: Εάν για έναν χρήστη $i \in S$, ο οποίος αιτείται υπηρεσία πραγματικού χρόνου, ισχύει $f_i^{-1}(R_{Infl,i}^*/R_{Max,i}^*) \leq \gamma_{Infl,i}^f$, τότε στο σημείο ισορροπίας κατά Nash, όπου ισχύει $P_i = P_i^*$ και συνεπώς $\gamma_i = \gamma_i^*$, ο επιτεύξιμος ρυθμός μετάδοσης R_i^* του χρήστη είναι πάντοτε μεγαλύτερος από τον ελάχιστο επιθυμητό $R_{Min,i}^* = R_{T,i}^* - EL_i$, ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις του χρήστη σε ΠτΥ. Επιγραμματικά ισχύει:

$$\text{εάν } f_i^{-1}(R_{Infl,i}^*/R_{Max,i}^*) \leq \gamma_{Infl,i}^f \text{ τότε } R_i^* > R_{Min,i}^*$$

Απόδειξη: Όταν ισχύει $f_i^{-1}(R_{Infl,i}^*/R_{Max,i}^*) \leq \gamma_{Infl,i}^f$ τότε σύμφωνα με τη σχέση (11) ισχύει $f_i^{-1}(R_{Infl,i}^*/R_{Max,i}^*) < \gamma_i^*$. Συνεπώς, εξάγεται το συμπέρασμα ότι $R_{Infl,i}^* < R_{Max,i}^* \cdot f_i(\gamma_i^*)$, δεδομένου ότι η συνάρτηση απόδοσης f_i είναι συνεχής και γνησίως αύξουσα ως προς το σηματοθορυβικό λόγο γ_i ($\gamma_i \geq 0$). Επιπρόσθετα, από τον ορισμό της ΣΧ των χρηστών, το σημείο καμπής της είναι $R_{Infl,i}^* = R_{Min,i}^*$, με βάση τις απαιτήσεις των χρηστών σε ΠτΥ και δεδομένου ότι ισχύει $R_i^* \equiv R_{Max,i}^* \cdot f_i(\gamma_i)$, εξάγεται το συμπέρασμα ότι

$$\text{Εάν } f_i^{-1}(R_{Infl,i}^*/R_{Max,i}^*) \leq \gamma_{Infl,i}^f \text{ τότε } R_i^* > R_{Min,i}^* \quad (12)$$

Συνεπώς, ισχύει ότι

$$\text{Εάν } f_i^{-1}(R_{Min,i}^*/R_{Max,i}^*) \leq \gamma_{Infl,i}^f \text{ τότε } R_i^* > R_{T,i}^* - EL_i \quad (13)$$

όταν η μέγιστη ισχύς εκπομπής P_i^{Max} των χρηστών είναι επαρκής ώστε να επιτευχθεί ο σηματοθορυβικός λόγος γ_i^* . ■

Η προηγούμενη πρόταση διατυπώνει μία ισχυρή συσχέτιση ανάμεσα στις απαιτήσεις των χρηστών σε ΠτΥ, στο σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που υιοθετείται (εκφραζόμενα μέσω της συνάρτησης απόδοσης) και στους φυσικούς και τεχνικούς περιορισμούς των τιμών της ισχύος εκπομπής εξαιτίας του υλισμικού των χρηστών. Επιπρόσθετα, είναι σαφές μέσω της προηγούμενης πρότασης ότι στην περίπτωση κατά την οποία η μέγιστη ισχύς εκπομπής των χρηστών είναι επαρκής για την επίτευξη του σηματοθορυβικού λόγου γ_i^* , τότε στο σημείο ισορροπίας κατά Nash του παιγνίου κατανομής ισχύος εκπομπής UPC επιτυγχάνεται η μεγιστοποίηση της ικανοποίησης που λαμβάνουν οι χρήστες από το δίκτυο (μέσω της μεγιστοποίησης της ΣΧ τους), αλλά ταυτόχρονα ικανοποιούνται και οι ελάχιστες απαιτήσεις ως προς τον επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσης των χρηστών που αιτούνται υπηρεσίες πολυμέσων, πραγματικού χρόνου, εάν ισχύει $f_i^{-1}(R_{Min,i}^*/R_{Max,i}^*) \leq \gamma_{Infl,i}^f$.

Παράλληλα, από την πλευρά του χρήστη, ο οποίος αιτείται μία υπηρεσία πραγματικού χρόνου, δεδομένης της συνάρτησης απόδοσής του f_i και την αντίστοιχη τιμή του σημείου καμπής της (δηλαδή με την προϋπόθεση ότι έχει υιοθετηθεί ένα συγκεκριμένο σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης), εξάγονται οι ακόλουθες παρατηρήσεις.

1. Στην περίπτωση κατά την οποία ισχύει $f_i^{-1}(R_{Min,i}^*/R_{Max,i}^*) \leq \gamma_{Infl,i}^f$, τότε εξασφαλίζεται ότι ο επιτεύξιμος ρυθμός μετάδοσης των χρηστών θα κυμαίνεται πάντοτε εντός των ορίων, τα οποία προσδιορίζονται από τον επιθυμητό ρυθμό μετάδοσης $R_{T,i}^*$ και από τον παράγοντα ελαστικότητας EF_i .
2. Κατά την αύξηση του παράγοντα ελαστικότητας EF_i του χρήστη, αυξάνονται οι πιθανότητες να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις του σε ΠτΥ, δεδομένου ότι η αντίστροφη συνάρτηση απόδοσης f_i^{-1} είναι γνησίως αύξουσα ως προς το λόγο $R_{Min,i}^*/R_{Max,i}^* = R_{T,i}^* - EL_i/R_{T,i}^* + EL_i$.
3. Στην αντίθετη περίπτωση κατά την οποία οι απαιτήσεις των χρηστών σε ΠτΥ είναι ιδιαίτερα αυστηρές (δηλαδή ο παράγοντας ελαστικότητας EF_i λαμβάνει μικρές τιμές, γεγονός που υποδεικνύει ότι επιτρέπονται μικρές αποκλίσεις από τον επιθυμητό ρυθμό μετάδοσης), τότε οι απαιτήσεις των χρηστών δύσκολα ικανοποιούνται. Επιπρόσθετα, εάν η τιμή που λαμβάνει ο παράγοντας ελαστικότητας EF_i είναι τέτοια ώστε να ισχύει $\gamma_{Infl,i}^f < f_i^{-1}(R_{Infl,i}^*/R_{Max,i}^*)$, τότε παρόλο που η ΣΧ του χρήστη μεγιστοποιείται, ο επιτεύξιμος ρυθμός μετάδοσης είναι μικρότερος από τον ελάχιστο επιθυμητό, $R_{Min,i}^*$.

Με βάση την προηγούμενη ανάλυση, είναι προφανές ότι το κριτήριο που διατυπώθηκε στην Πρόταση 2 μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένας παράγοντας απόφασης για την αρχική αποδοχή του συγκεκριμένου χρήστη, ο οποίος αιτείται υπηρεσία πραγματικού χρόνου, προς εξυπηρέτηση στη συγκεκριμένη κυψέλη (δηλαδή ως κριτήριο αποδοχής κλήσεων).

Αντιμετωπίζοντας το πρόβλημα από την πλευρά του συστήματος και δεδομένων των απαιτήσεων ενός ασύρματου χρήστη σε ΠτΥ ο οποίος εισέρχεται εντός της κυψέλης (δηλαδή προκαθορισμένη συνάρτηση επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης T_i και οι αντίστοιχες παράμετροι οι οποίες τη χαρακτηρίζουν: $R_{T,i}^*$, EL_i), τότε το σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που θα υιοθετήσει ο χρήστης και εκφράζεται μέσω της συνάρτησης απόδοσής του f_i , θα πρέπει να ικανοποιεί τη σχέση (13). Σύμφωνα με τη σχέση (13) παρατηρείται ότι όσο πιο απαιτητικός είναι ο χρήστης σε ΠτΥ (γεγονός που εκφράζεται από τις χαμηλές τιμές του παράγοντα ελαστικότητάς του), τόσο υψηλότερη πρέπει να είναι η τιμή του σημείου καμπής της επιλεγόμενης συνάρτησης απόδοσης f_i . Συνεπώς, καθώς παρατηρείται από το Σχήμα 1,

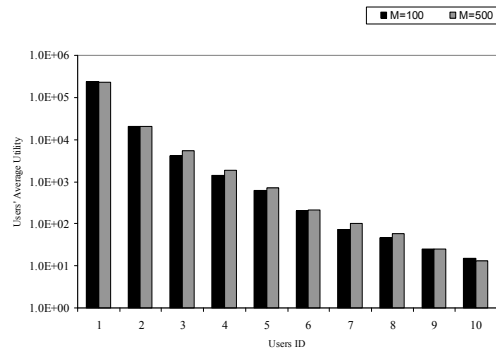
σε αυτή την περίπτωση επιλέγεται ένα χαμηλής ποιότητας σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης σε σχέση με το μέγιστο επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσης.

Τα κριτήρια που αναφέρθηκαν προηγουμένως ευνοούν το σχεδιασμό και την υλοποίηση αυτόνομων μηχανισμών των χρηστών, οι οποίοι θα ελέγχουν την ισχύ εκπομπής των χρηστών με σκοπό τη μεγιστοποίηση της λαμβανόμενης ικανοποίησής τους από το δίκτυο (μέσω της υιοθέτησης του προτεινόμενου μηχανισμού), αλλά παράλληλα θα ελέγχουν και την ικανοποίηση της ΠτΥ των χρηστών μέσω: α) της μοντελοποίησης κατάλληλων συναρτήσεων επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης και β) της ρύθμισης του σχήματος διαμόρφωσης και κωδικοποίησης σύμφωνα με τα προκαθορισμένα κριτήρια (δηλαδή τα κριτήρια που διατυπώθηκαν στην πρόταση 2) με σκοπό τη μεγιστοποίηση της λαμβανόμενης ικανοποίησης των χρηστών από το δίκτυο εξαιτίας της ικανοποίησης των απαιτήσεών τους σε ΠτΥ.

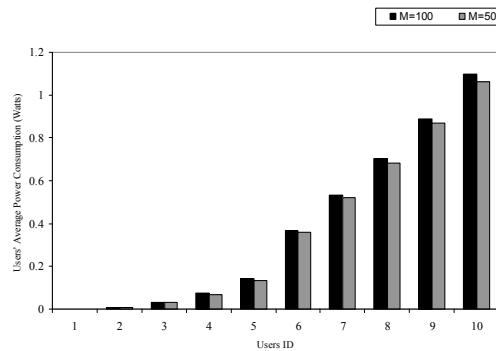
2.7 Αριθμητικά Αποτελέσματα

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται ορισμένα αριθμητικά αποτελέσματα τα οποία αναδεικνύουν τη λειτουργία και τα χαρακτηριστικά του προτεινόμενου παιχνιδιού και του αντίστοιχου επαναληπτικού κατανεμημένου και χαμηλής πολυπλοκότητας UPC αλγορίθμου. Σε όλη τη μελέτη θεωρείται η ζεύξη ανόδου μίας μοναδικής CDMA κυψέλης στην οποία εδρεύουν $N=10$ χρήστες, οι οποίοι αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου και έχουν συνεχώς δεδομένα να μεταδώσουν. Επιπλέον, κάθε προσομοίωση διαρκεί 10.000 χρονοσχιμές, ενώ ισχύει $P_i^{Max}=2\text{ Watts}$, $W=10^6\text{ Hz}$ και $I_0=5*10^{-16}$. Το κανάλι μετάδοσης κάθε χρήστη μοντελοποιείται ως $G_i=K_i/d_i^a$, όπου d_i είναι η απόσταση του χρήστη i από το σταθμό βάσης, η παράμετρος a είναι ο εκθετικός συντελεστής απωλειών ($a=4$) και ως K_i συμβολίζεται η λογαριθμοκανονική κατανομή μίας τυχαίας μεταβλητής με μέση τιμή θ και διακύμανση $\sigma^2=8\text{ (dB)}$, η οποία αντικατοπτρίζει τα φαινόμενα σκίασης. Επιπρόσθετα, σχετικά με την απόσταση κάθε χρήστη από το σταθμό βάσης ισχύει: $d_i=d_{i-1}+250\text{ (m)}$ για $i=2,\dots,10$, όπου $d_1=300\text{ (m)}$. Κατά αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η προσομοίωση του σεναρίου κατά το οποίο η μέση τιμή των συνθηκών του καναλιού μετάδοσης ενός χρήστη χειροτερεύει καθώς ο αύξων αριθμός του αυξάνει, δηλαδή $i=1,\dots,10$.

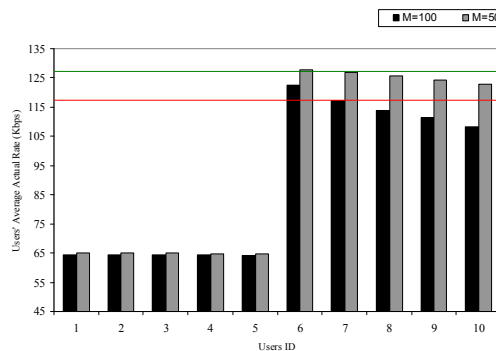
Επιπρόσθετα, λαμβάνονται υπόψη δύο διαφορετικά είδη υπηρεσιών πραγματικού χρόνου. Οι χρήστες με αύξοντα αριθμό 1 έως 5 απαιτούν ως επιθυμητό ρυθμό μετάδοσης $R_{T,i}^*=64\text{ Kbps}$ (υπηρεσία φωνής), ενώ οι χρήστες 6 έως 10 , απαιτούν $R_{T,i}^*=128\text{ Kbps}$ (υπηρεσία βίντεο συνεδρίας). Ο παράγοντας ελαστικότητας ορίζεται ως $EF_i=10\text{ Kbps}$ για όλους του χρήστες $i=1,\dots,N$ που εδρεύουν εντός της κυψέλης. Τα σχήματα 3, 4 και 5 παρουσιάζουν για κάθε χρήστη τη μέση τιμή των τιμών της ΣΧ ως προς το πλήθος των χρονοσχιμών που επαναλαμβάνεται ο αλγόριθμος των τιμών της ΣΧ, της ισχύος εκπομπής και του επιτεύξιμου



Σχήμα 3 Μέση τιμή της συνάρτησης χρησιμότητας των χρηστών.



Σχήμα 4 Μέση τιμή της ισχύος εκπομπής των χρηστών.



Σχήμα 5 Μέση τιμή του επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης των χρηστών.

ρυθμού μετάδοσης ως συνάρτηση του αύξοντα αριθμού του χρήστη αντίστοιχα, λαμβάνοντας υπόψη δύο διαφορετικά σενάρια για τη συνάρτηση απόδοσης των χρηστών, η οποία ορίζεται ως $f_i(\gamma_i) = (1 - e^{-\gamma_i})^M \quad \forall i = 1, \dots, N$. Στο πρώτο σενάριο (μαύρες στήλες), όπου γίνεται η θεώρηση $M = 100$ και για τις δύο ομάδες χρηστών ισχύει $f_i^{-1}(R_{Infl,i}^*/R_{Max,i}^*) \geq \gamma_{Infl,i}^f \quad \forall i = 1, \dots, N$, ενώ στο δεύτερο σενάριο (γκρι στήλες), όπου ισχύει $M = 500$, προκύπτει $f_i^{-1}(R_{Infl,i}^*/R_{Max,i}^*) \leq \gamma_{Infl,i}^f \quad \forall i = 1, \dots, N$.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα παρατηρείται ότι καθώς η ποιότητα του καναλιού των χρηστών χειροτερεύει (αύξηση του αύξοντα αριθμού των χρηστών) επηρεάζεται παράλληλα η λαμβανόμενη ικανοποίηση των χρηστών από το δίκτυο, η οποία μειώνεται (Σχήμα 3),

καθώς επίσης και η ισχύς εκπομπής τους, η οποία αυξάνεται (Σχήμα 4). Παράλληλα παρατηρείται ότι ο επιτεύξιμος ρυθμός μετάδοσης που τελικά απολαμβάνουν οι χρήστες, ικανοποιεί την απαίτηση του ελάχιστου επιθυμητού ρυθμού μετάδοσης R_T^* , ιδιαίτερα στο σενάριο κατά το οποίο $M=500$.

Η συγκεκριμένη παρατήρηση είναι ιδιαίτερης σημασίας διότι αναδεικνύει την αποδοτικότητα του αλγορίθμου, καθώς επίσης και την καλή λειτουργία της συνάρτησης επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης (T_i), ως προς τον παράγοντα ικανοποίησης των απαιτήσεων σε ΠτΥ των χρηστών που αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου.

Επιπρόσθετα, με βάση τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται σε αυτή την ενότητα γίνεται αντιληπτό ότι η κατάλληλη επιλογή του σχήματος διαμόρφωσης και κωδικοποίησης έχει καθοριστικό αποτέλεσμα στην ικανοποίηση των απαιτήσεων των χρηστών σε ΠτΥ. Πιο αναλυτικά, τονίζεται ότι στο σενάριο κατά το οποίο ισχύει $M=500$, ο επιτεύξιμος ρυθμός μετάδοσης όλων των χρηστών είναι εντός των αναμενόμενων ορίων, δηλαδή $R_{Min,i}^* < E[R_i^*] < R_{Max,i}^* \forall i \in S$, δεδομένου ότι ισχύει $R_{Min,i}^* < R_i^* < R_{Max,i}^*$ σε κάθε χρονοσχισμή, ακόμα και για τη δεύτερη κατηγορία χρηστών (σημειώνεται ότι στο σχήμα 5 η κάτω ($R_{Min,i}^*$) και η άνω οριζόντια γραμμή ($R_{T,i}^*$) αντιπροσωπεύουν τα επιτρεπτά όρια του επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης). Η τελευταία παρατήρηση δεν ισχύει στο σενάριο κατά το οποίο θεωρείται $M=100$. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν γίνεται αντιληπτό ότι κάθε χρήστης έχει τη δυνατότητα να ελέγχει και να προσαρμόζει το σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησής του ώστε να επιτυγχάνει την ικανοποίηση των απαιτήσεών του σε ΠτΥ, γεγονός το οποίο συνάδει με το όραμα της αυτονομίας των χρηστών. Επιπρόσθετα, τονίζεται ότι έπειτα από τη μοντελοποίηση της συνάρτησης επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις του χρήστη σε ΠτΥ, η επιλογή του σχήματος διαμόρφωσης και κωδικοποίησης πρέπει να υπακούει στα κριτήρια που προτάθηκαν και αναλύθηκαν στην πρόταση 2, ώστε να βελτιστοποιείται η λαμβανόμενη ικανοποίηση των χρηστών και να ικανοποιούνται ταυτόχρονα οι απαιτήσεις τους σε ΠτΥ.

2.8 Συμπεράσματα & Ανακεφαλαίωση

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάστηκε το πρόβλημα της βέλτιστης κατανομής ισχύος εκπομπής στη ζεύξη ανόδου ενός CDMA ασύρματου κυψελωτού δικτύου, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στην υποστήριξη και ικανοποίηση των απαιτήσεων των χρηστών σε ΠτΥ, οι οποίοι αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου. Το αντίστοιχο πρόβλημα βελτιστοποίησης μοντελοποιήθηκε ως ένα μη συνεργατικό παίγνιο και επιλύθηκε με τη βοήθεια ενός επαναληπτικού και καταναμεμένου αλγορίθμου χαμηλής πολυπλοκότητας, ο οποίος

προσδιορίζει το μοναδικό σημείο ισορροπίας κατά Nash του εν λόγω παιγνίου λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη τους φυσικούς και τεχνικούς περιορισμούς που τίθενται από το υλισμικό των ασύρματων χρηστών. Η ύπαρξη και η μοναδικότητα του σημείου ισορροπίας κατά Nash του υπό μελέτη παιγνίου αποδείχθηκε αναλυτικά και αναδείχθηκαν οι ιδιότητες του σημείου ισορροπίας κατά Nash και οι σχέσεις που αναπτύσσονται ανάμεσα στη λαμβανόμενη από τους ασύρματους χρήστες ικανοποίηση λόγω της κατανομής των πόρων του δικτύου και τις αντίστοιχες απαιτήσεις τους σε ΠτΥ, δεδομένου ότι αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου.

Γενικεύοντας την ιδέα και την προσέγγιση που αναλύθηκε στο κεφάλαιο αυτό, ο επόμενος στόχος της παρούσας διδακτορικής διατριβής, ο οποίος θα αναλυθεί στο κεφάλαιο που ακολουθεί είναι η βέλτιστη κατανομή ισχύος εκπομπής στη ζεύξη ανόδου ενός CDMA ασύρματου κυψελωτού δικτύου, στο οποίο οι χρήστες είναι δυνατόν να αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου και υπηρεσίες δεδομένων χρησιμοποιώντας και προτείνοντας σε κάθε περίπτωση την κατάλληλη ΣΧ για το είδος της υπό ζήτηση από τους χρήστες υπηρεσίας. Επιπρόσθετα, η προσέγγιση που αναλύθηκε σε αυτό το κεφάλαιο παρέχει ένα πρώτο βήμα προς την υλοποίηση του αυτόνομων ασύρματων δικτύων, στα οποία ο χρήστης θα διαθέτει αυτοπροσαρμοζόμενους μηχανισμούς, οι οποίοι θα επιτρέπουν τον έλεγχο της κατανομής ισχύος εκπομπής προς τους αυτόνομους χρήστες και θα διευκολύνουν την ικανοποίηση των απαιτήσεών τους σε ΠτΥ.

3 Βέλτιστη Κατανομή Ισχύος Εκπομπής σε CDMA Ασύρματα Κυψελωτά Δίκτυα κατά τη Ζεύξη Ανόδου: Πολλαπλές Υπηρεσίες

Σε αυτό το κεφάλαιο αντιμετωπίζεται το πρόβλημα βέλτιστης κατανομής ισχύος εκπομπής σε CDMA ασύρματα κυψελωτά δίκτυα στη ζεύξη ανόδου, με βάση την ικανοποίηση των απαιτήσεων των χρηστών σε ΠτΥ, όπου οι χρήστες είναι δυνατό να αιτούνται είτε υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, είτε υπηρεσίες δεδομένων. Λόγω της ανάγκης για την υποστήριξη ταυτόχρονα διαφορετικού είδους υπηρεσιών, οι οποίες χαρακτηρίζονται από διαφορετικές και πολλές φορές αντικρουόμενες απαιτήσεις σε ΠτΥ, σε κάθε χρήστη αντιστοιχίζεται μία φωλιασμένη ΣΧ η οποία αντιπροσωπεύει το βαθμό της ικανοποίησης την οποία λαμβάνει ο χρήστης από το διαμοιρασμό των πόρων του δικτύου σε σχέση με τον επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσής του (ο οποίος αντιπροσωπεύει την ικανοποίηση των απαιτήσεών του σε ΠτΥ) και την αντίστοιχη κατανάλωση ενέργειας (δηλαδή ισχύος εκπομπής). Εντός αυτού του πλαισίου προσέγγισης του προβλήματος, το υπό μελέτη πρόβλημα μοντελοποιείται ως ένα μη κυρτό μη συνεργατικό παίγνιο κατανομής ισχύος εκπομπής και υποστήριξης πολλαπλών υπηρεσιών στη ζεύξη ανόδου (Multi- Service Uplink Power Control - MSUPC) στο οποίο οι χρήστες επιδιώκουν κατά έναν εγωιστικό τρόπο να μεγιστοποιήσουν τη λαμβανόμενη από το δίκτυο ικανοποίησή τους, υπακούοντας παράλληλα στους φυσικούς και τεχνικούς περιορισμούς που τίθενται από το υλισμικό τους.

Αρχικά στο κεφάλαιο αυτό αποδεικνύεται η ύπαρξη και η μοναδικότητα του σημείου ισορροπίας κατά Nash του εν λόγω παιγνίου (MSUPC παίγνιο) και έπειτα παρουσιάζεται ένας μη κεντρικοποιημένος επαναληπτικός αλγόριθμος, ο οποίος προσδιορίζει το σημείο ισορροπίας του παιγνίου. Τέλος, μέσω μοντελοποίησης και προσομοίωσης, αναδεικνύονται η λειτουργία και τα χαρακτηριστικά της προτεινόμενης προσέγγισης και του αντίστοιχου μη κεντρικοποιημένου αλγόριθμου σε σχέση με την επίτευξη των απαιτήσεων των χρηστών σε ΠτΥ. Τα αριθμητικά αποτελέσματα και η επεξήγηση αυτών επικυρώνουν και αναδεικνύουν τις άμεσες σχέσεις που υπάρχουν ανάμεσα στην ποιότητα των καναλιών των χρηστών, στην αντίστοιχη κατανάλωση ισχύος εκπομπής και στη λαμβανόμενη ικανοποίηση των χρηστών από το διαμοιρασμό των πόρων του συστήματος.

3.1 Σχετική βιβλιογραφία

Στη σύγχρονη διεθνή βιβλιογραφία, οι προσεγγίσεις της θεωρίας παιγνίων για τη μελέτη της κατανομής ισχύος εκπομπής στη ζεύξη ανόδου των CDMA ασύρματων κυψελωτών δικτύων έχουν προσελκύσει μεγάλο ενδιαφέρον [9], [10] ως εναλλακτική λύση στις παραδοσιακές προσεγγίσεις κατανομής ισχύος εκπομπής σύμφωνα με τις οποίες οι αποφάσεις λαμβάνονται με έναν κεντρικοποιημένο τρόπο [11]-[15] ή ημι-κεντρικοποιημένο τρόπο [16] στο σταθμό βάσης της κυψέλης. Σύμφωνα με τη θεωρία παιγνίων η κατανομή ισχύος εκπομπής στους χρήστες διαμορφώνεται ως ένα μη συνεργατικό παίγνιο στο οποίο οι χρήστες ενεργούν ως αυτόνομοι παίκτες στοχεύοντας εγωιστικά στη μεγιστοποίηση της λαμβανόμενης από το δίκτυο ικανοποίησής τους, η οποία εκφράζεται από κατάλληλα ορισμένες συναρτήσεις χρησιμότητας (ΣΧ). Οι ΣΧ χαρακτηρίζουν και αντιστοιχίζονται σε κάθε χρήστη και είναι συναρτήσεις εξαρτώμενες από την καταναλισκόμενη ισχύ εκπομπής των χρηστών και από το σηματοθορυβικό λόγο που αντιλαμβάνονται οι χρήστες. Κάθε χρήστης προσδιορίζει την προσωπική του ισχύ εκπομπής με σκοπό τη μεγιστοποίηση της ΣΧ του, δηλαδή της λαμβανόμενης ικανοποίησής του από το διαμοιρασμό των πόρων του δικτύου.

Διαισθητικά είναι αντιληπτό ότι η επιλογή της ΣΧ του κάθε χρήστη έχει καθοριστική και καταλυτική επιρροή στη φύση του παιγνίου και στον τρόπο σύμφωνα με τον οποίο οι χρήστες επιλέγουν την ισχύ εκπομπής τους. Στις δημοσιεύσεις [17] και [18] έχοντας ως στόχο τη μεγιστοποίηση του συνολικού ρυθμού μετάδοσης του δικτύου, οι ΣΧ των χρηστών μοντελοποιήθηκαν ως λογαριθμικές κοίλες συναρτήσεις ως προς το σηματοθορυβικό λόγο (signal-to-interference-plus-noise ratio - SINR). Αυτός ο τρόπος μοντελοποίησης των ΣΧ των χρηστών ομοιάζει ιδιαίτερα στη φόρμουλα του Shannon και για το λόγο αυτό αντιμετωπίζει το σύνολο των παρεμβολών ως λευκό Γκαουσιανό θόρυβο [19]. Στη δημοσίευση [20] προτείνεται μία υποψήφια ΣΧ ανάλογη του ρυθμού μετάδοσης των χρηστών σε συνδυασμό με μία πολιτική κοστολόγησης η οποία βασίζεται στην κανονικοποιημένη λαμβανομένη ισχύ εκπομπής των χρηστών. Παράλληλα, στη δημοσίευση [21] μελετώνται τα S-modular παίγνια κατανομής ισχύος εκπομπής. Στη δημοσίευση [9], οι συγγραφείς χρησιμοποιούν μία ΣΧ, η οποία αντιπροσωπεύει τα επιτυχώς μεταδιδόμενα *bits* προς το σταθμό βάσης ανά μονάδα *joule* καταναλισκόμενης ισχύος εκπομπής. Η έρευνα αυτή επεκτάθηκε στη δημοσίευση [22] όπου προτάθηκε μία πολιτική κοστολόγησης ώστε να αυξήσει την αποδοτικότητα του σημείου ισορροπίας κατά Nash που είχε ήδη προσδιοριστεί. Η αποδοτική κατανομή ισχύος εκπομπής και ο ταυτόχρονος σχεδιασμός των δεκτών μελετήθηκαν στις δημοσιεύσεις [23], [24] και μία αποδοτική προσέγγιση κατανομής ισχύος εκπομπής σε πολλαπλών φερουσών δίκτυα προτάθηκε στη δημοσίευση [25]. Η κατανομή ισχύος εκπομπής με επίκεντρο ταυτόχρονα το δίκτυο και το χρήστη μελετήθηκε στη δημοσίευση [26], ενώ η σταθερότητα

της μη κεντρικοποιημένης κατανομής ισχύος εκπομπής στους ασύρματους χρήστες στα CDMA ασύρματα κυψελωτά δίκτυα μελετήθηκε στη δημοσίευση [27].

3.2 Συμβολή & Καινοτομία

Στο παρόν κεφάλαιο της διδακτορικής διατριβής μελετάται με τη βοήθεια της θεωρίας παιγνίων το πρόβλημα της βέλτιστης κατανομής ισχύος εκπομπής στη ζεύξη ανόδου ενός CDMA ασύρματου κυψελωτού δικτύου, λαμβάνοντας υπόψη την ποιότητα του καναλιού μετάδοσης των χρηστών και υποστηρίζοντας πολλαπλών ειδών υπηρεσίες, δηλαδή υπηρεσίες πραγματικού χρόνου και υπηρεσίες δεδομένων, με διαφορετικές και πολλές φορές αντικρουόμενες απαιτήσεις των χρηστών σε ΠτΥ. Ακολουθώντας παρόμοιες πρόσφατες προσεγγίσεις παραπλήσιων προβλημάτων υιοθετείται η λογική της αντιστοίχισης σε κάθε χρήστη μίας κατάλληλα σχεδιασμένης ΣΧ. Μία από τις θεμελιώδεις διαφορές της προτεινόμενης σε αυτό το κεφάλαιο προσέγγισης αποτελεί ο ορισμός και η μοντελοποίηση των ΣΧ των χρηστών με σκοπό την ταυτόχρονη ικανοποίηση πολλαπλών ειδών υπηρεσιών σε ένα ασύρματο περιβάλλον όπου οι επιδόσεις των υπηρεσιών είναι αλληλένδετες και αλληλοσυσχετιζόμενες. Πιο αναλυτικά, σε αντίθεση με την έως τώρα έρευνα όπου η ικανοποίηση των χρηστών από το διαμοιρασμό των πόρων του δικτύου εκφράζεται ως ο λόγος των επιτυχώς μεταδιδόμενων *bits* που λαμβάνονται στο σταθμό βάσης προς την αντίστοιχη καταναλισκόμενη ισχύ εκπομπής, στην παρούσα προτεινόμενη μελέτη η ικανοποίηση των χρηστών, η οποία είναι αλληλένδετη με την αποτελεσματικότητα των επιδόσεων της υπηρεσίας που απαιτεί ο χρήστης, εκφράζεται ως μία σύνθετη και φωλιασμένη συνάρτηση του επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης και της αντίστοιχης καταναλισκόμενης ισχύος εκπομπής. Για να επιτευχθεί ο στόχος του προβλήματος κατανομής ισχύος εκπομπής με την ταυτόχρονη ικανοποίηση πολλαπλών υπηρεσιών, υιοθετούνται σύνθετες φωλιασμένες συναρτήσεις επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης των οποίων η μορφή εξαρτάται από το είδος της υπηρεσίας που απαιτεί ο χρήστης και συνεπώς η μορφή τους δεν είναι απαραίτητα κοίλη. Για το λόγο αυτό η προτεινόμενη προσέγγιση οδηγείται στη διατύπωση ενός μη κυρτού μη συνεργατικού παιγνίου κατανομής ισχύος υποστήριξης πολλαπλών υπηρεσιών (Multi-Service Uplink Power Control game - MSUPC). Η προτεινόμενη αυτή γενίκευση απαιτεί διαφορετική αντιμετώπιση σε σχέση με αυτή που ακολουθείται στις δημοσιεύσεις [23] και [27].

Διερευνώντας την προσέγγιση που προτείνεται στο παρόν κεφάλαιο, εντοπίζονται τα συγκεκριμένα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά των συναρτήσεων επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης τα οποία πρέπει να λαμβάνονται υπόψη ώστε οι συναρτήσεις αυτές να εκφράζουν αποδοτικά και αντιπροσωπευτικά τις απαιτήσεις των χρηστών σε ΠτΥ για τις διάφορες αιτούμενες από τους χρήστες υπηρεσίες. Επιπρόσθετα ιδιαίτερη έμφαση δίδεται στην ικανοποίηση των απαιτήσεων των χρηστών, οι οποίοι αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου σε ένα χρονικά

μεταβαλλόμενο ασύρματο περιβάλλον. Προς αποσαφήνιση της συμβολής της παρούσας προτεινόμενης προσέγγισης σημειώνεται ότι στη δημοσίευση [6] προτείνεται επίσης μία λύση βασισμένη στις ΣΧ των χρηστών (οι οποίοι αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου), όπου η ΣΧ εκφράζει την ικανοποίηση που λαμβάνει ο χρήστης από τον επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσης. Ωστόσο στην προσέγγιση της δημοσίευσης [6] δεν έχει ληφθεί υπόψη η κατανάλωση ισχύος εκπομπής των χρηστών, καθώς επίσης δε μελετώνται οι ιδιότητες των προτεινόμενων προς υιοθέτηση από τους χρήστες ΣΧ. Παράλληλα, στη δημοσίευση [3] προτείνεται μία προσέγγιση βασισμένη στη θεωρία για την κατανομή ισχύος εκπομπής στην ζεύξη ανόδου CDMA ασύρματων κυψελωτών δικτύων με σκοπό την υποστήριξη υπηρεσιών πραγματικού χρόνου, ευαίσθητων στις χρονικές καθυστερήσεις. Παρόλα αυτά, στη δημοσίευση [3] και [28], λαμβάνονται υπόψη αποκλειστικά γραμμικές ΣΧ ως προς τον επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσης, ενώ οι απαιτήσεις των χρηστών που αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου εκφράζονται ως περιορισμοί στατιστικών χρονικών καθυστερήσεων, υπόθεση η οποία σε πολλές περιπτώσεις είναι ανεπαρκής όπως έχει αποδειχθεί στις δημοσιεύσεις [7] και [29]. Σύμφωνα με την ανάλυση που περιλαμβάνεται στις δημοσιεύσεις [7] και [29], αποδεικνύεται ότι ακόμα και στην περίπτωση που ικανοποιούνται οι περιορισμοί των χρονικών καθυστερήσεων, η υποβάθμιση της ποιότητας της υπηρεσίας που λαμβάνει ο χρήστης δεν μπορεί να αποφευχθεί λόγω των πιθανών κακών συνθηκών στο κανάλι μετάδοσης του χρήστη, αλλά και λόγω των μεταβολών στην ποιότητα του καναλιού του. Αντίθετα, στην παρούσα προτεινόμενη προσέγγιση, οι αυστηρές βραχυπρόθεσμες απαιτήσεις των χρηστών σε ρυθμό μετάδοσης λαμβάνονται υπόψη για τις υπηρεσίες πραγματικού χρόνου και εκφράζονται μέσω των συναρτήσεων επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης, με σκοπό την ταυτόχρονη ικανοποίηση των βραχυπρόθεσμων καθυστερήσεων και των απαιτήσεων σε συγκεκριμένο ρυθμό μετάδοσης.

Επιπρόσθετα, σημειώνεται ότι η παρούσα προσέγγιση παρέχει μια μεθοδολογία για τον καθορισμό και την ανάλυση γενικευμένων προβλημάτων υποστήριξης πολλαπλών υπηρεσιών και κατανομής της ισχύος εκπομπής των χρηστών στη ζεύξη ανόδου ενός CDMA ασύρματου κυψελωτού δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, εντοπίζονται οι ικανές και αναγκαίες συνθήκες για την ύπαρξη και τη μοναδικότητα του σημείου ισορροπίας κατά Nash στο υπό μελέτη πρόβλημα βελτιστοποίησης. Επιπλέον, προτείνεται ένας επαναληπτικός καταναμημένος αλγόριθμος χαμηλής πολυπλοκότητας για τον προσδιορισμό του σημείου ισορροπίας κατά Nash του παιγνίου. Η καταναμημένη φύση του προβλήματος υποστηρίζει την αυτονομία των χρηστών, γεγονός το οποίο συνάδει με το όραμα των μελλοντικών ασύρματων δικτύων. Επιπλέον, μέσω μοντελοποίησης και προσομοίωσης, μελετούνται εκτενώς οι ιδιότητες του σημείου ισορροπίας κατά Nash και αναδεικνύονται οι ισχυρές συσχετίσεις που υπάρχουν ανάμεσα στις αυστηρές απαιτήσεις σε ΠτΥ των υπηρεσιών πραγματικού χρόνου, στις ακόρεστες προσδοκίες σε ρυθμό μετάδοσης των υπηρεσιών δεδομένων, στα υιοθετούμενα

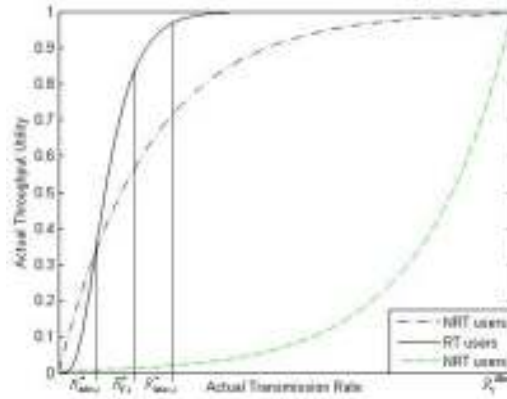
σχήματα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης και στους φυσικούς και τεχνικούς περιορισμούς της ισχύος εκπομπής και του ρυθμού μετάδοσης των χρηστών, εξαιτίας του υλισμικού τους.

3.3 Μοντέλο Συστήματος & Σχετικές Πληροφορίες

Σε αυτό το κεφάλαιο εξετάζεται η ζεύξη ανόδου μίας κυψέλης ενός CDMA ασύρματου κυψελωτού δικτύου, το οποίο εξυπηρετεί $N(t)$ χρήστες, οι οποίοι έχουν συνεχώς δεδομένα να μεταδώσουν σε κάθε χρονοσχισμή t και το $S(t)$ συμβολίζει το αντίστοιχο σύνολό τους. Το μοντέλο του συστήματος που υιοθετείται στο παρόν κεφάλαιο ομοιάζει με αυτό που αναλύσαμε στην υποενότητα 2.2 και αποτελεί το υπόβαθρο ενός CDMA ασύρματου κυψελωτού δικτύου. Πιο συγκεκριμένα στο παρόν κεφάλαιο, το προτεινόμενο σύστημα περιλαμβάνει δύο βασικά είδη χρηστών, οι οποίοι ονομάζονται χρήστες μη πραγματικού χρόνου (Non-Real Time - NRT), δηλαδή χρήστες που αιτούνται υπηρεσίες δεδομένων ανεκτικές ως προς την καθυστέρηση αλλά απαιτητικές ως προς το ρυθμό μετάδοσης και χρήστες πραγματικού χρόνου (Real Time - RT), δηλαδή χρήστες που αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, οι οποίες έχουν αυστηρούς βραχυπρόθεσμους περιορισμούς ως προς την ΠτΥ. Στην υπόλοιπη ανάλυση που παρατίθεται ακολούθως το πλήθος των χρηστών μη πραγματικού χρόνου (πραγματικού χρόνου) συμβολίζεται με N_{NRT} (N_{RT}) και το αντίστοιχο σύνολό τους με S_{NRT} (S_{RT}). Παράλληλα, εξαιτίας της ανάγκης για την υποστήριξη πολλαπλών υπηρεσιών με διαφορετικές απαιτήσεις σε ΠτΥ, κάθε χρήστης συνδέεται με μία ΣΧ U_i η οποία αντιπροσωπεύει το βαθμό της λαμβανόμενης ικανοποίησής του σε σχέση με την αναμενόμενη συσχέτιση ανάμεσα στη συνάρτηση επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης και στην κατανάλωση ισχύος εκπομπής ανά χρονοσχισμή t . Ως εκ τούτου, μπορεί να εκφραστεί ως:

$$U(R_i^*, P_i, \bar{P}_{-i}) = \frac{T_i(R_i^*, P_i, \bar{P}_{-i})}{P_i} = \frac{T_i(R_i^F \cdot f_i(\gamma_i), P_i, \bar{P}_{-i})}{P_i} \quad (14)$$

όπου με $R_i^* \equiv R_i^F \cdot f_i(\gamma_i)$ συμβολίζεται ο επιτεύξιμος ρυθμός μετάδοσης του χρήστη i στην υπό μελέτη χρονοσχισμή, με R_i^F συμβολίζεται ο προτεινόμενος σταθερός ρυθμός μετάδοσης (δηλαδή ισχύει $R_i^F \equiv R_i$) και με f_i συμβολίζεται η συνάρτηση απόδοσης, οι ιδιότητες της οποίας αναλύθηκαν εκτενώς στο προηγούμενο κεφάλαιο. Τέλος, η συνάρτηση επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης T_i χρησιμοποιείται για να αντικατοπτρίζει το βαθμό ικανοποίησης του χρήστη ως προς τη λαμβανόμενη από το δίκτυο ΠτΥ για την αιτούμενη από το χρήστη υπηρεσία. Οι ιδιότητες της συνάρτησης επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης θα αναλυθούν εκτενώς σε επόμενη ενότητα.



Σχήμα 6 Η συνάρτηση επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης για διαφορετικές υπηρεσίες.

3.4 Ικανοποίηση Απαιτήσεων σε Ποιότητα της Υπηρεσίας

Σε αυτή την ενότητα ορίζονται οι συναρτήσεις επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης και οι ΣΧ των χρηστών ανάλογα με το είδος της υπηρεσίας που αιτούνται, με σκοπό το σχεδιασμό ενός αποδοτικού αλγορίθμου κατανομής ισχύος εκπομπής ο οποίος υποστηρίζει την εξυπηρέτηση πολλαπλών ειδών υπηρεσιών. Σε γενικές γραμμές, στο παρόν κεφάλαιο η συνάρτηση επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης $T_i(R_i^*, P_i, \bar{P}_i) \equiv T_i(R_i^*)$ κάθε χρήστη $i \in S$ ορίζεται ως μία φωλιασμένη μη κυρτή συνάρτηση (εξαιτίας της ύπαρξης της συνάρτησης απόδοσης) ως προς τον επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσης R_i^* και σχεδιάζεται με κατάλληλο τρόπο ώστε να αντιπροσωπεύει εντός της ΣΧ U_i του χρήστη, τις απαιτήσεις του σε απόδοση και σε ΠτΥ. Επιπρόσθετα, γίνεται η υπόθεση ότι η συνάρτηση επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης έχει τις ακόλουθες ιδιότητες:

- 1) Η συνάρτηση T_i είναι γνησίως αύξουσα ως προς τον επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσης R_i^* .
- 2) Η συνάρτηση T_i είναι συνεχής και διπλά παραγωγίσιμη ως προς τον επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσης R_i^* .
- 3) Ισχύει $T_i(0)=0$ ώστε να διασφαλίζεται ότι ισχύει $U_i = 0$ όταν $R_i^* = 0$.
- 4) Η συνάρτηση T_i είναι άνω φραγμένη, δηλαδή ισχύει $T_i(R_i^*) \leq 1$.
- 5) Η συνάρτηση T_i είναι σιγμοειδής, γνησίως κοίλη ή γνησίως κυρτή συνάρτηση ως προς τον επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσης R_i^* στο αντίστοιχο πεδίο ορισμού της $[0, R_{Max,i}^*]$, όπου η τιμή $R_{Max,i}^*$ συμβολίζει το μέγιστο δυνατό επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσης.

Σε αυτό το σημείο τονίζεται ότι οι περισσότερες ΣΧ των χρηστών που έχουν χρησιμοποιηθεί στη βιβλιογραφία, είτε για ασύρματες επικοινωνίες [8] είτε για ενσύρματες [16], [6], μπορούν να αναπαρασταθούν από τις τρεις αυτές μορφές των συναρτήσεων. Στην

υπόλοιπη ενότητα ορίζονται και περιγράφονται τα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά που πρέπει να διαθέτει η συνάρτηση επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης ενός χρήστη, ώστε να αντιπροσωπεύει με τον καλύτερο δυνατό τρόπο τις απαιτήσεις του χρήστη σε ΠτΥ.

3.4.1 Υπηρεσίες Δεδομένων

Σχετικά με τις υπηρεσίες δεδομένων, η συνάρτηση επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης T_i μπορεί να είναι είτε γνησίως κοίλη είτε γνησίως κυρτή συνάρτηση ως προς τον επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσης R_i^* , ώστε να αντιπροσωπεύει κατάλληλα την ακόρεστη συμπεριφορά των χρηστών για αυξανόμενο ρυθμό μετάδοσης. Από την άλλη πλευρά, εξαιτίας των φυσικών και τεχνικών περιορισμών που τίθενται από το υλισμικό των χρηστών και του δικτύου, ο μέγιστος επιτεύξιμος ρυθμός μετάδοσης ($R_{Max,i}^*$) είναι εγγενώς περιορισμένος από τους περιορισμούς που τίθενται από τον πομπό (δηλαδή $R_i^* \leq R_i^{Max} \forall i \in S_{NRT}$ και συνεπώς $R_{Max,i}^* = R_i^{Max}$ όταν $f_i(\infty) = I$), ο οποίος καθορίζει και τη μέγιστη λαμβανόμενη ικανοποίηση των χρηστών. Συνεπώς, με σκοπό την ενσωμάτωση των περιορισμών που τίθενται από τις υπηρεσίες δεδομένων στη συνάρτηση επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης ορίζεται ο επιτεύξιμος ρυθμός μετάδοσης ως $R_i^* = R_i^{Max} \cdot f_i(\gamma_i)$ και δεδομένου ότι $f_i(\gamma_i) \leq 1$, προκύπτει $T_i(R_{Max,i}^*) = I$, καθώς φαίνεται στο σχήμα 6. Χωρίς απώλεια της γενικότητας παρατίθεται ο παρακάτω ορισμός.

Ορισμός 2: Η συνάρτηση επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης για τους χρήστες που αιτούνται υπηρεσίες δεδομένων $T_i(R_i^*) \equiv T_i(R_i^{Max} f(\gamma_i)) \forall i \in S_{NRT}$, όπου $R_i^* \in [0, R_i^{Max}]$ και $\gamma_i \geq 0$, είναι γνησίως κυρτή ή γνησίως κοίλη ως προς τον επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσης R_i^* και ισχύει $T_i(R_{Max,i}^*) = T_i(R_i^{Max}) = I$.

3.4.2 Υπηρεσίες Πραγματικού Χρόνου

Σχετικά με τις υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, είτε αναφερόμενοι στις προσαρμοστικές ως προς την καθυστέρηση (π.χ. ήχος και βίντεο) είτε στις προσαρμοστικές ως προς το ρυθμό μετάδοσης [8], η συνάρτηση επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης T_i θεωρείται ως σιγμοειδής συνάρτηση ως προς τον επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσης R_i^* ώστε να αντιπροσωπεύει τις απαιτήσεις των χρηστών σε ΠτΥ, οι οποίες συνίστανται κυρίως από βραχυπρόθεσμους περιορισμούς ως προς την καθυστέρηση και το ρυθμό μετάδοσης. Οι απαιτήσεις αυτές των χρηστών μπορούν να αποδοθούν σε μία κατάλληλα σχεδιασμένη σιγμοειδή συνάρτηση, η οποία μορφοποιείται ανάλογα με τον επιθυμητό ρυθμό μετάδοσης κάθε χρήστη και εξαρτάται από τη συγκεκριμένη υπηρεσία πραγματικού χρόνου που αιτείται και από έναν παράγοντα ελαστικότητας [30]. Ο επιθυμητός ρυθμός μετάδοσης $R_{T,i}^*$ υποδεικνύει τη βέλτιστη τιμή

ρυθμού μετάδοσης για κάθε χρήστη ανά χρονοσχισμή σύμφωνα με τον οποίο ικανοποιούνται οι απαιτήσεις του χρήστη σε ΠτΥ (ώστε να ικανοποιήσει τους περιορισμούς ως προς την καθυστέρηση), ενώ ο παράγοντας ελαστικότητας (Elasticity Factor – EF ή Margin Factor - MF) προσδιορίζει τα αποδεκτά όρια των διακυμάνσεων του επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης σε σχέση με τον επιθυμητό ρυθμό μετάδοσης. Οι ιδιότητες και η μορφή της συνάρτησης επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης των χρηστών που αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου αναλύθηκαν διεξοδικά στην υποενότητα 2.3.

Για πρακτικούς λόγους, όπως συνέβη και στην περίπτωση των χρηστών που αιτούνται υπηρεσίες δεδομένων θεωρείται ότι η συνάρτηση επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης έχει λάβει τη μέγιστη τιμή της όταν $R_{Max,i}^* = R_{T,i}^* + MF_i \quad \forall i \in S_{RT}$. Για το λόγο αυτό, όταν $i \in S_{RT}$ τότε τίθεται $R_i^* \equiv (R_{T,i}^* + MF_i) \cdot f_i(\gamma_i)$ ώστε $T_i(R_{T,i}^* + MF_i) = 1$, δεδομένου ότι $f_i(\gamma_i) \leq 1$ (Σχήμα 6). Χωρίς βλάβη της γενικότητας διατυπώνεται ο ακόλουθος ορισμός.

Ορισμός 3: Η συνάρτηση επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης για τους χρήστες που αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου $T_i(R_i^*) \equiv T_i((R_{T,i}^* + MF_i)f(\gamma_i)) \quad \forall i \in S_{RT}$, όπου $R_i^* \in [0, R_{T,i}^* + MF_i]$ και $\gamma_i \geq 0$ είναι σιγμοειδής συνάρτηση ως προς τον επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσης R_i^* και έχει μοναδικό σημείο καμπής $R_{Inf,i}^*$, το οποίο προσδιορίζεται ως ακολούθως:

$$R_{Inf,i}^* = \left\{ R_i^* : \left. \frac{\partial^2 T_i(R_i^*)}{\partial (R_i^*)^2} \right|_{R_i^* = R_{Inf,i}^*} = 0 \right\} \quad R_{Min,i}^* = R_{T,i}^* - MF_i \quad (15)$$

Τέλος, πρέπει να τονιστεί ότι με την κατάλληλη επιλογή του σχήματος διαμόρφωσης και κωδικοποίησης για τους χρήστες που αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου (δηλαδή την κατάλληλη επιλογή της συνάρτησης απόδοσης f) δύναται να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις του χρήστη ως προς την καθυστέρηση και το ρυθμό μετάδοσης, όπως έχει αποδειχθεί στη δημοσίευση [30].

Σύμφωνα με τις σχέσεις (14), (15) η ΣΧ κάθε χρήστη $i \in S$ μπορεί να εκφραστεί ως ακολούθως.

$$U_i(P_i, \bar{P}_{-i}) = \frac{T_i(R_i^*)}{P_i} = \begin{cases} \frac{T_i(R_i^{Max}) \cdot f_i(\gamma_i)}{P_i} & i \in S_{NRT} \\ \frac{T_i((R_{T,i}^* + MF_i) \cdot f_i(\gamma_i))}{P_i} & i \in S_{RT} \end{cases} \quad (16)$$

όπου $R_i^* \in [0, R_i^{Max}] \quad \forall i \in S_{NRT}$ και $R_i^* \in [0, R_{T,i}^* + MF_i] \quad \forall i \in S_{RT}$ δεδομένου ότι $f_i(\gamma_i) \in [0, 1] \quad \forall \gamma_i \geq 0$. Επιπρόσθετα γίνεται η υπόθεση ότι η ΣΧ $U_i(P_i)$ είναι μη αρνητική, άνω φραγμένη συνάρτηση ως προς την ισχύ εκπομπής $P_i \geq 0$ και για λόγους κανονικοποίησης γίνεται η θεώρηση

$\lim_{P_i \rightarrow 0^+} U_i(P_i) = 0^+$, δεδομένου ότι ένας χρήστης λαμβάνει μηδενική ικανοποίηση στην περίπτωση κατά την οποία δεν εκπέμπει καθόλου.

3.5 Μη-Συνεργατικό Παίγνιο Κατανομής Ισχύος Εκπομπής & Υποστήριξης Πολλαπλών Υπηρεσιών στη Ζεύξη Ανόδου

Καθώς το σύστημα εξελίσσεται, κατά την έναρξη κάθε χρονοσχιμής ένας αλγόριθμος κατανομής ισχύος εκπομπής στους χρήστες είναι υπεύθυνος για τον προσδιορισμό της κατάλληλης τιμής της ισχύος εκπομπής ώστε να μεγιστοποιείται η λαμβανόμενη από το δίκτυο ικανοποίηση των χρηστών, η οποία αντικατοπτρίζεται από τις τιμές της ΣΧ κάθε χρήστη. Σε αυτή την ενότητα αναλύονται οι βασικοί στόχοι του προβλήματος βέλτιστης κατανομής ισχύος εκπομπής στη ζεύξη ανόδου CDMA ασύρματων κυψελωτών δικτύων υποστηρίζοντας πολλαπλές υπηρεσίες (Multi-Service Uplink Power Control game – MSUPC) και το πρόβλημα μοντελοποιείται ως ένα μη συνεργατικό παίγνιο με τη χρήση της θεωρίας παιγνίων.

Δεδομένου ότι, κάθε χρήστης στο δίκτυο στοχεύει στη μεγιστοποίηση της μέσης τιμής της ΣΧ του U_i , ο αντίστοιχος στόχος του MSUPC αλγορίθμου μπορεί να ορισθεί ως η μεγιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης.

$$\max_{P_i} E[U_i(P_i, \bar{P}_{-i})] \quad s.t. \quad 0 \leq P_i \leq P_i^{Max} \quad (17)$$

Καθώς αναλύθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, τα κανάλια των τηλεπικοινωνιακών ζεύξεων θεωρούνται ανεξάρτητα και ταυτόσημα κατανεμημένα (independent and identically distributed - i.i.d.). Συνεπώς, η μεγιστοποίηση της μέσης τιμής της συνάρτησης χρησιμότητας κάθε χρήστη, όπως αυτή η διατυπώθηκε στη σχέση (17), μπορεί να επιτευχθεί από τη μεγιστοποίηση της συνάρτησης χρησιμότητας κάθε χρήστη ανά χρονοσχιμή t . Επιπλέον, εξαιτίας της εγωιστικής συμπεριφοράς των ασύρματων χρηστών με σκοπό τη διατήρηση της βέλτιστης ισχύος εκπομπής τους, ώστε να μεγιστοποιείται η λαμβανόμενη από το δίκτυο ικανοποίησή τους, το πρόβλημα βέλτιστης κατανομής ισχύος εκπομπής μπορεί να μοντελοποιηθεί ως ένα μη συνεργατικό παίγνιο κατανομής ισχύος το οποίο υποστηρίζει πολλαπλών ειδών υπηρεσίες.

Το μη κυρτό μη συνεργατικό παίγνιο συμβολίζεται ως $G = [S, \{A_i\}, \{U_i\}]$, όπου S είναι το σύνολο όλων των χρηστών που εδρεύουν εντός της κυψέλης, $A_i = [0, P_i^{Max}] \times \mathfrak{R}^N$ είναι το σύνολο στρατηγικών του χρήστη i και U_i είναι η αντικειμενική συνάρτηση του παιγνίου. Επιπλέον, θεωρώντας ότι οι τιμές της ισχύος εκπομπής των υπολοίπων χρηστών εντός της κυψέλης παραμένουν σταθερές κατά τη διάρκεια μίας χρονοσχιμής, το μη συνεργατικό παίγνιο για κάθε χρήστη ανά χρονοσχιμή μπορεί να ορισθεί ως ακολούθως.

$$\begin{aligned} \max_{P_i} U_i &= \max_{P_i} U_i(P_i, \bar{P}_{-i}) && \text{for } i=1, \dots, N \\ \text{s.t. } 0 &\leq P_i \leq P_i^{\text{Max}} \end{aligned} \quad (18)$$

Σύμφωνα με το MSUPC παίγνιο G που ορίστηκε, κάθε παίκτης επιλέγει την ισχύ εκπομπής του από το σύνολο των στρατηγικών του A_i και λαμβάνει ως αποτέλεσμα την αντίστοιχη τιμή της ΣΧ του U_i σύμφωνα με τη βέλτιστη πολιτική απόκρισης του $B_i(\bar{P}_{-i}) = \max_{P_i \in A_i} U_i(P_i, \bar{P}_{-i})$.

Στην παρούσα ενότητα της διδακτορικής διατριβής υιοθετείται η προσέγγιση του σημείου ισορροπίας κατά Nash ώστε να προσδιοριστεί η λύση του μη κυρτού μη συνεργατικού MSUPC παιγνίου. Η προσέγγιση αυτή είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη για την επίλυση μη συνεργατικών παιγνίων στα οποία οι χρήστες εμφανίζουν αντικρουόμενα συμφέροντα και στόχους. Το σημείο ισορροπίας κατά Nash είναι ένα διάνυσμα ισχύος εκπομπής, στο οποίο ο χρήστης δεν έχει κανένα κίνητρο να μεταβάλλει την ισχύ εκπομπής του, δεδομένων των τιμών ισχύος εκπομπής των υπολοίπων χρηστών που εδρεύουν εντός της κυψέλης, διότι δε δύναται να βελτιώσει περαιτέρω τη λαμβανόμενη από το δίκτυο ικανοποίησή του. Σύμφωνα με την παραπάνω ανάλυση δίδεται ο ακόλουθος ορισμός.

Ορισμός 4: Το διάνυσμα ισχύος εκπομπής $\bar{P}^* = (P_1^*, \dots, P_N^*)$ είναι σημείο ισορροπίας κατά Nash του MSUPC παιγνίου, εάν για κάθε χρήστη $i \in S$ ισχύει $U_i(P_i^*, \bar{P}_{-i}^*) \geq U_i(P_i, \bar{P}_{-i}^*)$ για όλες τις στρατηγικές $P_i^* \in A_i$.

3.6 Επίλυση Παιγνίου Βέλτιστης Κατανομής Ισχύος Εκπομπής & Προσδιορισμός του Μοναδικού Σημείου Ισορροπίας κατά Nash

Στην ενότητα αυτή μελετάται η ύπαρξη και η μοναδικότητα του σημείου ισορροπίας κατά Nash για το υπό μελέτη MSUPC παίγνιο. Στην ανάλυση που ακολουθεί αποδεικνύεται ότι η συνάρτηση επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης των χρηστών πρέπει να χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένες ιδιότητες σε σχέση με τη μορφή της στα όρια του πεδίου ορισμού της, έτσι ώστε η ΣΧ των χρηστών να ορίζεται και κατά συνέπεια να υφίσταται το σημείο ισορροπίας κατά Nash. Τονίζεται ότι η απουσία του σημείου ισορροπίας κατά Nash οδηγεί το σύστημα σε ασταθή και μη επιθυμητή κατάσταση.

3.6.1 Ιδιότητες Συνάρτησης Επιτεύξιμου Ρυθμού Μετάδοσης

Λαμβάνοντας υπόψη την προηγούμενη ανάλυση, αρχικά μελετούνται οι ιδιότητες της συνάρτησης επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης στο αντίστοιχο πεδίο ορισμού της, τόσο για τους

χρήστες που αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου όσο και για εκείνους που αιτούνται υπηρεσίες δεδομένων. Τα ακόλουθα δύο λήμματα προσδιορίζουν τις ιδιότητες της φωλιασμένης συνάρτησης επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης T_i ως συνάρτηση του σηματοθορυβικού λόγου (SINR). Συγκεκριμένα, για τους χρήστες που αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου ισχύει το ακόλουθο λήμμα.

Λήμμα 3: Λαμβάνοντας υπόψη τους χρήστες που αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, δηλαδή $i \in S_{RT}$ και δεδομένων: α) της συνάρτησης απόδοσης $f_i(\gamma_i)$, η οποία είναι σιγμοειδής ως προς το σηματοθορυβικό λόγο γ_i και έχει μοναδικό σημείο καμπής $\gamma_{Infl,i}^f$ και β) της συνάρτησης επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης $T_i(R_i^*)$, η οποία είναι σιγμοειδής ως προς τον επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσης R_i^* και έχει μοναδικό σημείο καμπής $R_{Infl,i}^* \equiv R_{Min,i}^* = R_{T,i}^* - MF_i$, όπου $R_i^* \equiv R_{Max,i}^* \cdot f_i(\gamma_i) \equiv (R_{T,i}^* + MF_i) \cdot f_i(\gamma_i)$, τότε η συνάρτηση $T_i(\gamma_i) = T_i((R_{T,i}^* + MF_i) \cdot f_i(\gamma_i))$ είναι επίσης σιγμοειδής ως προς το σηματοθορυβικό λόγο γ_i ($\gamma_i \geq 0$) με μοναδικό σημείο καμπής $\gamma_{Infl,i}^T$ τέτοιο ώστε:

$$\gamma_{Infl,i}^T : \begin{cases} f_i^{-1}\left(\frac{R_{Infl,i}^*}{R_{Max,i}^*}\right) \leq \gamma_{Infl,i}^T \leq \gamma_{Infl,i}^f & \text{when } f_i^{-1}\left(\frac{R_{Infl,i}^*}{R_{Max,i}^*}\right) \leq \gamma_{Infl,i}^f \\ \gamma_{Infl,i}^f \leq \gamma_{Infl,i}^T \leq f_i^{-1}\left(\frac{R_{Infl,i}^*}{R_{Max,i}^*}\right) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (19)$$

όπου $f_i^{-1}(R_{Infl,i}^*/R_{Max,i}^*)$ είναι το σημείο καμπής της συνάρτησης $T_i(R_i^*)$ σε τιμές σηματοθορυβικού λόγου γ_i .

Απόδειξη: Σύμφωνα με τον ορισμό της σιγμοειδούς συνάρτησης ισχύουν οι ακόλουθες ιδιότητες.

$$\frac{\partial f_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i} > 0 \quad (20)$$

$$\frac{\partial T(R_i^*)}{\partial R_i^*} > 0 \quad (21)$$

$$\left. \frac{\partial^2 f_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i^2} \right|_{\gamma_i < \gamma_{Infl,i}^f} > 0 \quad , \quad \left. \frac{\partial^2 f_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i^2} \right|_{\gamma_i > \gamma_{Infl,i}^f} < 0 \quad (22)$$

$$\left. \frac{\partial^2 T_i(R_i^*)}{\partial (R_i^*)^2} \right|_{R_i^* < R_{Infl,i}^*} > 0 \quad , \quad \left. \frac{\partial^2 T_i(R_i^*)}{\partial (R_i^*)^2} \right|_{R_i^* > R_{Infl,i}^*} < 0 \quad (23)$$

$$\lim_{R_i^* \rightarrow 0^+} \frac{\partial^2 T_i(R_i^*)}{\partial (R_i^*)^2} = 0^+ \quad , \quad \lim_{R_i^* \rightarrow \infty} \frac{\partial^2 T_i(R_i^*)}{\partial (R_i^*)^2} = 0^- \quad (24)$$

$$\lim_{\gamma_i \rightarrow 0^+} \frac{\partial^2 f_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i^2} = 0^+ \quad , \quad \lim_{\gamma_i \rightarrow \infty} \frac{\partial^2 f_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i^2} = 0^- \quad (25)$$

Αρχικά υπολογίζεται η πρώτη μερική παράγωγος της συνάρτησης $T_i(\gamma_i)$ ως προς το σηματοθορυβικό λόγο, λαμβάνοντας υπόψη τις σχέσεις (20) και (21):

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i} &= \frac{\partial T_i(R_{Max,i}^* f_i(\gamma_i))}{\partial \gamma_i} = \frac{\partial T_i(R_{Max,i}^* f_i(\gamma_i))}{\partial (R_{Max,i}^* f_i(\gamma_i))} \cdot \frac{\partial (R_{Max,i}^* f_i(\gamma_i))}{\partial \gamma_i} \\ &= R_{Max,i}^* \frac{\partial T_i(R_i^*)}{\partial R_i^*} \cdot \frac{\partial f_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i} > 0 \end{aligned}$$

Επειτα προσδιορίζεται η δεύτερη μερική παράγωγος της συνάρτησης $T_i(\gamma_i)$:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 T_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i^2} &= \frac{\partial^2 T_i(R_{Max,i}^* f_i(\gamma_i))}{\partial \gamma_i^2} = R_{Max,i}^* \frac{\partial T_i(\frac{\partial T_i(R_{Max,i}^* f_i(\gamma_i))}{\partial (R_{Max,i}^* f_i(\gamma_i))} \cdot \frac{\partial f_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i})}{\partial \gamma_i} = \\ &R_{Max,i}^* \left[R_{Max,i}^* \frac{\partial^2 T_i(R_i^*)}{\partial (R_i^*)^2} \cdot \left(\frac{\partial f_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i} \right)^2 + \frac{\partial^2 f_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i^2} \frac{\partial T_i(R_i^*)}{\partial R_i^*} \right] \quad (26) \end{aligned}$$

Μελετώντας τα όρια του πεδίου ορισμού της $T_i(\gamma_i)$, $\gamma_i \in [0, \infty)$ εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα.

$$\lim_{\gamma_i \rightarrow 0^+} \frac{\partial^2 T_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i^2} = R_{Max,i}^* \cdot \left[R_{Max,i}^* \lim_{R_i^* \rightarrow 0^+} \frac{\partial^2 T_i(R_i^*)}{\partial (R_i^*)^2} \cdot \left(\lim_{\gamma_i \rightarrow 0^+} \frac{\partial f_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i} \right)^2 + \lim_{\gamma_i \rightarrow 0^+} \frac{\partial^2 f_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i^2} \cdot \lim_{R_i^* \rightarrow 0^+} \frac{\partial T_i(R_i^*)}{\partial R_i^*} \right] = 0^+$$

Συνεπώς, ισχύει:

$$\lim_{\gamma_i \rightarrow \infty} \frac{\partial^2 T_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i^2} = R_{Max,i}^* \cdot \left[R_{Max,i}^* \lim_{R_i^* \rightarrow R_{Max,i}^*} \frac{\partial^2 T_i(R_i^*)}{\partial (R_i^*)^2} \cdot \left(\lim_{\gamma_i \rightarrow \infty} \frac{\partial f_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i} \right)^2 + \lim_{\gamma_i \rightarrow \infty} \frac{\partial^2 f_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i^2} \cdot \lim_{R_i^* \rightarrow R_{Max,i}^*} \frac{\partial T_i(R_i^*)}{\partial R_i^*} \right] = 0^-$$

δεδομένου ότι $\lim_{R_i^* \rightarrow R_{Max,i}^*} \frac{\partial^2 T_i(R_i^*)}{\partial (R_i^*)^2} \neq \infty$ και $\lim_{R_i^* \rightarrow R_{Max,i}^*} \frac{\partial T_i(R_i^*)}{\partial R_i^*} \neq \infty$.

Επιπρόσθετα, δεδομένων των σχετικών θέσεων των σημείων καμπής των αρχικών συναρτήσεων, δηλαδή των τιμών $\gamma_{Infl,i}^f$ και $f_i^{-1}(R_{Infl,i}^*/R_{Max,i}^*)$ στον άξονα του σηματοθορυβικού λόγου γ_i ($\gamma_i \geq 0$), μελετούνται στη συνέχεια οι ιδιότητες της δεύτερης παραγωγού της συνάρτησης $T_i(\gamma_i)$ ως προς το σηματοθορυβικό λόγο γ_i για δύο διαφορετικές περιπτώσεις.

Περίπτωση 1.1. Όταν ισχύει $f_i^{-1}(R_{Infl,i}^*/R_{Max,i}^*) \leq \gamma_{Infl,i}^f$.

Προκύπτουν οι ακόλουθες δύο υποπεριπτώσεις:

1.1.A. Για το πεδίο $0 \leq \gamma_i \leq f_i^{-1}(R_{Infl,i}^*/R_{Max,i}^*) \leq \gamma_{Infl,i}^f$ μπορεί να αποδειχθεί σύμφωνα με τις σχέσεις (20), (21), (22), (23) ότι ισχύει $\partial^2 T_i(\gamma_i)/\partial \gamma_i^2 > 0$.

I.I.B. Για το πεδίο $f_i^{-1}(R_{Infl,i}^*/R_{Max,i}^*) \leq \gamma_i^f \leq \gamma_i$ μπορεί να αποδειχθεί σύμφωνα με τις σχέσεις (20), (21), (22), (23) ότι ισχύει $\partial^2 T_i(\gamma_i)/\partial \gamma_i^2 < 0$.

I.I.C. Για το πεδίο $f_i^{-1}(R_{Infl,i}^*/R_{Max,i}^*) \leq \gamma_i \leq \gamma_{Infl,i}^f$ λαμβάνοντας υπόψη τις δύο προηγούμενες υποπεριπτώσεις (*I.I.A*) και (*I.I.B*) εξάγεται ότι η συνάρτηση $\partial^2 T_i(\gamma_i)/\partial \gamma_i^2$ έχει τουλάχιστον ένα σημείο τομής με τον άξονα του σηματοθορυβικού λόγου στο πεδίο $\gamma_i \in [f_i^{-1}(R_{Infl,i}^*/R_{Max,i}^*), \gamma_{Infl,i}^f]$.

Ωστόσο όμως, για να αποδειχθεί ότι η συνάρτηση $T_i(\gamma_i)$ είναι σιγμοειδής, πρέπει να αποδειχθεί ότι η δεύτερη παράγωγός της έχει μοναδικό σημείο τομής με τον άξονα του σηματοθορυβικού λόγου, όπου το σημείο τομής συμβολίζεται με $\gamma_{Infl,i}^T$. Από την ανάλυση της σχέσης (26), όταν $\gamma_i \in [f_i^{-1}(R_{Infl,i}^*/R_{Max,i}^*), \gamma_{Infl,i}^f]$ και δεδομένου ότι ισχύει $\partial^2 f_i(\gamma_i)/\partial \gamma_i^2 \Big|_{\gamma_i < \gamma_{Infl,i}^f} > 0$, τότε ο δεύτερος προσθετέος του αθροίσματος της σχέσης (26) είναι πάντοτε θετικός. Για το λόγο αυτό μόνο το πρόσημο του παράγοντα $\partial^2 T_i(\gamma_i)/\partial \gamma_i^2$ προσδιορίζει και συνεπώς μπορεί να μεταβάλλει το πρόσημο του όρου $\partial^2 T_i(\gamma_i)/\partial \gamma_i^2$. Δεδομένου όμως ότι το πρόσημο του όρου $\partial^2 T_i(R_i^*)/\partial (R_i^*)^2$ μεταβάλλεται μόνο μία φορά, εξάγεται το συμπέρασμα ότι η γραφική παράσταση της συνάρτησης $\partial^2 T_i(\gamma_i)/\partial \gamma_i^2$ εμφανίζει μοναδικό σημείο τομής με τον άξονα του σηματοθορυβικού λόγου. Συνεπώς αποδεικνύεται με βάση την προηγούμενη ανάλυση ότι η συνάρτηση $T_i(\gamma_i)$ είναι σιγμοειδής ως προς το σηματοθορυβικό λόγο γ_i , με μοναδικό σημείο καμπής $\gamma_{Infl,i}^T$, όταν ισχύει $f_i^{-1}(R_{Infl,i}^*/R_{Max,i}^*) \leq \gamma_{Infl,i}^f$ και συνεπώς για το σημείο καμπής της $T_i(\gamma_i)$ ισχύει $\gamma_{Infl,i}^T \in [f_i^{-1}(R_{Infl,i}^*/R_{Max,i}^*), \gamma_{Infl,i}^f]$.

Περίπτωση I.2. Όταν ισχύει $\gamma_{Infl,i}^f \leq f_i^{-1}(R_{Infl,i}^*/R_{Max,i}^*)$.

Ακολουθώντας τον ίδιο τρόπο ανάλυσης με προηγουμένως, είναι εύκολο να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η συνάρτηση $T_i(\gamma_i)$ είναι σιγμοειδής ως προς το σηματοθορυβικό λόγο γ_i , όταν $\gamma_{Infl,i}^f \leq f_i^{-1}(R_{Infl,i}^*/R_{Max,i}^*)$ και εμφανίζει μοναδικό σημείο καμπής $\gamma_{Infl,i}^T$ για το οποίο ισχύει $\gamma_{Infl,i}^T \in [\gamma_{Infl,i}^f, f_i^{-1}(R_{Infl,i}^*/R_{Max,i}^*)]$. ■

Επιπρόσθετα, μελετώντας τους χρήστες που αιτούνται υπηρεσίες δεδομένων ισχύει το ακόλουθο λήμμα.

Λήμμα 4: Λαμβάνοντας υπόψη τους χρήστες που αιτούνται υπηρεσίες δεδομένων, δηλαδή $i \in S_{NRT}$ και δεδομένων: α) της συνάρτησης απόδοσης $f_i(\gamma_i)$, η οποία είναι σιγμοειδής ως προς το σηματοθορυβικό λόγο γ_i και έχει μοναδικό σημείο καμπής $\gamma_{Infl,i}^f$ και β) της συνάρτησης επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης $T_i(R_i^*)$, η οποία είναι γνησίως κοίλη (γνησίως κυρτή) ως προς

τον επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσης R_i^* , όπου $R_i^* \equiv R_{Max,i}^* \cdot f_i(\gamma_i) \equiv R_i^{Max} \cdot f_i(\gamma_i)$, τότε για τη συνάρτηση $T_i(\gamma_i) = T_i(R_i^{Max} \cdot f_i(\gamma_i))$ ισχύει:

$$A) \text{ Εάν } \lim_{\gamma_i \rightarrow 0^+} \frac{\partial^2 T_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i^2} = 0^+ \quad \left(\lim_{\gamma_i \rightarrow \infty} \frac{\partial^2 T_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i^2} = 0^- \right) \quad (27)$$

Η συνάρτηση $T_i(\gamma_i) = T_i(R_i^{Max} \cdot f_i(\gamma_i))$ είναι σιγμοειδής ως προς το σηματοθορυβικό λόγο γ_i ($\gamma_i \geq 0$) με μοναδικό σημείο καμπής $\gamma_{Infl,i}^T$ για το οποίο ισχύει:

$$\gamma_{Infl,i}^T \leq \gamma_{Infl,i}^f \quad (\gamma_{Infl,i}^f \leq \gamma_{Infl,i}^T) \quad (28)$$

$$B) \text{ Εάν } \lim_{\gamma_i \rightarrow 0^+} \frac{\partial^2 T_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i^2} = 0^- \quad \left(\lim_{\gamma_i \rightarrow \infty} \frac{\partial^2 T_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i^2} = 0^+ \right) \quad (29)$$

Η συνάρτηση $T_i(\gamma_i) = T_i(R_i^{Max} \cdot f_i(\gamma_i))$ είναι γνησίως κοίλη (γνησίως κυρτή) συνάρτηση ως προς το σηματοθορυβικό λόγο γ_i ($\gamma_i \geq 0$).

Απόδειξη: Σε αυτή την απόδειξη παρέχεται μία κοινή προσέγγιση για τις δύο περιπτώσεις της συνάρτησης επιτεύξιμο ρυθμού μετάδοσης $T_i(R_i^*)$, η οποία μπορεί να είναι είτε γνησίως κοίλη είτε γνησίως κυρτή συνάρτηση ως προς τον επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσης R_i^* . Στα πλαίσια της απόδειξης γίνεται χρήση παρενθέσεων όποτε γίνεται αναφορά στην περίπτωση της γνησίως κυρτής συνάρτησης, ενώ οι αντίστοιχες εκφράσεις για την περίπτωση της γνησίως κοίλης συνάρτησης εμφανίζονται χωρίς παρενθέσεις. Σύμφωνα με τον ορισμό της γνησίως κοίλης (γνησίως κυρτής) συνάρτησης ισχύουν οι ακόλουθες ιδιότητες.

$$\frac{\partial T_i(R_i^*)}{\partial R_i^*} > 0 \quad (30)$$

$$\frac{\partial^2 T_i(R_i^*)}{\partial (R_i^*)^2} < 0 \quad \left(\frac{\partial^2 T_i(R_i^*)}{\partial (R_i^*)^2} > 0 \right) \quad (31)$$

Επιπρόσθετα, για τη σιγμοειδή συνάρτηση απόδοσης $f_i(\gamma_i)$ ισχύουν οι ιδιότητες (20), (21) και (25). Σχετικά με την πρώτη παράγωγο της συνάρτησης $T_i(\gamma_i)$, ισχύει σύμφωνα με τις σχέσεις (20) και (30).

$$\frac{\partial T_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i} = R_{Max,i}^* \frac{\partial T_i(R_i^*)}{\partial R_i^*} \cdot \frac{\partial f_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i} > 0$$

Επιπρόσθετα, για τη δεύτερη παράγωγο της συνάρτησης $T_i(\gamma_i)$ ισχύει:

$$\frac{\partial^2 T_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i^2} = R_{Max,i}^* \left[R_{Max,i}^* \frac{\partial^2 T_i(R_i^*)}{\partial (R_i^*)^2} \cdot \left(\frac{\partial f_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i} \right)^2 + \frac{\partial^2 f_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i^2} \frac{\partial T_i(R_i^*)}{\partial R_i^*} \right] \quad (32)$$

Σε αυτό το σημείο της απόδειξης θα μελετηθούν οι ιδιότητες της δεύτερης μερικής

παραγώγου της συνάρτησης επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης $T_i(\gamma_i)$ ως συνάρτηση του σηματοθορυβικού λόγου $\gamma_i, \gamma_i \in [0, \infty)$. Για το λόγο αυτό, στη συνέχεια μελετάται το πρόσημο της δεύτερης παραγώγου της συνάρτησης $T_i(\gamma_i)$ καθώς επίσης και οι ιδιότητές της στα όρια του πεδίου ορισμού της και συγκεκριμένα στα ακόλουθα υποσύνολα αυτού, δηλαδή $[0, \gamma_{\text{ηθ},i}^f]$ και $[\gamma_{\text{ηθ},i}^f, \infty)$.

Περίπτωση II.1. Όταν ισχύει $\gamma_i > \gamma_{\text{ηθ},i}^f$ ($\gamma_i < \gamma_{\text{ηθ},i}^f$).

Προκύπτει εύκολα ότι ισχύει $\frac{\partial^2 T_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i^2} < 0$ ($\frac{\partial^2 T_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i^2} > 0$) σύμφωνα με τις σχέσεις (22), (30), (31).

Περίπτωση II.2. Όταν ισχύει $\gamma_i < \gamma_{\text{ηθ},i}^f$ ($\gamma_i > \gamma_{\text{ηθ},i}^f$).

Εξετάζονται δύο διαφορετικές υποπεριπτώσεις (II.2.A και II.2.B) σε σχέση με τις τιμές της συνάρτησης $T_i(\gamma_i)$ όπου $\gamma_i \in [0, \infty)$ στο κάτω (άνω) όριο του πεδίου ορισμού της:

II.2.A: Όταν ισχύει $\lim_{\gamma_i \rightarrow 0^+} \frac{\partial^2 T_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i^2} = 0^+$ ($\lim_{\gamma_i \rightarrow \infty} \frac{\partial^2 T_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i^2} = 0^-$).

Σε αυτή την περίπτωση υπάρχει πάντα ένα υποδιάστημα εντός του διαστήματος $[0, \gamma_{\text{ηθ},i}^f]$ ($[\gamma_{\text{ηθ},i}^f, \infty)$), όπου ισχύει $\frac{\partial^2 T_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i^2} > 0$ ($\frac{\partial^2 T_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i^2} < 0$). Συνεπώς, εξάγεται το συμπέρασμα, λαμβάνοντας υπόψη το αποτέλεσμα της περίπτωσης II.1, ότι η συνάρτηση $\partial^2 T_i(\gamma_i)/\partial \gamma_i^2$ έχει ένα τουλάχιστον σημείο τομής με τον άξονα του σηματοθορυβικού λόγου στο διάστημα $[0, \gamma_{\text{ηθ},i}^f]$ ($[\gamma_{\text{ηθ},i}^f, \infty)$). Επιπρόσθετα, η μοναδικότητα αυτού του σημείου μπορεί να αποδειχθεί ως ακολούθως.

Μελετώντας τη σχέση (32) για το διάστημα $0 < \gamma_i < \gamma_{\text{ηθ},i}^f$ ($\gamma_i > \gamma_{\text{ηθ},i}^f$), ο δεύτερος όρος του αθροίσματος της σχέσης (32) είναι πάντοτε αρνητικός σύμφωνα με τη σχέση (22). Συνεπώς, μόνο η αλλαγή του πρόσημου του όρου $\partial^2 T_i(R_i^*)/\partial (R_i^*)^2$ μπορεί να συνεισφέρει στην αλλαγή του πρόσημου της παράστασης $\partial^2 T_i(\gamma_i)/\partial \gamma_i^2$. Ωστόσο όμως δεδομένου ότι ο όρος $\partial^2 T_i(R_i^*)/\partial (R_i^*)^2$ αλλάζει πρόσημο μόνο μία φορά, εξάγεται το συμπέρασμα ότι η γραφική παράσταση της συνάρτησης $\partial^2 T_i(\gamma_i)/\partial \gamma_i^2$ έχει ένα μοναδικό σημείο τομής με τον άξονα του σηματοθορυβικού λόγου γ_i .

Συνεπώς, σύμφωνα με την περίπτωση II.1 και την υποπερίπτωση II.2.A εξάγεται το ακόλουθο συμπέρασμα.

Συμπέρασμα 1: Όταν ισχύει $\lim_{\gamma_i \rightarrow 0^+} \frac{\partial^2 T_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i^2} = 0^+$ ($\lim_{\gamma_i \rightarrow \infty} \frac{\partial^2 T_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i^2} = 0^-$), τότε η συνάρτηση $T_i(\gamma_i)$ είναι

σιγμοειδής ως προς το σηματοθορυβικό λόγο $\gamma_i \in [0, \infty)$, με μοναδικό σημείο καμπής $\gamma_{\text{infl},i}^T$ για το οποίο ισχύει $\gamma_{\text{infl},i}^T \in [0, \gamma_{\text{infl},i}^f]$ ($\gamma_{\text{infl},i}^T \in [\gamma_{\text{infl},i}^f, \infty)$).

II.2.B: Όταν ισχύει $\lim_{\gamma_i \rightarrow 0^+} \frac{\partial^2 T_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i^2} = 0^-$ ($\lim_{\gamma_i \rightarrow \infty} \frac{\partial^2 T_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i^2} = 0^+$).

Σε αυτή την περίπτωση, η συνάρτηση $\partial^2 T_i(\gamma_i)/\partial \gamma_i^2$ δεν εμφανίζει κανένα σημείο τομής με τον άξονα του σηματοθορυβικού λόγου γ_i στο διάστημα $[0, \gamma_{\text{infl},i}^f]$ ($[\gamma_{\text{infl},i}^f, \infty)$). Για να αποδειχθεί αυτός ο ισχυρισμός πρέπει να ληφθεί υπόψη η περίπτωση II.1 και το γεγονός ότι ισχύει $\lim_{\gamma_i \rightarrow 0^+} \frac{\partial^2 T_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i^2} = 0^-$ ($\lim_{\gamma_i \rightarrow \infty} \frac{\partial^2 T_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i^2} = 0^+$), τότε η συνάρτηση $\partial^2 T_i(\gamma_i)/\partial \gamma_i^2$ είτε δεν τέμνει τον άξονα του σηματοθορυβικού λόγου στο διάστημα $[0, \gamma_{\text{infl},i}^f]$ ($[\gamma_{\text{infl},i}^f, \infty)$) είτε τον τέμνει περισσότερες από μία φορές. Η τελευταία παρατήρηση είναι αδύνατη δεδομένου ότι η συνάρτηση $\partial^2 T_i(\gamma_i)/\partial \gamma_i^2$ μπορεί να αλλάξει το πρόσημό της μόνο μία φορά στο διάστημα $\gamma_i \in [0, \infty)$, αφού καθώς επεξηγήθηκε το πρόσημό της προσδιορίζεται από τον όρο $\partial^2 T_i(R_i^*)/\partial (R_i^*)^2$, ο οποίος μεταβάλλει το πρόσημό του μόνο μία φορά.

Συνεπώς, σύμφωνα με την περίπτωση II.1 και την υποπερίπτωση II.2.B εξάγεται το ακόλουθο συμπέρασμα.

Συμπέρασμα 2: Όταν ισχύει $\lim_{\gamma_i \rightarrow 0^+} \frac{\partial^2 T_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i^2} = 0^-$ ($\lim_{\gamma_i \rightarrow \infty} \frac{\partial^2 T_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i^2} = 0^+$), τότε η συνάρτηση $T_i(\gamma_i)$ είναι γνησίως κοίλη (γνησίως κυρτή) ως προς το σηματοθορυβικό λόγο γ_i , $\gamma_i \in [0, \infty)$. Με τη βοήθεια των συμπερασμάτων 1 και 2 ολοκληρώνεται η απόδειξη. ■

3.6.2 Ιδιότητες της Συνάρτησης Χρησιμότητας των Χρηστών

Σύμφωνα με το λήμμα 4, όταν η συνάρτηση επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης $T_i(R_i^*)$ είναι γνησίως κοίλη (γνησίως κυρτή) ως προς τον επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσης R_i^* και η σχέση (29) ισχύει, τότε η συνάρτηση επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης είναι επίσης γνησίως κοίλη (γνησίως κυρτή) ως προς το σηματοθορυβικό λόγο γ_i ($\gamma_i \geq 0$). Το ακόλουθο λήμμα αποδεικνύει ότι σε αυτή την περίπτωση η συνάρτηση χρησιμότητας U_i (ΣΧ) του χρήστη αντιβαίνει τις βασικές υποθέσεις ορισμού της, δηλαδή $\lim_{P_i \rightarrow 0^+} U_i(P_i) = 0^+$ και η $U_i(P_i)$ να είναι άνω φραγμένη για $P_i \geq 0$, και για το λόγο αυτό οι συγκεκριμένες περιπτώσεις είναι μη πραγματοποιήσιμες.

Λήμμα 5: Όταν η συνάρτηση επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης $T_i(R_i^*)$ είναι γνησίως κοίλη

(γνησίως κυρτή) ως προς τον επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσης R_i^* και ισχύει $\lim_{\gamma_i \rightarrow 0^+} \partial^2 T_i(\gamma_i) / \partial \gamma_i^2 = 0^-$ ($\lim_{\gamma_i \rightarrow \infty} \partial^2 T_i(\gamma_i) / \partial \gamma_i^2 = 0^+$), τότε για την αντίστοιχη ΣΧ $U_i(P_i, \bar{P}_i)$ του χρήστη $i \in S_{NRT}$ ισχύει είτε $\lim_{P_i \rightarrow 0^+} U_i(P_i) \neq 0^+$ είτε $U_i(P_i) \leq 0$ για $P_i \geq 0$ (δηλαδή η ΣΧ δεν είναι άνω φραγμένη για $P_i \geq 0$), οι οποίες δύο περιπτώσεις σε κάθε περίπτωση αντιβαίνουν τους βασικούς ισχυρισμούς του ορισμού της ΣΧ.

Απόδειξη: Σε αυτή την απόδειξη, για απλοποίηση ως προς την παρουσίαση συμβολίζεται η ΣΧ των χρηστών που αιτούνται υπηρεσίες δεδομένων ως ακολούθως:

$$U_i(P_i) = \frac{T_i(P_i)}{P_i}, \text{ s.t. } 0 \leq P_i \leq P_i^{Max}$$

Επιπρόσθετα, εξαιτίας της ένα προς ένα σχέσης («1-1») ανάμεσα στο σηματοθορυβικό λόγο γ_i και την ισχύ εκπομπής P_i , οι ιδιότητες της συνάρτησης επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης $T_i(\gamma_i)$ ως προς το σηματοθορυβικό λόγο γ_i , καθώς αυτές αναλύθηκαν στα λήμματα 3 και 4, ισχύουν αντίστοιχα και για τη συνάρτηση $T_i(P_i)$ ως προς την ισχύ εκπομπής P_i .

Η πρώτη παράγωγος της ΣΧ του χρήστη $i \in S_{NRT}$ μπορεί να εκφραστεί ως ακολούθως.

$$\frac{\partial U_i(P_i)}{\partial P_i} = \frac{\partial \left(\frac{T_i(P_i)}{P_i} \right)}{\partial P_i} = \frac{\frac{\partial T_i(P_i)}{\partial P_i} P_i - T_i(P_i)}{P_i^2} = -\frac{b_i(P_i)}{P_i^2}$$

όπου $b_i(P_i) = T_i(P_i) - \frac{\partial T_i(P_i)}{\partial P_i} P_i$. Οι συναρτήσεις $T_i(P_i)$ και $\frac{\partial T_i(P_i)}{\partial P_i}$ θεωρούνται συνεχείς συναρτήσεις ως προς την ισχύ εκπομπής P_i και συνεπώς η συνάρτηση $b_i(P_i)$ είναι επίσης συνεχής ως προς την ισχύ εκπομπής P_i . Για δύο οποιεσδήποτε τιμές $v \in \{1,2\}$ της ισχύος εκπομπής του χρήστη i , οι οποίες συμβολίζονται ως $P_{v,i} \in [0, \infty)$, ισχύουν οι ακόλουθες ιδιότητες για τη γνησίως κοίλη (γνησίως κυρτή) συνάρτηση $T_i(P_i)$:

$$T_i(P_{2,i}) < T_i(P_{1,i}) + \left. \frac{\partial T_i(P_i)}{\partial P_i} \right|_{P_i=P_{1,i}} (P_{2,i} - P_{1,i}), \quad \forall P_{1,i}, P_{2,i} \in [0, \infty)$$

$$\left(T_i(P_{2,i}) > T_i(P_{1,i}) + \left. \frac{\partial T_i(P_i)}{\partial P_i} \right|_{P_i=P_{1,i}} (P_{2,i} - P_{1,i}), \quad \forall P_{1,i}, P_{2,i} \in [0, \infty) \right)$$

Θέτοντας $P_{2,i} = 0$ και $P_{1,i} = P_{v,i}$ και $P_i \geq 0$ εξάγεται το συμπέρασμα ότι:

$$T_i(0) < T_i(P_{v,i}) + \left. \frac{\partial T_i(P_i)}{\partial P_i} \right|_{P_i=P_{v,i}} (0 - P_{v,i}) \quad \left(T_i(0) > T_i(P_{v,i}) + \left. \frac{\partial T_i(P_i)}{\partial P_i} \right|_{P_i=P_{v,i}} (0 - P_{v,i}) \right)$$

και συνεπώς,

$$0 < T_i(P_{v,i}) - \left. \frac{\partial T_i(P_i)}{\partial P_i} \right|_{P_i=P_{v,i}} P_{v,i} \left(0 > T_i(P_{v,i}) - \left. \frac{\partial T_i(P_i)}{\partial P_i} \right|_{P_i=P_{v,i}} P_{v,i} \right)$$

$$b_i(P_{v,i}) > 0 \quad (b_i(P_{v,i}) < 0)$$

οπότε εξάγεται το ακόλουθο συμπέρασμα

$$\left. \frac{\partial U_i(P_i)}{\partial P_i} = -\frac{b_i(P_i)}{P_i^2} < 0 \quad \left(\frac{\partial U_i(P_i)}{\partial P_i} = -\frac{b_i(P_i)}{P_i^2} > 0 \right) \quad (33)$$

Με βάση την προηγούμενη ανάλυση εξάγονται τα ακόλουθα.

- A. όταν η συνάρτηση $T_i(P_i)$ είναι γνησίως κοίλη ως προς την ισχύ εκπομπής P_i , παρατηρείται ότι η ΣΧ του χρήστη $U_i(P_i)$ είναι γνησίως φθίνουσα συνάρτηση ως προς την ισχύ εκπομπής $P_i, P_i \in [0, P_i^{Max}]$, σύμφωνα με τη σχέση (33). Σε αυτή την περίπτωση εάν ισχύει $\lim_{P_i \rightarrow 0^+} U_i(P_i) = 0^+$ τότε εξάγεται ότι i) $U_i(P_i) < 0$ όταν $P_i \in [0, P_i^{Max}]$ ή ii) $\lim_{P_i \rightarrow 0^+} U_i(P_i) \neq 0^+$ ώστε να ισχύει $U_i(P_i) \geq 0$ όταν $P_i \in [0, P_i^{Max}]$. Τα συμπεράσματα αυτά αντιβαίνουν τους βασικούς ισχυρισμούς για τον ορισμό της ΣΧ U_i του χρήστη.
- B. όταν η συνάρτηση $T_i(P_i)$ είναι γνησίως κυρτή ως προς την ισχύ εκπομπής P_i του χρήστη, παρατηρείται ότι η ΣΧ $U_i(P_i)$ του χρήστη είναι γνησίως αύξουσα ως προς την ισχύ εκπομπής, σύμφωνα με τη σχέση (33). Συνεπώς, η ΣΧ του χρήστη δεν είναι άνω φραγμένη για $P_i \geq 0$, γεγονός το οποίο επίσης αντιβαίνει τους βασικούς ισχυρισμούς για τον ορισμό της ΣΧ U_i του χρήστη. ■

Με βάση το λήμμα 5, εξάγεται το συμπέρασμα ότι η συνάρτηση επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης πρέπει να ικανοποιεί τις ιδιότητες της σχέσης (27). Το φυσικό περιεχόμενο της σχέσης (27) είναι ότι οι ιδιότητες της ΣΧ του χρήστη, οι οποίες ισχύουν στο πεδίο της ισχύος εκπομπής, η οποία αποτελεί το βασικό πόρο που ξοδεύει ο χρήστης κατά τη διάρκεια της μετάδοσης δεδομένων του, πρέπει να ισχύουν ταυτόχρονα καθώς η ΣΧ του χρήστη μετασχηματίζεται στο πεδίο του σηματοθορυβικού λόγου γ_i , ο οποίος αντιπροσωπεύει τον αντίστοιχο πόρο που ξοδεύεται καθώς τα δεδομένα του χρήστη λαμβάνονται από το σταθμό βάσης. Η παρατήρηση αυτή ισχύει μόνο όταν αληθεύει η σχέση (27) και βασίζεται στην παρατήρηση ότι η ικανοποίηση που λαμβάνει ένας χρήστης από το δίκτυο δεν εξαρτάται μόνο από την ισχύ εκπομπής του, αλλά και από το θόρυβο που αντιλαμβάνεται εντός της κυψέλης και συμπεριλαμβάνεται εντός του σηματοθορυβικού λόγου του χρήστη. Επιπρόσθετα, όταν για τη συνάρτηση επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης ισχύει η σχέση (29), τότε αποδεικνύεται ότι το υπό μελέτη παίγνιο δεν εμφανίζει σημείο ισορροπίας κατά Nash.

Λαμβάνοντας υπόψη τα λήμματα 3 και 4 και τους λογικούς περιορισμούς που τίθενται από

τον ορισμό της ΣΧ των χρηστών, το ακόλουθο λήμμα προσδιορίζει τη μεγιστοποίηση τη ΣΧ του χρήστη, δεδομένου ότι οι τιμές της ισχύος εκπομπής των υπολοίπων χρηστών εντός της κυψέλης παραμένουν σταθερές.

Λήμμα 6: Η ΣΧ $U_i(P_i, \bar{P}_{-i})$ του χρήστη $i \in S$ είναι ημί-κοίλη ως προς την ισχύ εκπομπής του χρήστη. Επιπρόσθετα, θεωρώντας ότι οι τιμές της ισχύος εκπομπής των υπολοίπων χρηστών παραμένουν σταθερές, τότε η ΣΧ $U_i(P_i, \bar{P}_{-i})$ του υπό μελέτη χρήστη έχει μοναδικό ολικό σημείο μεγίστου στο διάστημα $P_i \in [0, P_i^{Max}]$, το οποίο δίδεται από την ακόλουθη σχέση.

$$P_i^* = \begin{cases} \min\left\{\frac{\gamma_i^*(R_{T,i}^* + MF_i)I_{-i}(\bar{P}_{-i})}{WG_i}, P_i^{Max}\right\}, & i \in S_{RT} \\ \min\left\{\frac{\gamma_i^* R_i^{Max} I_{-i}(\bar{P}_{-i})}{WG_i}, P_i^{Max}\right\}, & i \in S_{NRT} \end{cases} \quad (34)$$

όπου η τιμή γ_i^* είναι η μοναδική θετική λύση της εξίσωσης $\frac{\partial T_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i} \cdot \gamma_i - T_i(\gamma_i) = 0$.

Απόδειξη: Λαμβάνοντας υπόψη τα λήμματα 3, 4 και 5, εύκολα αποδεικνύεται ότι η συνάρτηση $T_i(\gamma_i), \forall i \in S$ είναι σιγμοειδής ως προς το σηματοθορυβικό λόγο $\gamma_i(\gamma_i \geq 0)$, αναφερόμενοι είτε στους χρήστες που αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου είτε σε αυτούς που αιτούνται υπηρεσίες δεδομένων. Επιπρόσθετα, εξαιτίας της ένα προς ένα («1-1») σχέσης ανάμεσα στο σηματοθορυβικό λόγο γ_i και την ισχύ εκπομπής P_i συνεπάγεται άμεσα ότι η συνάρτηση επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης είναι σιγμοειδής ως προς την ισχύ εκπομπής. Συνεπώς, ισχύουν οι ακόλουθες ιδιότητες της συνάρτησης $T_i(\gamma_i) = T_i(P_i, \bar{P}_{-i})$ ως προς την ισχύ εκπομπής P_i , όταν $P_i \geq 0$:

1. Το πεδίο ορισμού της είναι ο μη αρνητικός άξονας των πραγματικών αριθμών, δηλαδή το διάστημα $[0, \infty)$.
2. Το σύνολο τιμών της είναι το διάστημα $[0, 1)$, σύμφωνα με τις ιδιότητες της συνάρτησης επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης $T_i(\gamma_i), i \in S$.
3. Είναι μία γνησίως αύξουσα συνάρτηση ως προς την ισχύ εκπομπής $P_i, i \in S$, σύμφωνα με τα λήμματα 3, 4 και 5.
4. Είναι γνησίως κυρτή στο διάστημα $[0, P_{infl,i}^T]$ και γνησίως κοίλη στο διάστημα $[P_{infl,i}^T, P_i^{Max}]$,

όπου για το σημείο $P_{infl,i}^T$ εύκολα προκύπτει ότι $P_{infl,i}^T = \frac{\gamma_{infl,i}^T (R_{T,i}^* + MF_i) I_{-i}(\bar{P}_{-i})}{G_i W} \forall i \in S_{RT}$ και

$$P_{\text{Infl},i}^T = \frac{\gamma_{\text{Infl},i}^T R_i^{\text{Max}} I_{-i}(\overline{P_{-i}})}{G_i W} \quad \forall i \in S_{\text{NRT}}. \text{ Επιπρόσθετα, γίνεται η υπόθεση ότι } P_i^{\text{Max}} \gg P_{\text{Infl},i}^T \quad \forall i \in S. \text{ Αυτή}$$

η υπόθεση ισχύει λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα των λημμάτων 3, 4 και 5.

5. Έχει συνεχή παράγωγο, δεδομένου ότι οι συναρτήσεις $T_i(R_i^*)$ και $f_i(\gamma_i)$ έχουν επίσης συνεχείς παραγώγους.

Δεδομένου ότι οι παραπάνω ιδιότητες ισχύουν για τη συνάρτηση $T_i(P_i, \overline{P_{-i}}) \quad \forall i \in S$, τότε ο λόγος $T_i(P_i, \overline{P_{-i}})/P_i, \quad \forall i \in S$ είναι μία ημι-κοίλη συνάρτηση ως προς την ισχύ εκπομπής $P_i \in [0, P_i^{\text{Max}}]$ [32]. Συνεπώς, η ΣΧ $U_i(P_i, \overline{P_{-i}})$ του χρήστη $\forall i \in S$ είναι μία ημι-κοίλη συνάρτηση ως προς την ισχύ εκπομπής του.

Επιπρόσθετα, η πρώτη συνθήκη βελτιστοποίησης της συνάρτησης $U_i(P_i, \overline{P_{-i}})$ μπορεί να εκφραστεί ως ακολούθως.

$$\frac{\partial U_i(P_i, \overline{P_{-i}})}{\partial P_i} = \frac{\partial \left(\frac{T_i(\gamma_i)}{P_i} \right)}{\partial P_i} = \frac{\frac{\partial T_i(\gamma_i)}{\partial P_i} P_i - T_i(\gamma_i)}{(P_i)^2} = 0$$

Συνεπώς, η συνάρτηση $U_i(P_i, \overline{P_{-i}}) \quad \forall i \in S$ μεγιστοποιείται όταν:

$$\frac{\partial T_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i} \gamma_i - T_i(\gamma_i) = 0 \quad (35)$$

δεδομένου ότι υπάρχει ένα προς ένα σχέση ανάμεσα στο σηματοθορυβικό λόγο γ_i και την ισχύ εκπομπής P_i και ισχύει $\frac{\partial \gamma_i}{\partial P_i} = \frac{\gamma_i}{P_i}$. Επιπρόσθετα, εξαιτίας της σιγμοειδούς μορφής της συνάρτησης $T_i(\gamma_i), \quad \forall i \in S$, η εξίσωση (35) έχει μοναδική λύση γ_i^* , καθώς έχει αποδειχθεί στη δημοσίευση [32]. Συνεπώς, η μοναδική τιμή \hat{P}_i που μεγιστοποιεί τη συνάρτηση $U_i(P_i, \overline{P_{-i}})$ όταν $P_i \geq 0$, μπορεί να γραφεί ως ακολούθως.

$$\hat{P}_i = \begin{cases} \frac{\gamma_i^*(R_{T,i}^* + MF_i) I_{-i}(\overline{P_{-i}})}{G_i W} & i \in S_{\text{RT}} \\ \frac{\gamma_i^* R_i^{\text{Max}} I_{-i}(\overline{P_{-i}})}{G_i W} & i \in S_{\text{NRT}} \end{cases}$$

Εν κατακλείδι, εάν η μέγιστη δυνατή τιμή της ισχύος εκπομπής P_i είναι μικρότερη από την τιμή \hat{P}_i , τότε η τιμή της ΣΧ $U_i(P_i^{\text{Max}}, \overline{P_{-i}}) = T_i(P_i^{\text{Max}}, \overline{P_{-i}})/P_i^{\text{Max}} \quad \forall i \in S$ είναι η μέγιστη δυνατή τιμή της ΣΧ $U_i(P_i, \overline{P_{-i}})$, διότι η ΣΧ U_i είναι γνησίως αύξουσα στο διάστημα $[0, \hat{P}_i]$. Συνεπώς, η μικρότερη από τις τιμές $\hat{P}_i, P_i^{\text{Max}}$ είναι το ολικό μέγιστο της συνάρτησης $U_i(P_i, \overline{P_{-i}}) \quad \forall i \in S$ όπου $P_i \in [0, P_i^{\text{Max}}]$. Συνεπώς, εξάγεται το ακόλουθο:

$$P_i^* = \begin{cases} \min \left(\frac{\gamma_i^* (R_{T,i}^* + MF_i) I_{-i}(\bar{P}_{-i})}{G_i W}, P_i^{Max} \right), & i \in S_{RT} \\ \min \left(\frac{\gamma_i^* R_i^{Max} I_{-i}(\bar{P}_{-i})}{G_i W}, P_i^{Max} \right), & i \in S_{NRT} \end{cases}$$

το οποίο ολοκληρώνει την απόδειξη. ■

Το παραπάνω λήμμα αναδεικνύει ότι ο στόχος των χρηστών να μεγιστοποιήσουν τη λαμβανόμενη από το δίκτυο ικανοποίησή τους και συνεπώς τη μεγιστοποίηση της ευχαρίστησής τους από την ικανοποίηση των απαιτήσεών τους σε ΠτΥ, μπορεί να μεταφραστεί ως μία συνεχής προσπάθεια των χρηστών να επιτύχουν έναν σταθερό σηματοθορυβικό λόγο γ_i^* στο σταθμό βάσης, γεγονός το οποίο οδηγεί σε ένα ισορροπημένο δίκτυο ως προς το σηματοθορυβικό λόγο. Επιπλέον, εάν η ισχύς εκπομπής των χρηστών δεν είναι επαρκής ώστε να επιτευχθεί ο σηματοθορυβικός λόγος γ_i^* , εξαιτίας των κακών συνθηκών του καναλιού μετάδοσης, τότε η βέλτιστη πολιτική είναι η εκπομπή με τη μέγιστη δυνατή ισχύ εκπομπής.

3.6.3 Ύπαρξη και Μοναδικότητα του Σημείου Ισορροπίας κατά Nash

Η ακόλουθη πρόταση εξασφαλίζει την ύπαρξη και τη μοναδικότητα του σημείου ισορροπίας κατά Nash του προτεινόμενου MSUPC παιγνίου και κατά συνέπεια προσδιορίζει την ισχύ εκπομπής των χρηστών στο σημείο ισορροπίας.

Πρόταση 3: Το σημείο ισορροπίας κατά Nash του μη συνεργατικού παιγνίου (18) δίδεται από το διάνυσμα $\bar{P}^* = (P_1^*, \dots, P_N^*)$, όπου η τιμή P_i^* είναι το μοναδικό ολικό σημείο μεγίστου της ΣΧ του χρήστη i και δίδεται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$P_i^* = \min \left\{ \frac{\gamma_i^* (R_{T,i}^* + MF_i) I_{-i}(\bar{P}_{-i})}{WG_i}, P_i^{Max} \right\} \quad \text{εάν } i \in S_{RT},$$

και από

$$P_i^* = \min \left\{ \frac{\gamma_i^* R_i^{Max} I_{-i}(\bar{P}_{-i})}{WG_i}, P_i^{Max} \right\} \quad \text{εάν } i \in S_{NRT}.$$

Επιπλέον, η τιμή γ_i^* απορρέει από τη μοναδική θετική λύση της εξίσωσης $(\partial T_i(\gamma_i) / \partial \gamma_i) \cdot \gamma_i - T_i(\gamma_i) = 0$.

Απόδειξη: Σύμφωνα με το λήμμα 6, η τιμή της ισχύος εκπομπής που μεγιστοποιεί τη ΣΧ του χρήστη, δεδομένων των τιμών ισχύος εκπομπής των υπολοίπων χρηστών, ισούται με την τιμή της ισχύος εκπομπής που προσδιορίστηκε στη σχέση (34), όπου γ_i^* είναι η μοναδική θετική

λύση της εξίσωσης $\partial T_i(\gamma_i)/\partial \gamma_i \cdot \gamma_i - T_i(\gamma_i) = 0$. Έως αυτό το σημείο έχει αποδειχθεί ότι στο σημείο ισορροπίας κατά Nash, εάν αυτό το σημείο υπάρχει, η ισχύς εκπομπής του χρήστη εξασφαλίζει μία συγκεκριμένη τιμή του σηματοθορυβικού λόγου, η οποία εξαρτάται από το σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που χρησιμοποιείται (το οποίο εκφράζεται μέσω της συνάρτησης απόδοσης f_i), αλλά και από το είδος της υπηρεσίας που αιτείται ο χρήστης και εκφράζεται κατάλληλα μέσω της συνάρτησης επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης.

Επιπρόσθετα, με βάση τις δημοσιεύσεις [9] και [22], η ύπαρξη του σημείου ισορροπίας κατά Nash του παιγνίου (18) μπορεί να αποδειχθεί χρησιμοποιώντας τις ιδιότητες της ημι-κοίλης συνάρτησης του κάθε χρήστη ως προς την ισχύ εκπομπής του. Στο λήμμα 6, έχει ήδη αποδειχθεί ότι η $SX U_i(P_i, \bar{P}_i)$ είναι ημι-κοίλη ως προς την ισχύ εκπομπής $P_i \in [0, P_i^{Max}]$ και για το λόγο αυτό το σημείο ισορροπίας κατά Nash υπάρχει πάντοτε. Επιπρόσθετα, για μία σιγμοειδή συνάρτηση επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης T_i , η εξίσωση $\partial T_i(\gamma_i)/\partial \gamma_i \cdot \gamma_i - T_i(\gamma_i) = 0$ έχει μοναδική θετική λύση γ_i^* , η οποία είναι και το ολικό σημείο μεγίστου της SX του χρήστη i . Εξαιτίας της μοναδικότητας της λύσης γ_i^* και της ένα προς ένα («1-1») σχέσης ανάμεσα στην ισχύ εκπομπής και το σηματοθορυβικό λόγο, το σημείο ισορροπίας κατά Nash είναι μοναδικό. ■

Η πρόταση 3 υποδεικνύει ότι αν όλοι οι χρήστες υιοθετήσουν τη βέλτιστη πολιτική, όπως αυτή εκφράζεται στη σχέση (34), τότε το σημείο ισορροπίας κατά Nash θα υπάρχει και θα προσδιορίζεται πάντοτε για το MSUPC παίγνιο [33]. Μία τέτοιου είδους στρατηγική περιγράφεται από τον προτεινόμενο αλγόριθμο στην επόμενη ενότητα του κεφαλαίου της παρούσας διδακτορικής διατριβής. Ανακεφαλαιώνοντας την παρούσα ενότητα προτείνεται μία ικανή και αναγκαία συνθήκη για την ύπαρξη και τη μοναδικότητα του σημείου ισορροπίας κατά Nash για το MSUPC παίγνιο. Σύμφωνα με την πρόταση 3, η ύπαρξη και η μοναδικότητα του σημείου ισορροπίας κατά Nash βασίζεται στην ιδιότητα της ημι-κοίλης $SX U_i$ των χρηστών ως προς την ισχύ εκπομπής P_i και συνεπώς στη σιγμοειδή μορφή της αντίστοιχης συνάρτησης επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης T_i ως προς το σηματοθορυβικό λόγο γ_i . Επιπρόσθετα, η συνάρτηση επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης είναι πάντοτε σιγμοειδής αν και μόνο αν ισχύει η συνθήκη της σχέσης (27). Συνεπώς, η ικανοποίηση της συνθήκης της σχέσης (27) εξασφαλίζει τον ορθό ορισμό της SX των χρηστών U_i , αλλά παράλληλα εγγυάται τη σταθερότητα του συστήματος εξασφαλίζοντας την ύπαρξη και τη μοναδικότητα του σημείου ισορροπίας κατά Nash του MSUPC παιγνίου.

Πρόταση 4: Το μη συνεργατικό παίγνιο MSUPC έχει πάντοτε ένα μοναδικό σημείο ισορροπίας κατά Nash εάν η συνάρτηση επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης έχει τις ακόλουθες επιπρόσθετες ιδιότητες:

- a) $\lim_{\gamma_i \rightarrow 0^+} \frac{\partial^2 T_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i^2} = 0^+$ εάν η συνάρτηση T_i είναι γνησίως κοίλη ως προς τον επιτεύξιμο σηματοθορυβικό λόγο R_i^* ,
- b) $\lim_{\gamma_i \rightarrow \infty} \frac{\partial^2 T_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i^2} = 0^-$ εάν η συνάρτηση T_i είναι γνησίως κυρτή ως προς τον επιτεύξιμο σηματοθορυβικό λόγο R_i^* .

Απόδειξη: Σύμφωνα με την πρόταση 3 και τα λήμματα 5 και 6, η παραπάνω πρόταση ισχύει. Σημειώνεται ότι στην περίπτωση κατά την οποία η συνάρτηση επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης T_i είναι σιγμοειδής ως προς τον επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσης R_i^* , δε χρειάζονται επιπρόσθετες ιδιότητες ώστε να εξασφαλίζεται η ύπαρξη και η μοναδικότητα του σημείου ισορροπίας κατά Nash για το MSUPC παίγνιο. ■

3.7 MSUPC Αλγόριθμος και Σύγκλιση

Σε αυτή την ενότητα, βασιζόμενοι στην προηγούμενη ανάλυση, προτείνεται ένας επαναληπτικός, μη κεντρικοποιημένος και χαμηλής πολυπλοκότητας αλγόριθμος κατανομής ισχύος εκπομπής στη ζεύξη ανόδου ενός CDMA ασύρματου κυψελωτού δικτύου, ο οποίος προσδιορίζει το μοναδικό σημείο ισορροπίας κατά Nash για το MSUPC παίγνιο G σε κάθε χρονοσχισμή t και αποδεικνύεται η σύγκλισή του.

MSUPC Αλγόριθμος

Βήμα 1^ο: Στην αρχή κάθε χρονοσχισμής t , ο χρήστης i , $i \in S$ εκπέμπει με μία τυχαία επιλεγμένη τιμή της ισχύος εκπομπής (i.e. $0 \leq P_i^{*(0)} \leq P_i^{Max}$). Θέσε $k=0$ και $P_i^{*(0)}$, $i \in S$.

Βήμα 2^ο: Δεδομένων των τιμών ισχύος εκπομπής των υπολοίπων χρηστών που εδρεύουν εντός της κυψέλης, οι οποίες αναφέρονται από το σταθμό βάσης όταν αυτός ευρυεκπέμπει το συνολικό θόρυβο εντός της κυψέλης $I^{(k)}(\bar{P}^{(k)})$, κάθε χρήστης υπολογίζει το θόρυβο που αυτός αντιλαμβάνεται $I_{-i}^{(k)}(\bar{P}_{-i}^{(k)})$ και επαναυπολογίζει την ισχύ εκπομπής του, δηλαδή υπολογίζει την τιμή $P_i^{*(k+1)}$ σύμφωνα με τη σχέση (34).

Βήμα 3^ο: Εάν οι τιμές της ισχύος εκπομπής συγκλίνουν, δηλαδή ισχύει $|P_i^{*(k+1)} - P_i^{*(k)}| \leq 10^{-5}$ τότε σταμάτα.

Βήμα 4^ο: Σε κάθε άλλη περίπτωση, θέσε $k=k+1$ και επέστρεψε στο βήμα 2.

Ο MSUPC αλγόριθμος μπορεί να χαρακτηριστεί ως ένας αλγόριθμος χαμηλής πολυπλοκότητας προσδιορισμού μοναδικής τιμής για την ισχύ εκπομπής των χρηστών,

βασισζόμενος στη βέλτιστη πολιτική για κάθε χρήστη. Κάθε χρήστης εκπέμπει από μία αρχική τυχαία επιλεγμένη τιμή ισχύος εκπομπής από το πεδίο ορισμού της ισχύος εκπομπής A_i (i.e. $P_i^{(0)} \forall i \in S$) [33]. Λαμβάνοντας υπόψη την υπόθεση ότι η μέγιστη ισχύς εκπομπής P_i^{Max} είναι επαρκής για να επιτευχθεί ο σηματοθορυβικός λόγος γ_i^* για όλους τους χρήστες, η σύγκλιση του αλγορίθμου επιτυγχάνεται πάντα σύμφωνα με την πρόταση 1 της δημοσίευσης [23]. Στη γενική περίπτωση, η ιδιότητα του supermodular του υπό μελέτη παιγνίου μπορεί να εγγυηθεί τη σύγκλιση του MSUPC αλγορίθμου, λαμβάνοντας υπόψη τις προτάσεις 1 και 3 και το θεώρημα 1, όπως αυτά προτάθηκαν στη δημοσίευση [31]. Ένας τυπικός ορισμός του supermodular παιγνίου για μίας διάστασης πεδίο στρατηγικών των χρηστών δίδεται ακολούθως [22].

Ορισμός 5: Ένα παίγνιο $G = [S, \{A_i\}, \{U_i\}]$, όπου S είναι το σύνολο των χρηστών/παικτών και $A_i = [0, P_i^{Max}] \times \mathfrak{R}^N$ είναι το πεδίο στρατηγικών του i χρήστη, είναι supermodular εάν για κάθε χρήστη i , η ΣΧ του $U_i(P_i, \bar{P}_{-i})$ έχει μη φθίνουσες διαφορές (nondecreasing differences - NDD) στο (P_i, \bar{P}_{-i}) [22].

Καθώς επεξηγείται αναλυτικά στη δημοσίευση [31], οι αναγκαίες συνθήκες για να είναι ένα παίγνιο supermodular είναι οι ακόλουθες:

1. Το πεδίο στρατηγικών A_i είναι ένα μη κενό και συμπαγές σύνολο.
2. Η ΣΧ U_i είναι συνεχής στο πεδίο ορισμού όλων των χρηστών, είναι supermodular στο πεδίο στρατηγικών του i χρήστη και έχει αύξουσες διαφορές ανάμεσα σε κάθε στοιχείο των στρατηγικών του i χρήστη και ανάμεσα σε κάθε στοιχείο από το σύνολο στρατηγικών κάθε άλλου χρήστη.

Σχετικά με το MSUPC παίγνιο, δεδομένου ότι το πεδίο στρατηγικών του i χρήστη A_i είναι ένα κλειστό σύνολο μίας διάστασης και μη κενό, η συνθήκη 1 ισχύει. Επιπρόσθετα, από τον ορισμό της ΣΧ κάθε χρήστη, η συνάρτηση U_i είναι συνεχής στο πεδίο ορισμού των συναρτήσεων όλων των χρηστών $i \in S$. Η ΣΧ κάθε χρήστη U_i είναι supermodular στο πεδίο ορισμού του χρήστη. Η τελευταία συνθήκη για αύξουσες διαφορές της συνάρτησης U_i για κάθε στοιχείο των στρατηγικών του i χρήστη και ανάμεσα σε κάθε στοιχείο από το σύνολο στρατηγικών κάθε άλλου χρήστη, δηλαδή $\frac{\partial^2 U_i(P_i, \bar{P}_{-i})}{\partial P_i \partial P_j} \geq 0 \forall i, j \in S$ ισχύει σύμφωνα με το

θεώρημα 1 στη δημοσίευση [31], δεδομένου ότι η ΣΧ U_i είναι ημι-κοίλη συνάρτηση ως προς την προσωπική ισχύ εκπομπής P_i του χρήστη i και αντιστρόφως ανάλογη ως προς την ισχύ εκπομπής των υπολοίπων χρηστών \bar{P}_{-i} (συνεπώς ικανοποιεί τις ίδιες συνθήκες που ικανοποιεί η ΣΧ των χρηστών, όπως αυτή προτάθηκε στη δημοσίευση [31]).

Σύμφωνα με την πρόταση 3 στη δημοσίευση [31], σε ένα supermodular παίγνιο G : i) εάν οι

βέλτιστες πολιτικές των χρηστών είναι μονότιμες και εάν οι χρήστες χρησιμοποιούν τη μυωπική βέλτιστη πολιτική για να ανανεώνουν τη στρατηγική τους ξεκινώντας από τη μικρότερη (μεγαλύτερη) τιμή του πεδίου στρατηγικών τους, τότε οι στρατηγικές τους συγκλίνουν μονότονα στο μικρότερο (μεγαλύτερο) σημείο ισορροπίας κατά Nash, *ii*) εάν το σημείο ισορροπίας κατά Nash είναι μοναδικό τότε η μυωπική βέλτιστη πολιτική συγκλίνει στο μοναδικό σημείο ισορροπίας κατά Nash ξεκινώντας από οποιαδήποτε αρχική στρατηγική.

3.8 Αριθμητικά Αποτελέσματα

Σε αυτή την ενότητα παρατίθενται ορισμένα αριθμητικά αποτελέσματα τα οποία αναδεικνύουν τη λειτουργία και τα χαρακτηριστικά του προτεινόμενου MSUPC παιγνίου και του αντίστοιχου αλγορίθμου. Αρχικά, κυρίως για λόγους παρουσίασης των αποτελεσμάτων θεωρούνται προκαθορισμένης ποιότητας κανάλια μετάδοσης, ώστε να αναδειχθούν και να κατανοηθούν οι ιδιότητες του σημείου ισορροπίας κατά Nash του εν λόγω παιγνίου G για διαφορετικές καταστάσεις των καναλιών των χρηστών και για διαφορετικές απαιτήσεις ως προς την ΠτΥ που οι χρήστες αιτούνται. Στη συνέχεια θεωρούνται χρονομεταβλητά κανάλια και μελετούνται οι ιδιότητες του συστήματος σε βάθος χρόνου καθώς εξελίσσεται ο MSUPC αλγόριθμος για πληθώρα χρονοσχισμών και αναδεικνύονται οι σχέσεις ανάμεσα στην ποιότητα του καναλιού των χρηστών, στην ισχύ εκπομπής των χρηστών, καθώς επίσης και στην ικανοποίηση που λαμβάνουν οι χρήστες από το διαμοιρασμό των πόρων του συστήματος (η οποία εκφράζεται μέσω των τιμών των ΣX των χρηστών). Τελικά, μελετούνται οι συσχετίσεις ανάμεσα στις υπηρεσίες πραγματικού και στις υπηρεσίες δεομένων, υπό τους όρους του επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης, της ισχύος εκπομπής και των τιμών των ΣX των χρηστών, όταν οι χρήστες που αιτούνται τις δύο διαφορετικού είδους υπηρεσίες μοιράζονται τους ίδιους πόρους του συστήματος υπό χρονομεταβλητά κανάλια.

Στη διάρκεια της ανάλυσης στην παρούσα ενότητα μελετάται η ζεύξη ανόδου ενός CDMA ασύρματου κυψελωτού δικτύου, το οποίο υποστηρίζει $N=10$ χρήστες, οι οποίοι έχουν συνεχώς δεδομένα να μεταδώσουν. Κάθε προσομοίωση διαρκεί 10.000 χρονοσχισμές. Η ποιότητα του καναλιού των χρηστών μοντελοποιείται ως $G_i = K_i/d_i^n$ όπου d_i είναι η απόσταση του χρήστη i από το σταθμό βάσης, n είναι ο εκθέτης απωλειών λόγω απόστασης και K_i είναι μία λογαριθμοκανονική κατανομή με μέση τιμή θ και διακύμανση $\sigma^2 = 8(dB)$, η οποία αντιπροσωπεύει τα φαινόμενα σκίασης [16]. Για τα ακόλουθα αριθμητικά αποτελέσματα θεωρούνται οι τιμές για τις παραμέτρους του συστήματος, οι οποίες παρουσιάζονται στον πίνακα 1.

Επιπρόσθετα θεωρούνται δύο κλάσεις χρηστών, οι οποίες ονομάζονται κλάση 1 (class 1) και κλάση 2 (class 2). Η κλάση 1 αντιπροσωπεύει χρήστες οι οποίοι αιτούνται υπηρεσίες

δεδομένων, ενώ η κλάση 2 αντιπροσωπεύει χρήστες οι οποίοι αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου (υπηρεσίες βίντεο συνδιαλέξεων). Οι δυο κλάσεις διαφοροποιούνται με βάση τα χαρακτηριστικά των υπηρεσιών τους, όπως αυτά αντικατοπτρίζονται στη συνάρτηση επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης και στις αντίστοιχες παραμέτρους. Οι απαιτήσεις σε ΠτΥ των χρηστών που αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου εκφράζονται μέσω μίας σιγμοειδούς συνάρτησης επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης, δηλαδή $T_i(R_i^*) = (1 - e^{-(R_i^* - A)})^{M_{T,i}}$, ενώ οι απαιτήσεις σε ΠτΥ των χρηστών που αιτούνται υπηρεσίες δεδομένων εκφράζονται μέσω μίας γνησίως κοίλης συνάρτησης επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης, δηλαδή $T_i(R_i^*) = \log(c_i R_i^* + 1)$. Επιπρόσθετα, μία κοινή συνάρτηση απόδοσης υιοθετείται και για τις δύο κλάσεις χρηστών, η οποία αντιπροσωπεύει το κοινό σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που υιοθετείται από το σύνολο των χρηστών και είναι μία σιγμοειδής συνάρτηση ως προς το σηματοθορυβικό λόγο: $f_i(\gamma_i) = (1 - e^{-\gamma_i})^M \quad \forall i = 1, \dots, N$. Τα προηγούμενα χαρακτηριστικά που περιγράφηκαν, αναγράφονται περιληπτικά στους πίνακες 2 και 3.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1 ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Parameter ($\forall i \in S$)	Value
P_i^{Max}	2 (Watt)
$P_i^{*(0)}$	2 (Watt)
W	10^6 (Hz)
I_0	$5 * 10^{-16}$
N	4

ΠΙΝΑΚΑΣ 2 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΣΕ ΠΤΥ ΤΩΝ ΧΡΗΣΤΩΝ ΤΗΣ ΚΛΑΣΗΣ 1 (NRT USERS)

Users' Class	Class 1
Characteristic	(data users)
c_i	0.001
R_i^{Max}	2.4 (Mbps)
$\gamma_{M=500}^*$	5.8 (7.6 dB)

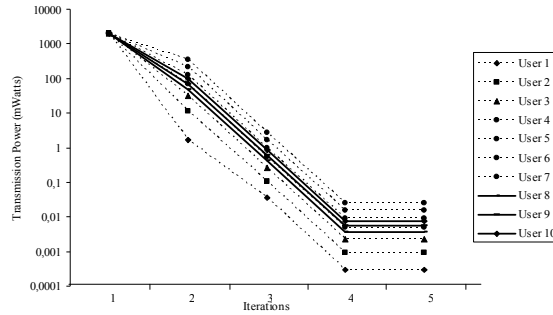
ΠΙΝΑΚΑΣ 3 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΣΕ ΠΤΥ ΤΩΝ ΧΡΗΣΤΩΝ ΤΗΣ ΚΛΑΣΗΣ 2 (RT USERS)

Users' Class	Class 2
Characteristic	(multimedia users)
R_i^*	128 (Kbps)
MF	10 (Kbps)
M_T	800
A_T	112
$\gamma_{M=500}^*$	8.9 (9.5 dB)

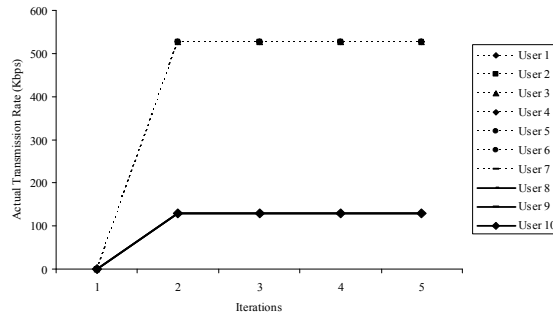
3.8.1 Οι Ιδιότητες του Σημείου Ισορροπίας κατά Nash

Στη συνέχεια μελετάται η σύγκλιση του MSUPC αλγορίθμου στο σημείο ισορροπίας κατά Nash σε μία συγκεκριμένη χρονοσχισμή. Θεωρούνται σταθερά κανάλια κατά τη διάρκεια μίας χρονοσχισμής και το κέρδος του καναλιού εκφράζεται ως $G_i = 1/d_i$ για κάθε χρήστη i , όπου η απόσταση του χρήστη από το σταθμό βάσης δίδεται από τη σχέση $d_i = d_{i-1} + 100 \text{ (m)}$ για τους χρήστες $i=2, \dots, 10$ με $d_1 = 300 \text{ (m)}$. Κατά αυτόν τον τρόπο προσομοιώνεται το σενάριο σύμφωνα με το οποίο η ποιότητα του καναλιού των χρηστών χειροτερεύει καθώς ο αύξων αριθμός του χρήστη αυξάνει (δηλαδή $i=1, \dots, 10$). Αποκλειστικά για λόγους παρουσίασης, οι χρήστες 1 έως 7 θεωρούνται ότι ανήκουν στην κλάση 1, ενώ οι χρήστες 8 έως 10 ότι ανήκουν στην κλάση 2.

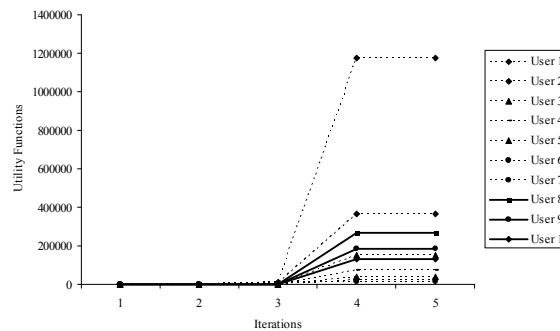
Τα σχήματα 7, 8 και 9 απεικονίζουν την ισχύ εκπομπής των χρηστών, τον επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσής τους και τις τιμές των ΣΧ τους, ως συνάρτηση των επαναλήψεων που χρειάζεται ο MSUPC αλγόριθμος ώστε να συγκλίνει στο σημείο ισορροπίας κατά Nash \bar{P}^* του παιγνίου G . Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν ότι η ισχύς εκπομπής των χρηστών είναι αντιστρόφως ανάλογη ως προς την ποιότητα του καναλιού των χρηστών (Σχήμα 7). Επιπρόσθετα, χρειάζονται μόνο πέντε επαναλήψεις του αλγορίθμου ώστε να συγκλίνει στο σημείο ισορροπίας κατά Nash, γεγονός το οποίο είναι ιδιαίτερα σημαντικό δεδομένης της μικρής χρονικής διάρκειας της χρονοσχισμής ($t=1.67 \text{ msec}$ [13]) στα CDMA ασύρματα κυψελωτά δίκτυα. Παράλληλα, παρόλο που οι τιμές των ΣΧ των χρηστών συγκλίνουν σε τιμές ανάλογες με την ποιότητα του καναλιού των χρηστών, ο επιτεύξιμος ρυθμός μετάδοσης των χρηστών είναι τέτοιος ώστε να ικανοποιεί ακόμα και τους πιο απαιτητικούς χρήστες ως προς την ΠτΥ τους, δηλαδή τους χρήστες $i = 8, 9, 10$ όπου ο επιθυμητός ρυθμός μετάδοσής τους είναι 128 Kbps (Σχήμα 8). Η τελευταία παρατήρηση αναδεικνύει την ικανότητα του MSUPC αλγορίθμου να ανταποκρίνεται σε πιθανή πρόσκαιρη και παροδική κακή ποιότητα του καναλιού των χρηστών, υποστηρίζοντας ταυτόχρονα πολλαπλών ειδών υπηρεσίες. Επιπρόσθετα, το γεγονός ότι ο επιτεύξιμος ρυθμός μετάδοσης των χρηστών συμβαδίζει με



Σχήμα 7. Σύγκλιση της ισχύος εκπομπής των χρηστών σε μία συγκεκριμένη χρονοσχισμή



Σχήμα 8. Επιτεύξιμος ρυθμός μετάδοσης των χρηστών σε μία συγκεκριμένη χρονοσχισμή



Σχήμα 9. Τιμές των ΣΧ των χρηστών σε μία συγκεκριμένη χρονοσχισμή

τον επιθυμητό ρυθμό μετάδοσης τους αναδεικνύει αρχικά την κατάλληλη μοντελοποίηση των απαιτήσεων των χρηστών σε ΠτΥ μέσω των συναρτήσεων επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης (T_i) διαμέσου των οποίων συναρτήσεων ο MSUPC αλγόριθμος δύναται να λαμβάνει υπόψη τις απαιτήσεις των χρηστών σε ΠτΥ, αλλά επίσης αναδεικνύει την ικανότητα των ΣΧ των χρηστών να λαμβάνουν υπόψη τις διαφορετικές απαιτήσεις σε ΠτΥ τους.

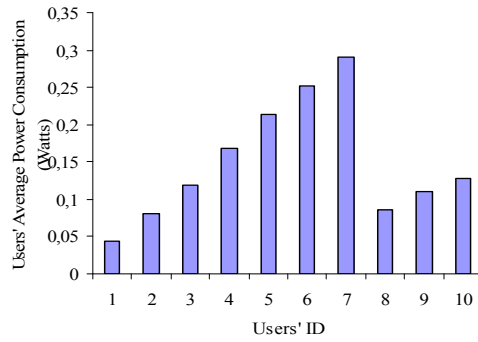
3.8.2 Σχέσεις ανάμεσα στην Ισχύ Εκπομπής των Χρηστών και στις Τιμές των Συναρτήσεων Χρησιμότητάς τους

Αρχικά, μελετώνται οι σχέσεις που υπάρχουν και αναπτύσσονται ανάμεσα στις τιμές των ΣΧ των χρηστών, στην ισχύ εκπομπής τους και στην ικανοποίηση της ΠτΥ των χρηστών, ως

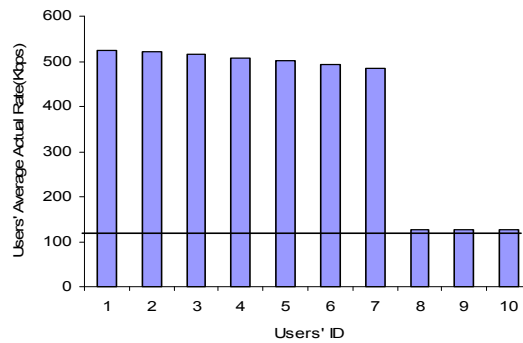
συνάρτηση της ποιότητας του καναλιού των χρηστών και των διαφορετικών ειδών υπηρεσιών που αιτούνται οι χρήστες, καθώς ο MSUPC αλγόριθμος εξελίσσεται. Για το λόγο αυτό θεωρούνται χρονομεταβλητά κανάλια και ο αλγόριθμος επαναλαμβάνεται για 10.000 χρονοσχιμές.

Τα σχήματα 10 (13), 11 (14), 12 (15) απεικονίζουν τη μέση τιμή της ισχύος εκπομπής, τον επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσης και τις τιμές της ΣΧ των χρηστών αντίστοιχα ως συνάρτηση του αύξοντα αριθμού του χρήστη, όταν αυτοί είναι κατανεμημένοι με βηματική απόσταση γύρω από το σταθμό βάσης σε αποστάσεις $d_i=d_{i-1}+50$ ($d_i=d_{i-1}+100$) (m) για $i=2,\dots,10$ και $d_1=300$ (m). Καθώς περιγράφηκε και στο προηγούμενο σενάριο προσομοίωσης, οι χρήστες 1 έως 7 θεωρείται ότι ανήκουν στην κλάση 1, ενώ οι χρήστες 8 έως 10 ότι ανήκουν στην κλάση 2. Στην περίπτωση των χρηστών που ανήκουν στην κλάση 2, τα αποτελέσματα αναδεικνύουν ότι καθώς η ποιότητα του καναλιού των χρηστών χειροτερεύει, δηλαδή ο αύξων αριθμός του χρήστη αυξάνει και στοχεύοντας να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις του σε ΠτΥ (Σχήμα 11), δηλαδή να αποκτήσει επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσης ίσο με 128 Kbps με παράγοντα ελαστικότητας 10 Kbps, τότε αυξάνει την ισχύ εκπομπής του (Σχήμα 10), γεγονός το οποίο οδηγεί στη μείωση των τιμών της ΣΧ του, αφού η ικανοποίηση που λαμβάνει από το διαμοιρασμό των πόρων του δικτύου μειώνεται (Σχήμα 12). Σχετικά με τους χρήστες που αιτούνται υπηρεσίες δεδομένων (Κλάση 1), καθώς ο αύξων αριθμός του χρήστη αυξάνει, τότε οι τιμές της ΣΧ του και ο επιτεύξιμος ρυθμός μετάδοσης μειώνεται, καθώς η ισχύς εκπομπής του χρήστη αυξάνει.

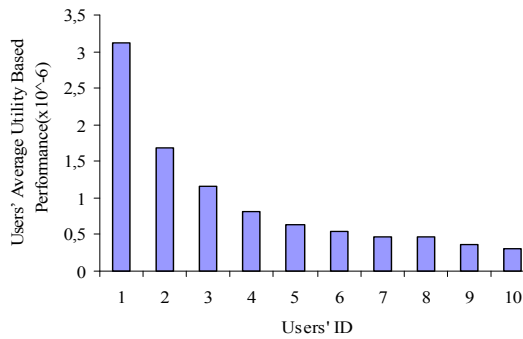
Πιο αναλυτικά, από την προσομοίωση εξάγεται ότι τόσο για τους χρήστες που αιτούνται υπηρεσίες δεδομένων όσο και για εκείνους που αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, οι απαιτήσεις σε υψηλό ρυθμό μετάδοσης και η επίτευξη του κατώτατου επιθυμητού ρυθμού μετάδοσης επιτυγχάνεται αντίστοιχα για τις δύο διαφορετικές κατηγορίες χρηστών. Η παρατήρηση αυτή επιβεβαιώνει την κατάλληλη μοντελοποίηση της συνάρτησης επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης (T_i), ώστε να αντιπροσωπεύει τις απαιτήσεις των χρηστών σε ΠτΥ εντός του MSUPC μηχανισμού και αντίστοιχα αναδεικνύει την ικανότητα της κατάλληλα μοντελοποιημένης ΣΧ των χρηστών να διαφοροποιεί τους χρήστες ανάλογα με την υπηρεσία που αυτοί αιτούνται. Συγκεκριμένα, μελετώντας τους χρήστες που αιτούνται υπηρεσίες δεδομένων, δηλαδή $i=1, \dots, 7$, η βέλτιστη σχέση ανάμεσα στη λαμβανόμενη ικανοποίηση των χρηστών από το διαμοιρασμό των πόρων του συστήματος και στην κατανάλωση ισχύος εκπομπής εμφανίζεται για μεγάλους ρυθμούς μετάδοσης ακόμα και για τους πιο απομακρυσμένους χρήστες από το σταθμό βάσης. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη μοντελοποίηση της συνάρτησης επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης, η οποία οδηγεί τους απομακρυσμένους χρήστες από το σταθμό βάσης να εκπέμπουν με υψηλή ισχύ εκπομπής, λόγω του αντίστοιχου επιθυμητού υψηλού επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης που λαμβάνουν σε αυτή την περίπτωση. Ωστόσο όμως η διαδικασία μεγιστοποίησης της ΣΧ των χρηστών,



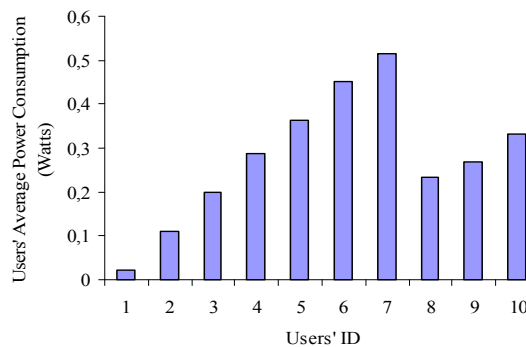
Σχήμα 10 Μέση ισχύς εκπομπής των χρηστών (βηματική απόσταση 50m)



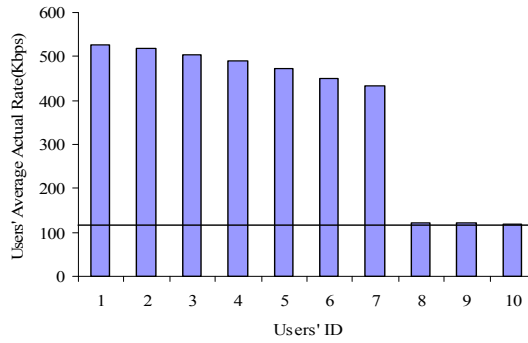
Σχήμα 11 Μέσος επιτεύξιμος ρυθμός μετάδοσης των χρηστών (βηματική απόσταση 50m)



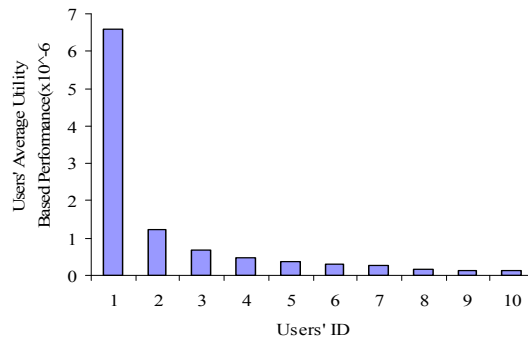
Σχήμα 12 Μέση τιμή της ΣΧ των χρηστών (βηματική απόσταση 50m)



Σχήμα 13 Μέση ισχύς εκπομπής των χρηστών (βηματική απόσταση 100m)



Σχήμα 14 Μέσος επιτεύξιμος ρυθμός μετάδοσης των χρηστών (βηματική απόσταση 100m)



Σχήμα 15 Μέση τιμή της ΣΧ των χρηστών (βηματική απόσταση 100m)

εν γένει, επιβάλλει στους χρήστες να εκπέμπουν με χαμηλή ισχύ εκπομπής, ενώ παράλληλα ο επιθυμητός επιτεύξιμος ρυθμός μετάδοσης των χρηστών που αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου επιτυγχάνεται. Τονίζεται ότι σε αυτή την κατηγορία χρηστών, η περαιτέρω αύξηση της ισχύος εκπομπής τους, η οποία έχει ως συνέπεια την περαιτέρω αύξηση του επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης, δεν έχει ειδοποιό διαφορά στην αύξηση των τιμών της ΣΧ των χρηστών, δεδομένου ότι οι απαιτήσεις σε ΠτΥ των χρηστών έχουν ήδη ικανοποιηθεί. Αυτή η συμπεριφορά των χρηστών έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του συνολικού θορύβου εντός της κυψέλης, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η απόδοση των υπηρεσιών όλων των χρηστών που εδρεύουν εντός της κυψέλης.

Εν κατακλείδι, η παράλληλη μελέτη των δύο κατηγοριών αποτελεσμάτων, σχήματα 10-12 και σχήματα 13-15, δίνει τη δυνατότητα να παρατηρηθούν οι σχέσεις που αναπτύσσονται ανάμεσα στους χρήστες που αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου και σε αυτούς που αιτούνται υπηρεσίες δεδομένων, ως προς τη συμπεριφορά τους και την απόδοσή τους, όταν οι δύο κατηγορίες χρηστών συνυπάρχουν εντός της κυψέλης και τα κανάλια των χρηστών είναι χρονομεταβλητά. Ανακεφαλαιωτικά, εξάγεται το συμπέρασμα ότι καθώς η ποιότητα του καναλιού των χρηστών χειροτερεύει (Σχήματα 13-15), ο επιτεύξιμος ρυθμός μετάδοσης των χρηστών που αιτούνται υπηρεσίες δεδομένων μειώνεται (ακόμα και για εκείνους τους χρήστες που βρίσκονται κοντά στο σταθμό βάσης), ενώ ο επιτεύξιμος ρυθμός μετάδοσης των

χρηστών που αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου παραμένει μεγαλύτερος από τον ελάχιστο επιθυμητό, ακόμα και για τους χρήστες με ιδιαίτερα κακή ποιότητα καναλιού. Αυτή η συμπεριφορά διευκολύνεται από την κατάλληλη μοντελοποίηση της συνάρτησης επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης, ώστε σε κάθε περίπτωση να επιτυγχάνεται ο ελάχιστος επιθυμητός ρυθμός μετάδοσης για τους χρήστες που αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, επιλέγοντας το κατάλληλο σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης. Επιπρόσθετα, οι χρήστες που αιτούνται υπηρεσίες δεδομένων επιτυγχάνουν υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, αλλά έχουν ως επίπτωση (κόστος) την υψηλή ισχύ εκπομπής και την αντίστοιχη μείωση των τιμών των ΣΧ τους.

3.9 Ανακεφαλαιωτικά Συμπεράσματα

Σε αυτή την ενότητα της παρούσας διδακτορικής διατριβής μελετήθηκε το πρόβλημα της αποδοτικής κατανομής ισχύος εκπομπής στη ζεύξη ανόδου ενός CDMA ασύρματου κυψελωτού δικτύου, ικανοποιώντας ταυτόχρονα τις απαιτήσεις σε ΠτΥ χρηστών που αιτούνται πολλαπλών ειδών υπηρεσίες. Στοχεύοντας στην αποδοτική αντιστοίχιση των απαιτήσεων των χρηστών σε ΠτΥ για τις διαφορετικού είδους υπηρεσίες προτάθηκε μία γενικευμένη και κατάλληλα σχεδιασμένη ΣΧ για κάθε χρήστη, η οποία σχεδιάστηκε με βάση το είδος της αιτούμενης υπηρεσίας.

Το αντίστοιχο μη κυρτό κατανεμημένο πρόβλημα βελτιστοποίησης πολλαπλών υπηρεσιών μοντελοποιήθηκε και επιλύθηκε με τη χρήση της θεωρίας παιγνίων. Με στόχο την επίλυσή του, αρχικά αποδείχθηκε η ύπαρξη και η μοναδικότητα του σημείου ισορροπίας κατά Nash για το εν λόγω παίγνιο και έπειτα προτάθηκε ένας μη κεντρικοποιημένος επαναληπτικός και χαμηλής πολυπλοκότητας αλγόριθμος για την εξεύρεση του μοναδικού σημείου ισορροπίας κατά Nash του παιγνίου. Επιπρόσθετα, η απόδοση της προτεινόμενης μοντελοποίησης για την ικανοποίηση των απαιτήσεων των χρηστών που αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου και υπηρεσίες δεδομένων επιβεβαιώθηκε μέσω αναλυτικών αποτελεσμάτων και προσομοιώσεων.

Το προτεινόμενο μοντέλο αποτελεί ένα δυναμικό εργαλείο το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αντιμετώπιση και την επίλυση προβλημάτων κατανομής πόρων σε διαφορετικών τεχνολογιών δίκτυα, π.χ. CDMA και SC-FDMA τα οποία υποστηρίζουν ποικίλων ειδών υπηρεσίες. Συνεπώς, με βάση το προτεινόμενο μοντέλο μπορεί να αντιμετωπισθεί μελλοντικά το πρόβλημα της ταυτόχρονης κατανομής πόρων σε ετερογενή ασύρματα δίκτυα, με τη χρήση μίας κοινής κατάλληλα μοντελοποιημένης ΣΧ των χρηστών, ώστε να πραγματοποιηθεί η ενιαία αντιμετώπιση των δικτύων αυτών ως προς την κατανομή των πόρων τους. Η μελέτη αυτή παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τη μελλοντική αντιμετώπισή της, έπειτα από το πέρας της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

4 Κατανομή Ισχύος Εκπομπής στη Ζεύξη Ανόδου CDMA Ασύρματων Κυψελωτών Δικτύων με Χρήση Κοστολόγησης μέσω Συναρτήσεων Χρησιμότητας: Υπηρεσίες Πραγματικού Χρόνου

Σύμφωνα με την ανάλυση που παρατέθηκε στο κεφάλαιο 2, η αποδοτική κατανομή ισχύος εκπομπής είναι μεγάλης σημασίας για την κάλυψη των απαιτήσεων των χρηστών που αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου στη ζεύξη ανόδου των CDMA ασύρματων κυψελωτών δικτύων. Προσεγγίσεις με βάση τη θεωρία παιγνίων έχουν χρησιμοποιηθεί στη βιβλιογραφία για να αντιμετωπίσουν το πρόβλημα κατανομής ισχύος εκπομπής, στοχεύοντας στη μεγιστοποίηση της ΣΧ των χρηστών. Παρόλα αυτά σε πολλές περιπτώσεις το αντίστοιχο σημείο ισορροπίας κατά Nash που προσδιορίζεται στο κάθε πρόβλημα δεν είναι ιδιαίτερα αποδοτικό για την κατανομή των πόρων του συστήματος. Με σκοπό την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος σε αυτό το κεφάλαιο προτείνεται μία προσέγγιση μεγιστοποίησης των ΣΧ των χρηστών μέσω ενός θεωρητικού πλαισίου που υιοθετεί τη θεωρία παιγνίων και κάνει χρήση κυρτής κοστολόγησης ως προς την ισχύ εκπομπής των χρηστών, ώστε να επιτύχει μία αποδοτική κατανομή της ισχύος εκπομπής των χρηστών στη ζεύξη ανόδου CDMA ασύρματων κυψελωτών δικτύων υποστηρίζοντας υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, με συγκεκριμένες απαιτήσεις σε ΠτΥ. Επιπρόσθετα, προσδιορίζεται αναλυτικά μία Pareto βέλτιστη λύση του επαναδιατυπωμένου μη συνεργατικού παιγνίου. Η αποδοτικότητα της προτεινόμενης προσέγγισης εξετάζεται μέσω αναλυτικών προσομοιώσεων και αποτελεσμάτων και το προτεινόμενο μοντέλο συγκρίνεται ως προς τις τιμές των ΣΧ των χρηστών και την ισχύ εκπομπής τους με το αντίστοιχο παίγνιο βέλτιστης κατανομής ισχύος εκπομπής, το οποίο υιοθετεί γραμμική κοστολόγηση ως προς την ισχύ εκπομπής των χρηστών.

4.1 Σχετική Βιβλιογραφία

Αρκετές ερευνητικές προσπάθειες έχουν αφιερωθεί στο πρόβλημα της αποδοτικής κατανομής πόρων στα CDMA ασύρματα κυψελωτά δίκτυα στοχεύοντας στη μεγιστοποίηση της απόδοσης του δικτύου. Ένα βασικό στοιχείο των πόρων του συστήματος προς κατανομή είναι η ισχύς εκπομπής των χρηστών [18]. Πιο αναλυτικά, υπάρχουν δύο βασικοί λόγοι για έναν χρήστη ώστε να στοχεύει στην αποδοτική κατανομή της ισχύος εκπομπής του. Ο πρώτος λόγος είναι η αύξηση της χωρητικότητας της κυψέλης σε πλήθος χρηστών, η οποία επιτυγχάνεται από τη μείωση των παρεμβολών [32] και ο δεύτερος λόγος είναι η περιορισμένη ενεργειακή ζωή των χρηστών, λόγω της περιορισμένης μπαταρίας τους. Επιπρόσθετα, η εγωιστική συμπεριφορά των χρηστών, καθώς επίσης και η ανάγκη να υποστηριχθούν διαφορετικών ειδών υπηρεσίες επιτρέπει τη μοντελοποίηση του προβλήματος κατανομής ισχύος στη ζεύξη ανόδου των CDMA ασύρματων κυψελωτών δικτύων ως ένα μη συνεργατικό παίγνιο, όπου κάθε χρήστης επιδιώκει να μεγιστοποιήσει τη λαμβανόμενη ικανοποίησή του από την κατανομή των πόρων του συστήματος, η οποία εκφράζεται μέσω κατάλληλα μοντελοποιημένων ΣΧ [4], [5].

Στη βιβλιογραφία έχουν χρησιμοποιηθεί προσεγγίσεις με βάση τη θεωρία παιγνίων ώστε να επιλυθεί το πρόβλημα βέλτιστης κατανομής ισχύος εκπομπής, στοχεύοντας στη μεγιστοποίηση των ΣΧ των χρηστών [4]. Το αποτέλεσμα της επίλυσης του μη συνεργατικού παιγνίου είναι ένα σημείο ισορροπίας κατά Nash [5], το οποίο όμως είναι πιθανόν να μην είναι ιδιαίτερα αποδοτικό από την κοινωνική οπτική γωνία εξαιτίας της εγωιστικής και ακόρεστης συμπεριφοράς των χρηστών [9]. Για το λόγο αυτό η κοστολόγηση των πόρων του συστήματος αναδεικνύεται ως ένα δυναμικό εργαλείο για την εξεύρεση ενός περισσότερο κοινωνικού σημείου ισορροπίας κατά Nash. Στην πρόσφατη ερευνητική δραστηριότητα έχουν προταθεί γραμμικές μέθοδοι κοστολόγησης της ισχύος εκπομπής των χρηστών, οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία κέρδους για το σύστημα και την παρότρυνση των χρηστών να χρησιμοποιούν τους πόρους του συστήματος πιο αποδοτικά [22], [17], [34]. Η χρήση γραμμικής κοστολόγησης ως προς την ισχύ εκπομπής των χρηστών επέτρεψε τη μοντελοποίηση ιδιαίτερα ενδιαφερόντων παιγνίων, τα οποία κατέληξαν σε εξίσου ενδιαφέροντα αποτελέσματα [22]. Ωστόσο όμως η γραμμική κοστολόγηση ως προς την ισχύ εκπομπής των χρηστών δεν αντιπροσωπεύει ρεαλιστικά συστήματα, διότι οι επιπτώσεις που προκαλεί ένας χρήστης στους γείτονές του δεν είναι ευθέως ανάλογη της ισχύος εκπομπής του. Για το λόγο αυτό η κυρτή κοστολόγηση, σύμφωνα με την οποία το κόστος που επιβάλλεται σε κάθε χρήστη καθώς αυξάνει την ισχύ εκπομπής του αυξάνεται και αυτό, αναδεικνύεται ως η καταλληλότερη επιλογή μορφής κοστολόγησης.

Συνεπώς στο παρόν κεφάλαιο της διδακτορικής διατριβής μελετάται ακριβώς το θέμα που περιγράφηκε προηγουμένως λαμβάνοντας υπόψη την εξυπηρέτηση χρηστών που αιτούνται

υπηρεσίες πραγματικού χρόνου. Συγκεκριμένα, αρχικά περιγράφεται το μοντέλο του συστήματος το οποίο μελετάται και έπειτα αποδεικνύεται η μη αποδοτικότητα του σημείου ισορροπίας κατά Nash του παιγνίου χωρίς χρήση κοστολόγησης ως προς την ισχύ εκπομπής των χρηστών [23], [35], [36]. Έπειτα εισάγεται η καινοτόμος ιδέα της κυρτής κοστολόγησης ως προς την ισχύ εκπομπής των χρηστών ως μέσο για τη βελτίωση της αποδοτικότητας του σημείου ισορροπίας κατά Nash και μοντελοποιείται το αντίστοιχο μη συνεργατικό παίγνιο κατανομής ισχύος εκπομπής στη ζεύξη ανόδου ενός CDMA ασύρματου κυψελωτού δικτύου με χρήση κυρτής κοστολόγησης (Uplink Power Control game with Pricing - UPCP) υποστηρίζοντας τις απαιτήσεις σε ΠτΥ χρηστών που αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου. Στη συνέχεια το προτεινόμενο παίγνιο επιλύεται προσδιορίζοντας το Pareto βέλτιστο σημείο ισορροπίας κατά Nash, το οποίο αποδεικνύεται ότι είναι μία βελτιωμένη λύση του συστήματος ως προς την αποδοτικότητά του σε σχέση με το αντίστοιχο σημείο ισορροπίας κατά Nash του παιγνίου κατανομής ισχύος εκπομπής χωρίς τη χρήση κοστολόγησης. Ολοκληρώνοντας την ανάλυση του προβλήματος παρουσιάζονται αναλυτικά αποτελέσματα και προσομοιώσεις τα οποία αναδεικνύουν τον ορθό και κατάλληλο ορισμό και επίλυση του υπό μελέτη προβλήματος.

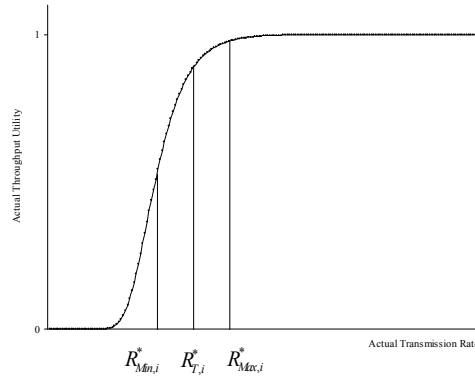
4.2 Μοντέλο Συστήματος & Σχετικές Πληροφορίες

Στο παρόν κεφάλαιο μελετάται η ζεύξη ανόδου ενός CDMA ασύρματου κυψελωτού δικτύου το οποίο υποστηρίζει $N(t)$ χρήστες, οι οποίοι έχουν συνεχώς δεδομένα να μεταδώσουν και με $S(t)$ συμβολίζεται το αντίστοιχο σύνολό τους. Μία χρονοσχισημή είναι ένα δεδομένο χρονικό διάστημα και στη διάρκειά της μπορούν να μεταδίδονται ένα ή περισσότερα πακέτα δεδομένων. Το μοντέλο του συστήματος που υιοθετείται στο παρόν κεφάλαιο ομοιάζει με αυτό που αναλύσαμε στην υποενότητα 2.2 και αποτελεί το υπόβαθρο ενός CDMA ασύρματου κυψελωτού δικτύου.

4.2.1 Μοντελοποίηση & Επίλυση Παιγνίου Κατανομής Ισχύος (Uplink Power Control game - UPC)

Το επίπεδο της ικανοποίησης που λαμβάνει ένας χρήστης από την εξασφάλιση των απαιτήσεων του σε ΠτΥ μπορεί να ποσοτικοποιηθεί με τη βοήθεια της ΣΧ των χρηστών U_i , η οποία εκφράζει τη σχέση ανάμεσα στον επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσης στο σταθμό βάσης και στην αντίστοιχη κατανάλωση ισχύος εκπομπής ανά χρονοσχισημή [23]. Η ΣΧ του χρήστη i μπορεί να μοντελοποιηθεί ως ακολούθως.

$$U_i(R_i^*, P_i, \mathbf{P}_{-i}) = \frac{T_i(R_{Max,i}^* f(\gamma_i), P_i, \mathbf{P}_{-i})}{P_i} \quad (36)$$



Σχήμα 16 Συνάρτηση επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης για υπηρεσίες πραγματικού χρόνου

όπου $R_i^* \equiv R_{Max,i}^* f(\gamma_i)$ είναι ο επιτεύξιμος ρυθμός μετάδοσης του χρήστη i στην υπό μελέτη χρονοσχισμή, $R_{Max,i}^*$ είναι ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης του χρήστη i , ο οποίος εξαρτάται από το είδος της υπηρεσίας που αιτείται ο χρήστης και με f_i συμβολίζεται η συνάρτηση απόδοσης του χρήστη, η οποία αντιπροσωπεύει την πιθανότητα επιτυχούς μετάδοσης ενός πακέτου υπό σταθερό ρυθμό μετάδοσης [36].

Επιπρόσθετα, η συνάρτηση επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης συμβολίζεται με $T_i(R_{Max,i}^* f(\gamma_i), P_i, \mathbf{P}_{-i})$ και είναι μία σιγμοειδής συνάρτηση ως προς τον επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσης R_i^* και αντιπροσωπεύει το βαθμό ικανοποίησης ενός χρήστη σε σχέση με τις απαιτήσεις του σε επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσης ανάλογα με την υπηρεσία την οποία αιτείται και τις απαιτήσεις του σε ΠτΥ σε κάθε χρονοσχισμή. Οι ιδιότητες και η μορφή της συνάρτησης επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης των χρηστών που αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου έχουν αναλυθεί διεξοδικά στην υποενότητα 2.3.

Οδώνοντας προς τη μοντελοποίηση του προβλήματος κατανομής ισχύος εκπομπής (UPC) στη ζεύξη ανόδου ενός CDMA ασύρματου κυψελωτού δικτύου, συμβολίζεται με $G = [S, \{A_i\}, \{U_i\}]$ το παίγνιο κατανομής ισχύος εκπομπής χωρίς κοστολόγηση (UPC game), όπου S είναι το σύνολο των χρηστών/παιχτών και $A_i = [0, P_i^{Max}]$ B^n είναι το σύνολο των δυνατών στρατηγικών του χρήστη i . Κάθε δυνατή στρατηγική από το σύνολο A_i μπορεί να γραφεί ως $a_i = (P_i)$. Επιπρόσθετα, κάθε χρήστης που εδρεύει εντός της κυψέλης στοχεύει στη μεγιστοποίηση της ΣΧ του U_i , συνεπώς ο αντίστοιχος στόχος του UPC μηχανισμού μπορεί να εντοπισθεί και προσδιοριστεί ως η μεγιστοποίηση της ΣΧ του κάθε χρήστη ανά χρονοσχισμή t και να μοντελοποιηθεί στο ακόλουθο πρόβλημα.

$$(UPC \text{ παίγνιο}) \quad \max_{P_i \in A_i} U_i = \max_{P_i \in A_i} U_i(P_i, \mathbf{P}_{-i}) \quad \text{for } i \in S. \quad (37)$$

Η ύπαρξη και η μοναδικότητα του σημείου ισορροπίας κατά Nash έχει αποδειχθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο της παρούσας διδακτορικής διατριβής και η αναλυτική απόδειξη έχει επιπλέον δημοσιευτεί στη δημοσίευση [36]. Σύμφωνα με αυτή την ανάλυση το μοναδικό σημείο ισορροπίας κατά Nash ως προς την ισχύ εκπομπής των χρηστών και για κάθε χρήστη $i \in S$ δίδεται ως ακολούθως.

$$P_i^* = \min \left\{ \frac{\gamma_i^* R_{Max,i}^* I_{-i}(\bar{P}_{-i})}{WG_i}, P_i^{Max} \right\} \quad (38)$$

όπου γ_i^* είναι η μοναδική θετική λύση της εξίσωσης $\frac{\partial T_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i} \cdot \gamma_i - T_i(\gamma_i) = 0$.

4.2.2 Μη Αποδοτικότητα του Σημείου Ισορροπίας κατά Nash του Παιγνίου Κατανομής Ισχύος Εκπομπής χωρίς Χρήση Κοστολόγησης

Το σημείο ισορροπίας κατά Nash που προσδιορίστηκε προηγουμένως για το παίγνιο κατανομής ισχύος εκπομπής χωρίς χρήση κάποιας πολιτικής κοστολόγησης προσφέρει μία βέλτιστη λύση σε ένα καταναμημένο πρόβλημα λήψης αποφάσεων. Συνεπώς, το σημείο ισορροπίας κατά Nash P_i^* του UPC παιγνίου αναμένεται να είναι λιγότερο αποδοτικό για το διαμοιρασμό των πόρων του συστήματος σε σχέση με ένα αντίστοιχο αποτέλεσμα το οποίο εξάγεται από μία κεντρικοποιημένη λήψη αποφάσεων. Ακολουθώντας παραπλήσια ανάλυση με αυτή που προτάθηκε στη δημοσίευση [22], αποδεικνύεται ότι το σημείο ισορροπίας κατά Nash του μη συνεργατικού παιγνίου κατανομής ισχύος εκπομπής χωρίς χρήση κοστολόγησης (UPC) είναι μη αποδοτικό. Συνεπώς, ο βασικός στόχος του παρόντος κεφαλαίου είναι να βελτιώσει την αποδοτικότητα του σημείου ισορροπίας κατά την Pareto έννοια.

Ορισμός 6: Ένα διάνυσμα ισχύος εκπομπής \mathbf{P}^* είναι Pareto βέλτιστο εάν δεν υπάρχει κανένα άλλο διάνυσμα ισχύος εκπομπής \mathbf{P} τέτοιο ώστε να ισχύει $U_i(\mathbf{P}) \geq U_i(\mathbf{P}^*)$ για όλους τους χρήστες $i \in S$ και $U_j(\mathbf{P}) > U_j(\mathbf{P}^*)$ για ορισμένους χρήστες $j \in S$.

Συγκεκριμένα, μία Pareto βέλτιστη λύση έχει τη χαρακτηριστική ιδιότητα ότι μπορεί να βελτιώσει τη ΣΧ ορισμένων χρηστών, χωρίς να επηρεάσει τους υπόλοιπους χρήστες εντός του δικτύου. Συνεπώς, στοχεύοντας στην αποδοτική κατανομή ισχύος εκπομπής στους χρήστες που εδρεύουν εντός της κυψέλης, οι χρήστες πρέπει να λαμβάνουν υπόψη εκτός από την περιορισμένη ενεργειακή τους ζώή (σύμφωνα με την οποία η βέλτιστη στρατηγική είναι να εκπέμπουν με χαμηλές τιμές ισχύος εκπομπής ικανοποιώντας ταυτόχρονα τις απαιτήσεις τους σε ΠτΥ) και τις επιπτώσεις που προκαλούν από την προσωπική ισχύ εκπομπής τους στους υπόλοιπους χρήστες που εδρεύουν εντός της κυψέλης μέσω του θορύβου που προκαλούν. Ένας βασικός τρόπος που έχει προταθεί στη βιβλιογραφία για να αντιμετωπιστεί

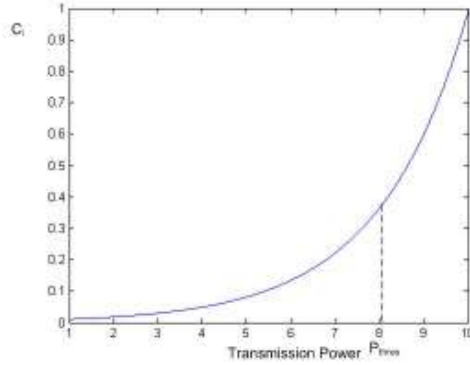
η εγωιστική συμπεριφορά των χρηστών, οι οποίοι προσπαθούν αποκλειστικά να μεγιστοποιήσουν τη ΣΧ τους ρυθμίζοντας κατάλληλα την ισχύ εκπομπής τους P_i , είναι οι πολιτικές κοστολόγησης [17], [22], [34]. Τα πλεονεκτήματα που πηγάζουν από την κοστολόγηση της ισχύος εκπομπής των χρηστών αναλύονται διεξοδικά στην επόμενη ενότητα.

4.3 Παίγνιο Κατανομής Ισχύος Εκπομπής με Χρήση Κυρτής Πολιτικής Κοστολόγησης

Καθώς αναφέρθηκε προηγουμένως, η ιδέα των πολιτικών κοστολόγησης προτάθηκε αρχικά από τους οικονομολόγους και έχει ήδη εφαρμοστεί από τους ερευνητές στο πεδίο των ασύρματων δικτύων. Οι πολιτικές κοστολόγησης με βάση τη χρήση πόρων του συστήματος έχουν αναδειχθεί ως ένα ιδιαίτερα αποδοτικό εργαλείο ώστε να βελτιωθεί η κοινωνική συμπεριφορά των χρηστών. Η υιοθέτηση της κατάλληλης πολιτικής κοστολόγησης ανά περίπτωση δημιουργεί μεγαλύτερο κέρδος στο σύστημα και δίνει κίνητρο στους χρήστες ώστε να χρησιμοποιούν τους πόρους του συστήματος πιο αποδοτικά. Στην πρόσφατη βιβλιογραφία, οι πολιτικές κοστολόγησης με βάση τη χρήση των πόρων του συστήματος έχουν προταθεί ως γραμμικές κοστολογήσεις ως προς την ισχύ εκπομπής των χρηστών P_i , σύμφωνα με την οποία ο χρήστης κοστολογείται αναλογικά με την ισχύ εκπομπής με την οποία εκπέμπει P_i [22], [17], [34]. Ωστόσο όμως η συγκεκριμένη πολιτική κοστολόγησης είναι ιδιαίτερα απλοποιημένη, μη ρεαλιστική και δεν αντιπροσωπεύει ικανοποιητικά τη συμπεριφορά των χρηστών και του συστήματος, δεδομένου ότι οι επιπτώσεις που προκαλεί ο χρήστης στους υπόλοιπους χρήστες που εδρεύουν εντός της κυψέλης δεν είναι ίδιες σε όλο το εύρος της ισχύος εκπομπής του. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το γεγονός ότι εάν η ισχύς εκπομπής ενός χρήστη υπερβεί ένα προκαθορισμένο από το σύστημα κατώφλι, P_{thres} , τότε το κόστος που δέχεται ο χρήστης αυξάνει κατακόρυφα, διότι οι επιπτώσεις που προκαλεί στο δίκτυο είναι καταστροφικές. Συνεπώς, μία ρεαλιστική πολιτική κοστολόγησης αποτελεί μία κυρτή συνάρτηση ως προς την ισχύ εκπομπής του χρήστη P_i .

Ακολουθώντας τον παραπάνω ισχυρισμό, προτείνεται το μη συνεργατικό παίγνιο βέλτιστης κατανομής ισχύος εκπομπής στη ζεύξη ανόδου CDMA ασύρματων κυψελωτών δικτύων με χρήση κυρτής κοστολόγησης ως προς την ισχύ εκπομπής των χρηστών (UPCP παίγνιο). Το UPCP παίγνιο συμβολίζεται ως $G_p = [S, \{A_i\}, \{U_i^{net}\}]$, όπου οι απαιτήσεις των χρηστών σε ΠτΥ και οι περιορισμοί που τίθενται από τα κοινωνικά κριτήρια εκφράζονται μέσω μίας κατάλληλα μοντελοποιημένης συνολικής ΣΧ U_i^{net} ως ακολούθως:

$$U_i^{net}(P_i, \mathbf{P}_{-i}) = \frac{T_i(R_{Max,i}^* f(\gamma_i), P_i, \mathbf{P}_{-i})}{P_i} - c_i(P_i, \mathbf{P}_{-i}) \quad (39)$$



Σχήμα 17 Κυρτή συνάρτηση κοστολόγησης ως προς την ισχύ εκπομπής

όπου $c_i : P \rightarrow \mathfrak{R}_+^1$ είναι η κυρτή συνάρτηση κοστολόγησης ως προς την ισχύ εκπομπής για το χρήστη $i \in S$. Χωρίς βλάβη της γενικότητας και αποκλειστικά για λόγους παρουσίασης, στο συγκεκριμένο κεφάλαιο υιοθετείται μία εκθετική κυρτή συνάρτηση κοστολόγησης ως προς την ισχύ εκπομπής των χρηστών.

$$c_i(P_i, \mathbf{P}_{-i}) = c(e^{P_i} - 1) \quad (40)$$

όπου $c \in \mathfrak{R}_+^1$ είναι ο συντελεστής κοστολόγησης.

4.4 Μοντελοποίηση και Επίλυση του Παιγνίου

Το UPCP πρόβλημα βελτιστοποίησης μπορεί να εκφραστεί ως ένα πρόβλημα μεγιστοποίησης για κάθε χρήστη $i \in S$ της ΣΧ του.

(UPCP παίγνιο)

$$\max_{P_i \in \mathcal{A}_i} U_i^{net}(P_i, \mathbf{P}_{-i}) = \frac{T_i(R_{Max,i}^* f(\gamma_i), P_i, \mathbf{P}_{-i})}{P_i} - c_i(P_i, \mathbf{P}_{-i}), \quad i \in S. \quad (41)$$

Εύκολα μπορεί να παρατηρηθεί ότι το ανωτέρω UPCP παίγνιο έχει την ίδια δομή και φιλοσοφία με το UPC παίγνιο με διαφορετική όμως αντικειμενική συνάρτηση. Ωστόσο όμως αυτή η διαφορά επιβάλλει τη διαφορετική αντιμετώπιση του προβλήματος, δεδομένου ότι η αντικειμενική συνάρτηση του UPC παιγνίου είναι ημι-κοίλη [35] ως προς την ισχύ εκπομπής από όπου εύκολα εξάγεται και προσδιορίζεται το μοναδικό σημείο ισορροπίας κατά Nash του παιγνίου. Αντίθετα όμως η αντικειμενική συνάρτηση του UPCP παιγνίου δεν έχει τη συγκεκριμένη επιθυμητή ιδιότητα, συνεπώς το σημείο ισορροπίας κατά Nash δεν προσδιορίζεται κατά τον ίδιο τρόπο. Για το λόγο αυτό ακολουθείται μία αναλυτική μαθηματική προσέγγιση για τον προσδιορισμό του.

Πριν τη μαθηματική ανάλυση για τον προσδιορισμό του σημείου ισορροπίας κατά Nash θα μελετηθούν οι σχετικές θέσεις, εντός του πεδίου ορισμού τους, των χαρακτηριστικών τιμών

της ισχύος εκπομπής, P_{infl}^T και P^* που προσδιορίζεται από τη σχέση (38) και τις ιδιότητες της ΣΧ των χρηστών που αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου. Συγκεκριμένα σε προηγούμενο κεφάλαιο της παρούσας διδακτορικής διατριβής έχει αποδειχθεί ότι η σύνθετη συνάρτηση δύο επιμέρους σιγμοειδών συναρτήσεων, $T_i(P_i) \equiv T_i(R_{Max,i}^* f(\gamma_i), P_i, P_{-i})$, είναι επίσης σιγμοειδής συνάρτηση με μοναδικό σημείο καμπής P_{infl}^T [35].

Το ακόλουθο λήμμα προσδιορίζει τη σχετική θέση της τιμής του μοναδικού σημείου καμπής P_{infl}^T της συνάρτησης επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης $T_i(P_i)$ και της μοναδικής θετικής

λύσης $P_i^* = \min \left\{ \frac{\gamma_i^* R_{Max,i}^* I_{-i}(\bar{P}_{-i})}{WG_i}, P_i^{Max} \right\}$ του UPC παιγνίου.

Λήμμα 7: Δεδομένων: (α) της συνάρτησης επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης $T(P) \equiv T(R_{Max}^* f(\gamma))$ η οποία είναι σιγμοειδής [35] ως προς την ισχύ εκπομπής P και έχει μοναδικό σημείο καμπής P_{infl}^T και (β) της ΣΧ $U(P) = \frac{T(P)}{P}$ η οποία είναι ημι-κοίλη [35] ως προς την ισχύ εκπομπής P και έχει μοναδικό ολικό σημείο μεγίστου P^* , τότε αποδεικνύεται δια της εις άτοπον απαγωγής ότι ισχύει

$$P_{infl}^T < P^* \quad (42)$$

Καθώς θα αναλυθεί στο ακόλουθο λήμμα, το προηγούμενο λήμμα έχει καθοριστικό ρόλο στον προσδιορισμό των ιδιοτήτων της ΣΧ των χρηστών.

Λήμμα 8: Δεδομένης της συνάρτησης επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης $T(P) \equiv T(R_{Max}^* f(\gamma))$, η οποία είναι σιγμοειδής ως προς την ισχύ εκπομπής P και έχει μοναδικό σημείο καμπής P_{infl}^T και της ΣΧ $U(P) = \frac{T(P)}{P}$, η οποία είναι ημι-κοίλη ως προς την ισχύ εκπομπής και έχει ένα μοναδικό σημείο ολικού μεγίστου P^* , τότε υπάρχει μία κρίσιμη τιμή της ισχύος εκπομπής $P_{crit} \in [P_{infl}^T, P^*)$ τέτοια ώστε η ΣΧ $U^{net}(P) = U(P) - c(P)$ είναι γνησίως φθίνουσα συνάρτηση ως προς την ισχύ εκπομπής στο διάστημα $P \in [P_{crit}, +\infty)$.

Το προηγούμενο λήμμα προσδιορίζει τη μορφή της συνολικής ΣΧ U^{net} των χρηστών σε σχέση με την ισχύ εκπομπής τους P . Επιπρόσθετα, το λήμμα αυτό αναδεικνύει το γεγονός ότι το ολικό μέγιστο της ΣΧ των χρηστών βρίσκεται περιορισμένο εντός του διαστήματος $(0, P_{crit}]$. Η ακόλουθη πρόταση δηλώνει την ύπαρξη και τη μοναδικότητα του σημείου ισορροπίας κατά Nash του προτεινόμενου UPCP παιγνίου.

Πρόταση 5: Η συνολική ΣΧ $U^{net}(P)$ των χρηστών του UPCP παιγνίου έχει ένα ολικό μέγιστο, P_{net}^* , στο διάστημα $(0, P_{crit}]$, το οποίο είναι το σημείο ισορροπίας κατά Nash του UPCP παιγνίου.

Απόδειξη: Με βάση τον ορισμό της συνολικής ΣΧ των χρηστών στην εξίσωση (39), εξάγεται εύκολα ότι η συνάρτηση είναι $U^{net}(P)$ είναι συνεχής και $C^{(n)}$ φορές παραγωγίσιμη στο διάστημα $(0, P_{crit}]$. Βασιζόμενοι στο θεώρημα μέγιστης τιμής ((Weierstrass) Extreme Value Theorem - E.V.T.) [37] εξάγεται ότι η συνολική ΣΧ έχει μοναδικό ολικό μέγιστο P_{net}^* , το οποίο είναι το μοναδικό σημείο ισορροπίας κατά Nash του UPCP παιγνίου. ■

Η προηγούμενη πρόταση δηλώνει και αποδεικνύει την ύπαρξη και μοναδικότητα του σημείου ισορροπίας κατά Nash του UPCP παιγνίου. Ωστόσο όμως η προηγούμενη πρόταση δεν προσδιορίζει την τιμή του διανύσματος της ισχύος εκπομπής P_{net}^* των χρηστών στο σημείο ισορροπίας κατά Nash. Για το λόγο αυτό το επόμενο θεώρημα προσδιορίζει τη συγκεκριμένη τιμή της ισχύος εκπομπής στο σημείο ισορροπίας κατά Nash, P_{net}^* .

Θεώρημα 1: Το σημείο ισορροπίας κατά Nash του μη συνεργατικού παιγνίου (41) δίδεται από την τιμή P_{net}^* , $P_{net}^* \in (0, P_{crit}]$

$$P_{net,i}^* = \min \left\{ \min_{\Lambda_{k,i}} \left(\arg \max_{\Lambda_{k,i}} \left(U_i^{net}(\Lambda_{k,i}) \right) \right), P_i^{Max} \right\}$$

$$\Lambda_{k,i} = \{P_{1,i}^*, P_{2,i}^*, \dots, P_{K,i}^*\}, k = 1, \dots, K, i \in S$$

$$s.t. \quad \left. \frac{\partial U_i^{net}(P_i)}{\partial P_i} \right|_{P_i=P_{net,i}^*} = 0 \quad \left. \frac{\partial^2 U_i^{net}(P_i)}{\partial^2 P_i} \right|_{P_i=P_{net,i}^*} < 0 \quad (43)$$

όπου $\Lambda_{k,i} = \{P_{1,i}^*, P_{2,i}^*, \dots, P_{K,i}^*\}, k = 1, \dots, K, i \in S$ είναι το σύνολο των τοπικών μεγίστων της συνάρτησης U_i^{net} στο υπό μελέτη διάστημα $P_i \in (0, P_{crit}]$.

4.5 Αλγόριθμος Κατανομής Ισχύος με Χρήση Κυρτής Κοστολόγησης

Σε αυτή την ενότητα προτείνεται ένας κατανεμημένος επαναληπτικός αλγόριθμος χαμηλής πολυπλοκότητας, ο οποίος προσδιορίζει το μοναδικό σημείο ισορροπίας κατά Nash, P_{net}^* του UPCP παιγνίου.

Αλγόριθμος Τμήμα I (Τμήμα Δικτύου)

Βήμα 1^ο: Ανακοίνωσε τον αρχικό συντελεστή κοστολόγησης $c=0$ σε όλους τους χρήστες i , $i \in S$.

Βήμα 2^ο: Κάθε χρήστης προσδιορίζει το σημείο ισοροπίας κατά Nash P_{net}^* (σύμφωνα με το δεύτερο τμήμα του αλγορίθμου) και υπολογίζει την τιμή της ΣΧ του U_i^{net} , $i \in S$.

Βήμα 3^ο: Αύξησε την τιμή του συντελεστή κοστολόγησης $c := c + \Delta c$ και ανακοίνωσε την σε όλους τους χρήστες.

Βήμα 4^ο: Εάν η συνολική ΣΧ των χρηστών δε βελτιώνεται ως προς τις τιμές της, δηλαδή $U_i^{net}(c) > U_i^{net}(c + \Delta c)$ για όλους τους χρήστες $i \in S$ τότε σταμάτα και θέσε $c_{best} = c$. Σε κάθε άλλη περίπτωση επέστρεψε στο βήμα 2.

Αλγόριθμος Τμήμα II (Τμήμα Χρήστη)

Βήμα 1^ο: Στην αρχή κάθε χρονοσχιμής t , ο χρήστης i , $i \in S$, εκπέμπει με μία τυχαία επιλεγμένη τιμή ισχύος εκπομπής (δηλαδή $0 \leq P_i^{*(0)} \leq P_i^{Max}$). Θέσε $l=0$ και συνεπώς $P_i^{*(0)}$, $i \in S$.

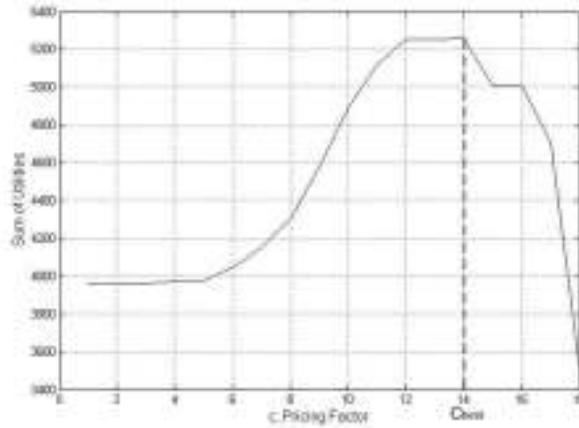
Βήμα 2^ο: Δεδομένων των τιμών της ισχύος εκπομπής όλων των χρηστών, οι οποίες ευρυσκεπέμπονται από το σταθμό βάσης, όταν αυτός εκπέμπει μέσω ευρυσκεπομπής το συνολικό θόρυβο εντός της κυψέλης $I^{(l)}(P^{(l)})$, κάθε χρήστης προσδιορίζει τις παρεμβολές που δέχεται από τους γείτονές του $I_{-i}^{(l)}(P_{-i}^{(l)})$ και επαναπροσδιορίζει την ισχύ εκπομπής του, $P_i^{*(l+1)}$, με βάση τη σχέση (43).

Βήμα 3^ο: Εάν οι τιμές της ισχύος εκπομπής συγκλίνουν (δηλαδή $|P_i^{*(l+1)} - P_i^{*(l)}| \leq 10^{-5}$) τότε σταμάτα.

Βήμα 4^ο: Σε κάθε άλλη περίπτωση, θέσε $l=l+1$ και επέστρεψε στο βήμα 2.

4.6 Αριθμητικά Αποτελέσματα

Σε αυτή την ενότητα παρατίθενται ορισμένα αριθμητικά αποτελέσματα τα οποία αναδεικνύουν τη λειτουργία και τα χαρακτηριστικά του προτεινόμενου UPCP αλγορίθμου και παρουσιάζουν μέσω μίας συγκριτικής μελέτης τα πλεονεκτήματα που πηγάζουν από την υιοθέτηση της κυρτής κοστολόγησης ως προς την ισχύ εκπομπής. Στο σύνολο της προτεινόμενης ανάλυσης μελετάται η ζεύξη ανόδου ενός ασύρματου CDMA κυψελωτού δικτύου το οποίο αποτελείται από μία μοναδική κυψέλη και υποστηρίζει N ασύρματους



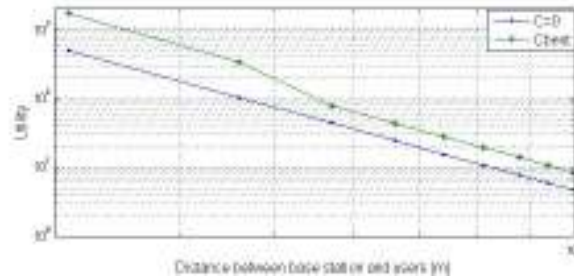
Σχήμα 18 Άθροισμα των τιμών της ΣX των χρηστών ως συνάρτηση του συντελεστή κοστολόγησης

χρήστες οι οποίοι έχουν συνεχώς δεδομένα να μεταδώσουν ($N=9$) και αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, π.χ. υπηρεσίες φωνής. Κάθε προσομοίωση διαρκεί 10.000 χρονοσχιμές και ισχύει $P_i^{Max} = 2 \text{ Watts}$, $W=10^6 \text{ Hz}$ και $I_o=5*10^{-16}$. Το κέρδος του καναλιού κάθε χρήστη μοντελοποιείται ως: $G_i = \frac{K_i}{d_i^a}$, όπου d_i είναι η απόσταση του χρήστη i από το σταθμό βάσης, a είναι ο εκθέτης απωλειών εξαιτίας απόστασης ($a=4$) και K_i είναι μία λογαριθμοκανονική κατανομή τυχαίας μεταβλητής με μέση τιμή θ και διακύμανση $\sigma^2=8(\text{db})$, η οποία αντιπροσωπεύει τα φαινόμενα σκίασης.

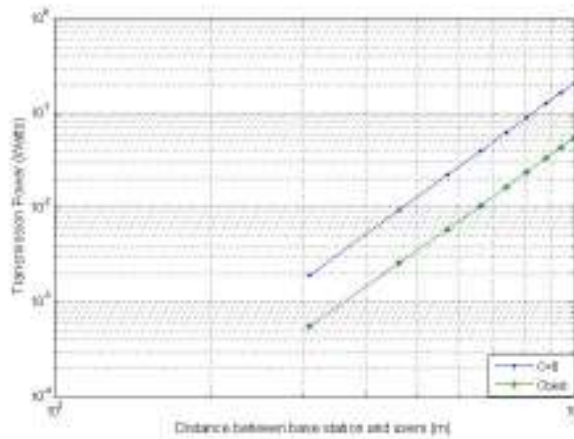
Αναφορικά με τα χαρακτηριστικά των υπηρεσιών πραγματικού χρόνου και συγκεκριμένα της υπηρεσίας φωνής, οι χρήστες επιθυμούν επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσης $R_{T,i}^* = 64 \text{ Kbps}$, ενώ ο παράγοντας ελαστικότητας είναι $EF_i = 10 \text{ Kbps}$, για κάθε χρήστη $i \in S$. Αποκλειστικά για λόγους παρουσίασης, κάθε χρήστης υιοθετεί μία συνάρτηση απόδοσης $f_i(\gamma_i) = (1 - e^{-3.7 \cdot \gamma_i})^M$, $M=80$ και μία συνάρτηση επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης $T_i(R_i^*) = (1 - e^{-(R_i^* - R_{Min,i}^*)})^{M_{T,i}}$ όπου $R_{Min,i}^* = R_{T,i}^* - EF_i = 54000 \text{ bps}$, $M_{T,i} = 2160$. Επιπρόσθετα, το σύστημα επιβάλλει στους χρήστες μία κυρτή πολιτική κοστολόγησης ως προς την ισχύ εκπομπής τους, $c_i(P_i) = c \cdot (e^{P_i} - 1)$, όπου c είναι ο συντελεστής κοστολόγησης.

Στο σχήμα 18 παρουσιάζεται το άθροισμα των τιμών των ΣX των χρηστών, όταν εκτέμουν με τις αντίστοιχες τιμές ισχύος εκπομπής στο σημείο ισορροπίας κατά Nash για αυξανόμενες βηματικά τιμές του συντελεστή κοστολόγησης c . Η αύξηση της τιμής του συντελεστή κοστολόγησης τερματίζεται εάν οι τιμές των ΣX των χρηστών δεν μπορούν περαιτέρω να βελτιωθούν και κατά αυτόν τον τρόπο προσδιορίζεται η βέλτιστη τιμή του $c=c_{best}$.

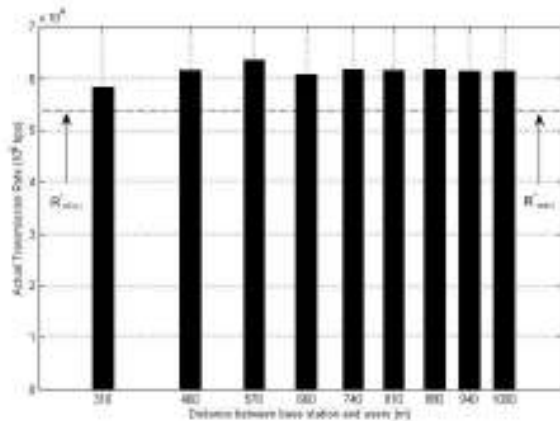
Στα σχήματα 19 και 20 παρουσιάζονται για κάθε χρήστη, οι τιμές της ΣX του και οι αντίστοιχες τιμές της ισχύος εκπομπής του για δύο διαφορετικά σενάρια. Στο πρώτο σενάριο μελετάται το UPC παίγνιο χωρίς τη χρήση κοστολόγησης, ενώ στο δεύτερο μελετάται το UPCP παίγνιο. Από το σχήμα 19 εύκολα εξάγεται ότι η λύση που επιτυγχάνεται για το UPCP



Σχήμα 19 ΣΧ των χρηστών για το UPC παίγνιο και για το UPCP παίγνιο με επιλογή του βέλτιστου συντελεστή κοστολόγησης



Σχήμα 20 Ισχύς εκπομπής των χρηστών στο σημείο ισορροπίας κατά Nash για το UPC παίγνιο και το UPCP παίγνιο με την επιλογή του βέλτιστου συντελεστή κοστολόγησης



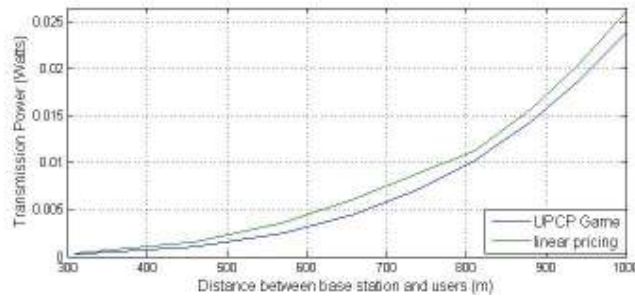
Σχήμα 21 Επιτεύξιμος ρυθμός μετάδοσης στο σημείο ισορροπίας κατά Nash για το UPC παίγνιο και το UPCP παίγνιο με επιλογή του βέλτιστου συντελεστή κοστολόγησης

παίγνιο θέτοντας $c=c_{best}$ προσφέρει χαρακτηριστικό πλεονέκτημα στις τιμές των ΣΧ των χρηστών σε σχέση με την αντίστοιχη λύση που επιτυγχάνεται για το UPC παίγνιο, όπου $c=0$.

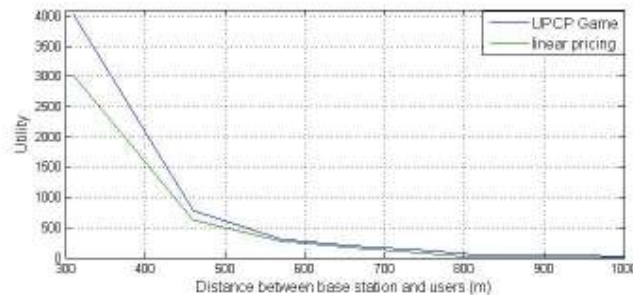
Επιπρόσθετα, στο σχήμα 20 παρατηρείται ότι η ισχύς εκπομπής των χρηστών είναι μικρότερη ανάμεσα στο σχήμα με χρήση κυρτής κοστολόγησης σε σχέση με αυτό χωρίς την πολιτική κοστολόγησης. Παράλληλα παρατηρώντας τα σχήματα 19 και 20 εξάγεται το

συμπέρασμα ότι καθώς η ποιότητα του καναλιού των χρηστών χειροτερεύει, οι τιμές των ΣΧ τους μειώνονται, ενώ οι τιμές της ισχύος εκπομπής τους αυξάνουν. Επιπρόσθετα, το σχήμα 21 απεικονίζει τον επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσης των χρηστών για το UPCP παίγνιο. Καθώς παρατηρείται από το σχήμα 21, ο επιτεύξιμος ρυθμός μετάδοσης των χρηστών είναι άνω του επιθυμητού κατώτατου επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης ($R_i^* \in [R_{T,i}^* - EF_i, R_{T,i}^* + EF_i]$) και συνεπώς οι απαιτήσεις των χρηστών σε ΠτΥ ικανοποιούνται.

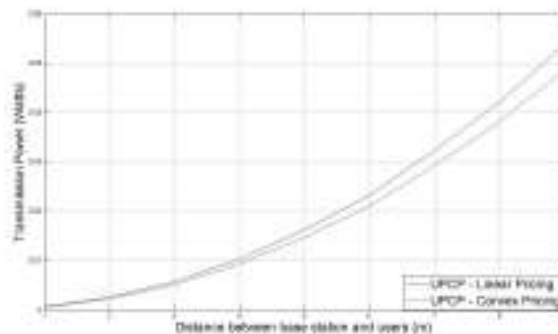
Στη συνέχεια συγκρίνονται τα αποτελέσματα του UPCP παιγνίου, όπου $c=c_{best}$, με τα αντίστοιχα αποτελέσματα του προβλήματος κατανομής ισχύος εκπομπής με χρήση γραμμικής κοστολόγησης. Τα σχήματα 22 και 23 απεικονίζουν την ισχύ εκπομπής των χρηστών και τις τιμές των ΣΧ των χρηστών αντίστοιχα αναφορικά με το UPCP παίγνιο και το αντίστοιχο πρόβλημα βέλτιστης κατανομής ισχύος εκπομπής στη ζεύξη ανόδου με χρήση γραμμικής κοστολόγησης, όπως αυτό αναλύεται στη δημοσίευση [22]. Με βάση τα αποτελέσματα παρατηρείται ότι η εισαγωγή της κυρτής κοστολόγησης ως προς την ισχύ εκπομπής στο πρόβλημα κατανομής ισχύος εκπομπής σε συνδυασμό με την επιλογή κατάλληλα σχεδιασμένης ΣΧ για τους χρήστες, η οποία αντιπροσωπεύει τις απαιτήσεις τους σε ΠτΥ για την αιτούμενη υπηρεσία πραγματικού χρόνου, έχει ως άμεσο αποτέλεσμα τη μείωση της ισχύος εκπομπής και την ταυτόχρονη αύξηση των τιμών των ΣΧ των χρηστών. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρώντας το σχήμα 22 εξάγεται το συμπέρασμα ότι μεθοδολογίες όπως αυτή που προτάθηκε στη δημοσίευση [22], όπου χρησιμοποιείται γραμμική πολιτική κοστολόγησης ως προς την ισχύ εκπομπής των χρηστών και η ΣΧ τους εκφράζει απλοϊκά το λόγο των επιτυχώς μεταδιδόμενων *bits* στο σταθμό βάσης προς τα αντίστοιχα *Joules* που καταναλώθηκαν, έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση της ισχύος εκπομπής των χρηστών (αύξηση από 10% έως 50%) σε σχέση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προκύπτουν από την προσέγγιση που προτάθηκε στο παρόν κεφάλαιο της διδακτορικής διατριβής. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται κυρίως στην απλοποιημένη μοντελοποίηση του μη συνεργατικού παιγνίου κατανομής ισχύος εκπομπής και στη γραμμική κοστολόγηση ως προς την ισχύ εκπομπής των χρηστών, σύμφωνα με την οποία γίνεται η υπόθεση ότι οι επιπτώσεις που προκαλεί ένας χρήστης στους γείτονές του μέσω του θορύβου που παράγει είναι αναλογικά οι ίδιες σε όλο το εύρος εκπομπής του. Ωστόσο όμως ο ισχυρισμός αυτός δεν είναι ρεαλιστικός διότι εάν η ισχύς εκπομπής του χρήστη ξεπεράσει ένα προκαθορισμένο από το σύστημα κατώφλι, τότε η κοστολόγηση αυξάνει κατακόρυφα, ώστε να μειωθούν οι επιπτώσεις που προκαλεί ο χρήστης στους υπολοίπους και αντίστοιχα ο χρήστης να αναγκαστεί να μειώσει την ισχύ εκπομπής του. Συνεπώς παρατηρείται η μειωμένη ισχύς εκπομπής των χρηστών (Σχήμα 22) και η αντίστοιχη αύξηση των τιμών των ΣΧ των χρηστών (Σχήμα 23) για το UPCP παίγνιο σε σχέση με το αντίστοιχο πρόβλημα κατανομής ισχύος με χρήση γραμμικής κοστολόγησης ως προς την ισχύ εκπομπής των χρηστών [22].



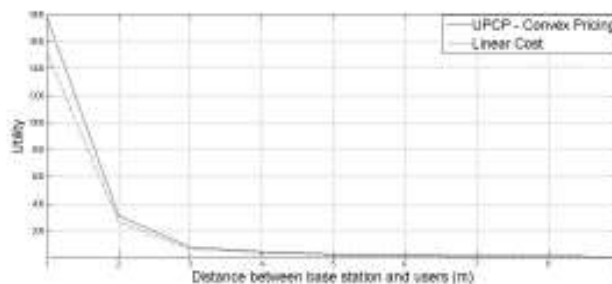
Σχήμα 22 Ισχύς εκπομπής των χρηστών για το UPCP παίγνιο με χρήση κυρτής κοστολόγησης και κατανομή ισχύος με χρήση γραμμικής κοστολόγησης [22]



Σχήμα 23 Τιμές των ΣΧ των χρηστών στο σημείο ισορροπίας κατά Nash του UPCP παιγνίου με χρήση κυρτής κοστολόγησης και της κατανομής ισχύος με χρήση γραμμικής κοστολόγησης [22]



Σχήμα 24 Ισχύς εκπομπής στο σημείο ισορροπίας κατά Nash του UPCP παιγνίου με κυρτή και γραμμική κοστολόγηση ως προς την ισχύ εκπομπής



Σχήμα 25 Τιμές των ΣΧ των χρηστών στο σημείο ισορροπίας κατά Nash του UPCP παιγνίου με κυρτή και γραμμική κοστολόγηση ως προς την ισχύ εκπομπής

Εν κατακλείδι, με σκοπό την ποσοτικοποίηση των πλεονεκτημάτων που πηγάζουν από την υιοθέτηση της κυρτής κοστολόγησης ως προς την ισχύ εκπομπής των χρηστών γίνεται σύγκριση ανάμεσα στα αποτελέσματα που προκύπτουν από το UPCP παίγνιο με υιοθέτηση κυρτής κοστολόγησης και στο ίδιο παίγνιο όπου έχει εφαρμοστεί γραμμική κοστολόγηση ως προς την ισχύ εκπομπής των χρηστών, δηλαδή $c_i(P_i) = c \cdot P_i$. Αποκλειστικά για λόγους παρουσίασης, η συνάρτηση απόδοσης που υιοθετεί το σύνολο των χρηστών είναι $f_i(\gamma_i) = (1 - e^{-4.2 \cdot \gamma_i})^M$, $M=80$. Τα σχήματα 24 και 25 απεικονίζουν τις τιμές των ΣΧ των χρηστών και την αντίστοιχη κατανάλωση ισχύος εκπομπής για το UPCP παίγνιο με κυρτή και γραμμική κοστολόγηση. Πιο αναλυτικά, παρατηρώντας τα σχήματα 24 και 25 εξάγεται το συμπέρασμα ότι το πλεονέκτημα που πηγάζει από την υιοθέτηση της κυρτής κοστολόγησης ως προς την ισχύ εκπομπής των χρηστών είναι της τάξης του 10% μείωσης της ισχύος εκπομπής, το οποίο έχει ως άμεσο αποτέλεσμα την αύξηση των τιμών της ΣΧ των χρηστών σε σχέση με την αντίστοιχη κατανομή ισχύος εκπομπής του UPCP παιγνίου με χρήση γραμμικής κοστολόγησης.

4.7 Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο μελετήθηκε το πρόβλημα αποδοτικής κατανομής ισχύος εκπομπής στη ζεύξη ανόδου CDMA ασύρματων κυψελωτών δικτύων με χρήση κυρτής κοστολόγησης ως προς την ισχύ εκπομπής των χρηστών που αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου. Αρχικά αναλύθηκε η μη αποδοτικότητα του σημείου ισορροπίας κατά Nash του μη συνεργατικού παιγνίου βέλτιστης κατανομής ισχύος εκπομπής χωρίς τη χρήση κοστολόγησης ως προς την ισχύ εκπομπής των χρηστών. Η παρατήρηση αυτή αποτέλεσε το κίνητρο για να μοντελοποιηθεί το παίγνιο κατανομής ισχύος εκπομπής στους χρήστες που αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου με χρήση κυρτής κοστολόγησης ως προς την ισχύ εκπομπής των χρηστών (UPCP παίγνιο). Στη συνέχεια αποδείχθηκε η ύπαρξη και η μοναδικότητα του σημείου ισορροπίας κατά Nash του εν λόγω παιγνίου και προτάθηκε ένας κατανεμημένος επαναληπτικός αλγόριθμος χαμηλής πολυπλοκότητας για τον προσδιορισμό του σημείου ισορροπίας κατά Nash. Η αποδοτικότητα της συγκεκριμένης μοντελοποίησης του προβλήματος βέλτιστης κατανομής ισχύος εκπομπής ως προς τη μείωση της ισχύος εκπομπής των χρηστών και τη μεγιστοποίηση της λαμβανόμενης ικανοποίησής τους από το διαμοιρασμό των πόρων του συστήματος επικυρώθηκε με αναλυτικά αποτελέσματα. Επιπρόσθετα παρουσιάστηκαν αναλυτικές συγκρίσεις ώστε να αναδειχθεί το προκύπτον όφελος στην κατανομή ισχύος εκπομπής από την υιοθέτηση της κυρτής κοστολόγησης σε αντίθεση με τις γραμμικές πολιτικές κοστολόγησης που έχουν έως τώρα προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί ότι το προτεινόμενο μοντέλο βέλτιστης κατανομής ισχύος εκπομπής λαμβάνει υπόψη τις αυστηρές απαιτήσεις σε ΠτΥ των χρηστών που αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου. Επιπρόσθετα, το προτεινόμενο μοντέλο θα εφαρμοστεί στη συνέχεια της διδακτορικής διατριβής σε CDMA ασύρματα κυψελωτά δίκτυα, τα οποία υποστηρίζουν πολλαπλών ειδών υπηρεσίες, δηλαδή υπηρεσίες πραγματικού χρόνου και υπηρεσίες δεδομένων. Επιπρόσθετα, η μελέτη και ανάλυση του συνδυαστικού προβλήματος κατανομής πόρων σε ετερογενή ασύρματα δίκτυα με τη χρήση των ΣΧ και της κυρτής πολιτικής κοστολόγησης ως προς την ισχύ εκπομπής των χρηστών, αναδύεται ως ένα ιδιαίτερα ενδιαφέρον ερευνητικό θέμα.

5 Κατανομή Ισχύος Εκπομπής στη Ζεύξη Ανόδου CDMA Ασύρματων Κυψελωτών Δικτύων με Χρήση Κοστολόγησης μέσω ΣΧ: Πολλαπλές Υπηρεσίες

Στο παρόν κεφάλαιο της διδακτορικής διατριβής θα μελετηθεί το πρόβλημα της αποδοτικής κατανομής ισχύος εκπομπής στη ζεύξη ανόδου CDMA ασύρματων κυψελωτών δικτύων με χρήση κυρτής κοστολόγησης ως προς την ισχύ εκπομπής των χρηστών, οι οποίοι αιτούνται πολλαπλών ειδών υπηρεσίες, δηλαδή πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου υπηρεσίες. Σε κάθε χρήστη ανατίθεται μία ΣΧ, η οποία αντιπροσωπεύει με κατάλληλο τρόπο ανάλογα με την αιτούμενη υπηρεσία τη σχέση ανάμεσα στον επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσης και την αντίστοιχη κατανάλωση ισχύος εκπομπής. Αρχικά μοντελοποιείται το πρόβλημα / παίγνιο βέλτιστης κατανομής ισχύος εκπομπής για υποστήριξη πολλαπλών υπηρεσιών (Multi-Service Uplink Power Control - MSUPC) στο οποίο κάθε χρήστης επιδιώκει εγωιστικά να μεγιστοποιήσει τη ΣΧ του υπακούοντας στους φυσικούς και τεχνικούς περιορισμούς που θέτει το υλισμικό του και στη συνέχεια προσδιορίζεται το μοναδικό σημείο ισορροπίας κατά Nash του εν λόγω παιγνίου. Έπειτα αποδεικνύεται η μη αποδοτικότητα του σημείου ισορροπίας κατά Nash του MSUPC παιγνίου χωρίς τη χρήση κοστολόγησης και για τη βελτίωση της αποδοτικότητάς του προτείνεται μία κυρτή πολιτική κοστολόγησης ως προς την ισχύ εκπομπής των χρηστών, η οποία προσφέρει καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τη γραμμική κοστολόγηση που έχει κατά καιρούς προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία. Συνεπώς μοντελοποιείται ένα παίγνιο βέλτιστης κατανομής ισχύος εκπομπής για την υποστήριξη πολλαπλών υπηρεσιών με χρήση κυρτής κοστολόγησης (Multi-Service Uplink Power Control game with Convex Pricing - MSUPC-CP) στη ζεύξη ανόδου CDMA ασύρματων κυψελωτών δικτύων και προσδιορίζεται το μοναδικό του Pareto βέλτιστο σημείο ισορροπίας κατά Nash. Με βάση την ανάλυση αυτή προτείνεται ένας κατανεμημένος επαναληπτικός αλγόριθμος χαμηλής πολυπλοκότητας για τον προσδιορισμό του σημείου ισορροπίας κατά Nash, ενώ η αποδοτικότητα του προτεινόμενου μοντέλου αναδεικνύεται μέσω αναλυτικών προσομοιώσεων και αριθμητικών αποτελεσμάτων.

5.1 Σχετική Βιβλιογραφία

Με τη ραγδαία ανάπτυξη των απαιτήσεων των χρηστών σε υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης και στην υποστήριξη πολλαπλών ειδών υπηρεσιών με διαφορετικά χαρακτηριστικά και απαιτήσεις σε ΠτΥ, η πολιτική δρομολόγησης έχει καθοριστικό ρόλο στην αποδοτική κατανομή των πόρων του συστήματος στα ασύρματα δίκτυα της τρίτης και της τέταρτης γενιάς [38], [39]. Οι περιορισμένοι πόροι του συστήματος, οι φυσικοί περιορισμοί που εισάγονται από το υλισμικό των ασύρματων χρηστών, καθώς επίσης και τα χρονομεταβλητά κανάλια των χρηστών, αποτελούν το κίνητρο για την υιοθέτηση μηχανισμών κατανομής ισχύος εκπομπής στη ζεύξη ανόδου [10] αλλά και στη ζεύξη καθόδου [15] των ασύρματων επικοινωνιών, με σκοπό την αποδοτική κατανομή των πόρων του συστήματος και τη διαχείριση του θορύβου εντός της κυψέλης [33].

Προσεγγίσεις με χρήση της θεωρίας παιγνίων για τη μελέτη του προβλήματος βέλτιστης κατανομής ισχύος εκπομπής στη ζεύξη ανόδου CDMA ασύρματων κυψελωτών δικτύων έχουν προσελκύσει το ενδιαφέρον των ερευνητών [17], [18], [20], [23], [9] και έχουν αναδειχθεί ως μία εναλλακτική προσέγγιση κατανομής ισχύος εκπομπής σε σχέση με τις παραδοσιακές κεντρικοποιημένες [12] ή ημι-κεντρικοποιημένες [16] προσεγγίσεις λήψης αποφάσεων στο σταθμό βάσης. Στις προσεγγίσεις που βασίζονται στη θεωρία παιγνίων, το πρόβλημα βέλτιστης κατανομής ισχύος εκπομπής μοντελοποιείται ως ένα μη συνεργατικό παίγνιο στο οποίο οι χρήστες λειτουργούν ως παίκτες, οι οποίοι στοχεύουν εγωιστικά στη μεγιστοποίηση της ΣΧ τους προσδιορίζοντας την προσωπική ισχύ εκπομπής τους. Το παίγνιο καταλήγει σε ένα σημείο ισορροπίας κατά Nash, εάν αυτό υπάρχει. Δεδομένου όμως ότι οι χρήστες λειτουργούν εγωιστικά, το σημείο ισορροπίας κατά Nash στο οποίο καταλήγει το παίγνιο είναι μη αποδοτικό από την κοινωνική σκοπιά του προβλήματος κατανομής των πόρων του συστήματος [22].

Σύμφωνα με την παραπάνω ανάλυση, η κοστολόγηση των πόρων του συστήματος αναδύεται ως ένα ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο για την επίτευξη μίας κοινωνικά βέλτιστης λύσης [26], [17], [40], [41]. Στην πρόσφατη βιβλιογραφία έχουν προταθεί γραμμικά σχήματα κοστολόγησης ως προς την ισχύ εκπομπής των χρηστών [22], [45], [47] με απώτερο στόχο να δώσουν κίνητρο στους χρήστες να χρησιμοποιούν τους πόρους του συστήματος πιο αποδοτικά. Η χρήση της γραμμικής κοστολόγησης στα προβλήματα κατανομής ισχύος εκπομπής βοήθησε στη μοντελοποίηση βελτιωμένων παιγνίων τα οποία παρότρυναν τους χρήστες να χρησιμοποιούν τους πόρους του συστήματος πιο αποδοτικά [26], [40]. Με βάση αυτή την παρατήρηση τα προβλήματα κατανομής ισχύος εκπομπής με χρήση γραμμικής κοστολόγησης μετακινούν το σημείο ισορροπίας κατά Nash σε ένα βέλτιστο σημείο, δηλαδή προσδιόριζαν την Pareto βέλτιστη λύση του προβλήματος. Παρόλα αυτά η βασική παρατήρηση ότι οι επιπτώσεις που προκαλεί ο χρήστης στους υπόλοιπους χρήστες δεν είναι

ίδιες σε ολόκληρο το εύρος εκπομπής του [17], [41], όπως θεωρεί η γραμμική κοστολόγηση ως προς την ισχύ εκπομπής, οδήγησε στην υιοθέτηση μη γραμμικών πολιτικών κοστολόγησης (π.χ. κυρτή κοστολόγηση) των πόρων του συστήματος [49], [51]. Μία μη γραμμική κοστολόγηση αντιπροσωπεύει καλύτερα τη σημασία των πόρων του συστήματος και για το λόγο αυτό οδηγεί το σύστημα σε βέλτιστες κατανομές των πόρων.

5.2 Συμβολή & Καινοτομία

Ακολουθώντας τις πρόσφατες προσεγγίσεις που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία στο παρόν κεφάλαιο υιοθετείται η προσέγγιση των ΣΧ, οι οποίες εκφράζουν το βαθμό της λαμβανόμενης ικανοποίησης των χρηστών από το διαμοιρασμό των πόρων του συστήματος. Οι ΣΧ που ανατίθενται και αντιστοιχίζονται στους χρήστες είναι συναρτήσεις της ισχύος εκπομπής τους και του σηματοθορυβικού τους λόγου. Στις δημοσιεύσεις [17] και [18], οι ΣΧ που έχουν χρησιμοποιηθεί είναι λογαριθμικές κοίλες συναρτήσεις ως προς το σηματοθορυβικό λόγο (SINR) και το υπό μελέτη πρόβλημα των δημοσιεύσεων στοχεύει στη μεγιστοποίηση του συνολικού ρυθμού μετάδοσης όλων των χρηστών. Στη δημοσίευση [20] προτάθηκε ως υποψήφια ΣΧ, μία συνάρτηση η οποία είχε αναλογική σχέση με το ρυθμό μετάδοσης των χρηστών και περιελάμβανε μία συνάρτηση κοστολόγησης ως προς την κανονικοποιημένη ισχύ εκπομπής των χρηστών. Στη δημοσίευση [9] προτάθηκε ως υποψήφια ΣΧ, μία συνάρτηση η οποία ήταν ο λόγος των επιτυχώς μεταδιδόμενων *bits* στο σταθμό βάσης προς την αντίστοιχη κατανάλωση ισχύος σε *Joules*.

Μία βασική διαφορά που προτείνεται στο παρόν κεφάλαιο της διδακτορικής διατριβής είναι η μοντελοποίηση των ΣΧ των χρηστών. Πιο συγκεκριμένα, αντί να μοντελοποιείται η ΣΧ των χρηστών απλοποιημένα ως ο λόγος των επιτυχώς μεταδιδόμενων *bits* προς το σταθμό βάσης προς την αντίστοιχη κατανάλωση ισχύος εκπομπής [22], στο παρόν κεφάλαιο εισάγεται μία ΣΧ, η οποία είναι ο λόγος μίας συνάρτησης ως προς τον επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσης των χρηστών εξαρτώμενη από το είδος της υπηρεσίας που αιτούνται οι χρήστες προς την αντίστοιχη κατανάλωση ισχύος εκπομπής [30]. Συνεπώς, αρχικά μοντελοποιείται το πρόβλημα βέλτιστης κατανομής ισχύος εκπομπής με σκοπό την υποστήριξη πολλαπλών ειδών υπηρεσιών χωρίς τη χρήση κοστολόγησης ως προς την ισχύ εκπομπής των χρηστών ως ένα μη συνεργατικό παίγνιο, όπου κάθε χρήστης προσπαθεί εγωιστικά να μεγιστοποιήσει τη ΣΧ του λαμβάνοντας υπόψη τους φυσικούς περιορισμούς που υπεισέρχονται στο πρόβλημα και προσδιορίζεται το αντίστοιχο σημείο ισορροπίας κατά Nash του εν λόγω παιγνίου. Στη συνέχεια αποδεικνύεται αναλυτικά ότι το σημείο ισορροπίας κατά Nash που προσδιορίστηκε δεν είναι αποδοτικό ως προς την κατανομή των πόρων του συστήματος.

Μία άλλη βασική καινοτομία που εισάγεται στο παρόν κεφάλαιο της διδακτορικής διατριβής είναι η προτεινόμενη κυρτή κοστολόγηση ως προς την ισχύ εκπομπής των

χρηστών, η οποία εκφράζει καλύτερα τη σημασία των πόρων του συστήματος και για το λόγο αυτό οδηγεί το σύστημα σε μία βέλτιστη λύση σε σύγκριση με το πρόβλημα χωρίς τη χρήση κοστολόγησης. Επιπρόσθετα, προτείνεται μία ΣΧ, η οποία εκφράζει κατάλληλα τις απαιτήσεις των χρηστών σε ΠτΥ, ενώ ταυτόχρονα αναγκάζει τους χρήστες να αποκτήσουν μία περισσότερο κοινωνική συμπεριφορά συμπεριλαμβάνοντας την κυρτή πολιτική κοστολόγησης ως προς την ισχύ εκπομπής των χρηστών.

Έπειτα μοντελοποιείται το παίγνιο κατανομής ισχύος υποστηρίζοντας πολλαπλών ειδών υπηρεσίες και χρησιμοποιώντας κυρτή κοστολόγηση ως προς την ισχύ εκπομπής των χρηστών. Στη συνέχεια προσδιορίζεται το μοναδικό Pareto βέλτιστο σημείο ισορροπίας κατά Nash με αναλυτική μαθηματική μέθοδο και η σύγκλιση του παιγνίου στο σημείο ισορροπίας αποδεικνύεται επίσης αναλυτικά. Επιπρόσθετα, προτείνεται ένας κατανεμημένος επαναληπτικός αλγόριθμος χαμηλής πολυπλοκότητας, ο οποίος συγκλίνει στο μοναδικό Pareto βέλτιστο σημείο ισορροπίας κατά Nash του εν λόγω παιγνίου. Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί ότι η συγκεκριμένη μοντελοποίηση κατανομής ισχύος εκπομπής λαμβάνει υπόψη πολλαπλών ειδών υπηρεσίες, δηλαδή υπηρεσίες πραγματικού χρόνου και υπηρεσίες δεδομένων. Στο τέλος της παρουσίασης του παρόντος κεφαλαίου παρατίθενται αναλυτικά αριθμητικά αποτελέσματα, τα οποία αναδεικνύουν τα χαρακτηριστικά και τη λειτουργία του προτεινόμενου μοντέλου κατανομής ισχύος εκπομπής με χρήση κυρτής κοστολόγησης ως προς την ισχύ εκπομπής των χρηστών με την παράλληλη υποστήριξη πολλαπλών ειδών υπηρεσιών.

5.3 Μοντέλο Συστήματος & Σχετικές Πληροφορίες

5.3.1 Μοντέλο Συστήματος

Στο παρόν κεφάλαιο μελετάται η ζεύξη ανόδου ενός CDMA ασύρματου κυψελωτού δικτύου, το οποίο υποστηρίζει $N(t)$ χρήστες οι οποίοι έχουν συνεχώς δεδομένα να μεταδώσουν ανά χρονοσχισμή t , όπου με $S(t) = S_{RT}(t) \cup S_{NRT}(t)$ συμβολίζεται το αντίστοιχο σύνολό τους. Το σύνολο των χρηστών αποτελείται από χρήστες οι οποίοι αιτούνται είτε υπηρεσίες πραγματικού χρόνου με αυστηρές απαιτήσεις σε ΠτΥ (δηλαδή το σύνολο $S_{RT}(t)$) είτε υπηρεσίες δεδομένων (δηλαδή το σύνολο $S_{NRT}(t)$). Επιπρόσθετα, με $N_{NRT}(t)$ και $N_{RT}(t)$ συμβολίζεται το πλήθος των χρηστών που αιτούνται υπηρεσίες δεδομένων και υπηρεσίες πραγματικού χρόνου αντίστοιχα. Παρόλα αυτά για ευκολία στην παρουσίαση της προτεινόμενης ανάλυσης του παρόντος κεφαλαίου, παραλείπεται ο συμβολισμός της συγκεκριμένης χρονοσχισμής t στα χρονικά εξαρτώμενα μεγέθη.

Επιπρόσθετα, τα χρονικά μεταβαλλόμενα κανάλια των χρηστών επηρεάζονται από φαινόμενα σκίασης, διαλείψεις πολλαπλών διαδρομών και βραχυπρόθεσμες διαλείψεις

περιβάλλουσας και για το λόγο αυτό μοντελοποιούνται με τη βοήθεια ενός στοχαστικού χρονικά μεταβαλλόμενου μοντέλου. Συνεπώς στη συνέχεια του κεφαλαίου συμβολίζεται με $G_i(t)$, P_i και R_i , το κέρδος του καναλιού, η ισχύς εκπομπής και ο ρυθμός μετάδοσης του χρήστη $i \in S(t)$ στην εκάστοτε υπό μελέτη χρονοσχισμή. Δεδομένων των φυσικών και τεχνικών περιορισμών που τίθενται από το υλισμικό των χρηστών, η ισχύς εκπομπής καθώς επίσης και ο ρυθμός μετάδοσης των χρηστών είναι μεγέθη φραγμένα, δηλαδή $0 \leq P_i \leq P_i^{Max}$ και $0 \leq R_i \leq R_i^{Max}$. Η χρονοσχισμή είναι ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα κατά τη διάρκεια του οποίου μπορούν να μεταδοθούν διάφορα πακέτα δεδομένων. Στην αρχή κάθε χρονοσχισμής t ένας μηχανισμός κατανομής ισχύος εκπομπής είναι υπεύθυνος για τη λήψη αποφάσεων με έναν κατανεμημένο τρόπο για την ισχύ εκπομπής των χρηστών και για τον προκύπτοντα ρυθμό μετάδοσης. Σημειώνεται ότι το κέρδος του καναλιού των χρηστών, η ισχύς εκπομπής τους, καθώς επίσης και ο ρυθμός μετάδοσής τους παραμένει σταθερός στη διάρκεια μίας χρονοσχισμής.

Πιο αναλυτικά, διευκρινίζεται ότι το πλήθος των επιτυχώς μεταδιδόμενων *bits* στο σταθμό βάσης δίδεται από τη σχέση $R_i^* \equiv R_i^F \cdot f_s(\gamma_i)$, όπου R_i^F είναι ο σταθερός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων για το χρήστη i . Η συνάρτηση $f_s(\gamma_i)$ αντιπροσωπεύει τον επιτυχή ρυθμό μετάδοσης των πακέτων (Packet Success Rate - PSR) και εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της μετάδοσης (π.χ. σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης, μέγεθος πακέτου κ.ά.). Στις περισσότερες περιπτώσεις που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία, η συνάρτηση $f_s(\gamma_i)$ είναι μία γνησίως αύξουσα σιγμοειδής συνάρτηση [1]. Παραδείγματος χάρη, όταν η διαμόρφωση που χρησιμοποιείται είναι BPSK (Binary Phase Shift Keying) και ο θόρυβος είναι προσθετικός λευκός Gaussian, τότε η συνάρτηση $f_s(\gamma_i)$ που χρησιμοποιείται είναι $f_s(\gamma_i) = (1 - Q(\sqrt{2\gamma_i}))^M$, όπου το $Q(\cdot)$ είναι η συμπληρωματική αθροιστική συνάρτηση κατανομής μιας τυποποιημένης κανονικής τυχαίας μεταβλητής [23]. Ωστόσο όμως ακολουθώντας μία τέτοιου είδους προσέγγιση, ο χρήστης μπορεί να επιτύχει δυνητικά άπειρη λαμβανόμενη ικανοποίηση από το δίκτυο, εκφραζόμενη μέσω της ΣΧ του, εκπέμποντας όμως με μηδενική ισχύ. Για το λόγο αυτό, όπως προτείνεται στη βιβλιογραφία, ένας τρόπος για να ξεπεραστεί αυτή η ανεπιθύμητη μοντελοποίηση είναι να αντικατασταθεί η συνάρτηση $f_s(\gamma_i)$ με τη συνάρτηση απόδοσης $f(\gamma_i)$ [23]. Για παράδειγμα, η συνάρτηση απόδοσης μπορεί να οριστεί ως $f(\gamma_i) = f_s(\gamma_i) - f_s(0)$. Σε όλες σχεδόν όμως τις περιπτώσεις, η τιμή $f_s(0)$ είναι πρακτικά πολύ μικρή και ως εκ τούτου ισχύει προσεγγιστικά ότι $f(\gamma_i) \equiv f_s(\gamma_i)$.

Επιπρόσθετα, ο σηματοθορυβικός λόγος που μετράται στο σταθμό βάσης $\gamma_i = E_b/I_o$ για κάθε χρήστη $i \in S$ δίδεται από τη σχέση [10]:

$$\gamma_i(R_i, P_i, \mathbf{P}_{-i}) = \frac{W}{R_i} \frac{G_i P_i}{\theta \sum_{j=1}^N G_j P_j - \theta G_i P_i + I_0} = \frac{W}{R_i} \frac{G_i P_i}{I_{-i}(\mathbf{P}_{-i})} \quad (44)$$

όπου με θ συμβολίζεται ο παράγοντας ορθογωνιότητας (για απλότητα στη μοντελοποίηση θεωρείται ότι $\theta=1$), με W συμβολίζεται το εύρος ζώνης του συστήματος, με \mathbf{P}_{-i} το διάνυσμα των τιμών ισχύος εκπομπής των υπολοίπων χρηστών εντός της κυψέλης εκτός του χρήστη i και ο όρος I_0 εκφράζει τον θόρυβο και τις ενδοκυψελικές παρεμβολές. Συνεπώς, ο όρος $I_{-i}(\mathbf{P}_{-i})$ συμπεριλαμβάνει το συνολικό θόρυβο που προκύπτει από το δίκτυο και το θόρυβο της κυψέλης, ο οποίος συνολικά προσμετρείται στο σταθμό βάσης όταν λαμβάνονται δεδομένα από τον κάθε χρήστη i και δίδεται ως ακολούθως:

$$I_{-i}(\mathbf{P}_{-i}) = \theta \sum_{j=1}^N G_j P_j - \theta G_i P_i + I_0 \quad (45)$$

5.4 Απαιτήσεις σε Ποιότητα της Υπηρεσίας & Συναρτήσεις Χρησιμότητας των Χρηστών: Πολλαπλές Υπηρεσίες

Αρχικά με σκοπό την πληρότητα της ανάλυσης και την καλύτερη κατανόηση του υπό μελέτη προβλήματος, πριν παρουσιαστεί η μοντελοποίηση του μη συνεργατικού παιγνίου κατανομής πόρων στη ζεύξη ανόδου για την υποστήριξη πολλαπλών ειδών υπηρεσιών (Multi-Service Uplink Power Control game - MSUPC), παρέχονται ορισμένες αναλυτικές πληροφορίες σε σχέση με τη μορφή και τις ιδιότητες των ΣΧ των χρηστών, καθώς επίσης και με τις απαιτήσεις των χρηστών που εισάγονται από τις υπηρεσίες πραγματικού χρόνου και υπηρεσίες δεδομένων. Έπειτα παρουσιάζονται οι απαιτήσεις των χρηστών σε ΠτΥ για υπηρεσίες πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου, χωρίς ωστόσο η ανάλυση να περιορίζεται απλοϊκά σε δύο κλάσεις υπηρεσιών/χρηστών. Κάθε κλάση ως προς το είδος της υπηρεσίας μπορεί να συμπεριλαμβάνει πολλές επιμέρους κλάσεις της ίδιας γενικής κατηγορίας, δηλαδή πραγματικού ή μη πραγματικού χρόνου υπηρεσίες. Παραδείγματος χάρη, με αναφορά στις υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, αυτές μπορούν να συμπεριλαμβάνουν υπηρεσίες φωνής, βίντεο, οι οποίες αποτελούν υποκλάσεις της γενικής κλάσεως των υπηρεσιών πραγματικού χρόνου πολυμέσων.

Πιο αναλυτικά, με απώτερο στόχο την υποστήριξη πολλαπλών ειδών υπηρεσιών με ποικίλες απαιτήσεις ως προς την ΠτΥ, κάθε χρήστης υιοθετεί μία κατάλληλα σχεδιασμένη ΣΧ, η οποία εκφράζει τη λαμβανόμενη ικανοποίηση του χρήστη από την απόδοση του επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης (δηλαδή $T_i(R_i^*, P_i, \mathbf{P}_{-i})$) και τη σχέση του με την αντίστοιχη κατανάλωση ισχύος εκπομπής ανά χρονοσχιμή. Η ΣΧ κάθε χρήστη μπορεί να ορισθεί ως ακολούθως [36]:

$$U(R_i^*, P_i, \mathbf{P}_i) = \frac{T_i(R_i^*, P_i, \mathbf{P}_i)}{P_i} = \frac{T_i(R_i^F \cdot f_i(\gamma_i), P_i, \mathbf{P}_i)}{P_i} \quad (46)$$

όπου με $R_i^* \equiv R_i^F \cdot f_i(\gamma_i)$ συμβολίζεται ο επιτεύξιμος ρυθμός μετάδοσης του χρήστη i στην υπό μελέτη χρονοσχισμή, με R_i^F ο σταθερός ρυθμός μετάδοσης του χρήστη και με f_i η συνάρτηση απόδοσης του χρήστη. Καθώς έχει προαναφερθεί η συνάρτηση απόδοσης εκφράζει την επιτυχή μετάδοση των πακέτων ενός χρήστη i και είναι γνησίως αύξουσα συνάρτηση ως προς το σηματοθορυβικό λόγο γ_i ανά χρονοσχισμή t .

Επιπρόσθετα, η συνάρτηση επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης T_i του χρήστη i είναι σχεδιασμένη έτσι ώστε να αντιπροσωπεύει τη λαμβανόμενη ικανοποίηση των χρηστών σε σχέση με τον επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσης και τις απαιτήσεις των χρηστών σε ΠτΥ. Πιο συγκεκριμένα για το χρήστη i η συνάρτηση επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσής του $T_i(R_i^*, P_i, \mathbf{P}_i) \equiv T_i(R_i^*)$ είναι μία φωλιασμένη (εξαιτίας της ύπαρξης της συνάρτησης απόδοσης f_i) μη κυρτή συνάρτηση ως προς τον επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσης R_i^* , σχεδιασμένη κατάλληλα ώστε να εκφράζει εντός της συνολικής ΣΧ U_i του χρήστη, την απόδοση της αιτούμενης υπηρεσίας του και τις απαιτήσεις του σε ΠτΥ, δεδομένων των φυσικών περιορισμών που εισάγονται από το υλισμικό των χρηστών, δηλαδή $0 \leq P_i \leq P_i^{Max}$ και $0 \leq R_i \leq R_i^{Max}$. Επιπρόσθετα, η συνάρτηση επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης των χρηστών που αιτούνται υπηρεσίες δεδομένων χαρακτηρίζεται από τις ιδιότητες, όπως αυτές αναλύθηκαν στην υποενότητα 3.4.

Στοχεύοντας στην εκπλήρωση των ακόρεστων απαιτήσεων των χρηστών ως προς το ρυθμό μετάδοσης, οι οποίοι αιτούνται υπηρεσίες δεδομένων, η συνάρτηση επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης T_i θεωρείται είτε γνησίως κυρτή είτε γνησίως κοίλη ως προς τον επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσης R_i^* . Επιπρόσθετα, ο μέγιστος επιτεύξιμος ρυθμός μετάδοσης κάθε χρήστη (δηλαδή η τιμή $R_{Max,i}^*$) περιορίζεται εγγενώς από τους φυσικούς περιορισμούς που εισάγονται από το υλισμικό κάθε χρήστη, δηλαδή $0 \leq R_i \leq R_i^{Max}$, $\forall i \in S_{NRT}$. Συνεπώς, προκύπτει ο ακόλουθος ορισμός:

Ορισμός 7: Η συνάρτηση επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης για έναν χρήστη ο οποίος αιτείται υπηρεσία δεδομένων, $T_i(R_i^*) \equiv T_i(R_i^{Max} f(\gamma_i))$ $\forall i \in S_{NRT}$, όπου $R_i^* \in [0, R_i^{Max}]$ και $\gamma_i \geq 0$, είναι μία γνησίως κυρτή ή γνησίως κοίλη συνάρτηση ως προς τον επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσης και ισχύει $T_i(R_{Max,i}^*) = T_i(R_i^{Max}) = I$. ■

Παράλληλα, στοχεύοντας στην ικανοποίηση των απαιτήσεων των χρηστών οι οποίοι αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, οι οποίες χαρακτηρίζονται από βραχυπρόθεσμους περιορισμούς ως προς το ρυθμό μετάδοσης και αυστηρούς περιορισμούς ως προς την καθυστέρηση μετάδοσης, η συνάρτηση επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης T_i είναι μία

σιγμοειδής συνάρτηση, το σημείο καμπής της οποίας προσδιορίζεται ανάλογα με τη συγκεκριμένη υπηρεσία πραγματικού χρόνου και επιλέγεται ένας κατάλληλος παράγοντας ελαστικότητας, όπως έχει διεξοδικά αναλυθεί στη δημοσίευση [36]. Επιπρόσθετα, η συνάρτηση επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης των χρηστών που αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου χαρακτηρίζεται από τις ιδιότητες, όπως αυτές αναλύθηκαν στην υποενότητα 3.4.

Ορισμός 8: Η συνάρτηση επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης για έναν χρήστη ο οποίος αιτείται υπηρεσία πραγματικού χρόνου $T_i(R_i^*) \equiv T_i((R_{T,i}^* + EF_i) \cdot f(\gamma_i)) \quad \forall i \in S_{RT}$, όπου $R_i^* \in [0, R_{T,i}^* + EF_i]$ και $\gamma_i \geq 0$, είναι μία σιγμοειδής συνάρτηση ως προς τον επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσης R_i^* με μοναδικό σημείο καμπής $R_{Inf,i}^*$ το οποίο προσδιορίζεται ως ακολούθως:

$$R_{Inf,i}^* = \left\{ R_i^* : \left. \frac{\partial^2 T_i(R_i^*)}{\partial (R_i^*)^2} \right|_{R_i^* = R_{Min,i}^*} = 0 \right\} \quad R_{Min,i}^* = R_{T,i}^* - EF_i \quad (47)$$

με $T_i(R_{Max,i}^*) = T_i(R_{T,i}^* + EF_i) = I$. ■

Σύμφωνα με τη σχέση (46) και βασιζόμενοι στην προηγούμενη ανάλυση σχετικά με τη συνάρτηση επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης, είτε για υπηρεσίες πραγματικού είτε μη πραγματικού χρόνου, εξάγεται το ακόλουθο συμπέρασμα για τη συνολική ΣΧ των χρηστών:

$$U_i(P_i, \mathbf{P}_i) = \frac{T_i(R_i^*)}{P_i} = \begin{cases} \frac{T_i(R_i^{Max}) \cdot f_i(\gamma_i)}{P_i} & i \in S_{NRT} \\ \frac{T_i((R_{T,i}^* + EF_i) \cdot f_i(\gamma_i))}{P_i} & i \in S_{RT} \end{cases} \quad (48)$$

όπου $R_i^* \in [0, R_i^{Max}] \quad \forall i \in S_{NRT}$ και $R_i^* \in [0, R_{T,i}^* + MF_i] \quad \forall i \in S_{RT}$ δεδομένου ότι $f_i(\gamma_i) \in [0, 1] \quad \forall \gamma_i \geq 0$.

5.5 Μη Συνεργατικό Παίγνιο Κατανομής Ισχύος Εκπομπής στη Ζεύξη Ανόδου με Υποστήριξη Πολλαπλών Υπηρεσιών

Το μη συνεργατικό παίγνιο κατανομής ισχύος εκπομπής στη ζεύξη ανόδου με υποστήριξη πολλαπλών υπηρεσιών συμβολίζεται ως $G_{MSUPC} = [S, \{A_i\}, \{U_i(\cdot)\}]$ όπου $S = S_{RT} \cup S_{NRT}$ είναι το σύνολο των χρηστών, δηλαδή οι χρήστες που αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου και εδρεύουν εντός της κυψέλης, με $A_i = [0, P_i^{Max}] \times \mathfrak{R}^N$ συμβολίζεται το σύνολο των στρατηγικών του i χρήστη και με $U_i(\cdot)$ συμβολίζεται η αντικειμενική συνάρτηση του i χρήστη, όπως αυτή ορίστηκε στη σχέση (48). Στην αρχή κάθε χρονοσχιμής, κάθε χρήστης επιλέγει την ισχύ εκπομπής του $a_i = P_i$, τέτοια ώστε $a_i \in A_i$, με βάση έναν κατανεμημένο αλγόριθμο κατανομής ισχύος εκπομπής, ο οποίος είναι υπεύθυνος για τον

προσδιορισμό της κατανομής ισχύος εκπομπής στους χρήστες, έτσι ώστε να μεγιστοποιούν το βαθμό της ικανοποίησης που λαμβάνουν από το διαμοιρασμό των πόρων του συστήματος, ο οποίος εκφράζεται μέσω μίας κατάλληλα επιλεγμένης ΣΧ. Θεωρώντας ότι εδρεύουν N χρήστες εντός της κυψέλης οι οποίοι αιτούνται πολλαπλές υπηρεσίες, το διάνυσμα της ισχύος εκπομπής των χρηστών συμβολίζεται με $\mathbf{P}^* = (P_1^*, P_2^*, \dots, P_N^*) \in A$, $A = \cup A_i, i \in S$ και αποτελεί το εξαγόμενο του παιγνίου κατανομής ισχύος εκπομπής.

$$\begin{aligned} \max_{A_i} E[U_i(P_i, \mathbf{P}_i)], \\ \text{s.t. } 0 \leq P_i \leq P_i^{Max} \end{aligned} \quad (49)$$

Επιπρόσθετα, θεωρώντας ότι τα κανάλια είναι ανεξάρτητα και ταυτόσημα κατανεμημένα (independent and identically distributed - i.i.d.), η μεγιστοποίηση του μέσου όρου της ΣΧ για κάθε χρήστη $i \in S$ όπως εκφράστηκε στη σχέση (49) μπορεί να επιτευχθεί από τη μεγιστοποίηση της ΣΧ κάθε χρήστη ανά χρονοσχισμή. Συνεπώς, θεωρώντας δεδομένη την ισχύ εκπομπής των υπόλοιπων χρηστών εντός της κυψέλης, το προκύπτον μη συνεργατικό παίγνιο ανά χρονοσχισμή μπορεί να εκφραστεί ως το ακόλουθο πρόβλημα μεγιστοποίησης.

(MSUPC παίγνιο)

$$\begin{aligned} \max_{A_i} U_i = \max_{A_i} U_i(P_i, \mathbf{P}_i), \quad \forall i \in S = S_{RT} \cup S_{NRT} \\ \text{s.t. } 0 \leq P_i \leq P_i^{Max} \end{aligned} \quad (50)$$

Αναφερόμενοι στη δημοσίευση [36], όπου είχε υιοθετηθεί η προσέγγιση του σημείου ισορροπίας κατά Nash με σκοπό την εξεύρεση της λύσης του μη κυρτού μη συνεργατικού παιγνίου κατανομής ισχύος (MSUPC παίγνιο), προκύπτει ο ακόλουθος ορισμός.

Ορισμός 9: Το διάνυσμα ισχύος εκπομπής $\mathbf{P}^* = (P_1^*, P_2^*, \dots, P_N^*) \in A$, $A = \cup A_i, i \in S = S_{RT} \cup S_{NRT}$ είναι ένα σημείο ισορροπίας κατά Nash του παιγνίου κατανομής ισχύος εκπομπής με υποστήριξη πολλαπλών υπηρεσιών (MSUPC), εάν για κάθε χρήστη $i \in S = S_{RT} \cup S_{NRT}$ ισχύει $U_i(P_i^*, \mathbf{P}_i^*) \geq U_i(P_i, \mathbf{P}_i^*)$ για όλες τις τιμές $P_i^* \in A_i$.

Πιο αναλυτικά, αναλύοντας και μελετώντας τις ιδιότητες της ΣΧ του χρήστη, η ιδιότητα της ημι-κοίλης ΣΧ $U_i(P_i, \mathbf{p}_i)$ (Lemma 4, [36]) χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό του σημείου ισορροπίας κατά Nash του παιγνίου. Με βάση την ιδιότητα αυτή προσδιορίστηκε το μοναδικό σημείο ισορροπίας κατά Nash του MSUPC παιγνίου [36], το οποίο δίδεται ως ακολούθως:

$$P_i^* = \begin{cases} \min\left\{\frac{\gamma_i^*(R_{T,i}^* + EF_i)I_{-i}(\mathbf{P}_i)}{WG_i}, P_i^{Max}\right\}, & \forall i \in S_{RT} \\ \min\left\{\frac{\gamma_i^* R_i^{Max} I_{-i}(\mathbf{P}_i)}{WG_i}, P_i^{Max}\right\}, & \forall i \in S_{NRT} \end{cases} \quad (51)$$

όπου γ_i^* είναι η μοναδική θετική λύση της εξίσωσης $\frac{\partial T_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i} \cdot \gamma_i - T_i(\gamma_i) = 0$, όπου η $T_i(\gamma_i)$ είναι

μία σιγμοειδής συνάρτηση ως προς το σηματοθορυβικό λόγο που προσδιορίζεται στο σταθμό βάσης γ_i .

5.6 Μη Αποδοτικότητα του Σημείου Ισορροπίας κατά Nash του Παιγνίου Κατανομής Ισχύος Εκπομπής χωρίς Χρήση Κοστολόγησης

Το σημείο ισορροπίας κατά Nash που προσδιορίστηκε στην προηγούμενη ενότητα αποτελεί μία λύση για το μη συνεργατικό παίγνιο κατανομής ισχύος εκπομπής με υποστήριξη πολλαπλών υπηρεσιών. Στο σημείο ισορροπίας που προσδιορίστηκε κανένας χρήστης δε δύναται με ατομική μεταβολή της ισχύος εκπομπής του να αυξήσει τη λαμβανόμενη ικανοποίησή του από το διαμοιρασμό των πόρων του συστήματος, δεδομένων των τιμών ισχύος εκπομπής των υπολοίπων χρηστών εντός της κυψέλης (δηλαδή δεδομένου του διανύσματος P_i^*). Ωστόσο όμως στις δημοσιεύσεις [22], [17], [26], [40], [41] έχει αποδειχθεί ότι το σημείο ισορροπίας κατά Nash που προκύπτει από κατανεμημένα παίγνια, εν γένει δεν είναι αποδοτικό για το διαμοιρασμό των πόρων του συστήματος. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα παίγνια κατανομής ισχύος εκπομπής στα οποία οι χρήστες προσπαθούν να μεγιστοποιήσουν έναν παράγοντα ο οποίος εκφράζει τα μεταδιδόμενα *bits* ανά την καταναλισκόμενη ισχύ εκπομπής [*Joule*] και εν τέλει καταλήγουν σε πολύ υψηλά επίπεδα ισχύος εκπομπής. Εύκολα εξάγεται ότι εάν όλοι οι χρήστες συμφωνούσαν να εκπέμπουν σε χαμηλότερα επίπεδα ισχύος εκπομπής, το γεγονός αυτό θα ήταν προσοδοφόρο για όλους τους χρήστες, αλλά και για το σύστημα. Συνεπώς, ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει η προσφορά ενός κίνητρου στους εγωιστικά συμπεριφερόμενους χρήστες, ώστε αυτοί να καταλήξουν σε τιμές ισχύος εκπομπής οι οποίες θα είναι πιο αποδοτικές για όλους τους χρήστες. Το κίνητρο αυτό τις περισσότερες φορές είναι κάποια κατάλληλα επιλεγμένη πολιτική κοστολόγησης των διαμοιραζόμενων πόρων του συστήματος.

Μία χαρακτηριστική προσέγγιση που χρησιμοποιήθηκε στις δημοσιεύσεις [9] και [40] ώστε να μετακινήσει το σημείο ισορροπίας κατά Nash σε χαμηλότερες τιμές ισχύος εκπομπής ήταν η πρόταση μίας πολιτικής κοστολόγησης ως προς την ισχύ εκπομπής των χρηστών. Σύμφωνα με αυτή την προσέγγιση, κάθε χρήστης υιοθέτησε μία κατάλληλα σχεδιασμένη Συνολική Συνάρτηση Χρησιμότητας (ΣΣΧ) $U_i(P_i, P_i) - c_i P_i$, όπου η συνάρτηση χρησιμότητας $U_i(P_i, P_i)$ εκφράζει τη λαμβανόμενη ικανοποίηση των χρηστών από το διαμοιρασμό των πόρων του συστήματος και εξαρτάται από την ισχύ εκπομπής του χρήστη P_i και από την ισχύ εκπομπής των υπολοίπων χρηστών εντός της κυψέλης P_i και ο παράγοντας c_i εκφράζει το κόστος εκπομπής του κάθε χρήστη ως προς την ισχύ εκπομπής του. Αυτή η μοντελοποίηση της ΣΣΧ οδηγεί τους χρήστες σε χαμηλότερες τιμές ισχύος εκπομπής και σε αντίστοιχη αύξηση της

λαμβανόμενης ικανοποίησής τους από το διαμοιρασμό των πόρων του συστήματος. Ωστόσο όμως παρόλο που αυτή η μοντελοποίηση της ΣΣΧ αναδεικνύει τη θετική συμβολή της πολιτικής κοστολόγησης, έχει ως επίπτωση η ΣΣΧ $U_i(P_i, P_i) - c_i P_i$ να μην έχει πλέον την ιδιότητα της ημι-κοίλης συνάρτησης, την οποία είχε η ΣΧ $U_i(P_i, P_i)$. Η ιδιότητα της ημι-κοίλης συνάρτησης μπορούσε εύκολα να χρησιμοποιηθεί στην απόδειξη της ύπαρξης του σημείου ισορροπίας κατά Nash. Συνεπώς, δεδομένου ότι πλέον η ΣΣΧ $U_i(P_i, P_i) - c_i P_i$ δεν είναι ημι-κοίλη, χρησιμοποιείται η μαθηματική ανάλυση για την απόδειξη της ύπαρξης του σημείου ισορροπίας κατά Nash, όπως είναι η ιδιότητα “super-modularity”. Το βασικό πλεονέκτημα ενός supermodular παιγνίου είναι ότι διαθέτει ένα μη κενό σύνολο από σημεία ισορροπίας κατά Nash. Ωστόσο όμως τονίζεται ότι στη δημοσίευση [22] με σκοπό να αποδειχθεί ότι το μη συνεργατικό παίγνιο κατανομής ισχύος εκπομπής είναι supermodular, χρησιμοποιήθηκαν συγκεκριμένες περιοριστικές υποθέσεις των οποίων η ορθότητα δεν έχει αποδειχθεί σε ένα ρεαλιστικό δίκτυο.

Συνεπώς στο παρόν κεφάλαιο γίνεται προσπάθεια να προσδιοριστεί μία πιο αποδοτική κατανομή πόρων του συστήματος, δεδομένης της απόδειξης της μη αποδοτικότητας του διαμοιρασμού των πόρων του συστήματος μέσω ενός κατανεμημένου παιγνίου κατανομής ισχύος εκπομπής χωρίς χρήση πολιτικής κοστολόγησης. Το διάνυσμα της ισχύος εκπομπής το οποίο βελτιώνει την απόδοση του διαμοιρασμού των πόρων του συστήματος κατά την Pareto έννοια σε σχέση με την κατανομή ισχύος εκπομπής που προσδιορίστηκε στο προηγούμενως προσδιορισθέν σημείο ισορροπίας κατά Nash P^* αναφέρεται ως Pareto βέλτιστο διάνυσμα ισχύος εκπομπής \tilde{P} .

Ορισμός 10: Ένα διάνυσμα ισχύος εκπομπής \tilde{P} είναι Pareto βέλτιστο εάν δεν υπάρχει άλλο διάνυσμα ισχύος εκπομπής P τέτοιο ώστε $U_i(P) \geq U_i(\tilde{P})$ για όλους τους χρήστες $i \in S$ και $U_i(P) > U_i(\tilde{P})$ για ορισμένους χρήστες $i \in S$.

Στο υπόλοιπο της παρούσας ενότητας αποδεικνύεται η μη αποδοτικότητα ως προς την κατανομή των πόρων του συστήματος του σημείου ισορροπίας του MSUPC παιγνίου, ενώ στην επόμενη ενότητα προσδιορίζεται η Pareto βέλτιστη λύση του παιγνίου κατανομής ισχύος εκπομπής με χρήση κατάλληλης πολιτικής κοστολόγησης.

Θεώρημα 2: Το σημείο ισορροπίας κατά Nash P^* του MSUPC παιγνίου είναι μη αποδοτικό.

Απόδειξη: Στη συνέχεια συμβολίζεται με $P^* \in C, C \subseteq A$ η στρατηγική η οποία αντιπροσωπεύει το σημείο ισορροπίας κατά Nash. Για ένα σημείο ισορροπίας κατά Nash P^* , οι μερικές παράγωγοι της ΣΧ $U_i(P)$ για όλους τους χρήστες $i \in S$ ως προς την ισχύ εκπομπής όλων των

υπόλοιπων χρηστών P_j , $j \in S, j \neq i$, υπάρχουν και είναι συνεχείς στο πεδίο $\mathbf{P} \in A$, εξαιτίας των ιδιοτήτων της ΣX , η οποία είναι συνεχής και διπλά παραγωγίσιμη στο πεδίο ορισμού της $\mathbf{P} \in A$. Πιο συγκεκριμένα από τον ορισμό του σημείου ισορροπίας κατά Nash \mathbf{P}^* , ισχύει το ακόλουθο,

$$\left. \frac{\partial U_i}{\partial P_i} \right|_{\mathbf{P}=\mathbf{P}^*} = 0, \text{ για } i \in S \quad (52)$$

Επιπρόσθετα, η πρώτη μερική παράγωγος της ΣX του χρήστη i ως προς την ισχύ εκπομπής των υπολοίπων χρηστών, δηλαδή $P_{j \neq i}$, $j \in S$, ισχύει μία από τις ακόλουθες δύο περιπτώσεις:

Για όλους τους χρήστες $i \in S$, η ΣX U_i του χρήστη i είναι φθίνουσα ως προς την ισχύ εκπομπής $P_{j \neq i}$ και για το λόγο αυτό ισχύει το ακόλουθο

$$\left. \frac{\partial U_i}{\partial P_j} \right|_{\mathbf{P}=\mathbf{P}^*} < 0 \quad \text{για } j \in S, j \neq i \quad (53)$$

Για όλους τους χρήστες $i \in S$, η ΣX U_i του χρήστη i είναι αύξουσα ως προς την ισχύ εκπομπής $P_{j \neq i}$ και για το λόγο αυτό ισχύει το ακόλουθο

$$\left. \frac{\partial U_i}{\partial P_j} \right|_{\mathbf{P}=\mathbf{P}^*} > 0 \text{ για } j \in S, j \neq i \quad (54)$$

Στη συνέχεια μειώνεται η ισχύς εκπομπής P_j όλων των χρηστών $i \in S$ του διανύσματος ισχύος εκπομπής \mathbf{P} από τις αντίστοιχες τιμές στο σημείο ισορροπίας \mathbf{P}^* . Έστω $\varepsilon > 0$ είναι μία μικρή θετική τιμή και για κάθε χρήστη $i \in S$ γίνεται η θεώρηση $\varepsilon_i = \varepsilon$. Σε αυτή την περίπτωση το διάνυσμα ισχύος εκπομπής είναι $(P_1^* - \varepsilon, P_2^* - \varepsilon, \dots, P_N^* - \varepsilon)$ και συμβολίζεται ως $\mathbf{P}^* - \varepsilon$. Τότε για κάθε χρήστη $i \in S$ ισχύει το ακόλουθο,

$$U_i(\mathbf{P}^* - \varepsilon) = U_i(\mathbf{P}^*) - \left. \frac{\partial U_i}{\partial P_j} \right|_{\mathbf{P}=\mathbf{P}^*} \varepsilon - \sum_{\substack{j \neq i \\ j \in S}} \left. \frac{\partial U_i}{\partial P_j} \right|_{\mathbf{P}=\mathbf{P}^*} \varepsilon + o(\varepsilon) \quad (55)$$

Με χρήση της σχέσης (52) προκύπτει το ακόλουθο,

$$U_i(\mathbf{P}^* - \varepsilon) = U_i(\mathbf{P}^*) - \sum_{\substack{j \neq i \\ j \in S}} \left. \frac{\partial U_i}{\partial P_j} \right|_{\mathbf{P}=\mathbf{P}^*} \varepsilon + o(\varepsilon) \quad (56)$$

Σημειώνεται ότι ισχύει $\frac{o(\varepsilon)}{\varepsilon} \rightarrow 0$ καθώς $\varepsilon \rightarrow 0$. Μελετώντας την πρώτη περίπτωση όπου η

μερική παράγωγος $\left. \frac{\partial U_i}{\partial P_j} \right|_{\mathbf{P}=\mathbf{P}^*}$ είναι αρνητική για όλους τους χρήστες $j \in S, j \neq i$, προκύπτει

μέσω της σχέσης (56) το ακόλουθο

$$U_i(\mathbf{P}^* - \varepsilon) > U_i(\mathbf{P}^*) \quad (57)$$

Όμοια μελετώντας τη δεύτερη περίπτωση και υποθέτοντας ότι η τιμή $\varepsilon < 0$ είναι μία μικρή αρνητική τιμή, εξάγεται το ίδιο συμπέρασμα της σχέσης (57). Αυτό υποδεικνύει ότι υπάρχει μία τιμή του διανύσματος ισχύος εκπομπής $\mathbf{P} (= \mathbf{P}^* - \varepsilon \neq \mathbf{P}^*)$ τέτοια ώστε $U_i(\mathbf{P}) > U_i(\mathbf{P}^*)$ για όλους τους χρήστες $i \in S$. Συνεπώς, το σημείο ισορροπίας κατά Nash \mathbf{P}^* του MSUPC

παιγνίου είναι μη αποδοτικό κατά την Pareto έννοια. ■

5.7 Μη Συνεργατικό Παίγνιο Κατανομής Ισχύος στη Ζεύξη Ανόδου με Χρήση Κυρτής Κοστολόγησης για την Υποστήριξη Πολλαπλών Υπηρεσιών (MSUPC-CP)

Στο μη συνεργατικό παίγνιο κατανομής ισχύος εκπομπής MSUPC χωρίς τη χρήση κοστολόγησης, κάθε χρήστης προσπαθεί να μεγιστοποιήσει τη ΣΧ του χωρίς να λαμβάνει υπόψη τις επιπτώσεις που προκαλεί στους υπόλοιπους χρήστες που εδρεύουν εντός της κυψέλης. Η εγωιστική συμπεριφορά των χρηστών προκαλεί επιπτώσεις στο σύστημα και ένας εφικτός τρόπος για να αντιμετωπιστεί είναι η χρήση κατάλληλης πολιτικής κοστολόγησης. Ανάμεσα στις ποικίλες πολιτικές κοστολόγησης που έχουν προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία, είτε ως προς την πρόσβαση στο δίκτυο, είτε ως προς την προτεραιότητα εξυπηρέτησης των χρηστών, είτε ως προς τη χρήση των πόρων του δικτύου, στο παρόν κεφάλαιο υιοθετείται η λογική της πολιτικής κοστολόγησης ως προς τους πόρους του δικτύου. Αυτού του είδους η πολιτική κοστολόγησης αναδεικνύεται ως ένα δυναμικό εργαλείο ώστε να αποκτήσουν οι χρήστες μία κοινωνικότερη συμπεριφορά και να βελτιωθεί το όφελος των χρηστών που εδρεύουν εντός της κυψέλης. Η υιοθέτηση κατάλληλης πολιτικής κοστολόγησης προκαλεί μεγαλύτερο κέρδος συνολικά για το σύστημα και προτρέπει τους χρήστες να χρησιμοποιούν πιο αποδοτικά τους πόρους του συστήματος. Ο σταθμός βάσης της υπό μελέτης κυψέλης προσδιορίζει την κατάλληλη πολιτική κοστολόγησης και τα συγκεκριμένα κόστη για τη χρήση των πόρων του συστήματος. Μία κατάλληλη πολιτική κοστολόγησης μπορεί να αντιπροσωπεύσει με ακρίβεια τις επιπτώσεις που προκαλούνται στο δίκτυο από τη μη αποδοτική χρήση των πόρων του και πρέπει να λαμβάνει υπόψη τη φύση και τα χαρακτηριστικά των υπηρεσιών που αιτούνται οι χρήστες.

5.7.1 Μη Γραμμική Πολιτική Κοστολόγησης

Καθώς αναφέρθηκε προηγουμένως, στη σύγχρονη βιβλιογραφία έχουν προταθεί πολιτικές κοστολόγησης, οι οποίες έχουν εφαρμοστεί στη ζεύξη ανόδου των ασύρματων κυψελωτών δικτύων και είναι γραμμικές συναρτήσεις ως προς την ισχύ εκπομπής των χρηστών. Με βάση αυτές τις προσεγγίσεις έχουν προκύψει αρκετά αριθμητικά αποτελέσματα τα οποία αναδεικνύουν το όφελος της υιοθέτησης της κοστολόγησης [9], [17], [22], [40], [41], [45]. Σε αυτές τις προσεγγίσεις, η υιοθέτηση της γραμμικής κοστολόγησης ως προς την ισχύ εκπομπής των χρηστών έχει χρησιμοποιηθεί για να μετακινηθεί το σημείο ισορροπίας κατά Nash σε μία καλύτερη λύση, δηλαδή σε μία λύση Pareto βέλτιστη.

Η ιδέα της κυρτής κοστολόγησης ως προς την ισχύ εκπομπής των χρηστών προήλθε από την παρατήρηση ότι οι επιπτώσεις που προκαλεί ένας χρήστης εξαιτίας της εκπομπής του στους υπόλοιπους χρήστες δεν είναι ισότιμη σε όλο το εύρος εκπομπής του, όπως υποθέτει η γραμμική κοστολόγηση. Παραδείγματος χάρη, εάν η ισχύς εκπομπής ενός χρήστη υπερβεί ένα προκαθορισμένο από το σύστημα κατώφλι, P_{thres} , τότε η κοστολόγησή του αυξάνει κατακόρυφα, ώστε να του επιβάλλει να χρησιμοποιήσει τους πόρους του συστήματος πιο αποδοτικά. Η συγκεκριμένη ιδέα είχε συζητηθεί και στη δημοσίευση [48], όπου οι συγγραφείς είχαν ισχυριστεί η κοστολόγηση των χρηστών μπορεί να είναι μία κυρτή συνάρτηση ως προς την ισχύ εκπομπής τους, ωστόσο όμως οι συγγραφείς περιορίστηκαν σε αριθμητικά αποτελέσματα αναφορικά μόνο με τη γραμμική κοστολόγηση.

Επιπρόσθετα, η ιδέα της μη γραμμικής κοστολόγησης έχει κατά καιρούς προταθεί στη βιβλιογραφία σε διάφορους ερευνητικούς τομείς [49], [50], [51] όπως στον τομέα της οικονομίας, της ενέργειας και αλλού. Περιληπτικά, οι βασικοί λόγοι για την υιοθέτηση μη γραμμικής κοστολόγησης είναι οι ακόλουθοι.

1. Η μη γραμμική κοστολόγηση των κρίσιμων και περιορισμένων πόρων του συστήματος είναι αναγκαία για την καλύτερη απόδοση του δικτύου.
2. Η μη γραμμική κοστολόγηση είναι μία χρήσιμη στρατηγική σε ανταγωνιστικές αγορές, όπως η ανταγωνιστική αγορά της κατανομής ισχύος εκπομπής, όπου ο πόρος της ισχύος εκπομπής είναι άνω φραγμένος και κρίσιμος για τους χρήστες για δύο βασικούς λόγους: (α) τη μεγιστοποίηση της λαμβανόμενης ικανοποίησης από το διαμοιρασμό των πόρων του συστήματος και (β) την ελαχιστοποίηση του θορύβου που δημιουργείται εντός της κυψέλης από την εκπομπή των χρηστών.
3. Η μη γραμμική κοστολόγηση αποτελεί ένα μέσο για τη διάκριση των χρηστών σε κλάσεις κοστολόγησης σε συστήματα όπου ο έλεγχος της ισχύος εκπομπής αποτελεί μονοπώλιο του ίδιου του συστήματος και συνεπώς μπορεί να αυξήσει το κέρδος του κοστολογώντας διαφορετικά τις ποικίλες κλάσεις των χρηστών. Σε αυτή την περίπτωση, οι χρήστες που ανήκουν σε κλάσεις όπου η ισχύς εκπομπής τους είναι αυξημένη, τότε αυτοί κοστολογούνται περισσότερο. Αυτή η ιδέα προκύπτει κυρίως από πολιτικές διαμοιρασμού και τμηματοποίησης των αγορών.

5.7.2 Μοντελοποίηση Προβλήματος

Λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω παρατηρήσεις, στην παρούσα ενότητα μοντελοποιείται το μη συνεργατικό παίγνιο κατανομής ισχύος εκπομπής στη ζεύξη ανόδου CDMA ασύρματων κυψελωτών δικτύων με χρήση κυρτής κοστολόγησης για την υποστήριξη πολλαπλών υπηρεσιών (Multi-Service Uplink Power Control game with Convex Pricing - MSUPC-CP). Το παίγνιο συμβολίζεται ως $G_{MSUPC-CP} = [S, \{A_i\}, \{U_i^{net}(\cdot)\}]$ στο οποίο οι ποικίλες

απαιτήσεις των χρηστών σε ΠτΥ για τις διαφορετικές υπηρεσίες (είτε πραγματικού είτε μη πραγματικού χρόνου) εκφράζονται μέσω μίας κατάλληλα μοντελοποιημένης ΣΣΧ U_i^{net} ως ακολούθως:

$$U_i^{net}(P_i, \mathbf{P}_{-i}) = \frac{T_i(R_i^*)}{P_i} - c_i(P_i, \mathbf{P}_{-i}) = \begin{cases} \frac{T_i(R_i^{Max} \cdot f_i(\gamma_i))}{P_i} - c_i(P_i, \mathbf{P}_{-i}), & \forall i \in S_{NRT} \\ \frac{T_i((R_{T,i}^* + EF_i) \cdot f_i(\gamma_i))}{P_i} - c_i(P_i, \mathbf{P}_{-i}), & \forall i \in S_{RT} \end{cases} \quad (58)$$

όπου $c_i: P \rightarrow \mathfrak{R}_+^1$ είναι η συνάρτηση κυρτής κοστολόγησης για το χρήστη $i \in S$, $S = S_{RT} \cup S_{NRT}$. Συνεπώς το MSUPC-CP παίγνιο βελτιστοποίησης μπορεί να εκφραστεί ως το πρόβλημα μεγιστοποίησης της ΣΣΧ κάθε χρήστη $i \in S$.

(MSUPC-CP παίγνιο)

$$\begin{aligned} \max_{P_i \in \mathcal{A}} U_i^{net} &= \max_{P_i \in \mathcal{A}} U_i^{net}(P_i, \mathbf{P}_{-i}) = \frac{T_i(R_i^*)}{P_i} - c_i(P_i, \mathbf{P}_{-i}) \\ s.t. \quad 0 &\leq P_i \leq P_i^{Max}, \quad \forall i \in S = S_{RT} \cup S_{NRT} \end{aligned} \quad (59)$$

Στο πρόβλημα όπως αυτό ορίστηκε προηγουμένως, η συνάρτηση κοστολόγησης έχει θεωρηθεί γενικά μία κυρτή συνάρτηση ως προς την ισχύ εκπομπής χωρίς να έχει υιοθετηθεί ένας συγκεκριμένος τύπος για αυτή. Ωστόσο όμως στην πορεία της ανάλυσης, χωρίς βλάβη της γενικότητας και κυρίως για λόγους παρουσίασης, υιοθετείται ως κυρτή συνάρτηση κοστολόγησης μία εκθετική συνάρτηση ως προς την ισχύ εκπομπής του χρήστη P_i ,

$$c_i(P_i, \mathbf{P}_{-i}) = c(e^{P_i} - 1) \quad (60)$$

όπου $c \in \mathfrak{R}_+^1$ είναι ο παράγοντας κοστολόγησης.

Το MSUPC-CP παίγνιο, όπως εκφράστηκε στη σχέση (59), έχει παρόμοια δομή με το MSUPC παίγνιο με διαφορετική όμως αντικειμενική συνάρτηση, η οποία για το MSUPC-CP παίγνιο είναι η ΣΣΧ. Παρόλα αυτά αυτή η διαφορά απαιτεί διαφορετική προσέγγιση για την επίλυση του MSUPC-CP παιγνίου, διότι η ΣΧ του MSUPC παιγνίου ήταν ημι-κοίλη, από όπου εύκολα προσδιοριζόταν το μοναδικό σημείο ισορροπίας κατά Nash, ενώ η αντικειμενική συνάρτηση του MSUPC-CP παιγνίου δεν είναι ημι-κοίλη.

Στη συνέχεια, αποδεικνύεται αναλυτικά η μοναδικότητα του σημείου ισορροπίας κατά Nash του MSUPC-CP παιγνίου και παράλληλα αποδεικνύεται ότι είναι ένα Pareto βέλτιστο σημείο, χωρίς να υιοθετείται η υπόθεση της supermodular θεωρίας, η οποία βασίζεται σε βασικές υποθέσεις και παραδοχές (χωρίς την απόδειξη αυτών).

Προς αυτή την κατεύθυνση και με βάση την προηγούμενη ανάλυση, αρχικά μελετώνται οι σχετικές θέσεις των ακόλουθων δύο χαρακτηριστικών τιμών της ισχύος εκπομπής: (α) P_{opt}^i , η οποία συμβολίζει το σημείο καμψής της συνάρτησης επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης $T_i(P_i)$, η

οποία έχει αποδειχθεί ότι είναι σιγμοειδής ως προς την ισχύ εκπομπής P_i (Lemma 1,2, [36]) και (β) P^* , η οποία συμβολίζει τη μοναδική θετική λύση του MSUPC παιχνιδιού, η οποία δίδεται από τη σχέση (51).

Λήμμα 9: Δεδομένων: (α) της συνάρτησης επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης $T(P) \equiv T(R_{Max}^* f(\gamma))$ η οποία είναι σιγμοειδής συνάρτηση [30] ως προς την ισχύ εκπομπής P και έχει ένα μοναδικό σημείο καμπής P_{Infl}^T και (β) της ΣΧ $U(P) = \frac{T(P)}{P}$ η οποία είναι ημι-κοίλη συνάρτηση ως προς την ισχύ εκπομπής P [30] και έχει μοναδικό σημείο μεγίστου P^* , τότε αποδεικνύεται μέσω της εις άτοπον απαγωγής ότι

$$P_{Infl}^T < P^* \quad (61)$$

Απόδειξη: Οι πιθανές σχετικές θέσεις των χαρακτηριστικών τιμών της ισχύος εκπομπής P_{Infl}^T και P^* είναι:

- A. $P_{Infl}^T > P^*$
- B. $P_{Infl}^T = P^*$
- C. $P_{Infl}^T < P^*$

Μελετώντας την περίπτωση (A), $P_{Infl}^T > P^*$, η ΣΧ είναι γνησίως φθίνουσα στο διάστημα $P \in [P^*, +\infty]$, συνεπώς

$$U(P_{Infl}^T) < U(P^*) \quad (62)$$

Επιπρόσθετα, εξαιτίας της παραπάνω ιδιότητας της ΣΧ στο υπό μελέτη διάστημα, εξάγεται ότι:

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial U}{\partial P} \right|_{P \in [P^*, +\infty]} &< 0 && \Leftrightarrow \\ \left. \frac{P \frac{\partial T(P)}{\partial P} - T(P)}{P^2} \right|_{P \in [P^*, +\infty]} &< 0 && \Leftrightarrow \\ \left. \frac{\partial T(P)}{\partial P} \right|_{P \in [P^*, +\infty]} &< \left. \frac{T(P)}{P} \right|_{P \in [P^*, +\infty]} && \Leftrightarrow \\ \left. \frac{\partial T(P)}{\partial P} \right|_{P \in [P^*, +\infty]} &< U(P) && \begin{matrix} P_{Infl}^T \in [P^*, +\infty] \\ \Leftrightarrow \end{matrix} \\ \left. \frac{\partial T(P)}{\partial P} \right|_{P=P_{Infl}^T} &< U(P_{Infl}^T) && (63) \end{aligned}$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (62) και (63) εξάγεται ότι

$$\left. \frac{\partial T(P)}{\partial P} \right|_{P=P_{Infl}^T} < U(P_{Infl}^T) < U(P^*) \quad (64)$$

Επιπλέον, στο διάστημα $P \in [P^*, P_{infl}^T]$, εξαιτίας του ορισμού της σιγμοειδούς συνάρτησης, η δεύτερη παράγωγος της συνάρτησης επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης ως προς την ισχύ εκπομπής P είναι θετική, δηλαδή $\left. \frac{\partial^2 T(P)}{\partial P^2} \right|_{P \in [P^*, P_{infl}^T]}$, συνεπώς η πρώτη παράγωγος $\left. \frac{\partial T(P)}{\partial P} \right|_{P \in [P^*, P_{infl}^T]}$ είναι γνησίως αύξουσα συνάρτηση. Στην περίπτωση (A), έχει γίνει η υπόθεση ότι $P_{infl}^T > P^*$, συνεπώς με βάση την προηγούμενη παρατήρηση εξάγεται η ακόλουθη ανισότητα,

$$\left. \frac{\partial T(P)}{\partial P} \right|_{P=P_{infl}^T} > \left. \frac{\partial T(P)}{\partial P} \right|_{P=P^*} \quad (65)$$

Επιπρόσθετα, για τη συγκεκριμένη τιμή του σημείου ισοροπίας κατά Nash του MSUPC παιχνιδιού, $P=P^*$, ισχύει ότι

$$\left. \frac{\partial U(P)}{\partial P} \right|_{P=P^*} = 0 \Leftrightarrow \left. \frac{\partial T(P)}{\partial P} \right|_{P=P^*} = U(P^*) \quad (66)$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (65) και (66) εξάγεται ότι

$$\left. \frac{\partial T(P)}{\partial P} \right|_{P=P_{infl}^T} > U(P^*) \quad (67)$$

Μελετώντας την περίπτωση (A), συμπεραίνεται μέσω της ατόπου απαγωγής και συνδυάζοντας τις σχέσεις (64) και (67) ότι η υπόθεση $P_{infl}^T > P^*$ δεν ισχύει.

Στη συνέχεια, μελετώντας την περίπτωση (B), όπου $P_{infl}^T = P^*$ και εξαιτίας την ένα προς ένα σχέσης («1-1») της ισχύος εκπομπής P και του σηματοθορυβικού λόγου γ , η περίπτωση (B) είναι ισοδύναμη με $\gamma_{infl}^T = \gamma^*$, όπου γ^* είναι η μοναδική θετική λύση της σχέσης $\frac{\partial T(\gamma)}{\partial \gamma} \cdot \gamma - T(\gamma) = 0$.

Θεωρώντας τη συνάρτηση $N(\gamma) = \frac{\partial T(\gamma)}{\partial \gamma} \cdot \gamma - T(\gamma)$, υπολογίζεται η πρώτη της παράγωγος ως προς το σηματοθορυβικό λόγο γ .

$$\begin{aligned} \frac{\partial N(\gamma)}{\partial \gamma} &= \gamma \cdot \frac{\partial^2 T(\gamma)}{\partial \gamma^2} && \gamma_{infl}^T = \gamma^* \\ &&& \Leftrightarrow \\ N(\gamma_{infl}^T) &= N(\gamma^*) = 0 \end{aligned} \quad (68)$$

Επιπρόσθετα, η πρώτη παράγωγος της συνάρτησης $N(\gamma)$ ως προς το σηματοθορυβικό λόγο γ είναι θετική στο διάστημα $\gamma \in (0, \gamma_{infl}^T)$, δηλαδή $\left. \frac{\partial N(\gamma)}{\partial \gamma} \right|_{\gamma \in (0, \gamma_{infl}^T)} > 0$, εξαιτίας της θετικής δεύτερης παραγώγου της συνάρτησης επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης ως προς το σηματοθορυβικό λόγο γ , δηλαδή $\left. \frac{\partial^2 T(\gamma)}{\partial \gamma^2} \right|_{\gamma \in (0, \gamma_{infl}^T)}$, ιδιότητα η οποία πηγάζει από τον ορισμό της σιγμοειδούς συνάρτησης. Συνεπώς, δεδομένου ότι η συνάρτηση $N(\gamma)$ είναι συνεχής στο διάστημα $\gamma \in (0, \gamma_{infl}^T)$ και η πρώτη της παράγωγος $\left. \frac{\partial N(\gamma)}{\partial \gamma} \right|_{\gamma \in (0, \gamma_{infl}^T)}$ είναι θετική στο διάστημα

$(0, \gamma_{\text{Infl}}^T)$, τότε εξάγεται ότι η συνάρτηση $N(\gamma)$ είναι γνησίως αύξουσα σε ολόκληρο το διάστημα $[0, \gamma_{\text{Infl}}^T]$. Συνεπώς, ισχύει η ακόλουθη σχέση,

$$\begin{aligned} \gamma > 0 &\Leftrightarrow N(\gamma) > N(0) = 0 && \stackrel{\gamma = \gamma_{\text{Infl}}^T}{\Leftrightarrow} \\ & && N(\gamma_{\text{Infl}}^T) > 0 \end{aligned} \quad (69)$$

Μελετώντας την περίπτωση (B), εξάγεται με βάση την εις άτοπον απαγωγή και παρατηρώντας τις σχέσεις (68) και (69) ότι η υπόθεσηση $P_{\text{Infl}}^T = P^*$ δεν ισχύει. Συνεπώς, η σχετική θέση των τιμών της ισχύος εκπομπής P_{Infl}^T και P^* , υπακούει στην περίπτωση (C), δηλαδή $P_{\text{Infl}}^T < P^*$. ■

Καθώς αναλύεται στο ακόλουθο λήμμα, το προηγούμενο λήμμα έχει καθοριστικό ρόλο στον προσδιορισμό των ιδιοτήτων της ΣΣΧ των χρηστών. Πιο αναλυτικά, στο ακόλουθο λήμμα αναλύονται οι ιδιότητες της ΣΣΧ των χρηστών που αιτούνται είτε υπηρεσίες πραγματικού είτε μη πραγματικού χρόνου, στο αντίστοιχο πεδίο ορισμού τους.

Λήμμα 10: Δεδομένων: (α) της συνάρτησης επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης $T(P) \equiv T(R_{\text{Max}}^* f(\gamma))$ η οποία είναι σιγμοειδής ως προς την ισχύ εκπομπής P και έχει μοναδικό σημείο καμπής P_{Infl}^T και (β) της ΣΧ $U(P) = \frac{T(P)}{P}$ η οποία είναι ημι-κοίλη συνάρτηση ως προς την ισχύ εκπομπής P και έχει ένα μοναδικό ολικό μέγιστο P^* , τότε υπάρχει μία κρίσιμη τιμή της ισχύος εκπομπής $P_{\text{crit}} \in [P_{\text{Infl}}^T, P^*)$ τέτοια ώστε η ΣΣΧ $U^{\text{net}}(P) = U(P) - c(P)$ είναι γνησίως φθίνουσα συνάρτηση ως προς την ισχύ εκπομπής P στο διάστημα $P \in [P_{\text{crit}}, +\infty)$.

Απόδειξη: Θεωρώντας την πρώτη παράγωγο της ΣΣΧ ως προς την ισχύ εκπομπής P , ισχύει η ακόλουθη σχέση,

$$\frac{\partial U^{\text{net}}}{\partial P} = \frac{P \frac{\partial T(P)}{\partial P} - T(P)}{P^2} - \frac{\partial c(P)}{\partial P} = \frac{\partial U(P)}{\partial P} - \frac{\partial c(P)}{\partial P} \quad (70)$$

Επιπρόσθετα, μελετώντας το διάστημα $P \in [P^*, +\infty)$, εξαιτίας του ορισμού της ημι-κοίλης ΣΧ και της κυρτής συνάρτησης κοστολόγησης ως προς την ισχύ εκπομπής P , ισχύουν οι ακόλουθες ιδιότητες,

$$\left. \frac{\partial U(P)}{\partial P} \right|_{P \geq P^*} \leq 0 \quad (71)$$

$$\left. \frac{\partial c(P)}{\partial P} \right|_{P \geq P^*} \geq 0 \quad (72)$$

Συνεπώς, η πρώτη παράγωγος της ΣΣΧ ως προς την ισχύ εκπομπής P είναι αρνητική στο διάστημα $P \in [P^*, +\infty)$, δηλαδή

$$\left. \frac{\partial U^{net}}{\partial P} \right|_{P=P^*} < 0 \quad (73)$$

Επιπρόσθετα, η δεύτερη παράγωγος της ημι-κοίλης ΣX και της κυρτής συνάρτησης κοστολόγησης είναι αρνητική και θετική αντίστοιχα, στο διάστημα $P \in (P_{inf}^T, P^*)$ (δηλαδή $\left. \frac{\partial^2 U^{net}(P)}{\partial P^2} \right|_{P \in (P_{inf}^T, P^*)} = \left. \frac{\partial^2 U(P)}{\partial P^2} \right|_{P \in (P_{inf}^T, P^*)} - \left. \frac{\partial^2 c(P)}{\partial P^2} \right|_{P \in (P_{inf}^T, P^*)} < 0$). Για το λόγο αυτό, η πρώτη παράγωγος της ΣX ως προς την ισχύ εκπομπής P είναι γνησίως φθίνουσα στο υπό μελέτη διάστημα. Επιπλέον, από τη σχέση (73) προκύπτει ότι $\left. \frac{\partial U^{net}(P)}{\partial P} \right|_{P=P^*} < 0$. Συνεπώς, ακολουθώντας την προηγούμενη ανάλυση εξάγεται η ύπαρξη μίας κρίσιμης τιμής της ισχύος εκπομπής, $P_{crit} \in [P_{inf}^T, P^*]$, τέτοια ώστε η πρώτη παράγωγος της ΣX ως προς την ισχύ εκπομπής είναι αρνητική στο διάστημα $P \in [P_{crit}, P^*)$. Για το λόγο αυτό, η $\Sigma X U^{net}(P)$ είναι γνησίως φθίνουσα στο διάστημα $[P_{crit}, +\infty)$. ■

Με βάση το προηγούμενο λήμμα, αναδεικνύεται η μορφή της ΣX των χρηστών $U^{net}(P)$ ως προς την ισχύ εκπομπής P , οι οποίοι μπορεί να αιτούνται είτε υπηρεσίες πραγματικού είτε μη πραγματικού χρόνου. Επιπρόσθετα, από το προηγούμενο λήμμα εξάγεται ότι το ολικό μέγιστο της ΣX είναι περιορισμένο εντός του διαστήματος $(0, P_{crit}]$. Αυτή η παρατήρηση είναι σύμφωνη με την απόδειξη της μη αποδοτικότητας του σημείου ισορροπίας κατά Nash του MSUPC παιγνίου, διότι παρατηρείται ότι το σημείο ισορροπίας κατά Nash του MSUPC-CP παιγνίου, P_{net}^* , εάν αυτό υπάρχει, βρίσκεται στο διάστημα $P_{net}^* \in (0, P_{crit}]$, δηλαδή $P_{net}^* < P^*$. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι οι χρήστες θα μεγιστοποιούν τη ΣX τους στο MSUPC-CP παίγνιο σε χαμηλότερη ισχύ εκπομπής P_{net}^* , σε αντίθεση με το αντίστοιχο σημείο ισορροπίας κατά Nash, P^* , του MSUPC παιγνίου. Η ακόλουθη πρόταση δηλώνει την ύπαρξη και μοναδικότητα του σημείου ισορροπίας κατά Nash του MSUPC-CP παιγνίου.

Πρόταση 6: Η $\Sigma X U_{net}(P)$ του MSUPC-CP παιγνίου έχει ένα μοναδικό ολικό μέγιστο, P_{net}^* , στο διάστημα $(0, P_{crit}]$, το οποίο είναι το σημείο ισορροπίας του MSUPC-CP παιγνίου.

Απόδειξη: Μελετώντας τη $\Sigma X U_{net}(P)$ όπως αυτή ορίστηκε στη σχέση (58), εύκολα εξάγεται ότι είναι συνεχής και $C^{(n)}$ παραγωγίσιμη στο διάστημα $(0, P_{crit}]$. Βασίζόμενοι στο θεώρημα μέγιστης τιμής (Weierstrass Extreme Value Theorem - E.V.T.), εξάγεται ότι η ΣX έχει ένα μοναδικό ολικό μέγιστο P_{net}^* , το οποίο είναι το μοναδικό σημείο ισορροπίας κατά Nash του MSUPC – CP παιγνίου. ■

Η προηγούμενη πρόταση καταλήγει στην ύπαρξη και μοναδικότητα του σημείου ισορροπίας κατά Nash του MSUPC-CP παιγνίου. Με βάση την προηγούμενη ανάλυση μπορεί

να προσδιοριστεί η συγκεκριμένη τιμή του διανύσματος της ισχύος εκπομπής P_{net}^* , η οποία αντιστοιχεί στο μοναδικό σημείο ισορροπίας κατά Nash, δηλαδή τη συγκεκριμένη τιμή της ισχύος εκπομπής όλων των χρηστών στη ζεύξη ανόδου P_{net}^* , όπως φαίνεται στο ακόλουθο θεώρημα:

Θεώρημα 3: Το σημείο ισορροπίας κατά Nash του μη συνεργατικού παιγνίου όπως αυτό ορίστηκε στη σχέση (59) δίδεται από την τιμή P_{net}^* , $P_{net}^* \in (0, P_{crit}]$

$$P_{net,i}^* = \min \left\{ \min_{\Lambda_{k,i}} \left(\arg \max_{\Lambda_{k,i}} (U_i^{net}(\Lambda_{k,i})) \right), P_i^{Max} \right\} \quad \Lambda_{k,i} = \{P_{1,i}^*, P_{2,i}^*, \dots, P_{K,i}^*\}, k=1, \dots, K, i \in S$$

$$s.t. \quad \left. \frac{\partial U_i^{net}(P_i)}{\partial P_i} \right|_{P_i=P_{net,i}^*} = 0$$

$$\left. \frac{\partial^2 U_i^{net}(P_i)}{\partial^2 P_i} \right|_{P_i=P_{net,i}^*} < 0 \quad (74)$$

όπου $\Lambda_{k,i} = \{P_{1,i}^*, P_{2,i}^*, \dots, P_{K,i}^*\}, k=1, \dots, K, i \in S$ είναι το σύνολο των τοπικών μεγίστων που βρίσκονται στο υπό μελέτη διάστημα $P_i \in (0, P_{crit}]$.

5.8 Σύγκλιση του MSUPC-CP Παιγνίου

Σε αυτή την ενότητα αποδεικνύεται η σύγκλιση του μη συνεργατικού παιγνίου κατανομής ισχύος εκπομπής στη ζεύξη ανόδου με χρήση κυρτής κοστολόγησης και υποστήριξη πολλαπλών υπηρεσιών (MSUPC-CP παίγνιο). Με βάση το προηγούμενο θεώρημα, συμβολίζεται η καλύτερη απόκριση του χρήστη i ως BR_i (best response) και δίδεται ως ακολούθως:

$$BR_i(P_i) = \min \left\{ \min_{\Lambda_{k,i}} \left(\arg \max_{\Lambda_{k,i}} (U_i^{net}(\Lambda_{k,i})) \right), P_i^{Max} \right\}$$

$$\Lambda_{k,i} = \{P_{1,i}^*, P_{2,i}^*, \dots, P_{K,i}^*\}, k=1, \dots, K, i \in S$$

$$s.t. \quad \left. \frac{\partial U_i^{net}(P_i)}{\partial P_i} \right|_{P_i=P_{net,i}^*} = 0$$

$$\left. \frac{\partial^2 U_i^{net}(P_i)}{\partial^2 P_i} \right|_{P_i=P_{net,i}^*} < 0 \quad (75)$$

Θεώρημα 4: Το MSUPC-CP παίγνιο $G_{MSUPC-CP} = [S, \{A_i\}, \{U_i^{net}(\cdot)\}]$ συγκλίνει στο μοναδικό του σημείο ισορροπίας κατά Nash, όπως αυτό ορίστηκε στη σχέση (74), ξεκινώντας από

οποιοδήποτε αρχικό σημείο.

Απόδειξη: Έως αυτό το σημείο της ανάλυσης έχει αποδειχθεί η μοναδικότητα του σημείου ισορροπίας κατά Nash του MSUPC-CP παιγνίου. Το σημείο ισορροπίας συμβολίζεται ως $P_{net}^* = (P_{net,1}^*, P_{net,2}^*, \dots, P_{net,N}^*)$. Εξ ορισμού το μοναδικό σημείο ισορροπίας κατά Nash ικανοποιεί τη σχέση,

$$P_{net}^* = BR(P) \quad (76)$$

όπου $BR(P) = (BR_1(P_1), BR_2(P_2), \dots, BR_N(P_N))$ είναι το διάνυσμα των βέλτιστων αποκρίσεων όλων των χρηστών. Το βασικό στοιχείο για να αποδειχθεί ότι το MSUPC-CP παίγνιο συγκλίνει στο μοναδικό του σημείο ισορροπίας κατά Nash είναι να αποδειχθεί ότι η συνάρτηση βέλτιστης απόκρισης $BR(P)$ είναι standard [33], [45]. Μία συνάρτηση χαρακτηρίζεται ως standard εάν χαρακτηρίζεται από τις ακόλουθες ιδιότητες για όλα τα διανύσματα $P \geq 0$, όπου $P = (P_1, P_2, \dots, P_N)$,

- Θετική: $BR(P) > 0$;
- Μονότονη: εάν $P' \geq P$ τότε $BR(P') \geq BR(P)$;
- Κλιμάκωση: for all $\alpha > 1$, $\alpha BR(P) \geq BR(\alpha P)$.

Αυτές οι ιδιότητες μπορούν εύκολα να αποδειχθούν για τη συνάρτηση βέλτιστης απόκρισης $BR(P)$ για το $G_{MSUPC-CP}$ παίγνιο, αφού,

- $P > 0$, τότε $BR(P) > 0$;
- Εάν $P' \geq P$ τότε από την εξίσωση (33) εξάγεται ότι $BR(P') \geq BR(P)$;
- Για όλες τις τιμές $\alpha > 1$, μέσω της σχέσης (33) εξάγεται ότι $\alpha BR(P) \geq BR(\alpha P)$.

Συνεπώς, η σύγκλιση του MSUPC-CP παιγνίου στο μοναδικό του σημείο ισορροπίας κατά Nash μέσω της στρατηγικής βέλτιστης απόκρισης, όπως αυτή δίδεται από τη σχέση (76), είναι εγγυημένη.

5.9 MSUPC-CP Αλγόριθμος

Σε αυτή την ενότητα, με βάση την ανάλυση που προηγήθηκε, προτείνεται ένας κατανεμημένος επαναληπτικός αλγόριθμος κατανομής ισχύος εκπομπής, ο οποίος καταλήγει στο μοναδικό Pareto βέλτιστο σημείο ισορροπίας κατά Nash, P_{net}^* του MSUPC-CP παιγνίου. Πιο αναλυτικά, ο προτεινόμενος αλγόριθμος είναι χωρισμένος σε δύο βασικά μέρη. Το ένα τμήμα του αλγορίθμου εδρεύει στο σταθμό βάσης και είναι υπεύθυνο για την ευρυεκπομπή του παράγοντα κοστολόγησης στους χρήστες και τη συλλογή του ολικού θορύβου από το σύστημα. Το δεύτερο μέρος του αλγορίθμου εδρεύει σε κάθε χρήστη, ο οποίος συμμετέχει

στο μη συνεργατικό παίγνιο και δεδομένου του παράγοντα κοστολόγησης, αποφασίζει ο αλγόριθμος την ισχύ εκπομπής του χρήστη μέσω της σχέσης (74) με έναν κατανεμημένο τρόπο. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται έως ότου ο αλγόριθμος συγκλίνει στη Pareto βέλτιστη τιμή της ισχύος εκπομπής για το MSUPC-CP παίγνιο, P_{net}^* . Τα αντίστοιχα τμήματα του αλγορίθμου που περιγράφηκαν είναι τα ακόλουθα.

Αλγόριθμος Τμήμα I (Τμήμα Δικτύου)

Βήμα 1^ο: Ανακοίνωσε τον αρχικό συντελεστή κοστολόγησης $c=0$ σε όλους τους χρήστες i , $i \in S$.

Βήμα 2^ο: Κάθε χρήστης προσδιορίζει το σημείο ισοροπίας κατά Nash P_{net}^* (σύμφωνα με το δεύτερο τμήμα του αλγορίθμου) και υπολογίζει την τιμή της ΣΣΧ του U_i^{net} , $i \in S$

Βήμα 3^ο: Αύξησε την τιμή του συντελεστή κοστολόγησης $c := c + \Delta c$ και ανακοίνωσέ την σε όλους τους χρήστες.

Βήμα 4^ο: Εάν η ΣΣΧ των χρηστών δε βελτιώνεται ως προς τις τιμές της, δηλαδή $U_i^{net}(c) > U_i^{net}(c + \Delta c)$ για όλους τους χρήστες $i \in S$ τότε σταμάτα και θέσε $c_{best} = c$. Σε κάθε άλλη περίπτωση επέστρεψε στο βήμα 2.

Αλγόριθμος Τμήμα II (Τμήμα Χρήστη)

Βήμα 1^ο: Στην αρχή κάθε χρονοσχιsmής t , ο χρήστης i , $i \in S$, εκπέμπει με μία τυχαία επιλεγμένη τιμή ισχύος εκπομπής (δηλαδή $0 \leq P_i^{*(0)} \leq P_i^{Max}$). Θέσε $l=0$ και συνεπώς $P_i^{*(0)}$, $i \in S$.

Βήμα 2^ο: Δεδομένων των τιμών της ισχύος εκπομπής όλων των χρηστών, οι οποίες ευρυσκεπέμπονται από το σταθμό βάσης, όταν αυτός εκπέμπει μέσω ευρυσκεπομπής το συνολικό θόρυβο εντός της κυψέλης $I^{(l)}(P^{(l)})$, κάθε χρήστης προσδιορίζει τις παρεμβολές που αντιλαμβάνεται από τους γείτονές του $I_{-i}^{(l)}(P_{-i}^{(l)})$ και επαναπροσδιορίζει την ισχύ εκπομπής του, $P_i^{*(l+1)}$, με βάση τη σχέση (74).

Βήμα 3^ο: Εάν οι τιμές της ισχύος εκπομπής συγκλίνουν (δηλαδή $|P_i^{*(l+1)} - P_i^{*(l)}| \leq 10^{-5}$) τότε σταμάτα.

Βήμα 4^ο: Σε κάθε άλλη περίπτωση, θέσε $l=l+1$ και επέστρεψε στο βήμα 2.

Ο MSUPC-CP αλγόριθμος χαρακτηρίζεται ως ένας μονότιμος κατανεμημένος αλγόριθμος χαμηλής πολυπλοκότητας με χρήση της βέλτιστης απόκρισης των χρηστών, ο οποίος ξεκινάει από μία τυχαία επιλεγμένη τιμή από το σύνολο των στρατηγικών του A_i (δηλαδή $P_{net,i}^{*(0)} \forall i \in S$) και συγκλίνει στο Pareto βέλτιστο σημείο ισοροπίας κατά Nash του παιγνίου.

5.10 Αριθμητικά Αποτελέσματα & Συμπεράσματα

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται ορισμένα αριθμητικά αποτελέσματα, ώστε να αναδειχθεί η λειτουργία και τα χαρακτηριστικά του προτεινόμενου μοντέλου και του MSUPC-CP αλγορίθμου. Υποθέτοντας χρονομεταβλητά κανάλια επικοινωνιών, αναδεικνύονται οι ιδιότητες του MSUPC-CP αλγορίθμου και οι συσχετίσεις ανάμεσα στην ποιότητα του καναλιού των χρηστών, την αντίστοιχη κατανάλωση ισχύος εκπομπής και τη λαμβανόμενη ικανοποίηση των χρηστών από το διαμοιρασμό των πόρων του συστήματος. Επιπρόσθετα μελετάται η συσχέτιση ανάμεσα στην απόδοση των υπηρεσιών πραγματικού χρόνου και μη πραγματικού χρόνου, σε όρους ισχύος εκπομπής και λαμβανόμενης ικανοποίησης από το δίκτυο, όταν οι χρήστες που αιτούνται τα δύο διαφορετικά είδη υπηρεσιών μοιράζονται τους ίδιους πόρους του συστήματος υπό χρονομεταβλητά κανάλια.

Αρχικά, μελετούνται τα πλεονεκτήματα από την υιοθέτηση της πολιτικής κοστολόγησης, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της ισχύος εκπομπής και των τιμών των ΣΧ των χρηστών για τα MSUPC και MSUPC-CP παίγνια, ενώ παράλληλα μελετάται η σύγκλιση του MSUPC-CP αλγορίθμου. Επιπρόσθετα, συγκρίνονται τα αποτελέσματα του MSUPC-CP παιγνίου, στο οποίο υιοθετείται κυρτή πολιτική κοστολόγησης, με τα αντίστοιχα αποτελέσματα του ίδιου παιγνίου το οποίο όμως υιοθετεί γραμμική πολιτική κοστολόγησης (το αντίστοιχο παίγνιο συμβολίζεται ως MSUPC-LP), η οποία είναι η πιο συνηθισμένη πολιτική κοστολόγησης στη βιβλιογραφία. Τελικά, η απόδοση του MSUPC-CP παιγνίου μελετάται καθώς το πλήθος των χρηστών εντός της υπό μελέτη κυψέλης αυξάνει, συγκρίνοντας τέσσερα διαφορετικά σενάρια κατανομής ισχύος στη ζεύξη ανόδου που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία.

Κατά τη διάρκεια όλης της μελέτης, εξετάζεται η ζεύξη ανόδου ενός μονοκυψελικού CDMA ασύρματου συστήματος, το οποίο εξυπηρετεί χρήστες που αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου, οι οποίοι έχουν συνεχώς δεδομένα να μεταδώσουν. Κάθε προσομοίωση διαρκεί 10.000 χρονοσχιμές. Το κέρδος του καναλιού του χρήστη μοντελοποιείται μέσω ενός μοντέλου απωλειών διαδρομής $G_i = K_i / d_i^a$, όπου d_i είναι η απόσταση του χρήστη i από το σταθμό βάσης, a είναι ο εκθέτης απωλειών εξαιτίας της απόστασης (όπου $a=4$) και K_i είναι μία λογαριθμοκανονική κατανομή τυχαίας μεταβλητής με μέσο όρο θ και διακύμανση $\sigma^2 = 8(db)$, η οποία αντιπροσωπεύει τα φαινόμενα σκίασης. Επιπρόσθετα, για λόγους παρουσίασης γίνεται η θεώρηση ότι όλοι οι χρήστες υιοθετούν ένα κοινό σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης, δηλαδή την ίδια συνάρτηση απόδοσης, η οποία εκφράζεται ως μία σιγμοειδής συνάρτηση $f_i(\gamma_i) = (1 - e^{-3.7 \cdot \gamma_i})^M$, $M=8\theta$. Οι φυσικοί και τεχνικοί περιορισμοί που τίθενται από το υλισμικό των χρηστών σχετικά με την ισχύ εκπομπής τους είναι $P_i^{Max} = 2$ W και η αρχικά επιλεγόμενη ισχύς εκπομπής των χρηστών

ΠΙΝΑΚΑΣ 4 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

<i>Parameter</i> ($\forall i \in S$)	<i>Value</i>
P_i^{Max}	2 (Watt)
$P_i^{*(0)}$	2 (Watt)
W	106 (Hz)
$I0$	$5 \cdot 10^{-16}$
A	4
M	80

ΠΙΝΑΚΑΣ 5 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΥ ΧΡΟΝΟΥ

<i>Users' Class</i>	<i>Class 2</i>
<i>Characteristic</i>	<i>(multimedia users)</i>
R_i^*	64 (Kbps)
EF	10 (Kbps)
M_T	2160
$R_{Min,i}^*$	54 (Kbps)

ΠΙΝΑΚΑΣ 6 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΜΗ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΥ ΧΡΟΝΟΥ

<i>Users' Class</i>	<i>Class 2</i>
<i>Characteristic</i>	<i>(multimedia users)</i>
b_i	0.001
R_i^{Max}	2.4 (Mbps)

θεωρείται ότι επιλέγεται τυχαία από το πεδίο ορισμού της ισχύος εκπομπής. Οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες.

5.10.1 Ιδιότητες Σημείου Ισορροπίας κατά Nash του MSUPC-CP Παιγνίου

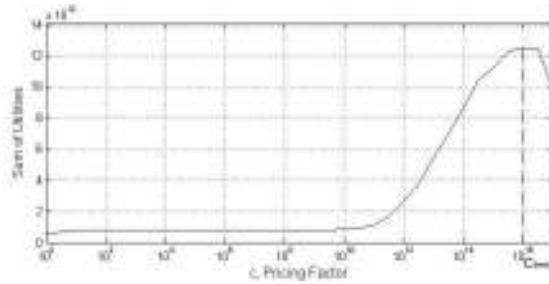
Στη συνέχεια μελετάται η ζεύξη ανόδου ενός μονοκυβελικού CDMA ασύρματου δικτύου, το οποίο υποστηρίζει $N=9$ χρήστες, οι οποίοι έχουν συνεχώς δεδομένα να μεταδώσουν και

είναι τοποθετημένοι σε αποστάσεις $d=[310, 460, 570, 660, 740, 810, 880, 940, 1000]$ meters από το σταθμό βάσης. Με αυτό τον τρόπο μοντελοποιείται το σενάριο κατά το οποίο καθώς η ποιότητα του καναλιού των χρηστών χειροτερεύει, ο αντίστοιχος αριθμός του χρήστη αυξάνει (δηλαδή $i=1,2,\dots,9$). Με βάση το είδος της υπηρεσίας που αιτούνται οι χρήστες διαχωρίζονται σε δύο κλάσεις (χρήστες πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου). Η κλάση των χρηστών πραγματικού χρόνου αντιπροσωπεύει χρήστες οι οποίοι αιτούνται πολυμεσικές υπηρεσίες και συγκεκριμένα υπηρεσίες φωνής, ενώ η κλάση των χρηστών μη πραγματικού χρόνου αντιπροσωπεύει χρήστες που αιτούνται υπηρεσίες δεδομένων. Οι δύο κλάσεις διαφοροποιούνται με βάση τα χαρακτηριστικά των υπηρεσιών, τα οποία αντικατοπτρίζονται στη μοντελοποίηση της συνάρτησης επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης, $T_i(R_i^*)$ και στις αντίστοιχες παραμέτρους. Οι χρήστες που αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου απαιτούν ελάχιστο επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσης $R_{T,i}^* = 64Kbps$, όπου ο παράγοντας ελαστικότητας είναι $EF_i = 10Kbps$, για $i \in S_{RT}$ και υιοθετούν ως συνάρτηση επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης την ακόλουθη $T_i(R_i^*) = (1 - e^{-(R_i^* - R_{Min,i}^*)^{M_{T,i}}})^{M_{T,i}}$, με $R_{Min,i}^* = R_{T,i}^* - EF_i = 54Kbps$, $M_{T,i} = 2160$. Αναφορικά με τους χρήστες που αιτούνται υπηρεσίες δεδομένων υιοθετείται ως συνάρτηση επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης μία γνησίως κοίλη συνάρτηση, $T_i(R_i^*) = \log(b_i R_i^* + 1)$. Για λόγους προσομοίωσης και παρουσίασης γίνεται η επιλογή, οι χρήστες 1 έως 6 να αιτούνται υπηρεσίες δεδομένων, ενώ οι χρήστες 7 έως 9 να αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου.

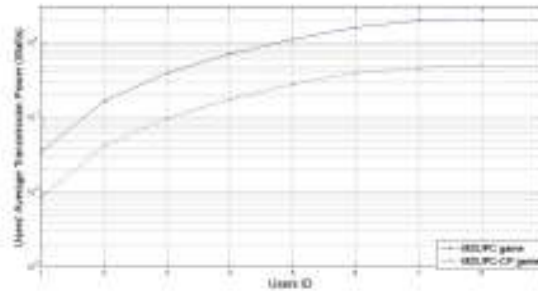
Το σχήμα 26 αντιπροσωπεύει το άθροισμα των τιμών των ΣΧ των χρηστών ως συνάρτηση του παράγοντα κοστολόγησης c . Το διάγραμμα έχει κατασκευαστεί με βάση τον MSUPC-CP αλγόριθμο, όπου το δεύτερο μέρος του αλγορίθμου συγκλίνει στο σημείο ισορροπίας κατά Nash για κάθε τιμή του παράγοντα κοστολόγησης.

Τα σχήματα 27 και 28 απεικονίζουν τη μέση τιμή της ισχύος εκπομπής και τη μέση τιμή των τιμών των ΣΧ ως προς τον αύξοντα αριθμό των χρηστών. Στην περίπτωση των χρηστών που αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου (δηλαδή οι χρήστες 7 έως 9), τα αποτελέσματα αναδεικνύουν ότι καθώς η ποιότητα του καναλιού των χρηστών χειροτερεύει (δηλαδή αυξάνει ο αύξων αριθμός των χρηστών) και με στόχο την ικανοποίηση των απαιτήσεων των χρηστών σε ΠτΥ, οι χρήστες αυξάνουν την ισχύ εκπομπής τους με αποτέλεσμα την αντίστοιχη μείωση των τιμών των ΣΧ τους. Παράλληλα, μελετώντας τους χρήστες που αιτούνται υπηρεσίες δεδομένων, παρατηρείται ότι καθώς η ποιότητα του καναλιού τους χειροτερεύει (δηλαδή αναφερόμενοι στους χρήστες 1 έως 6), οι τιμές των ΣΧ τους μειώνονται, ενώ η ισχύς εκπομπής των χρηστών αυξάνεται.

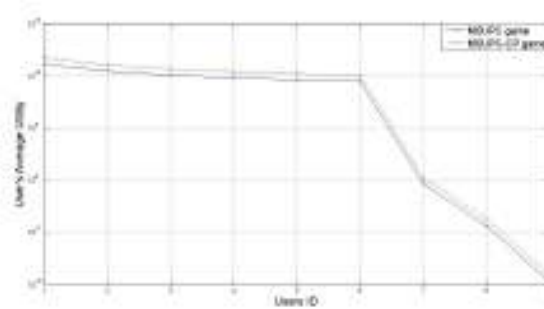
Επιπρόσθετα, τα σχήματα 27 και 28 παρουσιάζουν τα αποτελέσματα της μέσης τιμής της ισχύος εκπομπής των χρηστών και τη μέση τιμή των ΣΧ τους, για τα παίγνια MSUPC και MSUPC-CP. Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν ότι οι τιμές των ΣΧ των χρηστών που εδρεύουν εντός της κυψέλης βελτιώνονται σημαντικά, ως αποτέλεσμα της υιοθέτησης της κυρτής



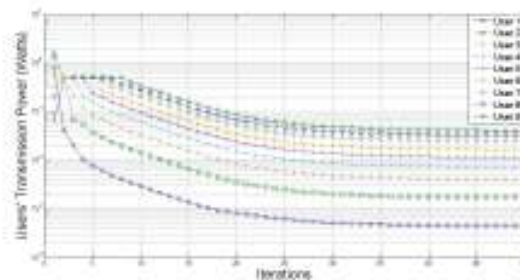
Σχήμα 26 Άθροισμα των τιμών των ΣΧ των χρηστών ως συνάρτηση του παράγοντα κοστολόγησης, c .



Σχήμα 27 Μέση τιμή της ισχύος εκπομπής στο σημείο ισορροπίας για το MSUPC και το MSUPC-CP παίγνιο, με $c=c_{best}$.

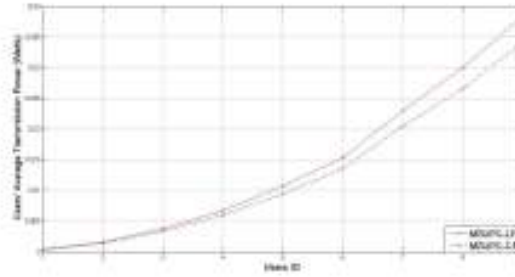


Σχήμα 28 Μέση τιμή των τιμών της ΣΧ στο σημείο ισορροπίας για το MSUPC και το MSUPC-CP παίγνιο, με $c=c_{best}$.

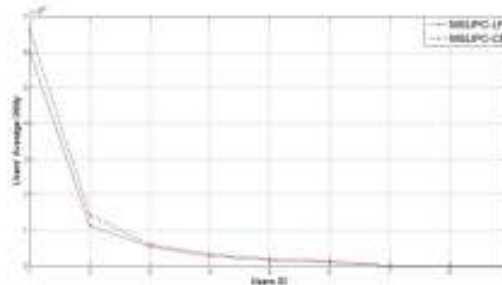


Σχήμα 29 Σύγκλιση της ισχύος εκπομπής των χρηστών

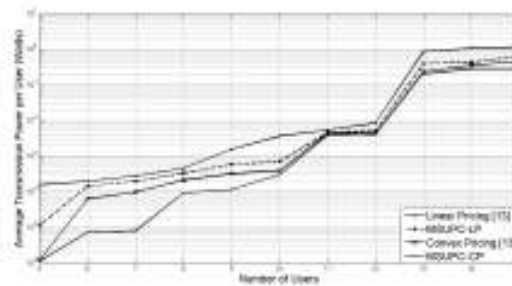
κοστολόγησης ως προς την ισχύ εκπομπής (MSUPC-CP παίγνιο) και η αντίστοιχη ισχύς εκπομπής μειώνεται από τις αντίστοιχες τιμές ισχύος εκπομπής που επιτυγχάνονται μέσω του παιγνίου κατανομής ισχύος χωρίς κοστολόγηση (δηλαδή το MSUPC παίγνιο).



Σχήμα 30 Μέση τιμή της ισχύος εκπομπής των χρηστών στο σημείο ισορροπίας κατά Nash του MSUPC-CP παιχνιδιού με χρήση κυρτής και γραμμικής κοστολόγησης.



Σχήμα 31 Μέση τιμή των τιμών των ΣΧ των χρηστών στο σημείο ισορροπίας κατά Nash του MSUPC-CP παιχνιδιού με χρήση κυρτής και γραμμικής κοστολόγησης



Σχήμα 32 Μέση τιμή της ισχύος εκπομπής (ανά χρήστη) στο σημείο ισορροπίας κατά Nash καθώς το πλήθος των χρηστών αυξάνεται

Αναφορικά με τη σύγκλιση του προτεινόμενου μη συνεργατικού και επαναληπτικού MSUPC-CP αλγόριθμου, το σχήμα 29 παρουσιάζει τις τιμές της ισχύος εκπομπής ως συνάρτηση των επαναλήψεων του MSUPC-CP αλγορίθμου που χρειάζεται έως ότου συγκλίνει στο σημείο ισορροπίας κατά Nash του $G_{MSUPC-CP}$ παιχνιδιού, P_{net}^* σε κάθε χρονοσχισμή.

Επιπλέον, τα αποτελέσματα αναδεικνύουν ότι για τους χρήστες που ανήκουν στην ίδια κλάση, είτε στην κλάση των υπηρεσιών πραγματικού είτε μη πραγματικού χρόνου, οι τιμές της ισχύος εκπομπής των χρηστών είναι αντιστρόφως ανάλογες ως προς την ποιότητα του καναλιού των χρηστών. Επιπρόσθετα, παρατηρείται ότι η σύγκλιση του αλγορίθμου είναι ιδιαίτερα γρήγορη, αφού χρειάζονται λιγότερες από 50 επαναλήψεις ώστε ο αλγόριθμος να συγκλίνει στο σημείο ισορροπίας κατά Nash του παιχνιδιού για όλους τους χρήστες, ξεκινώντας από μία τυχαία τιμή της ισχύος εκπομπής, ενώ από πρακτικής σκοπιάς

σημειώνεται ότι σε λιγότερες από 25 επαναλήψεις, οι τιμές της ισχύος εκπομπής έχουν πρακτικά σταθεροποιηθεί. Αυτή η παρατήρηση είναι ιδιαίτερα σημαντική δεδομένης της μικρής διάρκειας της χρονοσχισμής (δηλαδή 1.67 msec περίπου) στα ασύρματα δίκτυα.

5.10.2 Κυρτή και Γραμμική Πολιτική Κοστολόγησης

Στα σχήματα 30 και 31 συγκρίνουμε τα αποτελέσματα των τιμών της μέσης τιμής της ισχύος εκπομπής των χρηστών και των αντίστοιχων τιμών των ΣΧ τους, για το παίγνιο MSUPC-CP με χρήση κυρτής κοστολόγησης και για το ίδιο παίγνιο με υιοθέτηση όμως γραμμικής κοστολόγησης (δηλαδή MSUPC-LP) [9], [17], [22]. Η σύγκριση των δύο παιγνίων ως προς το είδος της πολιτικής κοστολόγησης που υιοθετείται, αναδεικνύει το κέρδος της υιοθέτησης της κυρτής κοστολόγησης, ως προς τις χαμηλές τιμές ισχύος εκπομπής και τις αντίστοιχες υψηλές τιμές των ΣΧ των χρηστών. Η παρατήρηση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, δεδομένων των κρίσιμων πόρων του συστήματος, τους φυσικούς περιορισμούς του υλισμικού των χρηστών και τα χρονομεταβλητά κανάλια των χρηστών. Η υιοθέτηση της κατάλληλης πολιτικής κοστολόγησης (δηλαδή της κυρτής κοστολόγησης) έχει ως αποτέλεσμα την επιβολή μίας κοινωνικής συμπεριφοράς στους χρήστες και τη βελτίωση του κοινωνικού οφέλους, σε σχέση με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την υιοθέτηση της γραμμικής κοστολόγησης.

5.10.3 Αυξανόμενο Πλήθος Χρηστών

Σε αυτή την υποενότητα παρουσιάζονται αποτελέσματα, τα οποία αναδεικνύουν τη συμπεριφορά του συστήματος καθώς το πλήθος των χρηστών που εδρεύουν εντός της κυψέλης αυξάνεται. Αναφορικά με τα ακόλουθα αποτελέσματα, οι χρήστες είναι τοποθετημένοι σε ίσες αποστάσεις από το σταθμό βάσης, δηλαδή $d=300m$ και εξετάζονται τέσσερα διαφορετικά σενάρια.

Στα δύο σενάρια, προσομοιώνεται το παίγνιο κατανομής ισχύος εκπομπής όπως αυτό παρουσιάστηκε στη δημοσίευση [22], αρχικά υιοθετώντας γραμμική κοστολόγηση και στη συνέχεια υιοθετώντας κυρτή κοστολόγηση. Το παίγνιο κατανομής ισχύος εκπομπής που παρουσιάστηκε στη δημοσίευση [22] υιοθετεί μία ΣΧ, η οποία εκφράζει απλοϊκά το πλήθος των επιτυχώς μεταδιδόμενων *bits* στο σταθμό βάσης προς την αντίστοιχη κατανάλωση ισχύος εκπομπής, ενώ προτείνει μία γραμμική συνάρτηση κοστολόγησης, δηλαδή $c_i(P_i, \mathbf{P}_{-i}) = cP_i$. Επιπρόσθετα, τα άλλα δύο σενάρια που προσομοιώνονται υιοθετούν την προσέγγιση που προτάθηκε στο παρόν κεφάλαιο, αρχικά χρησιμοποιώντας γραμμική κοστολόγηση και έπειτα χρησιμοποιώντας κυρτή κοστολόγηση.

Το σχήμα 32 απεικονίζει τη μέση τιμή της ισχύος εκπομπής (ανά χρήστη) στο σημείο ισορροπίας κατά Nash του κάθε υπό μελέτη παιγνίου, ως συνάρτηση του πλήθους των

χρηστών που εδρεύουν εντός της κυψέλης. Παρατηρείται ότι το παίγνιο κατανομής ισχύος εκπομπής, όπως αυτό προτάθηκε στη δημοσίευση [22], με χρήση γραμμικής κοστολόγησης παρουσιάζει τη χειρότερη απόδοση σε σχέση με τα υπόλοιπα σενάρια που προσομοιώνονται. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται για δύο βασικούς λόγους: (α) την απλοποιημένη μοντελοποίηση του παιγνίου κατανομής ισχύος εκπομπής, όπου η ΣΧ των χρηστών αντιπροσωπεύει απλοποιημένα το λόγο των επιτυχώς μεταδιδόμενων *bits* στο σταθμό βάσης προς την αντίστοιχη κατανάλωση ισχύος εκπομπής και (β) την πολιτική κοστολόγησης που υιοθετείται, δηλαδή το γραμμικό σχήμα κοστολόγησης. Σε αντίθεση το παίγνιο κατανομής ισχύος εκπομπής με χρήση κυρτής κοστολόγησης (MSUPC-CP παίγνιο) παρουσιάζει την καλύτερη απόδοση, σε σχέση με τα υπόλοιπα σενάρια που προσομοιώνονται. Οι βασικοί λόγοι για την υπεροχή του παιγνίου αυτού είναι δύο: (α) ο κατάλληλος ορισμός του μη συνεργατικού παιγνίου κατανομής ισχύος, όπου η ΣΧ των χρηστών εκφράζει το είδος της αιτούμενης υπηρεσίας σε σχέση με τον επιτευξιμό ρυθμό μετάδοσης και την κατανάλωση ισχύος εκπομπής και (β) η κυρτή πολιτική κοστολόγησης που υιοθετείται, όπου το κόστος με το οποίο επιβαρύνεται ένας χρήστης αυξάνει κατακόρυφα εάν η ισχύς εκπομπής P_i του χρήστη υπερβεί ένα προκαθορισμένο κατώφλι, P_{thres} . Συνεπώς, ο κατάλληλος συνδυασμός ενός καλώς ορισμένου παιγνίου κατανομής ισχύος εκπομπής (δηλαδή του MSUPC παιγνίου), με μία αντιπροσωπευτική πολιτική κοστολόγησης (δηλαδή την κυρτή πολιτική κοστολόγησης) έχει ως αποτέλεσμα την εξασφάλιση κέρδους για το σύστημα από το διαμοιρασμό των πόρων του και την παρότρυνση των χρηστών να χρησιμοποιούν τους πόρους του συστήματος ακόμα πιο αποδοτικά.

5.11 Ανακεφαλαίωση

Σε αυτό το κεφάλαιο μελετήθηκε το πρόβλημα αποδοτικής κατανομής ισχύος εκπομπής στη ζεύξη ανόδου ασύρματων κυψελωτών δικτύων με χρήση κυρτής πολιτικής κοστολόγησης ως προς την ισχύ εκπομπής των χρηστών και με εξυπηρέτηση πολλαπλών ειδών υπηρεσιών. Με σκοπό την εξυπηρέτηση πολλαπλών ειδών υπηρεσιών μέσω ενός ενιαίου πλαισίου υιοθετείται μία κατάλληλη ΣΧ η οποία αντιπροσωπεύει τις απαιτήσεις των χρηστών σε ΠΤΥ. Επιπρόσθετα, στοχεύοντας οι χρήστες να αποκτήσουν μία κοινωνική συμπεριφορά προτείνεται η κυρτή πολιτική κοστολόγησης, η οποία παροτρύνει τους χρήστες να χρησιμοποιούν τους πόρους του συστήματος πιο αποδοτικά, σε σχέση με τη γραμμική πολιτική κοστολόγησης, η οποία είχε έως τώρα προταθεί στη βιβλιογραφία.

Αρχικά μοντελοποιήθηκε το παίγνιο κατανομής ισχύος εκπομπής με σκοπό την εξυπηρέτηση πολλαπλών υπηρεσιών, δηλαδή το MSUPC παίγνιο και έπειτα επιλύθηκε με τη χρήση της θεωρίας παιγνίων, όπου αποδείχθηκε η ύπαρξη και η μοναδικότητα του σημείου ισορροπίας κατά Nash του MSUPC παιγνίου. Έπειτα αποδείχθηκε η μη αποδοτικότητα του

συγκεκριμένου σημείου ισορροπίας του MSUPC παίγνιου ως προς την κατανομή των πόρων του συστήματος και τη λαμβανόμενη ικανοποίηση των χρηστών. Με σκοπό την αντιμετώπιση της μη αποδοτικότητας η οποία και αποδείχθηκε, προτάθηκε η κυρτή πολιτική κοστολόγησης ως προς την ισχύ εκπομπής των χρηστών, η οποία αναδεικνύεται ως ένα ιδιαίτερα δυναμικό εργαλείο για την κατανομή των πόρων του συστήματος.

Επιπρόσθετα, μοντελοποιήθηκε το μη συνεργατικό παίγνιο κατανομής ισχύος εκπομπής στη ζεύξη ανόδου ασύρματων κυψελωτών δικτύων με χρήση κυρτής πολιτικής κοστολόγησης ως προς την ισχύ εκπομπής των χρηστών και με εξυπηρέτηση πολλαπλών ειδών υπηρεσιών, δηλαδή το MSUPC-CP παίγνιο, όπου κάθε χρήστης στοχεύει στη μεγιστοποίηση της ΣΣΧ του, η οποία εκφράζεται ως η διαφορά ανάμεσα στη ΣΧ του χρήστη και τη συνάρτηση κοστολόγησης. Έπειτα, αποδείχθηκε η ύπαρξη και η μοναδικότητα του σημείου ισορροπίας κατά Nash του MSUPC-CP παίγνιου και αποδείχθηκε ότι η λύση αυτή είναι Pareto βέλτιστη και έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της λαμβανόμενης ικανοποίησης των χρηστών από το διαμοιρασμό των πόρων του συστήματος. Η απόδοση της συγκεκριμένης μοντελοποίησης ως προς την αύξηση του κέρδους του συστήματος και την παρότρυνση των χρηστών να χρησιμοποιούν τους πόρους του συστήματος πιο αποδοτικά, αποδείχθηκε μέσω αναλυτικών αποτελεσμάτων και έγινε ταυτόχρονη σύγκριση με το αντίστοιχο παίγνιο χωρίς τη χρήση κοστολόγησης, ώστε να αναδειχθεί το όφελος της υιοθέτησης της κοστολόγησης των χρηστών, αλλά παράλληλα έγινε σύγκριση με αντίστοιχα παίγνια τα οποία έκαναν χρήση γραμμικής κοστολόγησης, αναδεικνύοντας ότι η χρήση αντιπροσωπευτικής κοστολόγησης αποφέρει μεγαλύτερο συνολικό κέρδος για τους χρήστες αλλά και για το σύστημα.

Το προτεινόμενο παίγνιο κατανομής ισχύος εκπομπής αποτελεί ένα δυναμικό εργαλείο το οποίο μπορεί να εφαρμοστεί σε ασύρματα δίκτυα τα οποία χρησιμοποιούν διαφορετικές τεχνολογίες πρόσβασης (π.χ. CDMA και SC-FDMA), διαφορετικούς πόρους προς κατανομή στους χρήστες και εμφανίζουν ποικίλες απαιτήσεις ως προς την ΠτΥ των χρηστών. Συνεπώς, η μελέτη της ενιαίας κατανομής των πόρων ετερογενών ασύρματων δικτύων μέσω του προτεινόμενου μοντέλου κατανομής πόρων αποτελεί ένα ιδιαίτερα ενδιαφέρον ερευνητικό πεδίο.

6 Συνδυαστική Κατανομή Ισχύος Εκπομπής και Ρυθμού Μετάδοσης στη Ζεύξη Ανόδου CDMA Ασύρματων Κυψελωτών Δικτύων

Στο παρόν κεφάλαιο της διδακτορικής διατριβής προτείνεται ένα καινοτόμο πρόβλημα βασισμένο στη θεωρία παιγνίων για την αντιμετώπιση του ζητήματος της συνδυαστικής κατανομής ισχύος εκπομπής και ρυθμού μετάδοσης στη ζεύξη ανόδου ασύρματων κυψελωτών δικτύων. Αρχικά, σε κάθε χρήστη ανατίθεται μία γενικευμένη συνάρτηση χρησιμότητας, η οποία αντιπροσωπεύει με κατάλληλο τρόπο την ευχαρίστηση που λαμβάνουν οι χρήστες από το διαμοιρασμό των πόρων του συστήματος για διαφορετικού τύπου υπηρεσίες, οι οποίες έχουν ποικίλες απαιτήσεις σε ρυθμό μετάδοσης. Στη συνέχεια ορίζεται ένα μη συνεργατικό παίγνιο συνδυαστικής κατανομής ισχύος εκπομπής και ρυθμού μετάδοσης (Joint Utility-based uplink Power and Rate Allocation - JUPRA), στο οποίο κάθε χρήστης στοχεύει εγωιστικά στη μεγιστοποίηση της συνάρτησης χρησιμότητάς του λαμβάνοντας υπόψη τους φυσικούς περιορισμούς που θέτει το υλισμικό του. Έπειτα προσδιορίζεται το μοναδικό σημείο ισορροπίας κατά Nash του JUPRA παιγνίου ως προς και τις δύο ελεύθερες μεταβλητές (δηλαδή την ισχύ εκπομπής και το ρυθμό μετάδοσης) και αποδεικνύεται αναλυτικά η σύγκλιση του παιγνίου στο μοναδικό του σημείο ισορροπίας κατά Nash. Επιπρόσθετα, προτείνεται ένας επαναληπτικός κατανεμημένος και χαμηλής πολυπλοκότητας αλγόριθμος για τον προσδιορισμό και υπολογισμό του μοναδικού σημείου ισορροπίας κατά Nash. Η απόδοση της προτεινόμενης προσέγγισης αναδεικνύεται με αναλυτικά αριθμητικά αποτελέσματα και συγκρίσεις με τις πιο αντιπροσωπευτικές προσεγγίσεις στο προτεινόμενο θέμα από τη σύγχρονη βιβλιογραφία. Επιπρόσθετα, η συνεισφορά των διαφορετικών παραγόντων του JUPRA παιγνίου στην αποδοτική μοντελοποίηση και επίλυση του παιγνίου αναλύεται και ποσοτικοποιείται μέσω των συγκριτικών αποτελεσμάτων.

6.1 Εισαγωγή

Τα ασύρματα δίκτυα επικοινωνίας έχουν αδιαμφισβήτητα μεγάλη επίδραση στην παγκόσμια κοινότητα, τη βιομηχανία, και τα άτομα ως ξεχωριστές οντότητες. Το πλήθος των χρηστών που χρησιμοποιεί καθημερινά τα ασύρματα δίκτυα, καθώς επίσης και οι

απαιτήσεις τους σε ποιότητα της υπηρεσίας συνεχώς αυξάνονται. Για το λόγο αυτό έντονη ερευνητική δραστηριότητα παρουσιάζεται στο πρόβλημα της κατανομής πόρων στα ασύρματα κυψελωτά δίκτυα, με απώτερο στόχο τη μεγιστοποίηση της απόδοσής τους. Ανάμεσα στα βασικά στοιχεία που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στη μοντελοποίηση και επίλυση αυτών των προβλημάτων είναι η ισχύς εκπομπής και ο ρυθμός μετάδοσης των χρηστών. Στη σύγχρονη βιβλιογραφία έχουν προταθεί ποικίλες προσεγγίσεις για την αντιμετώπιση του μονοπαραμετρικού προβλήματος κατανομής ισχύος εκπομπής, με στόχο τον προσδιορισμό της ελάχιστης δυνατής ισχύος εκπομπής για την ικανοποίηση των απαιτήσεων τους σε ΠτΥ [18], [22]. Ανάμεσα στις ποικίλες προσεγγίσεις που έχουν προταθεί για την αντιμετώπιση του μονοπαραμετρικού προβλήματος, πιο υποσχόμενη και κατάλληλη παρουσιάζεται εκείνη που λαμβάνει υπόψη τις συναρτήσεις χρησιμότητας για τον αντιπροσωπευτικό αντικατοπτρισμό των απαιτήσεων των χρηστών σε ΠτΥ και στη συνέχεια τη μοντελοποίηση του προβλήματος βέλτιστης κατανομής ισχύος εκπομπής. Ωστόσο όμως το μονοπαραμετρικό πρόβλημα κατανομής ισχύος εκπομπής δε λαμβάνει υπόψη το περιορισμένο εύρος ζώνης του δικτύου, καθώς επίσης την ανάγκη που προκύπτει για τα δίκτυα τέταρτης και επόμενης γενιάς να υποστηρίξουν πολυμεσικές υπηρεσίες, οι οποίες παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία στις απαιτήσεις τους σε ρυθμό μετάδοσης και σε ΠτΥ.

Για τους παραπάνω λόγους, ο βασικός στόχος αυτού του κεφαλαίου της διδακτορικής διατριβής είναι η δημιουργία ενός συμπαγούς και άρτιου μοντέλου για τη μελέτη της συνδυαστικής κατανομής ισχύος εκπομπής και ρυθμού μετάδοσης μέσω της θεωρίας παιγνίων. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης που ορίζεται είναι ένα διπαραμετρικό πρόβλημα, του οποίου η λύση είναι ένα ενεργειακά αποδοτικό σημείο ισορροπίας κατά Nash, το οποίο προσδιορίζεται ταυτόχρονα και ως προς τις δύο ελεύθερες μεταβλητές, δηλαδή την ισχύ εκπομπής και το ρυθμό μετάδοσης. Επιπρόσθετα, παρέχεται μία ολοκληρωμένη περιγραφή της σχετικής διεθνούς βιβλιογραφίας αναφορικά με το συνδυαστικό πρόβλημα κατανομής πόρων στη ζεύξη ανόδου CDMA ασύρματων κυψελωτών δικτύων, η οποία αναδεικνύει το κίνητρο μελέτης του συγκεκριμένου προβλήματος και το ερευνητικό κενό που καλύπτει η προτεινόμενη προσέγγιση στο παρόν κεφάλαιο. Επιπρόσθετα, αναφέρονται επιγραμματικά τα βασικά στοιχεία της έρευνας μας και η συνεισφορά της προτεινόμενης προσέγγισης στην έρευνα.

6.2 Σχετική Βιβλιογραφία

Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν προταθεί περιορισμένες ερευνητικές προσπάθειες για την αντιμετώπιση του προβλήματος της συνδυαστικής κατανομής ισχύος εκπομπής και ρυθμού μετάδοσης, κυρίως λόγω της αυξημένης δυσκολίας επίλυσης του διπαραμετρικού

προβλήματος. Οι δύο βασικές προσεγγίσεις που έχουν προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία είναι οι ακόλουθες δύο:

1. Η συνδυαστική κατανομή ισχύος εκπομπής και ρυθμού μετάδοσης προσεγγίζεται με χρήση της θεωρίας παιγνίων και μοντελοποιείται με τη βοήθεια δύο διακριτών προβλημάτων βελτιστοποίησης, δηλαδή το πρόβλημα βέλτιστης κατανομής ισχύος εκπομπής και το πρόβλημα βέλτιστης κατανομής ρυθμού μετάδοσης. Αρχικά όλοι οι χρήστες προσδιορίζουν το βέλτιστο ρυθμό μετάδοσής τους και έπειτα επιλύεται σειριακά το πρόβλημα βέλτιστης κατανομής ισχύος εκπομπής, με σκοπό τον προσδιορισμό της βέλτιστης ισχύος εκπομπής κάθε χρήστη που εδρεύει εντός της κυψέλης.
2. Το συνδυαστικό πρόβλημα κατανομής ισχύος εκπομπής και ρυθμού μετάδοσης μετατρέπεται σε ένα μονοπαραμετρικό πρόβλημα, ως προς το λόγο του ρυθμού μετάδοσης προς την ισχύ εκπομπής.

Πιο αναλυτικά, αναφορικά με την πρώτη προτεινόμενη προσέγγιση, οι συγγραφείς στη δημοσίευση [55] μοντελοποιούν και επιλύουν το πρόβλημα βέλτιστης συνδυαστικής κατανομής πόρων ως δύο διακριτά επιμέρους προβλήματα βελτιστοποίησης, τα οποία επιλύουν σειριακά. Το πρώτο παίγνιο καταναίμει το ρυθμό μετάδοσης σε όλους τους χρήστες που εδρεύουν εντός της κυψέλης, το οποίο τροφοδοτεί το δεύτερο παίγνιο με ένα διάνυσμα σταθερών c . Το διάνυσμα c χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της βέλτιστης ισχύος εκπομπής κάθε χρήστη, η οποία βρίσκεται σε συμφωνία με τη βέλτιστη κατανομή ρυθμού μετάδοσης του πρώτου παιγνίου. Ωστόσο όμως, η κατανομή του ρυθμού μετάδοσης και της ισχύος εκπομπής σε δύο διαφορετικά βήματα εισάγει μεγάλη επεξεργαστική καθυστέρηση στον προσδιορισμό της βέλτιστης συνδυαστικής κατανομής, με αποτέλεσμα την αργή σύγκλιση του αλγορίθμου στην εξαγόμενη βέλτιστη συνδυαστική κατανομή και την κατασπατάληση ενέργειας στην ανταλλαγή σημάτων πληροφορίας.

Τα ανωτέρω περιγραφέντα αρνητικά χαρακτηριστικά της πρώτης προσέγγισης έχουν περιοριστεί στη δημοσίευση [56], στην οποία οι συγγραφείς εξετάζουν συγκεκριμένες τιμές ισχύος εκπομπής και ρυθμού μετάδοσης των χρηστών και καταλήγουν σε ένα σταθερό σημείο ισορροπίας συνδυαστικής κατανομής πόρων, στο οποίο οι χρήστες που βρίσκονται κοντά στο σταθμό βάσης της κυψέλης είναι ευεργετημένοι. Επιπρόσθετα, στις δημοσιεύσεις [57], [58] οι συγγραφείς έχουν επιλέξει να αντιπροσωπεύουν την ευχαρίστηση που λαμβάνει ο χρήστης από το διαμοιρασμό των πόρων του συστήματος μέσω μίας ιδιαίτερα ειδικής συνάρτησης χρησιμότητας, η οποία εκφράζει το λόγο των επιτυχώς μεταφερόμενων *bits* στο σταθμό βάσης προς την αντίστοιχη καταναλισκόμενη ισχύ εκπομπής. Εξαιτίας του συγκεκριμένου τύπου της επιλεγμένης συνάρτησης χρησιμότητας είναι εφικτή η σειριακή και ανεξάρτητη επίλυση του συνδυαστικού προβλήματος κατανομής πόρων, μέσω δύο διακριτών

προβλημάτων. Για το λόγο αυτό, η συνδυαστική κατανομή πόρων συνίσταται από τις δύο επιμέρους κατανομές ρυθμού μετάδοσης και ισχύος εκπομπής, όπου η κατανομή ρυθμού μετάδοσης που προκύπτει από το πρώτο πρόβλημα βελτιστοποίησης λειτουργεί ως παράμετρος εισόδου στο δεύτερο πρόβλημα βέλτιστης κατανομής ισχύος εκπομπής.

Εν συντομία, το κύριο μειονέκτημα της πρώτης προσέγγισης είναι ότι το πρόβλημα βελτιστοποίησης επιλύεται ασύγχρονα και ξεχωριστά ως προς τις δύο ελεύθερες μεταβλητές/πόρους, συνεπώς η συνδυαστική κατανομή πόρων των δύο επιμέρους προβλημάτων είναι λιγότερο αποδοτική σε σχέση με την πραγματικά ταυτόχρονη κατανομή του ρυθμού μετάδοσης και της ισχύος εκπομπής στους χρήστες. Πιο αναλυτικά, οι λόγοι για τους οποίους η ασύγχρονη κατανομή πόρων στους χρήστες δεν είναι αποδοτική είναι οι ακόλουθοι τρεις: (α) η συνδυαστική κατανομή πόρων εξαρτάται άμεσα από την αρχικά επιλεγόμενη τιμή της ισχύος εκπομπής του αλγορίθμου, η οποία καθορίζει την ταχύτητα σύγκλισης του αλγορίθμου, (β) οι χρήστες δεν ανανεώνουν το ρυθμό μετάδοσής τους και την ισχύ εκπομπής τους στο ίδιο βήμα του αλγορίθμου, συνεπώς εισάγεται επιπλέον καθυστέρηση στη σύγκλιση του στη συνδυαστική κατανομή των πόρων και (γ) δεν υπάρχει καμία απολύτως εγγύηση ότι το αποτέλεσμα της συνδυαστικής κατανομής πόρων που προκύπτει από τη σειριακή επίλυση των επιμέρους προβλημάτων είναι ισοδύναμα βέλτιστη σε σχέση με την πραγματικά ταυτόχρονη επίλυση του συνδυαστικού προβλήματος, στην οποία ο ρυθμός μετάδοσης και η ισχύς εκπομπής θα ανανεώνονται στο ίδιο βήμα του αλγορίθμου.

Αναφορικά με τη δεύτερη προσέγγιση που έχει προταθεί στη σύγχρονη βιβλιογραφία, μία ιδιαίτερα αντιπροσωπευτική παρουσίαση έχει δημοσιευτεί στο άρθρο [57], στο οποίο χρησιμοποιείται η ίδια συνάρτηση χρησιμότητας που περιγράφηκε ανωτέρω, δηλαδή ο λόγος των επιτυχώς μεταδιδόμενων *bits* στο σταθμό βάσης προς την αντίστοιχη καταναλισκόμενη ισχύ εκπομπής. Η συγκεκριμένη συνάρτηση χρησιμότητας, εξαιτίας του ειδικού της τύπου δίνει τη δυνατότητα στους συγγραφείς του άρθρου να αντικαταστήσουν το λόγο του ρυθμού μετάδοσης προς την καταναλισκόμενη ισχύ εκπομπής με μία νέα μεταβλητή και κατά αυτόν τον τρόπο να μετατρέψουν το διπαραμετρικό πρόβλημα σε μονοπαραμετρικό πρόβλημα βελτιστοποίησης. Ωστόσο όμως είναι προφανές ότι η συγκεκριμένη προσέγγιση δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε ρεαλιστικές περιπτώσεις, όπου οι συναρτήσεις των χρηστών είναι πιο γενικευμένες και αντιπροσωπεύουν το είδος της υπηρεσίας που ο χρήστης αιτείται, διότι οι δύο ελεύθερες μεταβλητές (δηλαδή ο ρυθμός μετάδοσης και η ισχύς εκπομπής) δε συνδέονται μεταξύ τους αποκλειστικά και μόνο με το λόγο αυτό. Συνεπώς, η εμβέλεια εφαρμογής της συγκεκριμένης προσέγγισης είναι ιδιαίτερα περιορισμένη σε προβλήματα βελτιστοποίησης, όπου ο λόγος του ρυθμού μετάδοσης προς την ισχύ εκπομπής εμφανίζεται στη συνάρτηση χρησιμότητας των χρηστών και κατά αυτόν τον τρόπο το διπαραμετρικό πρόβλημα μπορεί να μετασχηματιστεί σε μονοπαραμετρικό. Πιο αναλυτικά, στη

συγκεκριμένη προσέγγιση της βιβλιογραφίας, το πρόβλημα βελτιστοποίησης επιλύεται ως μονοπαραμετρικό πρόβλημα ως προς τον αντικατεστημένο λόγο και προσδιορίζεται το βέλτιστο ζεύγος κατανομής ρυθμού μετάδοσης και ισχύος εκπομπής θεωρώντας αρχικά τη μέγιστη τιμή για το ρυθμό μετάδοσης και συνεπαγωγικά υπολογίζεται μέσω του βέλτιστου λόγου που έχει ήδη προσδιοριστεί η βέλτιστη ισχύς εκπομπής, είτε αντιστρόφως θεωρώντας τη μέγιστη ισχύ εκπομπής και προσδιορίζοντας το βέλτιστο ρυθμό μετάδοσης. Στη συγκεκριμένη προσέγγιση παρόλο που ο ρυθμός μετάδοσης και η ισχύς εκπομπής ανανεώνονται στο ίδιο βήμα του αλγορίθμου, παραμένει το σημαντικό μειονέκτημα ότι δεν υπάρχει καμία εγγύηση ότι η συνδυαστική κατανομή που προσδιορίζεται είναι ισότιμα βέλτιστη με την αντίστοιχη που θα προέκυπτε εάν το πρόβλημα λυνόταν ως αυτούσιο διπαραμετρικό πρόβλημα συνδυαστικής κατανομής ρυθμού μετάδοσης και ισχύος εκπομπής.

Επιπλέον, πρόσθετες ερευνητικές προσπάθειες έχουν αναφερθεί στη βιβλιογραφία για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος μέσω κατανεμημένων κατανομών πόρων, όπως αυτή που προτείνεται στη δημοσίευση [60], όπου παρουσιάζεται μία κατανεμημένη κατανομή πόρων μέσω δύο αλληλένδετων παιγνίων (ενός παιγνίου κατανομής ισχύος που εκτελείται ανάμεσα στους χρήστες και ενός παιγνίου κατανομής ρυθμού μετάδοσης που εκτελείται σε επίπεδο δικτύου). Επίσης έχουν προταθεί και ευρεστικές μέθοδοι κατανομής ρυθμού μετάδοσης στους χρήστες [61], όπου παρουσιάζεται ένα απλοποιημένο ευρεστικό σχήμα κατανομής ρυθμού μετάδοσης, το οποίο μπορεί να αναφερθεί ως μία εφαρμογή της μεθόδου water-filling και έπειτα από τον προσδιορισμό του ρυθμού μετάδοσης εφαρμόζεται ένας επαναληπτικός αλγόριθμος κατανομής ισχύος εκπομπής.

6.3 Συνεισφορά Προτεινόμενης Προσέγγισης

Σύμφωνα με τις προηγούμενες προσεγγίσεις που περιγράφηκαν και έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία, η ισχύς εκπομπής και ο ρυθμός μετάδοσης κατανέμονται ανεξάρτητα ή εν μέρει συνδυαστικά, ακόμα και στην περίπτωση που οι δύο παράμετροι ανανεώνονται στο ίδιο βήμα του αλγορίθμου. Για το λόγο αυτό, τα αποτελέσματα των αλγορίθμων καταλήγουν σε υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης και χαμηλές τιμές ισχύος εκπομπής για τους χρήστες που βρίσκονται κοντά στο σταθμό βάσης, ενώ οι απομακρυσμένοι χρήστες λαμβάνουν πολύ χαμηλές τιμές του ρυθμού μετάδοσης και εκπέμπουν με ιδιαίτερα υψηλή ισχύ εκπομπής. Τα βασικά χαρακτηριστικά, η συνεισφορά και οι κυριότερες διαφορές της προσέγγισης που προτείνεται στο συγκεκριμένο κεφάλαιο της διδακτορικής διατριβής σε σχέση με τη διεθνή βιβλιογραφία μπορούν να συνοψιστούν στα ακόλουθα σημεία:

1. Στην παρούσα προσέγγιση προτείνεται μία ολοκληρωμένη μελέτη για τη μοντελοποίηση και επίλυση του διπαραμετρικού προβλήματος κατανομής ρυθμού μετάδοσης και ισχύος εκπομπής στη ζεύξη ανόδου CDMA ασύρματων κυψελωτών

δικτύων. Πιο συγκεκριμένα, το διπαραμετρικό πρόβλημα κατανομής ρυθμού μετάδοσης και ισχύος εκπομπής επιλύεται και ως προς τις δύο ελεύθερες μεταβλητές ταυτόχρονα, σε αντίθεση με τις προγενέστερες προσεγγίσεις σύμφωνα με τις οποίες είτε επιλύονταν ξεχωριστά τα προβλήματα κατανομής ρυθμού μετάδοσης και ισχύος εκπομπής, είτε μετέτρεπαν το διπαραμετρικό πρόβλημα σε μονοπαραμετρικό με συγκεκριμένες και περιοριστικές υποθέσεις. Σχετικά με το διπαραμετρικό πρόβλημα προσδιορίζεται η βέλτιστη κατανομή ρυθμού μετάδοσης και ισχύος εκπομπής και οι τιμές των δύο μεταβλητών ανανεώνονται στο ίδιο βήμα του αλγορίθμου. Τα αποτελέσματα της προτεινόμενης προσέγγισης επαληθεύουν τη διαίσθησή μας ότι η μοντελοποίηση και επίλυση του προβλήματος κατανομής πόρων και ως προς τις δύο ελεύθερες μεταβλητές οδηγεί σε ένα πιο αποδοτικό σημείο ισορροπίας για την κατανομή των πόρων από τη σκοπιά της λαμβανόμενης ικανοποίησης των χρηστών.

2. Στην προτεινόμενη προσέγγιση υιοθετούνται πιο γενικές και ρεαλιστικές συναρτήσεις χρησιμότητας [64], [66], οι οποίες δεν εκφράζουν απλοϊκά το λόγο των επιτυχώς μεταδιδόμενων *bits* στο σταθμό βάσης προς την αντίστοιχη καταναλισκόμενη ισχύ εκπομπής. Οι υιοθετούμενες συναρτήσεις χρησιμότητας εκφράζουν κατάλληλα τις απαιτήσεις των χρηστών σε ποιότητα της υπηρεσίας και διαφοροποιούνται ανάλογα με το είδος της υπηρεσίας που αιτείται ο χρήστης. Συνεπώς, οι ΣΧ που υπεισέρχονται στο πρόβλημα βελτιστοποίησης κατανομής πόρων μπορούν να συμπεριλάβουν οποιοδήποτε είδος υπηρεσίας εξυπηρετείται από τα σύγχρονα ασύρματα κυψελωτά δίκτυα. Πιο συγκεκριμένα, στη γενικότερη περίπτωση οι ΣΧ αντικατοπτρίζουν το λόγο του επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης (εξαρτώμενο από το είδος της υπηρεσίας) προς την αντίστοιχη καταναλισκόμενη ισχύ εκπομπής.
3. Η προτεινόμενη προσέγγιση συμπεριλαμβάνει: α) τη μοντελοποίηση του διπαραμετρικού συνδυαστικού προβλήματος κατανομής ρυθμού μετάδοσης και ισχύος εκπομπής ως ένα μη συνεργατικό παίγνιο (JUPRA παίγνιο), στο οποίο κάθε χρήστης προσπαθεί να μεγιστοποιήσει την ικανοποίηση που λαμβάνει από το διαμοιρασμό των πόρων του συστήματος λαμβάνοντας υπόψη του φυσικούς περιορισμούς που θέτει το υλισμικό του, β) την επίλυση του προβλήματος και τον προσδιορισμό του μοναδικού σημείου ισορροπίας κατά Nash ταυτόχρονα και ως προς τις δύο ελεύθερες μεταβλητές, δηλαδή το ρυθμό μετάδοσης και την ισχύ εκπομπής και γ) ένας επαναληπτικός κατανεμημένος και χαμηλής πολυπλοκότητας αλγόριθμος, ο οποίος προσδιορίζει το μοναδικό σημείο ισορροπίας κατά Nash του JUPRA παιγνίου και η σύγκλισή του αποδεικνύεται.

4. Αναδεικνύεται και ποσοτικοποιείται μέσω αναλυτικών και συγκριτικών αποτελεσμάτων ο ρόλος και η επιρροή των διαφορετικών σχημάτων κοστολόγησης (δηλαδή γραμμικών και μη γραμμικών σχημάτων κοστολόγησης) για την επίτευξη περισσότερο ενεργειακά αποδοτικών κατανομών πόρων. Η αφορμή για την εισαγωγή κοστολόγησης στο πρόβλημα συνδυαστικής κατανομής πόρων με σκοπό τη βελτίωση της κατανομής πόρων με γνώμονα το κοινωνικό όφελος των χρηστών προήλθε από τη βιβλιογραφία [26], [41], [47], αλλά και από προηγούμενες ερευνητικές μελέτες που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια του διδακτορικού [64], [65].
5. Η απόδοση της προτεινόμενης προσέγγισης αξιολογείται λεπτομερώς καθώς επίσης αποδεικνύεται μέσω αναλυτικών συγκριτικών αποτελεσμάτων η υπεροχή της σε σχέση με τη διεθνή βιβλιογραφία [57] - [59]. Επιπρόσθετα, αναλύεται και ποσοτικοποιείται η συνεισφορά του κάθε στοιχείου που υπεισέρχεται στη μοντελοποίηση και επίλυση του προβλήματος στη βελτίωση των λαμβανόμενων αποτελεσμάτων. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται αναλυτικά τα οφέλη που προκύπτουν από: (α) τη συνδυαστική κατανομή του ρυθμού μετάδοσης και της ισχύος εκπομπής στο ίδιο βήμα του αλγορίθμου, (β) την κατάλληλη μοντελοποίηση των συναρτήσεων χρησιμότητας ώστε να αντιπροσωπεύουν τις απαιτήσεις των χρηστών σε ΠτΥ ανάλογα με το είδος της υπηρεσίας που αιτούνται και (γ) την εισαγωγή κατάλληλης πολιτικής κοστολόγησης.

6.4 Μοντέλο Συστήματος

Στο παρόν κεφάλαιο της διδακτορικής διατριβής μελετάται η ζεύξη ανόδου ενός CDMA ασύρματου κυψελωτού δικτύου στο οποίο εδρεύουν $N(t)$ χρήστες οι οποίοι έχουν συνεχώς δεδομένα να μεταδώσουν. Το σύνολο των χρηστών συμβολίζεται με $S(t)$, το κέρδος του καναλιού με $G_i(t)$, η ισχύς εκπομπής με $p_i(t)$ και ο ρυθμός μετάδοσης με $r_i(t)$. Η ισχύς εκπομπής και ο ρυθμός μετάδοσης του κάθε χρήστη είναι άνω φραγμένες μεταβλητές, δηλαδή $p_i(t) \leq p_i^{Max}$ και $r_i(t) \leq r_i^{Max}$ εξαιτίας των φυσικών περιορισμών που θέτει το υλισμικό των ασύρματων χρηστών. Στο υπόλοιπο της ανάλυσης του παρόντος κεφαλαίου θα παραλείπεται για ευκολία ως προς την παρουσίαση ο συμβολισμός της χρονοσχισμής t .

Η παρεμβολή μεταξύ των κυψελών, ο θερμικός θόρυβος και τα σήματα των χρηστών αναφέρονται συνολικά ως μία διαδικασία προσθετικού λευκού Gauss θορύβου (Additive White Gaussian Noise - AWGN), με σταθερή φασματική πυκνότητα ισχύος I_0 . Για το λόγο αυτό, οι συνολικές παρεμβολές που αντιλαμβάνεται ο χρήστης $i \in S$ αποτελούνται από τις παρεμβολές του δικτύου και τον AWGN θόρυβο από το υπόβαθρο:

$I_{-i}(\mathbf{p}_i) = \sum_{j=1}^N G_j p_j - G_i p_i + I_0$, όπου με $\mathbf{p}_i = (p_1, p_2, \dots, p_{i-1}, p_{i+1}, \dots, p_N)$ και $\mathbf{r}_i = (r_1, r_2, \dots, r_{i-1}, r_{i+1}, \dots, r_N)$ συμβολίζεται το διάνυσμα ισχύος εκπομπής και ρυθμού μετάδοσης όλων των χρηστών, εξαιρουμένου του χρήστη i αντίστοιχα. Επιπρόσθετα, ο αντίστοιχος σηματοθορυβικός λόγος ($\gamma_i = E_b/I_0$) που μετράται στο σταθμό βάσης για τον κάθε χρήστη $i \in S$ δίδεται από τη σχέση: $\gamma_i(r_i, p_i, \mathbf{p}_i) = \frac{W \cdot G_i p_i}{r_i I_{-i}(\mathbf{p}_i)}$, όπου με W [Hz] συμβολίζεται το διαθέσιμο εύρος ζώνης.

Επιπρόσθετα, με στόχο να συμπεριληφθούν τα ποικίλα χαρακτηριστικά των υπηρεσιών που αιτούνται οι χρήστες εντός ενός κοινού πλαισίου βελτιστοποίησης, σε κάθε χρήστη ανατίθεται μία συνάρτηση χρησιμότητας U_i . Η ΣΧ αντιπροσωπεύει τη λαμβανόμενη ικανοποίηση του χρήστη και εξαρτάται από την ισχύ εκπομπής του και το ρυθμό μετάδοσής του. Συνήθως, οι χρήστες επιθυμούν να επιτύχουν υψηλό σηματοθορυβικό λόγο, γ_i , καταναλώνοντας ελάχιστη ισχύ εκπομπής p_i και μεταδίδοντας σε υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης r_i . Συνεπώς, τα ανωτέρω περιγραφέντα χαρακτηριστικά της συνάρτησης χρησιμότητας μοντελοποιούνται μέσω μίας συνεχούς και $C^{(n)}$ φορές παραγωγίσιμης συνάρτησης U_i και ως προς το ρυθμό μετάδοσης r_i , αλλά και ως προς την ισχύ εκπομπής p_i .

$$U(r_i, p_i) = \frac{Q_i(\hat{r}_i, p_i)}{p_i} = \frac{Q_i(r_i \cdot f_i(\gamma_i), p_i)}{p_i} \quad (77)$$

όπου με $\hat{r}_i \equiv r_i \cdot f_i(\gamma_i)$ συμβολίζεται το πλήθος των επιτυχώς μεταδιδόμενων *bits* στο σταθμό βάσης, με $f_i(\gamma_i)$ η συνάρτηση απόδοσης, η οποία αντιπροσωπεύει την πιθανότητα επιτυχούς μεταφοράς πακέτων δεδομένων στο σταθμό βάσης [1] και με Q_i συμβολίζεται η συνάρτηση επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης, η οποία αντιπροσωπεύει την ευχαρίστηση που λαμβάνει ο χρήστης σε σχέση με την υπηρεσία που απολαμβάνει και σε συνάρτηση με την ικανοποίηση των απαιτήσεών του σε ποιότητα της υπηρεσίας. Καθώς έχει αναλυθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο, η συνάρτηση απόδοσης f_i είναι μία γνησίως αύξουσα, συνεχής, διπλά παραγωγίσιμη σιγμοειδής συνάρτηση ως προς το σηματοθορυβικό λόγο γ_i και εξαρτάται από τα σχήματα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που υιοθετούνται. Επιπρόσθετα, για τη συνάρτηση απόδοσης ισχύουν οι ιδιότητες $f_i(0) = 0$ και $f_i(\infty) = 1$.

Στη διεθνή βιβλιογραφία [22], [56], [59], η συνάρτηση χρησιμότητας που χρησιμοποιείται συστηματικά είναι ο λόγος των επιτυχώς μεταδιδόμενων *bits* στο σταθμό βάσης προς την αντίστοιχη καταναλισκόμενη ισχύ εκπομπής. Παρόλα αυτά η συγκεκριμένη συνάρτηση δε λαμβάνει υπόψη το είδος της υπηρεσίας που αιτείται ο χρήστης και τις συγκεκριμένες απαιτήσεις του σε ποιότητα της υπηρεσίας. Αντίθετα, η συνάρτηση χρησιμότητας που προτείνεται στο συγκεκριμένο κεφάλαιο της διδακτορικής διατριβής αντανακλά αντιπροσωπευτικά τις προσωπικές προτιμήσεις του χρήστη σε σχέση με το είδος της υπηρεσίας που αιτείται (δηλαδή υπηρεσίες πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου) [64], [67]. Ιδιαίτερα σημαντικό είναι να τονιστεί ότι η ευχαρίστηση που λαμβάνουν οι χρήστες από

το διαμοιρασμό των πόρων του συστήματος διαφοροποιείται ανάλογα με το είδος της υπηρεσίας που αιτείται ο χρήστης και η εξάρτηση αυτή αντικατοπτρίζεται αντιπροσωπευτικά στη συνάρτηση επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης $Q_i(\hat{r}_i, p_i)$. Η συνάρτηση επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης $Q_i(\hat{r}_i, p_i)$ έχει τις ακόλουθες χαρακτηριστικές ιδιότητες.

1. Η συνάρτηση επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης Q_i είναι γνησίως αύξουσα, συνεχής και $C^{(n)}$ φορές παραγωγίσιμη ως προς τον επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσης $\hat{r}_i \equiv r_i \cdot f_i(\gamma_i)$.
2. Ισχύει $Q_i(\hat{r}_i = 0, p_i) = 0$ ώστε να διασφαλίζεται ότι ισχύει $U_i(r_i = 0, p_i) = 0$.

Ανακεφαλαιώνοντας την ενότητα αυτή, τονίζεται ο στόχος κάθε χρήστη είναι να ελέγξει και να προσδιορίσει την ισχύ εκπομπής του και το ρυθμό μετάδοσής του με έναν καταναμεμένο τρόπο, ώστε να μεγιστοποιήσει τη λαμβανόμενη ικανοποίησή του από το διαμοιρασμό των πόρων του συστήματος.

6.5 Παίγνιο Συνδυαστικής Κατανομής Ισχύος Εκπομπής & Ρυθμού Μετάδοσης με Χρήση Συναρτήσεων Χρησιμότητας

Στο παρόν κεφάλαιο της διδακτορικής διατριβής, το μη συνεργατικό παίγνιο συνδυαστικής κατανομής ισχύος εκπομπής και ρυθμού μετάδοσης μοντελοποιείται ως ένα πρόβλημα μεγιστοποίησης της συνάρτησης χρησιμότητας κάθε χρήστη. Στο συγκεκριμένο παίγνιο κάθε χρήστης ανανεώνει την ισχύ εκπομπής του και το ρυθμό μετάδοσής του με έναν αποκλειστικά εγωιστικό τρόπο, με απώτερο στόχο τη μεγιστοποίηση της λαμβανόμενης ικανοποίησής του από το διαμοιρασμό των πόρων του συστήματος.

$$\begin{aligned} \max_{\substack{p_i \in P_i \\ r_i \in R_i}} U_i(p_i, r_i) &= \frac{Q_i(\hat{r}_i = r_i \cdot f(\gamma_i), p_i)}{p_i}, i \in S \\ \text{s.t. } 0 \leq r_i &\leq r_i^{\text{Max}}, \quad 0 \leq p_i \leq p_i^{\text{Max}} \end{aligned} \quad (78)$$

Το ανωτέρω πρόβλημα συνδυαστικής κατανομής ισχύος εκπομπής και ρυθμού μετάδοσης (joint utility-based uplink power and rate allocation - JUPRA) συμβολίζεται ως $G = [S, \{P_i, R_i\}, \{U_i(p_i, r_i)\}]$, όπου $S = \{1, 2, \dots, N\}$ είναι το σύνολο των ενεργών ασύρματων χρηστών που βρίσκονται εντός της κυψέλης, P_i είναι το σύνολο στρατηγικών των χρηστών ως προς την ισχύ εκπομπής, R_i είναι το σύνολο στρατηγικών των χρηστών ως προς το ρυθμό μετάδοσης και η συνάρτηση U_i αντιπροσωπεύει την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος βελτιστοποίησης όπως αυτή ορίστηκε στη σχέση (77). Επιπρόσθετα, γίνεται η υπόθεση ότι τα πεδία στρατηγικών ως προς την ισχύ εκπομπής P_i και το ρυθμό μετάδοσης R_i είναι συμπαγή και κυρτά σύνολα, με περιορισμούς ως προς τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή τους. Συνεπώς, για τον κάθε χρήστη $i \in S$ θεωρούμε τα αντίστοιχα κλειστά σύνολα ως πεδία στρατηγικών για την ισχύ εκπομπής του και το ρυθμό μετάδοσής του: $P_i = [0, p_i^{\text{Max}}]$ και

$R_i = [0, r_i^{Max}]$. Επιπλέον, κάθε χρήστης επιλέγει συνδυαστικά το ρυθμό μετάδοσης $r_i \in R_i$ και την ισχύ εκπομπής του $p_i \in P_i$ ώστε να μεγιστοποιήσει τη συνάρτηση χρησιμότητάς του U_i . Στη συνέχεια το διάνυσμα ρυθμού μετάδοσης όλων των χρηστών που εδρεύουν εντός της κυψέλης, το οποίο προκύπτει από την επίλυση του παιγνίου συμβολίζεται με $\mathbf{r}^* = (r_1, r_2, \dots, r_N)^T \in R = R_1 \times R_2 \times \dots \times R_N$ και το αντίστοιχο διάνυσμα ισχύος εκπομπής όλων των χρηστών με $\mathbf{p}^* = (p_1, p_2, \dots, p_N)^T \in P = P_1 \times P_2 \times \dots \times P_N$.

Στην προτεινόμενη προσέγγιση το παίγνιο που μοντελοποιείται αποτελείται από δύο διαφορετικές μεταβλητές, δηλαδή το ρυθμό μετάδοσης και την ισχύ εκπομπής στη ζεύξη ανόδου του CDMA ασύρματου κυψελωτού δικτύου. Οι δύο αυτές ελεύθερες μεταβλητές πρέπει να βελτιστοποιηθούν με σκοπό τη μεγιστοποίηση της συνάρτησης χρησιμότητας κάθε χρήστη. Το βασικό στοιχείο του προβλήματος βελτιστοποίησης όπως αυτό ορίστηκε στη σχέση (78), το οποίο απαιτεί ειδική μεταχείριση, είναι η ταυτόχρονη και σύγχρονη βελτιστοποίηση της συνάρτησης χρησιμότητας των χρηστών, όχι μόνο ως προς την ισχύ εκπομπής τους, αλλά και ως προς το ρυθμό μετάδοσής τους. Συνεπώς, το πρόβλημα βελτιστοποίησης επιλύεται ταυτόχρονα και συνδυαστικά και ως προς τις δύο ελεύθερες μεταβλητές του παιγνίου και καταλήγει στην εύρεση του βέλτιστου ζεύγους ισχύος εκπομπής και ρυθμού μετάδοσης: $(\mathbf{p}^*, \mathbf{r}^*)$. Με σκοπό την επίλυση του συνδυαστικού παιγνίου υιοθετείται η θεωρία παιγνίων κατά Nash, η οποία είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη για την επίλυση μη συνεργατικών παιγνίων.

6.6 Εύρεση Σημείου Ισορροπίας κατά Nash

Το σημείο ισορροπίας κατά Nash αποτελεί μία σταθερή, προβλέψιμη και προσδιορίσιμη λύση ενός μη συνεργατικού παιγνίου, στο οποίο πολλαπλοί χρήστες με πιθανώς αντικρουόμενα συμφέροντα ανταγωνίζονται μεταξύ τους και καταλήγουν σε ένα σημείο ισορροπίας, από το οποίο κανένας χρήστης δε θέλει να αποκλίνει. Συγκεκριμένα, στο σημείο ισορροπίας κανένας χρήστης δεν έχει κίνητρο να μεταβάλει την ισχύ εκπομπής του και το ρυθμό μετάδοσής του, δεδομένου ότι η ικανοποίηση που λαμβάνει από το διαμοιρασμό των πόρων του συστήματος δε μπορεί να βελτιωθεί από μεμονωμένες αλλαγές της ισχύος εκπομπής και του ρυθμού μετάδοσης, εφόσον οι υπόλοιποι χρήστες διατηρούν σταθερές τις στρατηγικές τους, δηλαδή τα διανύσματα p_i^* και r_i^* παραμένουν σταθερά.

Ορισμός 11: Το ζεύγος διανυσμάτων $(\mathbf{p}^*, \mathbf{r}^*) = (p_1^*, p_2^*, \dots, p_N^*, r_1^*, r_2^*, \dots, r_N^*)$ από τα σύνολα των στρατηγικών $p_i^* \in P_i$ και $r_i^* \in R_i$ είναι σημείο ισορροπίας κατά Nash του JUPRA παιγνίου G , τέτοιο ώστε κανένας χρήστης δεν μπορεί να βελτιώσει μονομερώς τη δική του λαμβανόμενη

ικανοποίηση, εάν για κάθε χρήστη $i \in S$ ισχύουν οι ακόλουθες συνθήκες:
 $U_i(p_i^*, r_i^*, p_i, r_i) \geq U_i(p_i, r_i, p_i, r_i)$, για κάθε τιμή $p_i \in P_i, r_i \in R_i$.

Ωστόσο όμως, αξίζει να τονιστεί ότι ένα μη συνεργατικό παίγνιο δεν έχει πάντα σημείο ισορροπίας κατά Nash, εξαιτίας της εγωιστικής συμπεριφοράς των χρηστών, επειδή είναι πιθανό ότι οι χρήστες δεν θα συμφωνήσουν μεταξύ τους σε ένα σταθερό αποτέλεσμα. Η απουσία σημείου ισορροπίας κατά Nash σημαίνει ότι το σύστημα είναι εγγενώς ασταθές. Για το λόγο αυτό, αρχικά μελετάται η ύπαρξη σημείου ισορροπίας κατά Nash στο JUPRA παίγνιο.

Θεώρημα 5: Στο JUPRA παίγνιο $G = [S, \{P_i, R_i\}, \{U_i(p_i, r_i)\}]$ υπάρχει σημείο ισορροπίας κατά Nash ως προς την ισχύ εκπομπής και το ρυθμό μετάδοσης $(\mathbf{p}^*, \mathbf{r}^*) = (p_1^*, p_2^*, \dots, p_N^*, r_1^*, r_2^*, \dots, r_N^*)$, $p_i^* \in P_i$ και $r_i^* \in R_i, \forall i \in S$.

Απόδειξη: Με σκοπό τη μελέτη της ύπαρξης του σημείου ισορροπίας κατά Nash στο JUPRA παίγνιο, είναι απαραίτητο να ισχύουν οι ακόλουθες συνθήκες.

1. Τα σύνολα P_i και R_i είναι μη κενά, κυρτά και συμπαγή υποσύνολα των Ευκλείδειων χώρων P^N και R^N αντίστοιχα.
2. Η συνάρτηση χρησιμότητας $U_i(\mathbf{p}, \mathbf{r})$ είναι συνεχής και $C^{(m)}$ φορές παραγωγίσιμη ως προς την ισχύ εκπομπής $\mathbf{p} \in P = [P_1 \times P_2 \times \dots \times P_N]$ και το ρυθμό μετάδοσης $\mathbf{r} \in R = [R_1 \times R_2 \times \dots \times R_N]$ [62].

Συνεπώς, δεδομένου ότι οι προαναφερθείσες ιδιότητες ισχύουν σύμφωνα με τη μοντελοποίηση του προτεινόμενου προβλήματος και βασιζόμενοι στο θεώρημα (Weierstrass) Extreme Value Theorem (E.V.T.) [63], εξάγεται το συμπέρασμα ότι η συνάρτηση χρησιμότητας, όπως αυτή ορίστηκε στη σχέση (77), έχει τουλάχιστον ένα ολικό μέγιστο $(\mathbf{p}^*, \mathbf{r}^*) = (p_1^*, p_2^*, \dots, p_N^*, r_1^*, r_2^*, \dots, r_N^*)$ που είναι το σημείο ισορροπίας κατά Nash του JUPRA παιγνίου. Καθώς επεξηγήθηκε και προηγουμένως, στο σημείο ισορροπίας κατά Nash η συνάρτηση χρησιμότητας του κάθε χρήστη μεγιστοποιείται και δε μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω κάνοντας οποιοσδήποτε μεμονωμένες αλλαγές. ■

Το θεώρημα 5 ορίζει και αποδεικνύει την ύπαρξη ενός σημείου ισορροπίας κατά Nash για το JUPRA παίγνιο. Συνεπώς, καθώς αποδείχθηκε στο θεώρημα 5, το JUPRA παίγνιο έχει ένα μη κενό σύνολο από σημεία ισορροπίας κατά Nash, τα οποία αποτελούν σταθερά σημεία ισορροπίας για το σύστημα. Ωστόσο όμως, έχοντας ως βασικό στόχο του προβλήματος την εξεύρεση μίας ενεργειακά αποδοτικής λύσης και στοχεύοντας στη βέλτιστη συνδυαστική

κατανομή ισχύος εκπομπής και ρυθμού μετάδοσης ικανοποιώντας ταυτόχρονα τις απαιτήσεις των χρηστών σε ποιότητα της υπηρεσίας, απώτερος στόχος της επίλυσης του προβλήματος είναι η μεγιστοποίηση της λαμβανόμενης ικανοποίησης των χρηστών με την ελάχιστη δυνατή ισχύ εκπομπής για κάθε χρήστη. Το ακόλουθο θεώρημα αποδεικνύει τη μοναδικότητα του σημείου ισορροπίας κατά Nash κατά την εξέταση του στόχου της ενεργειακά αποδοτικής κατανομής πόρων και προσδιορίζει τις συγκεκριμένες τιμές του βέλτιστου ζεύγους ισχύος εκπομπής και ρυθμού μετάδοσης (p^*, r^*) .

Θεώρημα 6: Το μοναδικό σημείο ισορροπίας κατά Nash του JUPRA μη συνεργατικού παιγνίου G από τη σκοπιά της ενεργειακά αποδοτικής κατανομής πόρων δίδεται από το ζεύγος (p_i^*, r_i^*) , $p_i \in P_i$ και $r_i \in R_i$:

$$(p_i^*, r_i^*) = \min_{\Lambda_{k,i}} \left\{ \min_{p_i \in P_i} \left\{ \arg \max_{p_i \in P_i, r_i \in R_i} U_i(p_i, r_i), p_i^{Max} \right\} \right\} \quad (79)$$

$$\Lambda_{k,i} = (p_{1,i}^*, p_{2,i}^*, \dots, p_{k,i}^*), k = 1, 2, \dots, K, i \in S$$

$$s.t. \left. \frac{\partial U_i(p_i, r_i)}{\partial p_i} \right|_{p_i = p_i^*} = 0 \quad \text{and} \quad \left. \frac{\partial U_i(p_i, r_i)}{\partial r_i} \right|_{r_i = r_i^*} = 0 \quad (79\alpha)$$

$$\text{and} (p_i, r_i)^T H(p_i, r_i)(p_i, r_i) < 0, \forall p_i \in P_i, \forall r_i \in R_i \quad (79\beta)$$

όπου $H(p_i, r_i) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 U_i(p_i, r_i)}{\partial p_i^2} & \frac{\partial^2 U_i(p_i, r_i)}{\partial p_i \partial r_i} \\ \frac{\partial^2 U_i(p_i, r_i)}{\partial p_i \partial r_i} & \frac{\partial^2 U_i(p_i, r_i)}{\partial r_i^2} \end{bmatrix}$ είναι ο Εσσιανός πίνακας στο σημείο (p_i, r_i)

και $\Lambda_{k,i} = (p_{1,i}^*, p_{2,i}^*, \dots, p_{k,i}^*)$, $k = 1, 2, \dots, K$, $i \in S$ είναι το μη κενό σύνολο από σημεία ισορροπίας κατά Nash του JUPRA παιγνίου στο υπό μελέτη συμπαγές, κυρτό και κλειστό σύνολο $P_i = [0, p_i^{Max}]$.

Απόδειξη: Οι συνθήκες της πρώτης τάξης παραγώγου (79α) της συνάρτησης χρησιμότητας προσδιορίζουν τα στάσιμα σημεία της συνάρτησης χρησιμότητας $U_i(p_i, r_i)$, τα οποία μπορεί να είναι είτε σημείο μεγίστου, είτε σημείο ελαχίστου, είτε σημείο σέλας. Με στόχο τον προσδιορισμό του σημείου μεγίστου της συνάρτησης χρησιμότητας, η συνθήκη (79β) είναι ικανή και αναγκαία (δηλαδή ο Εσσιανός πίνακας να είναι αρνητικά ορισμένος). Η ισχύς της συνθήκης (79β) είναι εγγυημένη για ένα ζεύγος (p_i, r_i) , $p_i \in P_i$, $r_i \in R_i$, διότι η συνάρτηση χρησιμότητας είναι συνεχής και $C^{(n)}$ φορές παραγωγίσιμη. Επιπρόσθετα είναι αναγκαία η επιλογή της ελάχιστης ισχύος εκπομπής ανάμεσα στις τιμές $\arg \max_{p_i \in P_i, r_i \in R_i} U_i(p_i, r_i)$ και p_i^{Max} ,

εξαιτίας των φυσικών περιορισμών που θέτει το υλισμικό των χρηστών ως προς τη μέγιστη ισχύ εκπομπής, δηλαδή $p_i \leq p_i^{Max}$. Επιπλέον, για την επίτευξη της ενεργειακά αποδοτικής

λύσης επιλέγεται η ελάχιστη δυνατή ισχύς εκπομπής μεταξύ των σημείων ισορροπίας κατά Nash, η οποία συμβάλει στον προσδιορισμό του μοναδικού σημείου ισορροπίας κατά Nash υπό την ενεργειακά αποδοτική σκοπιά επίλυσης του προβλήματος. ■

6.7 JUPRA Αλγόριθμος & Σύγκλιση

Στην ενότητα αυτή, παρουσιάζεται η σύγκλιση του JUPRA παιγνίου και περιγράφονται τα βήματα ενός επαναληπτικού κατανεμημένου και χαμηλής πολυπλοκότητας αλγορίθμου ο οποίος προσδιορίζει το μοναδικό σημείο ισορροπίας κατά Nash $(\mathbf{p}^*, \mathbf{r}^*)$.

6.7.1 Σύγκλιση του JUPRA παιγνίου

Με βάση το θεώρημα 6, προσδιορίζεται για κάθε χρήστη $i \in S$ η βέλτιστη στρατηγική του BR_i ως ακολούθως:

$$BR_i(p_i, r_i) = \min_{\Lambda_{k,i}} \left\{ \min_{p_i \in P_i} \left\{ \arg \max_{p_i \in P_i, r_i \in R_i} U_i(p_i, r_i), p_i^{Max} \right\} \right\} \quad (80)$$

$$\Lambda_{k,i} = (p_{1,i}^*, p_{2,i}^*, \dots, p_{k,i}^*), \quad k = 1, 2, \dots, K, \quad i \in S$$

$$s.t. \left. \frac{\partial U_i(p_i, r_i)}{\partial p_i} \right|_{p_i = p_i^*} = 0 \quad \text{and} \quad \left. \frac{\partial U_i(p_i, r_i)}{\partial r_i} \right|_{r_i = r_i^*} = 0$$

$$\text{and} (p_i, r_i)^T H(p_i, r_i)(p_i, r_i) < 0, \forall p_i \in P_i, \forall r_i \in R_i$$

Θεώρημα 7: Το JUPRA παίγνιο συγκλίνει στο μοναδικό του σημείο ισορροπίας κατά Nash, ξεκινώντας από οποιοδήποτε αρχικό σημείο.

Απόδειξη: Εξ ορισμού, το σημείο ισορροπίας κατά Nash ενός μη συνεργατικού παιγνίου πρέπει να πληρεί τη συνθήκη: $(\mathbf{p}^*, \mathbf{r}^*) = \mathbf{BR}(\mathbf{p}, \mathbf{r})$. Το θεμελιώδες στοιχείο προκειμένου να αποδειχθεί η σύγκλιση του JUPRA παιγνίου στο μοναδικό του σημείο ισορροπίας κατά Nash είναι να αποδειχθεί ότι η συνάρτηση χρησιμότητας των χρηστών είναι μια standard συνάρτηση [33]. Σε γενικές γραμμές, μια συνάρτηση f λέγεται ότι είναι standard, εφόσον χαρακτηρίζεται από τις ακόλουθες τρεις ιδιότητες:

- (i) Θετικότητα: $f(x) > 0$;
- (ii) Μονοτονία: εάν $x \geq x'$, τότε $f(x) \geq f(x')$;
- (iii) Επεκτασιμότητα: για κάθε $a > 1$, $af(x) \geq f(ax)$,

για όλα τα διανύσματα $x \geq 0$, όπου $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ είναι ένα σημείο ισορροπίας κατά Nash και η συνάρτηση $f(x)$ είναι η συνάρτηση βέλτιστης στρατηγικής. Μελετώντας το

JUPRA παίγνιο, οι παραπάνω ιδιότητες μπορούν εύκολα να ελεγχθούν ως προς την ισχύ τους για τη συνάρτηση βέλτιστης στρατηγικής $BR(p,r)$, δεδομένου ότι:

- (i) $(p,r) \succ \theta$, συνεπώς $BR(p,r) \succ \theta$, μέσω της σχέσης (80),
- (ii) εάν $(p,r) \succ (p',r')$, τότε μέσω της σχέσης (80) εξάγεται ότι $BR(p,r) \succ BR(p',r')$,
- (iii) για κάθε $a > 1$, δεδομένου ότι η συνάρτηση $BR(p,r)$ είναι γνησίως αύξουσα ως προς (p,r) , τότε εξάγεται ότι $aBR(p,r) \succ BR(ap,ar)$. ■

Ως εκ τούτου, η σύγκλιση του JUPRA παιγνίου στο μοναδικό σημείο ισορροπίας κατά Nash, ξεκινώντας από οποιαδήποτε αρχικό σημείο, είναι εγγυημένη.

6.7.2 JUPRA Αλγόριθμος

Το θεμελιώδες χαρακτηριστικό του προτεινόμενου αλγορίθμου είναι η ανανέωση της ισχύος εκπομπής και του ρυθμού μετάδοσης των χρηστών στην ίδια επανάληψη του αλγορίθμου και για το λόγο αυτό η μοναδική βέλτιστη λύση προσδιορίζεται ταυτόχρονα και ως προς την ισχύ εκπομπής και ως προς το ρυθμό μετάδοσης.

Βήμα 1^ο: Στην αρχή κάθε χρονοσχιμής t , κάθε χρήστης i , $i \in S$, επιλέγει τυχαία μία δυνατή τιμή της ισχύος εκπομπής $p_i^{(0)}$ (δηλαδή $0 < p_i^{(0)} \leq p_i^{Max}$) και μία επίσης τυχαία και δυνατή τιμή του ρυθμού μετάδοσης $r_i^{(0)}$ (i.e. $0 < r_i^{(0)} \leq r_i^{Max}$). Θέσε $k=0$, όπου με k συμβολίζεται ο αριθμός των επαναλήψεων του αλγορίθμου.

Βήμα 2^ο: Ο συνολικός θόρυβος (παρεμβολές) που αντιλαμβάνονται οι χρήστες $I^{(k)}(p^{(k)})$ ευρυνεκπέμπεται από το σταθμό βάσης, δεδομένων των τιμών της ισχύος εκπομπής όλων των χρηστών. Με βάση το συνολικό θόρυβο εντός της κυψέλης, κάθε χρήστης υπολογίζει το θόρυβο που ο ίδιος αντιλαμβάνεται $I_{-i}^{(k)}(p_{-i}^{(k)})$ και επαναπροσδιορίζει την ισχύ εκπομπής του, $p_i^{(k+1)}$ και το ρυθμό μετάδοσής του $r_i^{(k+1)}$, σύμφωνα με τη σχέση (79).

Βήμα 3^ο: Εάν η ισχύς εκπομπής και ο ρυθμός μετάδοσης συγκλίνουν (δηλαδή $|p_i^{(k+1)} - p_i^{(k)}| \leq \varepsilon$ και $|r_i^{(k+1)} - r_i^{(k)}| \leq \varepsilon$, $\varepsilon = 10^{-5}$) τότε σταμάτα.

Βήμα 4^ο: Σε κάθε άλλη περίπτωση, θέσε $k=k+1$ και επέστρεψε στο βήμα 2.

Ο JUPRA αλγόριθμος χαρακτηρίζεται ως ένας αλγόριθμος μοναδικής τιμής, χαμηλής πολυπλοκότητας και κατανεμημένος, ο οποίος καταλήγει στη βέλτιστη τιμή ισχύος εκπομπής και ρυθμού μετάδοσης για κάθε χρήστη ξεκινώντας από οποιαδήποτε τυχαία επιλεγμένη τιμή των μεταβλητών αυτών (δηλαδή $p_i^{(0)}$ και $r_i^{(0)}$, $\forall i \in S$).

6.8 Βελτίωση της Συνδυαστικής Ενεργειακά Αποδοτικής Κατανομής Πόρων μέσω Κοστολόγησης

Στο παρόν κεφάλαιο της διδακτορικής διατριβής προσδιορίστηκε έως αυτό το σημείο το μοναδικό σημείο ισορροπίας κατά Nash του JUPRA παίγνιου στοχεύοντας στην ενεργειακά αποδοτική κατανομή των πόρων του συστήματος. Ωστόσο όμως, καθώς έχει αποδειχθεί στη σύγχρονη διεθνή βιβλιογραφία [22], [26], [47], [64], [65], τα σημεία ισορροπίας κατά Nash που προέρχονται από κατανεμημένη λήψη αποφάσεων είναι εν γένει μη αποδοτικά υπό την κοινωνική σκοπιά του διαμοιρασμού των πόρων του συστήματος, εξαιτίας της εγωιστικής συμπεριφοράς των χρηστών. Για το λόγο αυτό, η κοστολόγηση των πόρων του συστήματος αναδύεται ως ένα ιδιαίτερα δυναμικό εργαλείο για το διαμοιρασμό των πόρων του συστήματος και καταλήγουν σε μία κοινωνικότερη λύση και κατανομή. Οι κύριοι λόγοι που υποδεικνύουν την υιοθέτηση της κοστολόγησης των πόρων του συστήματος είναι: το μεγαλύτερο κέρδος του συστήματος ως προς την λελογισμένη κατανομή των πόρων μέσω των μηχανισμών κοστολόγησης και η ενθάρρυνση των χρηστών να χρησιμοποιούν τους πόρους του συστήματος πιο αποτελεσματικά.

Συνεπώς, με βάση την ανάλυση που προηγήθηκε [64], [65], εισάγονται υπάρχουσες πολιτικές κοστολόγησης στο JUPRA παίγνιο ώστε να ενισχυθεί η απόδοση της προτεινόμενης προσέγγισης και να επιτευχθεί μία κοινωνικότερη συνδυαστική κατανομή των πόρων του συστήματος, δηλαδή της ισχύος εκπομπής και του ρυθμού μετάδοσης. Στην περίπτωση αυτή, κάθε χρήστης υιοθετεί μια κατάλληλη συνάρτηση χρησιμότητας, η οποία συνδέεται με τις απαιτήσεις του ως προς τους πόρους του συστήματος, ενώ το κόστος που εισάγεται αντικατοπτρίζει τις σχέσεις μεταξύ της τρέχουσας ζήτησης των χρηστών σε πόρους του συστήματος και τη διαθεσιμότητα των πόρων. Έτσι, το μη συνεργατικό παίγνιο συνδυαστικής κατανομής της ισχύος εκπομπής και του ρυθμού μετάδοσης με χρήση κοστολόγησης (Joint Uplink Power and Rate Allocation game with Pricing - JUPRA-P game) μπορεί να διατυπωθεί ως εξής:

$$\max_{\substack{p_i \in P \\ r_i \in R_i}} U_i^P(p_i, r_i) = \frac{Q_i(\hat{r}_i = r_i \cdot f(\gamma_i), p_i)}{p_i} - c_i(p_i), i \in S \quad (81)$$

$$s.t. \quad 0 \leq r_i \leq r_i^{Max}, \quad 0 \leq p_i \leq p_i^{Max}$$

όπου με $c_i(P)$ συμβολίζεται η συνάρτηση κοστολόγησης ως προς την ισχύ εκπομπής. Στη συνέχεια της ανάλυσης, αποκλειστικά για λόγους παρουσίασης, χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικές παραλλαγές της συνάρτησης κοστολόγησης: (α) γραμμική κοστολόγηση ως προς την ισχύ εκπομπής, δηλαδή $c_i(p_i) = c_i \cdot p_i$ (το αντίστοιχο παίγνιο συμβολίζεται ως

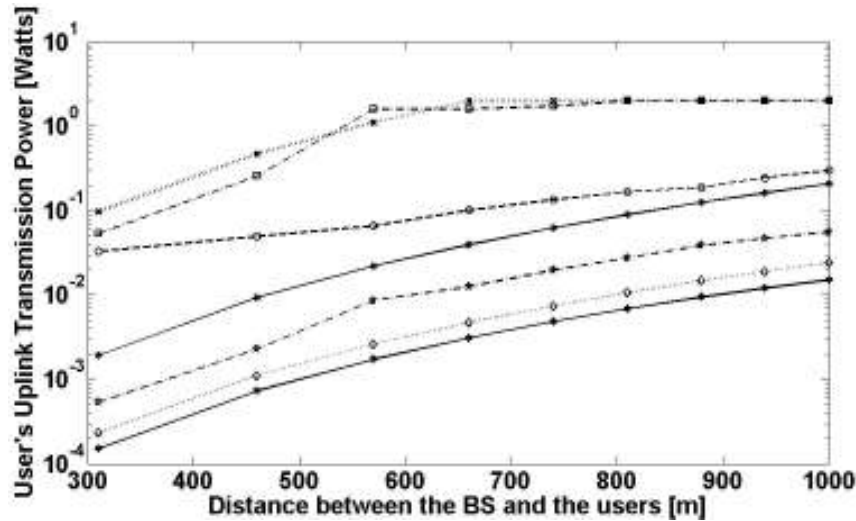
JUPRA-LP) και (β) κυρτή κοστολόγηση ως προς την ισχύ εκπομπής, δηλαδή $c_i(p_i) = c_i \cdot (e^{p_i} - 1)$ (το αντίστοιχο παίγνιο συμβολίζεται ως JUPRA-CP).

Σημειώνεται ότι, παραδοσιακά, οι περισσότεροι από τους μηχανισμούς κοστολόγησης που έχουν εφαρμοστεί για την κατανομή ισχύος εκπομπής στα ασύρματα κυψελωτά δίκτυα, είναι γραμμικές συναρτήσεις ως προς την ισχύ εκπομπής των χρηστών [26], [47]. Η ιδέα της μη γραμμικής κοστολόγησης της ισχύος εκπομπής των χρηστών προέρχεται από την παρατήρηση ότι η ζημία που ένας χρήστης επιβάλλει στους υπόλοιπους χρήστες που εδρεύουν εντός της κυψέλης, δεν είναι η ίδια σε όλο το εύρος τιμών της ισχύος εκπομπής, όπως ο γραμμικός μηχανισμός κοστολόγησης παραδέχεται. Ως εκ τούτου, οι μη γραμμικοί μηχανισμοί κοστολόγησης έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί εκτενώς στη βιβλιογραφία σε διάφορους τομείς [50], όπως στον τομέα της οικονομίας, της ενέργειας, κλπ. Τα οφέλη από την υιοθέτηση τέτοιων μηχανισμών κοστολόγησης στην προτεινόμενη προσέγγιση του παρόντος κεφαλαίου αναδεικνύονται μέσω αναλυτικών συγκριτικών αποτελεσμάτων.

6.9 Αριθμητικά Αποτελέσματα

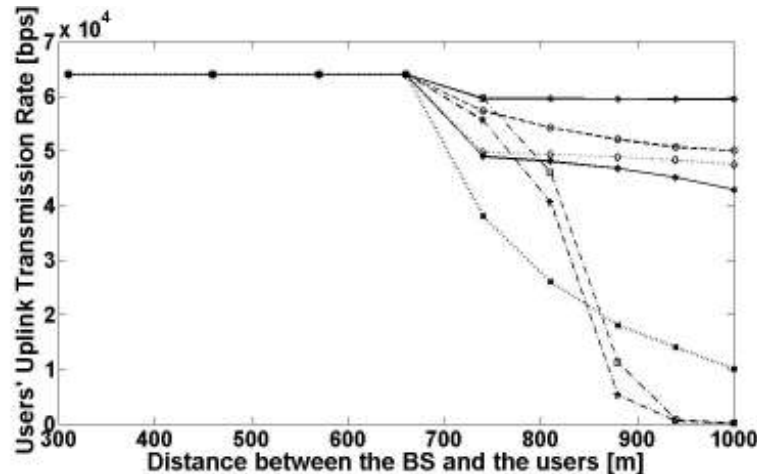
Στην ενότητα αυτή, παρουσιάζονται ορισμένα αριθμητικά αποτελέσματα σε σχέση με την λειτουργία της προτεινόμενης προσέγγισης που αποδεικνύουν τις βελτιώσεις ως προς την απόδοση που μπορεί να επιτευχθούν σε ένα CDMA ασύρματο μονοκυψελωτό δίκτυο. Κατά τη διάρκεια της αξιολόγησης της προτεινόμενης προσέγγισης θεωρούνται και εξετάζονται διάφορες παραλλαγές της, προκειμένου να γίνει αντιληπτή η επιρροή και η συνεισφορά στην καλύτερη απόδοση του διαμοιρασμού των πόρων του συστήματος, της κάθε προτεινόμενης καινοτομίας της προσέγγισης. Κατά αυτό τον τρόπο, παρουσιάζονται αναλυτικά τα οφέλη από (α) τη συνδυαστική κατανομή της ισχύος εκπομπής και του ρυθμού μετάδοσης στο ίδιο βήμα του αλγορίθμου, (β) την κατάλληλη μοντελοποίηση των απαιτήσεων των χρηστών σε ποιότητα της υπηρεσίας μέσω μίας γενικευμένης και κατάλληλα σχεδιασμένης συνάρτησης χρησιμότητας και (γ) την υιοθέτηση κατάλληλης πολιτικής κοστολόγησης.

Αποκλειστικά για λόγους παρουσίασης, θεωρείται ότι εντός της κυψέλης εδρεύουν $N=9$ χρήστες, οι οποίοι έχουν συνεχώς δεδομένα να μεταδώσουν και βρίσκονται σε αποστάσεις $d=[310 \ 460 \ 570 \ 660 \ 740 \ 810 \ 880 \ 940 \ 1000]$ m από το σταθμό βάσης. Το κέρδος του καναλιού των χρηστών μοντελοποιείται μέσω ενός μοντέλου κέρδους καναλιού $G_i = K_i / d_i^a$, όπου με a συμβολίζεται ο εκθέτης των απωλειών (όπου $a=4$) και με K_i μία λογαριθμοκανονική κατανομή τυχαίας μεταβλητής με μέση τιμή θ και τυπική απόκλιση $\sigma^2=8(db)$. Κάθε χρήστης υιοθετεί μία σιγμοειδή συνάρτηση επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης $Q_i(n_i, p_i) = (1 - e^{-(n_i - A)})^M$, όπου A και M είναι θετικές σταθερές, οι οποίες ρυθμίζουν το σχήμα της σιγμοειδούς συνάρτησης και με $f_i(\gamma_i) = (1 - e^{-3.7 \cdot \gamma_i})^{80}$, $I_o = 5 * 10^{-6}$, $W = 10^6 Hz$, συμβολίζεται η



- *— (i) JUPRA Algorithm
- (ii) JUPRA's Utility function via Algorithm in [58]
- ...♦... (iii) Algorithm in [58]
- (iv) Utility function in [57]-[59] via JUPRA Algorithm
- ◆— (v) JUPRA-CP game
- ...◇... (vi) JUPRA-LP game
- *... (vii) Algorithm in [58] with linear pricing

Σχήμα 33 Μέση τιμή της ισχύος εκπομπής στο σημείο ισορροπίας για διαφορετικά υπό μελέτη σενάρια



Σχήμα 34 Μέση τιμή του ρυθμού μετάδοσης στο σημείο ισορροπίας για διαφορετικά υπό μελέτη σενάρια

συνάρτηση απόδοσης. Οι φυσικοί περιορισμοί που θέτει το υλισμικό των χρηστών σχετικά με τη μέγιστη ισχύ εκπομπής τους είναι $p_i^{Max} = 2Watt$ και σχετικά με το μέγιστο ρυθμό μετάδοσής τους $r_i^{Max} = 64Kbps$ (π.χ. για χρήστες που αιτούνται υπηρεσίες φωνής). Κάθε

προσομοίωση επαναλαμβάνεται για 10.000 χρονοσχισμές. Σχετικά με το JUPRA-LP παίγνιο, η συνάρτηση κοστολόγησης που υιοθετείται είναι $c_i(p_i) = c_i \cdot p_i$ και για το JUPRA-CP $c_i(p_i) = c_i \cdot (e^{p_i} - 1)$, όπου με c_i συμβολίζεται ο συντελεστής κοστολόγησης, ο οποίος ευρυνεκπέμπεται από το σταθμό βάσης που επιβάλλει την πολιτική κοστολόγησης του συστήματος.

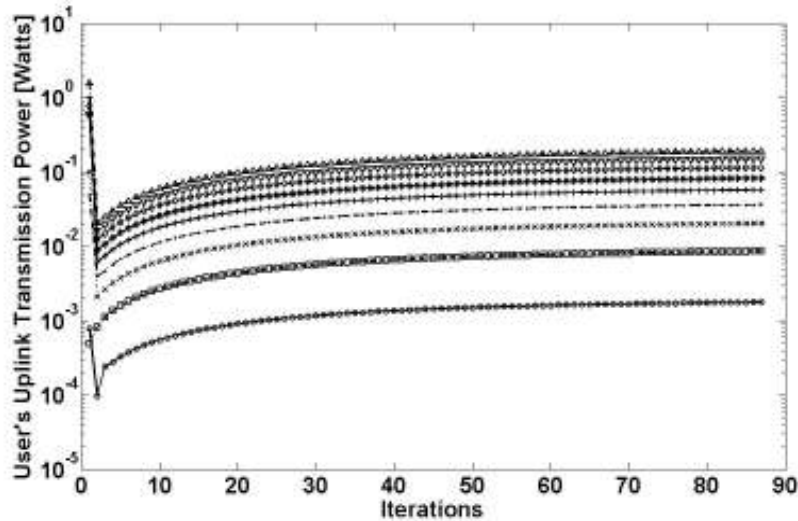
Τα σχήματα 33 και 34 παρουσιάζουν την μέση τιμή της ισχύος εκπομπής και του ρυθμού μετάδοσης ως συνάρτηση της απόστασης των χρηστών από το σταθμό βάσης για διαφορετικά σενάρια. Συγκεκριμένα, προκειμένου να καταστεί δυνατή μια λεπτομερής αξιολόγηση της προτεινόμενης προσέγγισης και μία δίκαιη συγκριτική ανάλυση, μελετώνται τα ακόλουθα επτά διαφορετικά σενάρια: (i) ο αλγόριθμος (i) ο JUPRA αλγόριθμος, (ii) ο αλγόριθμος που παρουσιάζεται στη δημοσίευση [58] με χρήση της συνάρτησης χρησιμότητας που προτάθηκε στην παρούσα προσέγγιση στη σχέση (77), (iii) ο αλγόριθμος που προτάθηκε στη δημοσίευση [59], (iv) ο JUPRA αλγόριθμος με υιοθέτηση της συνάρτησης χρησιμότητας που προτάθηκε στις δημοσιεύσεις [57]-[59], (v) το JUPRA – LP παίγνιο, (vi) το JUPRA – CP παίγνιο και (vii) ο αλγόριθμος που προτάθηκε στη δημοσίευση [58] με υιοθέτηση γραμμικής κοστολόγησης. Αξίζει να σημειωθεί ότι στη δημοσίευση [58], οι συγγραφείς αντιμετωπίζουν το πρόβλημα της συνδυαστικής κατανομής ισχύος εκπομπής και ρυθμού μετάδοσης, επιλύοντας αρχικά το πρόβλημα της βέλτιστης κατανομής ρυθμού μετάδοσης και έπειτα επιλύουν σειριακά το πρόβλημα της βέλτιστης κατανομής ισχύος εκπομπής. Αντίθετα, στη δημοσίευση [59] οι συγγραφείς μετατρέπουν το διπαραμετρικό πρόβλημα σε μονοπαραμετρικό, αντικαθιστώντας το λόγο του ρυθμού μετάδοσης προς την ισχύ εκπομπής με μία νέα μεταβλητή.

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα σενάρια, τα αποτελέσματα αποκαλύπτουν ότι καθώς η ποιότητα του καναλιού των χρηστών χειροτερεύει (δηλαδή η απόσταση των χρηστών από το σταθμό βάσης αυξάνεται) και προκειμένου οι χρήστες να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις τους σε ποιότητα της υπηρεσίας, η μέση τιμή της ισχύος εκπομπής τους αυξάνεται, ενώ ο ρυθμός μετάδοσής τους μειώνεται με διαφορετικό ρυθμό για κάθε υπό μελέτη σενάριο. Τα οφέλη που προκύπτουν ως προς την εξοικονόμηση ενέργειας και την κάλυψη των απαιτήσεων των χρηστών σε ποιότητα της υπηρεσίας, από την ανανέωση της ισχύος εκπομπής και του ρυθμού μετάδοσης στο ίδιο βήμα του αλγορίθμου και από την επίλυση του συνδυαστικού προβλήματος ως ένα διπαραμετρικό πρόβλημα, μπορούν να παρατηρηθούν από τη σύγκριση του JUPRA αλγορίθμου (σενάριο *i*) και του αλγορίθμου που προτάθηκε στη δημοσίευση [58] (σενάριο *ii*), όταν και οι δύο αλγόριθμοι υιοθετούν τη συνάρτηση χρησιμότητας που προτάθηκε στη σχέση (77). Ο JUPRA αλγόριθμος παρουσιάζει ανώτερη απόδοση ως προς την εξοικονόμηση ενέργειας και ταυτόχρονα ικανοποιεί τις απαιτήσεις των χρηστών σε ποιότητα της υπηρεσίας. Αντίθετα, ο αλγόριθμος που προτάθηκε στη δημοσίευση [58]

αντιμετωπίζει με προνομιακό τρόπο τους χρήστες που βρίσκονται πλησιέστερα στο σταθμό βάσης (δηλαδή χαμηλή ισχύς εκπομπής και υψηλός ρυθμός μετάδοσης) σε σύγκριση με τους απομακρυσμένους χρήστες.

Επιπλέον, τα οφέλη που προκύπτουν από την κατάλληλη μοντελοποίηση των απαιτήσεων των χρηστών σε μία ορθά σχεδιασμένη και πιο γενική συνάρτηση χρησιμότητας (σε σύγκριση με την απλοϊκή συνάρτηση χρησιμότητας που έχει προταθεί στη βιβλιογραφία [57]-[59] και εκφράζει το λόγο των επιτυχώς μεταδιδόμενων *bits* στο σταθμό βάσης προς την απαιτούμενη ισχύ εκπομπής), μπορούν να παρατηρηθούν από τη σύγκριση του JUPRA αλγορίθμου (σενάριο *i*) και του JUPRA αλγορίθμου όταν αυτός υιοθετεί τη συνάρτηση χρησιμότητας που έχει προταθεί στις δημοσιεύσεις [57]-[59] (σενάριο *iv*). Τα αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι η συνάρτηση χρησιμότητας της σχέσης (77) εκφράζει καλύτερα τις απαιτήσεις των χρηστών και συνεπώς χρειάζεται χαμηλότερη ισχύς εκπομπής για να επιτευχθεί υψηλότερος ρυθμός μετάδοσης. Επιπλέον, το συνολικό και συνδυαστικό όφελος που προκύπτει από την ορθή σχεδίαση της συνάρτησης χρησιμότητας και από την ανανέωση της ισχύος εκπομπής και του ρυθμού μετάδοσης στο ίδιο βήμα του αλγορίθμου μπορεί να παρατηρηθεί από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων του JUPRA αλγορίθμου (σενάριο *i*) και των αντίστοιχων αποτελεσμάτων του αλγορίθμου που προτάθηκε στη δημοσίευση [59] (σενάριο *iii*). Αξίζει να σημειωθεί ότι στην προσέγγιση που προτείνεται στο παρόν κεφάλαιο της διδακτορικής διατριβής επιτυγχάνεται σημαντική εξοικονόμηση ισχύος εκπομπής και οι χρήστες αντιμετωπίζονται με έναν ενιαίο τρόπο ως προς τον επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσής τους (ακόμη και οι απομακρυσμένοι χρήστες).

Επιπλέον, τα οφέλη που προκύπτουν από την επιβολή και την ενσωμάτωση μιας κατάλληλης πολιτικής κοστολόγησης, μπορούν να παρατηρηθούν μέσω της σύγκρισης των αποτελεσμάτων των JUPRA, JUPRA-LP και JUPRA-CP παιγνίων (σενάρια *i*, *v*, *vi*). Στα συγκεκριμένα αποτελέσματα αποδεικνύεται ότι η εισαγωγή του κατάλληλου μηχανισμού κοστολόγησης, αναγκάζει τους χρήστες να καταλήξουν σε ένα σημείο ισορροπίας στο οποίο εκπέμπουν με χαμηλότερη ισχύ εκπομπής χωρίς να μειώνεται σημαντικά ο ρυθμός μετάδοσής τους. Επιπλέον, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του JUPRA-LP παιγνίου (σενάριο *v*) με εκείνα που προκύπτουν από τον αλγόριθμο που προτάθηκε στη δημοσίευση [58] με υιοθέτηση γραμμικής κοστολόγησης (σενάριο *vi*), εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι χρήστες στο σημείο ισορροπίας κατά Nash του JUPRA-LP παιγνίου εκπέμπουν με σημαντικά χαμηλότερη ισχύ εκπομπής και επιτυγχάνουν υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης. Ολοκληρώνοντας τη σύγκριση των επτά διαφορετικά σεναρίων, παρατηρείται ότι το JUPRA-CP παίγνιο (σενάριο *vi*) επιτυγχάνει το πιο ενεργειακά αποδοτικό σημείο ισορροπίας.



Σχήμα 35 Σύγκλιση της ισχύος εκπομπής των χρηστών για το JUPRA παίγνιο

Τέλος, το σχήμα 35 απεικονίζει την ισχύ εκπομπής όλων των χρηστών ως συνάρτηση των επαναλήψεων που απαιτούνται για την σύγκλιση του JUPRA αλγορίθμου στο σημείο ισορροπίας κατά Nash (p^*, r^*) του G παιγνίου. Τα αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι η σύγκλιση του JUPRA αλγορίθμου είναι γρήγορη, καθώς απαιτούνται λιγότερες από ογδόντα επαναλήψεις για τη σύγκλιση στο σημείο ισορροπίας κατά Nash για όλους τους χρήστες, ξεκινώντας από οποιεσδήποτε τυχαία επιλεγμένες αρχικές τιμές της ισχύος εκπομπής. Επιπρόσθετα, παρατηρείται ότι σε λιγότερες από σαράντα επαναλήψεις οι τιμές της ισχύος εκπομπής έχουν πρακτικά συγκλίνει πολύ κοντά στις τελικές τιμές.

6.10 Ανακεφαλαιωτικά Συμπεράσματα

Η προσέγγιση που προτάθηκε στο παρόν κεφάλαιο της διδακτορικής διατριβής, η οποία επιλύει το συνδυαστικό πρόβλημα της κατανομής ισχύος εκπομπής και ρυθμού μετάδοσης με τη χρήση κατάλληλα σχεδιασμένης συνάρτησης χρησιμότητας αποτελεί ένα δυναμικό εργαλείο, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εννιαία αντιμετώπιση των διαφορετικών και πολλαπλών απαιτήσεων των χρηστών στα ασύρματα δίκτυα επόμενης γενιάς. Το βασικό πλεονέκτημα της προτεινόμενης προσέγγισης είναι η λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης και ως προς τις δύο μεταβλητές, δηλαδή την ισχύ εκπομπής και το ρυθμό μετάδοσης. Οι συγκρίσεις με άλλες προσεγγίσεις από την πρόσφατη βιβλιογραφία επαλήθευσαν τα σημαντικά οφέλη απόδοσης που μπορούν να επιτευχθούν με την υιοθέτηση της συγκεκριμένης προτεινόμενης προσέγγισης.

7 Κατανομή Ισχύος Εκπομπής & Υποφερουσών σε SC-FDMA Ασύρματα Δίκτυα

Στο παρόν κεφάλαιο της διδακτορικής διατριβής μελετάται το πρόβλημα της βέλτιστης συνδυαστικής κατανομής ισχύος εκπομπής και υποφερουσών σε SC-FDMA ασύρματα δίκτυα με υποστήριξη χρηστών, οι οποίοι αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, μέσω της υιοθέτησης κατάλληλων ΣΧ για τους χρήστες. Αρχικά μοντελοποιείται το πρόβλημα κατανομής ισχύος εκπομπής και υποφερουσών στους χρήστες και ως πρώτο βήμα προσδιορίζεται η βέλτιστη κατανομή ισχύος εκπομπής στους χρήστες, ενώ προτείνεται ένας επαναληπτικός αλγόριθμος για τη συνδυαστική κατανομή ισχύος εκπομπής και υποφερουσών στους χρήστες. Στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζονται αναλυτικά αριθμητικά αποτελέσματα τα οποία αναδεικνύουν την αποδοτικότητα της προτεινόμενης προσέγγισης, ως προς την εξοικονόμηση ισχύος εκπομπής για τους χρήστες και τη μεγιστοποίηση της λαμβανόμενης ικανοποίησής τους από το διαμοιρασμό των πόρων του συστήματος.

7.1 Σχετική Βιβλιογραφία & Ανάλυση

Στο παρόν κεφάλαιο της διδακτορικής διατριβής μελετάται το πρόβλημα της βέλτιστης συνδυαστικής κατανομής ισχύος εκπομπής και υποφερουσών σε SC-FDMA ασύρματα δίκτυα με υποστήριξη χρηστών, οι οποίοι αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, μέσω της υιοθέτησης κατάλληλων ΣΧ για τους χρήστες. Στη σύγχρονη βιβλιογραφία έχουν προταθεί ευρεστικοί αλγόριθμοι χαμηλής πολυπλοκότητας, οι οποίοι έχουν ως αποτέλεσμα την επίτευξη υψηλών ρυθμών μετάδοσης και στοχεύουν στη συνδυαστική κατανομή ισχύος εκπομπής και υποφερουσών στους χρήστες [52], [53]. Οι προτεινόμενοι αλγόριθμοι έχουν ως κύριο στόχο τους τη μεγιστοποίηση της συνολικής χωρητικότητας του συστήματος και κατανέμουν ισόποσα τη συνολική ισχύ εκπομπής κάθε χρήστη στις υποφέρουσες που του ανατίθενται από το δίκτυο. Επιπρόσθετα, ορισμένοι από αυτούς τους αλγορίθμους λαμβάνουν υπόψη την αναλογική δικαιοσύνη ανάμεσα στους χρήστες και για το λόγο αυτό ως υποψήφια ΣΧ των χρηστών υιοθετείται μία λογαριθμική συνάρτηση ως προς το ρυθμό μετάδοσης των χρηστών και οι αλγόριθμοι έχουν ως στόχο τη μεγιστοποίηση του αθροίσματος των ΣΧ όλων των χρηστών που ανήκουν εντός της υπό μελέτης κυψέλης, καταλήγοντας στην κατανομή της ισχύος εκπομπής των χρηστών και των υποφερουσών του δικτύου [52]. Αντίθετα, στο παρόν

κεφάλαιο προτείνεται μία καινοτόμος προσέγγιση, σύμφωνα με την οποία οι χρήστες στοχεύουν εγωιστικά στην ικανοποίηση των απαιτήσεών τους σε ΠτΥ μέσω της μεγιστοποίησης της ΣΧ τους, λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη τους φυσικούς περιορισμούς που τίθενται από το υλισμικό των χρηστών. Η σύνθετη μορφή της αντικειμενικής συνάρτησης, η οποία εξαρτάται από την κατανομή των υποφερουσών και τους φυσικούς περιορισμούς ως προς την ισχύ εκπομπής των χρηστών που εισάγονται στο πρόβλημα, καθιστά την άμεση επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης ιδιαίτερα περίπλοκη. Για το λόγο αυτό και με σκοπό την ικανοποίηση των απαιτήσεων των χρηστών σε ΠτΥ, που αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου προτείνεται μία αποδοτική λύση και ο αντίστοιχος αλγόριθμος συνδυαστικής κατανομής ισχύος εκπομπής και υποφερουσών σε SC-FDMA ασύρματα δίκτυα.

7.2 Μοντέλο Συστήματος

Στο παρόν κεφάλαιο της διδακτορικής διατριβής μελετάται ένα μονοκυψελικό SC-FDMA ασύρματο σύστημα, το οποίο υποστηρίζει $N(t)$ χρήστες οι οποίοι αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου και διαθέτουν συνεχώς δεδομένα να μεταδώσουν. Το σύνολο των χρηστών ανά χρονοσχιμή που αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου συμβολίζεται ως $S_{RT}(t)$. Το εύρος ζώνης του συστήματος συμβολίζεται με B Hz και χωρίζεται σε S υποφέρουσες, όπου με S_{sub} συμβολίζεται το αντίστοιχο σύνολό τους. Οι υποφέρουσες μεταδίδονται σειριακά και μόνο ένας χρήστης έχει το δικαίωμα να μεταδώσει στην εκάστοτε υποφέρουσα. Το κέρδος του καναλιού του χρήστη $i \in S_{RT}$ στην υποφέρουσα $s \in S_{sub}$ συμβολίζεται με $G_{i,s}(t)$ και η ισχύς εκπομπής του και ο αντίστοιχος ρυθμός μετάδοσής του με $P_{i,s}$ και $R_{i,s}$ αντίστοιχα. Η συνολική ισχύς εκπομπής του κάθε χρήστη i είναι άνω φραγμένη από τη μέγιστη διαθέσιμη ισχύ εκπομπής του P_i^{Max} εξαιτίας των περιορισμών που εισάγει το υλισμικό του χρήστη, δηλαδή $\sum_{s=1}^{S_i} P_{i,s} \leq P_i^{Max}$, όπου S_i είναι το πλήθος των υποφερουσών, οι οποίες είναι κατειλημμένες από το χρήστη i . Επιπρόσθετα, ο λαμβανόμενος σηματοθορυβικός λόγος, $\gamma_{i,s}$ του χρήστη i στο σταθμό βάσης δίδεται από τη σχέση: $\gamma_{i,s} = P_{i,s} G_{i,s} / \sigma_s^2$, όπου με σ_s^2 συμβολίζεται ο συνολικός θόρυβος που προκαλείται εντός της κυψέλης.

Με σκοπό τη θεώρηση των απαιτήσεων των χρηστών σε ΠτΥ μέσω ενός ενιαίου πλαισίου βελτιστοποίησης, αντιστοιχίζεται σε κάθε χρήστη μία κατάλληλα σχεδιασμένη ΣΧ U_i , η οποία αντιπροσωπεύει το βαθμό της ικανοποίησης του χρήστη σε σχέση με την κάλυψη των απαιτήσεών του σε ΠτΥ και την κατανάλωση ισχύος εκπομπής για την επίτευξή τους. Συνεπώς, η ΣΧ του χρήστη i για την υποφέρουσα $s \in S_i \subseteq S_{sub}$ εκφράζεται ως ακολούθως:

$$U_{i,s}(R_{i,s}^*, P_{i,s}) = \frac{Q_i(R_{i,s}^*, P_{i,s})}{P_{i,s}} = \frac{Q_i(R_{opt} f_i(\gamma_{i,s}), P_{i,s})}{P_{i,s}} \quad (82)$$

όπου με $R_{i,s}^* = R_{opt} f_i(\gamma_{i,s})$ συμβολίζεται ο επιτεύξιμος ρυθμός μετάδοσης σε κάθε υποφέρουσα $s \in S_i \subseteq S_{sub}$ του χρήστη, με R_{opt} ο σταθερός ρυθμός μετάδοσης ο οποίος εξαρτάται από το είδος της υπηρεσίας που αιτείται ο χρήστης, με f_i συμβολίζεται η συνάρτηση απόδοσης του χρήστη [16] και η συνάρτηση επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης συμβολίζεται με $Q_i(R_{i,s}^*, P_{i,s})$ και αντιπροσωπεύει το βαθμό ικανοποίησης του χρήστη ως προς την ικανοποίηση των απαιτήσεών του σε ΠτΥ ανά χρονοσχισμή. Η συνάρτηση επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης δίνει το πλεονέκτημα και την ικανότητα στους χρήστες να εκφράζουν καλύτερα και με μεγαλύτερη ακρίβεια τις απαιτήσεις τους σε πόρους του συστήματος. Συνεπώς, η ΣΧ του κάθε χρήστη, δεν αντιπροσωπεύει απλοϊκά το λόγο των επιτυχώς μεταδιδόμενων *bits* προς το σταθμό βάσης σε σχέση με την καταναλισκόμενη ισχύ εκπομπής, αλλά εκφράζει τη λαμβανόμενη ικανοποίηση των χρηστών από το διαμοιρασμό των πόρων του συστήματος σε σχέση με τα χαρακτηριστικά της υπηρεσίας την οποία αιτούνται και την αντίστοιχη κατανάλωση ισχύος εκπομπής.

Η πιθανότητα επιτυχούς μετάδοσης των πακέτων των χρηστών για σταθερό ρυθμό μετάδοσης αντιπροσωπεύεται με τη συνάρτηση απόδοσης, η οποία εξαρτάται από το σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που υιοθετείται και είναι μία γνησίως αύξουσα, συνεχής, σιγμοειδής και $C^{(n)}$ φορές παραγωγίσιμη συνάρτηση ως προς το σηματοθορυβικό λόγο $\gamma_{i,s}$ [16]. Επιπρόσθετα, για τη συνάρτηση απόδοσης ισχύουν οι ακόλουθες ιδιότητες: (a) $f_i(\infty) = 1$ και (b) $\lim_{\gamma_{i,s} \rightarrow 0^+} f_i(\gamma_{i,s}) = 0^+$ ώστε να διασφαλίζεται ότι ισχύει $\lim_{\gamma_{i,s} \rightarrow 0^+} Q_i(\gamma_{i,s}) = 0^+$ όταν $P_{i,s} = 0$ [16].

Η συνολική ΣΧ του χρήστη i στη χρονοσχισμή t , $U_i(t)$, δεδομένου του πλήθους των υποφερουσών που κατέχει ο χρήστης $S_i \subseteq S_{sub}$, ορίζεται ως το άθροισμα των επιμέρους ΣΧ του χρήστη $U_{i,s}$ ανά υποφέρουσα s .

$$U_i(R_{i,s}^*, P_{i,s}) = \sum_{s=1}^{S_i} U_{i,s}(R_{i,s}^*, P_{i,s}) = \sum_{s=1}^{S_i} \frac{Q_i(R_{opt} f_i(\gamma_{i,s}), P_{i,s})}{P_{i,s}} \quad (83)$$

Οι απαιτήσεις των χρηστών, οι οποίοι αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, σε ΠτΥ αναφέρονται κυρίως στην επίτευξη ενός κατώτατου ρυθμού μετάδοσης δεδομένων ανά χρονοσχισμή, R_{opt} . Συνεπώς, όταν ο επιτεύξιμος ρυθμός μετάδοσης των χρηστών κυμαίνεται στο διάστημα $(0, R_{opt})$, τότε η συνάρτηση επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης Q_i είναι φθίνουσα ως προς τον επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσης $R_{i,s}^*$, ώστε να αναδεικνύεται η ανάγκη των χρηστών να δεσμεύουν περισσότερους πόρους του συστήματος. Με την ίδια λογική, όταν επιτευχθεί ο κατώτατος επιθυμητός ρυθμός μετάδοσης από τους χρήστες, τότε μία περαιτέρω αύξηση του ρυθμού μετάδοσης του χρήστη δε συμβάλει στην ειδοποιό αύξηση της λαμβανόμενης ικανοποίησης του χρήστη. Συνεπώς, ο επιτεύξιμος ρυθμός μετάδοσης των χρηστών που αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου είναι άνω φραγμένος, ώστε να αποφεύγεται η

κατασπατάληση των πόρων και η περίσσεια του ρυθμού μετάδοσης να μπορεί να επανακατανεμηθεί στους χρήστες που δεν έχουν επιτύχει τον κατώτατο επιθυμητό ρυθμό μετάδοσης. Για το λόγο αυτό, η συνάρτηση επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης Q_i είναι μία γνησίως αύξουσα, σιγμοειδής, συνεχής και $C^{(n)}$ φορές παραγωγίσιμη συνάρτηση ως προς τον επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσης $R_{i,s}^*$, με μοναδικό σημείο καμπής. Επιπρόσθετα, ισχύουν οι ακόλουθες ιδιότητες: (a) $Q_i(\infty)=1$, (b) $Q_i(R_{opt})=1-\varepsilon$, όπου ε είναι μία μικρή θετική τιμή (π.χ. $\varepsilon=10^{-5}$) και (c) $\lim_{R_{i,s}^* \rightarrow 0^+} Q_i(R_{i,s}^*)=0^+$.

7.3 Συνδυαστική Κατανομή Ισχύος και Υποφερουσών στη Ζεύξη Ανόδου

Κατά τη μελέτη του SC-FDMA συστήματος, στην αρχή κάθε χρονοσχισμός ένας αλγόριθμος συνδυαστικής κατανομής ισχύος εκπομπής και υποφερουσών στη ζεύξη ανόδου είναι υπεύθυνος για τον προσδιορισμό του πλήθους των υποφερουσών που θα κατανεμηθούν σε κάθε χρήστη, καθώς επίσης και την ισχύ εκπομπής των χρηστών σε κάθε υποφέρουσα $s \in S_i \subseteq S_{sub}$, η οποία τους έχει κατανεμηθεί. Στόχος του αλγορίθμου είναι η μεγιστοποίηση της λαμβανόμενης ικανοποίησης του χρήστη U_i από το διαμοιρασμό των πόρων του συστήματος. Συνεπώς, το αντίστοιχο πρόβλημα βελτιστοποίησης ανά χρονοσχισμή μπορεί να εκφραστεί ως ακολούθως:

$$\begin{aligned} \max_{P_{i,s}} U_i(R_{i,s}^*, P_{i,s}) &= \max_{P_{i,s}} \sum_{s=1}^{S_i} U_{i,s}(R_{i,s}^*, P_{i,s}) \\ \text{s.t. } 0 &\leq \sum_{s=1}^{S_i} P_{i,s} \leq P_i^{Max}, \forall i \in S_{RT} \end{aligned} \quad (84)$$

Η επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης όπως αυτό διατυπώθηκε στη σχέση (84) είναι ιδιαίτερα δύσκολη και περίπλοκη εξαιτίας της σύνθετης μορφής της συνολικής συνάρτησης χρησιμότητας του χρήστη, η οποία εξαρτάται από την κατανομή των υποφερουσών στους χρήστες και από την ισχύ εκπομπής των χρηστών. Συνεπώς, η επαναδιατύπωση και η επαναμοντελοποίηση του προηγούμενου προβλήματος σε ένα αμιγές πρόβλημα βελτιστοποίησης ανά υποφέρουσα είναι αναγκαία και περιορίζει ιδιαίτερα την πολυπλοκότητα του προβλήματος. Συνεπώς, το πρόβλημα κατανομής ισχύος εκπομπής και υποφερουσών στη ζεύξη ανόδου (Uplink Power and Subcarrier Allocation - UPSA) μπορεί να ορισθεί ως ακολούθως:

$$\max_{P_{i,s}} U_{i,s}(R_{i,s}^*, P_{i,s}), \quad \forall i \in S_{RT}, \quad \forall s \in S_{sub} \quad (85)$$

Μελετώντας το UPSA πρόβλημα που ορίστηκε προηγουμένως, κάθε χρήστης προσδιορίζει ανά χρονοσχισμή την ισχύ εκπομπής του σε κάθε υποφέρουσα $\mathbf{P}_i^* = [P_{i1}^* P_{i2}^* \dots P_{iS}^*]$ $\forall s \in S_{sub}$ και προσδιορίζει το αντίστοιχο διάνυσμα με τις τιμές της ΣX του ανά υποφέρουσα

$U_i(P_i^*) = [U_{i1}^* U_{i2}^* \dots U_{is}^*]$. Ο χρήστης i^* , ο οποίος έχει τη μέγιστη ΣΧ $U_{i^*,s^*}(P_{i^*,s^*}^*)$ στην υποψήφια προς κατανομή υποφέρουσα s^* , ανάμεσα σε όλους τους υπόλοιπους χρήστες οι οποίοι εδρεύουν εντός της κυψέλης, καταλαμβάνει τη συγκεκριμένη υποφέρουσα s^* και εκπέμπει με τη βέλτιστη τιμή ισχύος εκπομπής, η οποία έχει προσδιοριστεί από το UPSA πρόβλημα (85). Επιπρόσθετα, ένας χρήστης αποκλείεται από τη διαδικασία κατανομής υποφερουσών εάν οι απαιτήσεις του σε ΠΤΥ έχουν ικανοποιηθεί (δηλαδή $\sum_{s=1}^{S_i} R_{i,s}^* \geq R_{opt}$) ή εάν η μέγιστη δυνατή ισχύς εκπομπής του έχει εξαντληθεί.

Στη συνέχεια, μελετάται η ύπαρξη και μοναδικότητα της βέλτιστης ισχύος εκπομπής ενός χρήστη i για το πρόβλημα βελτιστοποίησης UPSA. Με βάση το Λήμμα 1 της δημοσίευσης [36], εξάγεται ότι η συνάρτηση που προκύπτει από το συνδυασμό δύο επιμέρους σιγμοειδών συναρτήσεων είναι επίσης σιγμοειδής, όπως συμβαίνει στην περίπτωση της συνάρτησης επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης $Q_i(R_{opt}, f_i(\gamma_{i,s}))$, η οποία προκύπτει ότι είναι σιγμοειδής. Η παραπάνω ιδιότητα της συνάρτησης επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης ισχύει ακόμα και όταν η συνάρτηση μελετάται στο πεδίο της ισχύος εκπομπής $P_{i,s}$, εξαιτίας της ένα προς ένα σχέσης ανάμεσα στο σηματοθορυβικό λόγο, $\gamma_{i,s}$ και την ισχύ εκπομπής $P_{i,s}$. Με βάση την προηγούμενη παρατήρηση, αρχικά μελετώνται οι ιδιότητες της ΣΧ του χρήστη $i \in S_{RT}$ σε κάθε υποφέρουσα στην οποία αυτός μεταδίδει $s \in S_i \subseteq S_{sub}$.

Θεώρημα 8: Η ΣΧ $U_{i,s}(P_{i,s})$ του χρήστη $i \in S_{RT}$ σε κάθε υποφέρουσα στην οποία αυτός μεταδίδει $s \in S_i \subseteq S_{sub}$ είναι ημι-κοίλη συνάρτηση ως προς την ισχύ εκπομπής του $P_{i,s}$, συνεπώς παρουσιάζει ολικό σημείο μεγίστου:

$$P_{i,s}^* = \min(P_{Max}, \sigma_i^2 \gamma_{i,s}^* / G_{i,s}) \quad (86)$$

όπου $\gamma_{i,s}^*$ είναι η μοναδική τιμή του σηματοθορυβικού λόγου, η οποία προκύπτει από την επίλυση της εξίσωσης $\partial Q_i(\gamma_{i,s}) / \partial \gamma_{i,s} \gamma_{i,s} - Q_i(\gamma_{i,s}) = 0$.

Το προηγούμενο θεώρημα προσδιορίζει την ισχύ εκπομπής του χρήστη i σε καθεμία από τις υποφερουσες που του έχουν κατανεμηθεί $s \in S_i \subseteq S_{sub}$, με σκοπό τη μεγιστοποίηση της ΣΧ του ανά υποφέρουσα. Επιπρόσθετα, σύμφωνα με τη σχέση (86), εάν η υπολειπόμενη μέγιστη ισχύς εκπομπής κάθε χρήστη δεν είναι επαρκής για να επιτευχθεί ο επιθυμητός σηματοθορυβικός λόγος $\gamma_{i,s}^*$, εξαιτίας της πιθανής κακής ποιότητας του καναλιού του χρήστη, τότε η καλύτερη πολιτική είναι ο χρήστης να εκπέμπει με τη μέγιστη υπολειπόμενη ισχύ εκπομπής του. Η ύπαρξη και η μοναδικότητα του ολικού σημείου μεγιστοποίησης του UPSA προβλήματος πηγάζει από την ημι-κοίλη μορφή της ΣΧ των χρηστών $U_{i,s}$.

7.4 UPSA Αλγόριθμος

Στην παρούσα ενότητα προτείνεται ένας επαναληπτικός αλγόριθμος, ο οποίος προσδιορίζει το πλήθος των υποφερουσών $s \in S_i \subseteq S_{sub}$ που θα κατανεμηθούν σε κάθε χρήστη $i \in S_{RT}$, καθώς επίσης και την αντίστοιχη ισχύ εκπομπής κάθε χρήστη σε κάθε κατανεμημένη σε αυτόν υποφέρουσα, με σκοπό την ικανοποίηση των απαιτήσεών του σε ΠτΥ.

Αρχικοποίηση: Στην αρχή κάθε χρονοσχιsmής t , όλοι οι χρήστες που αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου και όλες οι υποφέρουσες δημιουργούν δύο σύνολα αντίστοιχα: το σύνολο των χρηστών και το σύνολο των υποφερουσών, δηλαδή $S_{RT}^0 = \{1, 2, \dots, N\}$ και $S_{sub}^0 = \{1, 2, \dots, S\}$ αντίστοιχα. Θέσε $k=0$ και $P_i^{Max(0)} = P_i^{Max}$.

Βήμα 1^ο (Βελτιστοποίηση της ισχύος εκπομπής και της ΣΧ): Κάθε χρήστης i υπολογίζει την ισχύ εκπομπής του $P_{i,s}^*$ για κάθε μη κατανεμημένη υποφέρουσα $s \in S_{sub}$, με βάση τη σχέση (86), και την αντίστοιχη τιμή της ΣΧ του $U_{i,s}(P_{i,s}^*)$, με βάση τη σχέση (82).

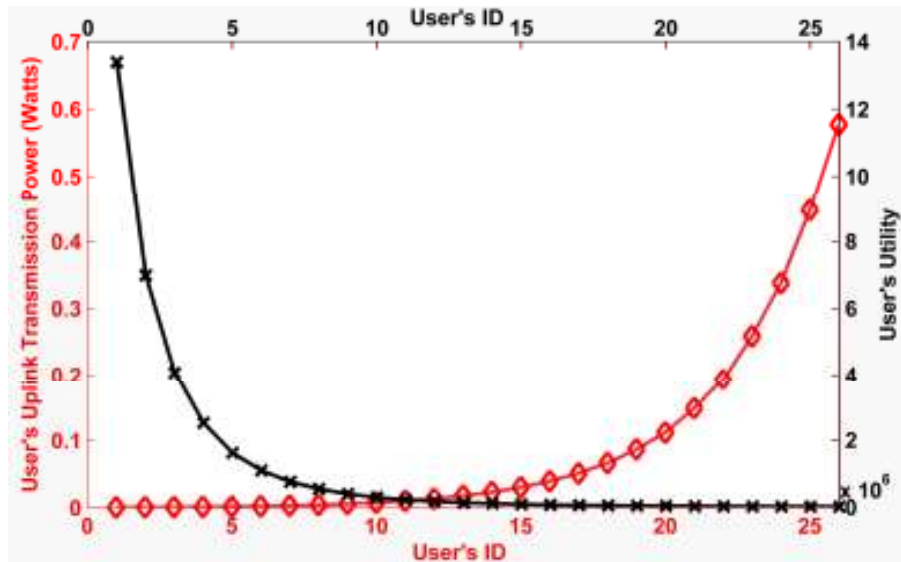
Βήμα 2^ο (Κατανομή Υποφερουσών): Διάλεξε το χρήστη (i^*) που παρουσιάζει τη μέγιστη τιμή της ΣΧ, ώστε να μεταδώσει στην υποφέρουσα (s^*), ως ακολούθως:

$$(i^*, s^*) = \arg \max_{i^* \in S_{RT}, s^* \in S_{sub}} (U_{i^*,s^*}(P_{i^*,s^*}^*))$$

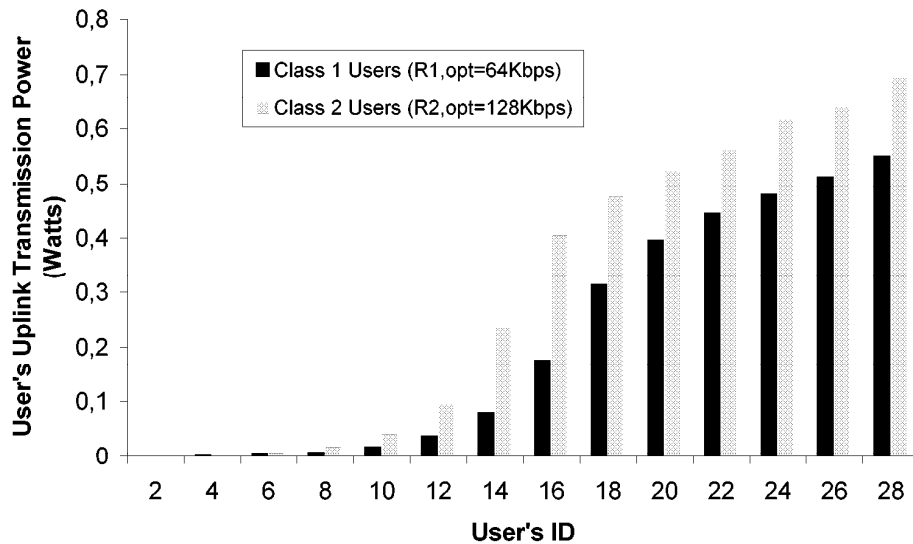
Βήμα 3^ο: Θέσε $k:=k+1$, διέγραψε την υποφέρουσα s^* από το σύνολο των διαθέσιμων υποφερουσών, δηλαδή $S_{sub}^{(k+1)} = S_{sub}^{(k)} - \{s^*\}$, ανανέωσε τη μέγιστη ισχύ εκπομπής του i^* $P_i^{Max(k+1)} = P_i^{Max(k)} - P_{i^*,s^*}^*$ και διέγραψε το χρήστη i^* από το σύνολο των χρηστών, δηλαδή $S_{RT}^{(k+1)} = S_{RT}^{(k)} - \{i^*\}$, εάν ισχύει $\sum_{s=1}^{S_i^*} R_s \geq R_{opt}$, εξαιτίας της ικανοποίησης των απαιτήσεών του σε ΠτΥ ή εάν ο χρήστης i^* έχει εξαντλήσει τη μέγιστη διαθέσιμη ισχύ εκπομπής του, δηλαδή $P_i^{Max(k+1)} = 0$. Σε κάθε άλλη περίπτωση επέστρεψε στο βήμα 1.

7.5 Αριθμητικά Αποτελέσματα

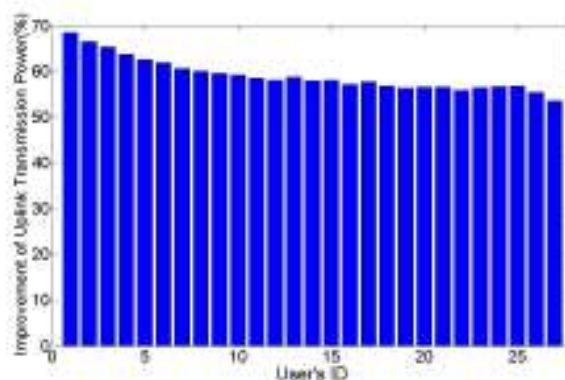
Τα σχήματα 36 και 37 παρουσιάζουν ορισμένα αριθμητικά αποτελέσματα τα οποία αναδεικνύουν τη λειτουργία και τα χαρακτηριστικά του UPSA αλγορίθμου. Αναφορικά με το σχήμα 36, αποκλειστικά για λόγους παρουσίασης, θεωρείται ότι όλοι οι χρήστες αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου και συγκεκριμένα υπηρεσίες φωνής, με ελάχιστο επιθυμητό ρυθμό μετάδοσης $R_{opt}=64Kbps$, ενώ είναι όλοι τοποθετημένοι σε βηματική απόσταση από το σταθμό βάσης, $d_i=d_{i-1}+50$ (m), για $i=2,3,\dots,S_{RT}$ και $d_1=300m$. Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν ότι καθώς η ποιότητα του καναλιού των χρηστών χειροτερεύει, η λαμβανόμενη ικανοποίησή τους, η οποία εκφράζεται μέσω των τιμών της ΣΧ τους,



Σχήμα 36 Μέση ισχύς εκπομπής και μέση τιμή της ΣΧ των χρηστών.



Σχήμα 37 Μέση ισχύς εκπομπής για δύο κλάσεις χρηστών.



Σχήμα 38 Βελτίωση της ισχύος εκπομπής των χρηστών μέσω του UPSA αλγορίθμου σε σχέση με την πολιτική μέγιστου κέρδους καναλιού.

μειώνεται, ενώ η ισχύς εκπομπής τους αυξάνεται. Επιπρόσθετα, το σχήμα 37 παρουσιάζει αριθμητικά αποτελέσματα, τα οποία συμπεριλαμβάνουν δύο κλάσεις χρηστών, οι οποίοι αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου (δηλαδή υπηρεσίες φωνής - Κλάση 1 και υπηρεσίες βίντεο - Κλάση 2), οι οποίοι επιθυμούν κατώτατο ρυθμό μετάδοσης $R_{1,opt}=64Kbps$ και $R_{2,opt}=128Kbps$ αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν ότι για την κλάση των χρηστών που αιτούνται αυξημένο κατώτατο ρυθμό μετάδοσης (δηλαδή την κλάση 2 με $R_{2,opt}=128Kbps$), η ισχύς εκπομπής των χρηστών αυξάνει ταχύτερα καθώς η ποιότητα του καναλιού των συγκεκριμένων χρηστών χειροτερεύει, σε σύγκριση με την κλάση 1 των χρηστών.

Εν κατακλείδι, συγκρίνεται το σενάριο που προτάθηκε στο παρόν κεφάλαιο, με το αντίστοιχο σενάριο όπου υιοθετείται η πολιτική κατανομής των υποφερουσών με κριτήριο την καλύτερη ποιότητα του καναλιού του χρήστη $i \in S_{RT}$ που αιτείται να αποκτήσει την κάθε υποφέρουσα $s \in S_{sub}$. Το σχήμα 38 παρουσιάζει τη βελτίωση που συνεισφέρει ο UPSA αλγόριθμος (βελτίωση της τάξης του 60%) στη μείωση της ισχύος εκπομπής των χρηστών, ενώ ταυτόχρονα εξασφαλίζεται η ικανοποίηση των απαιτήσεων των χρηστών (επίτευξη προκαθορισμένου κατώτατου ρυθμού μετάδοσης, $R_{opt}=64Kbps$).

7.6 Συμπεράσματα & Παρατηρήσεις

Σε αυτό το κεφάλαιο της παρούσας διδακτορικής διατριβής μελετήθηκε το πρόβλημα της βέλτιστης συνδυαστικής κατανομής ισχύος εκπομπής και ρυθμού μετάδοσης στη ζεύξη ανόδου των SC-FDMA ασύρματων δικτύων με την ταυτόχρονη υποστήριξη υπηρεσιών πραγματικού χρόνου. Με σκοπό τη μοντελοποίηση του προβλήματος βελτιστοποίησης υιοθετήθηκε κατάλληλη συνάρτηση χρησιμότητας και για την αντιμετώπιση του προβλήματος προτάθηκε ένας κατανεμημένος επαναληπτικός χαμηλής πολυπλοκότητας αλγόριθμος. Τα θετικά αποτελέσματα της προτεινόμενης μοντελοποίησης αναδεικνύονται μέσω αναλυτικών αποτελεσμάτων και συγκριτικών προσομοιώσεων. Ολοκληρώνοντας την παρουσίαση αυτού του κεφαλαίου, τονίζεται ότι ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η αντιμετώπιση του συνδυαστικού προβλήματος κατανομής υποφερουσών και ισχύος εκπομπής στα SC-FDMA ασύρματα δίκτυα με τη χρήση της θεωρίας και των μοντέλων διαπραγμάτευσης.

8 Συνδυαστική Κατανομή Ισχύος

Εκπομπής & Υποφερουσών σε SC-FDMA

Ασύρματα Δίκτυα: Χρήση Μοντέλων

Διαπραγμάτευσης

Στο παρόν κεφάλαιο της διδακτορικής διατριβής μελετάται το πρόβλημα της συνδυαστικής κατανομής ισχύος εκπομπής και υποφερουσών στη ζεύξη ανόδου ασύρματων κυψελωτών δικτύων μοναδικής υποφέρουσας πολλαπλής πρόσβασης διαίρεσης συχνότητας (Single-Carrier Frequency Division Multiple Access - SC-FDMA). Δεδομένης της εγγενούς πολυπλοκότητας του αντίστοιχου προβλήματος βελτιστοποίησης, στο παρόν κεφάλαιο προτείνεται μία προσέγγιση αντιμετώπισης του προβλήματος, η οποία διακρίνεται σε τρεις διαδοχικές φάσεις. Αρχικά, υιοθετείται ένα μοντέλο διαπραγμάτευσης μεταξύ πολλών χρηστών (συγκεκριμένα το μοντέλο διαπραγμάτευσης που έχει προταθεί από τον Rubinstein), με βάση το οποίο προσδιορίζεται μία εφικτή και σταθερή κατανομή του πλήθους των υποφερουσών στους χρήστες που εδρεύουν εντός της κυψέλης. Στη συνέχεια, προτείνονται διάφορες ρεαλιστικές πολιτικές κατανομής των συγκεκριμένων υποφερουσών ανά χρήστη. Η τρίτη φάση της αντιμετώπισης του προβλήματος, καταναίμει τη βέλτιστη ισχύ εκπομπής του κάθε χρήστη ανά κάθε υποφέρουσα στην οποία αυτός εκπέμπει. Για την επίτευξη της τρίτης φάσης της προτεινόμενης προσέγγισης, μοντελοποιείται ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης ως προς την ισχύ εκπομπής, το οποίο και επιλύεται αναλυτικά. Επιπρόσθετα, με σκοπό την έμφαση στην ενεργειακά αποδοτική επίλυση του προβλήματος, η λαμβανόμενη ευχαρίστηση κάθε χρήστη από το διαμοιρασμό των πόρων του συστήματος μοντελοποιείται κατάλληλα μέσω μιας ορθά σχεδιασμένης συνάρτησης χρησιμότητας, η οποία αντιπροσωπεύει τη συσχέτιση ανάμεσα στον επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσης και στην αντίστοιχη κατανάλωση ισχύος εκπομπής. Η αξιολόγηση της απόδοσης της προτεινόμενης προσέγγισης επιτυγχάνεται μέσω της μοντελοποίησης και των αναλυτικών προσομοιώσεων, και αποδεικνύεται η υπεροχή της έναντι των άλλων υπάρχουσών εναλλακτικών λύσεων που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία.

8.1 Σχετική Βιβλιογραφία

Η τεχνολογία SC-FDMA αναδείχθηκε ως μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία πρόσβασης δικτύου για την τέταρτη γενιά (4G) δικτύων κινητής επικοινωνίας. Ως εκ τούτου, έχει επιλεγεί ως η τεχνολογία που εφαρμόζεται στη ζεύξη ανόδου για τα τέταρτης γενιάς ασύρματα δίκτυα από το 3GPP- LTE πρότυπο [69]. Στα SC-FDMA ασύρματα δίκτυα, το συνολικό εύρος ζώνης χωρίζεται σε ορθογώνιες υποφέρουσες, οι οποίες στη συνέχεια κατανέμονται στους χρήστες. Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν προταθεί δύο βασικές μέθοδοι κατανομής των υποφερουσών στους χρήστες που εδρεύουν εντός της κυψέλης: (α) η τοπική (Localized SC-FDMA – L-SC-FDMA) και (β) η κατανεμημένη (Distributed SC-FDMA – D-SC-FDMA), στις οποίες οι υποφέρουσες κατανέμονται στους χρήστες είτε συνεχόμενα είτε διάσπαρτα, αντίστοιχα [70]. Η L-SC-FDMA στρατηγική εκμεταλλεύεται την επιλεκτική εξασθένιση του σήματος σε συγκεκριμένες συχνότητες με σκοπό τη μεγιστοποίηση του συνολικού ρυθμού μετάδοσης των χρηστών, μέσω της ορθής κατανομής υποφερουσών στους χρήστες. Αντίθετα, η D-SC-FDMA στρατηγική αποφεύγει να κατανέμει υποφέρουσες σε χρήστες των οποίων το κανάλι έχει χαμηλό κέρδος για τη συγκεκριμένη υποφέρουσα. Κατά αυτόν τον τρόπο προσφέρει ανθεκτικότητα στο σύστημα ως προς την αποφυγή έντονων εξασθενίσεων του σήματος και επιτυγχάνει χαμηλότερο λόγο μέγιστης προς μέση ισχύ εκπομπής (Peak-to-Average Power Ratio - PAPR). Στα πλαίσια του παρόντος κεφαλαίου της διδακτορικής διατριβής υιοθετούνται σε διαφορετικά σενάρια και οι δύο στρατηγικές κατανομής υποφερουσών στους χρήστες, δηλαδή οι L-SC-FDMA και D-SC-FDMA στρατηγικές. Πιο συγκεκριμένα, στα πλαίσια του παρόντος κεφαλαίου προτείνεται μία συμπαγής και ενιαία προσέγγιση, η οποία επιτρέπει την ενεργειακά αποδοτική κατανομή υποφερουσών και ισχύος εκπομπής στους χρήστες, μέσω της υιοθέτησης κατάλληλου μοντέλου διαπραγματεύσεων και με την επίλυση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης ως προς την ισχύ εκπομπής. Καθώς θα αποδειχθεί μετέπειτα στο κεφάλαιο, η συγκεκριμένη προσέγγιση συγκλίνει σε μία εφικτή και σταθερή λύση, ενώ τα αριθμητικά αποτελέσματα αναδεικνύουν την υπεροχή της προτεινόμενης προσέγγισης, όταν αυτή συγκρίνεται με υπάρχουσες προσεγγίσεις που έχουν προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία.

Στη δημοσίευση [54] προτείνεται μία προσέγγιση κατανομής ισχύος εκπομπής και υποφερουσών, η οποία υιοθετεί δύο διαφορετικές συναρτήσεις χρησιμότητας: (α) η πρώτη εκφράζει το συνολικό ρυθμό μετάδοσης των χρηστών με σκοπό τη μεγιστοποίηση της χωρητικότητας του δικτύου και (β) η δεύτερη εκφράζει τον αθροιστικό λογαριθμικό ρυθμό μετάδοσης των χρηστών με σκοπό τη μεγιστοποίηση της αναλογικής δικαιοσύνης μεταξύ των χρηστών. Επιπρόσθετα, στις δημοσιεύσεις [52], [54] οι συγγραφείς προτείνουν έναν ευρεστικό αλγόριθμο κατανομής υποφερουσών στους χρήστες, ο οποίος βασίζεται στη βελτίωση της οριακής χρησιμότητας των χρηστών και δεν επιλύουν άμεσα το πρόβλημα

βελτιστοποίησης για την κατανομή των υποφερουσών. Πιο αναλυτικά, οι υποφερούσες οργανώνονται σε ομάδες και οι ομάδες των υποφερουσών κατανέμονται στους χρήστες με σκοπό την ελαχιστοποίηση του χρόνου σύγκλισης του ευρεστικού αλγορίθμου.

Στη δημοσίευση [53] μελετάται το πρόβλημα βελτιστοποίησης του συνολικού ρυθμού μετάδοσης όλων των χρηστών με χρήση βαρών σε SC-FDMA ασύρματα δίκτυα, το οποίο προσεγγίζει το αντίστοιχο πρόβλημα με στόχο την αναλογική δικαιοσύνη μέσω της κατάλληλης επιλογής των βαρών. Έπειτα, το αρχικό πρόβλημα αναδιατυπώνεται σε ένα ακέραιο δυαδικό πρόβλημα. Μία επέκταση της ερευνητικής εργασίας που έχει προταθεί στη δημοσίευση [53] αποτελεί η δημοσίευση [72] στην οποία μελετώνται δύο επιπρόσθετα προβλήματα κατανομής πόρων. Το πρώτο πρόβλημα μελετά την ικανοποίηση του επιθυμητού ρυθμού μετάδοσης των χρηστών με περιορισμό ως προς το ελάχιστο πλήθος κατανεμημένων υποφερουσών και το δεύτερο πρόβλημα αντιμετωπίζει τη βελτιστοποίηση του αθροίσματος της ισχύος εκπομπής των χρηστών με περιορισμούς ως προς τον ελάχιστο ρυθμό μετάδοσής τους. Επιπρόσθετα, στη δημοσίευση [73] προτείνεται μία ενεργειακά αποδοτική κατανομή πόρων σε ένα L-SC-FDMA ασύρματο κυψελωτό δίκτυο με σύγχρονο υβριδικό αυτόματο αίτημα επανάληψης (hybrid automatic repeat request), ενώ προτείνεται μία μεταβλητής πολυπλοκότητας προσέγγιση για την ελαχιστοποίηση της δαπανώμενης ενέργειας για την κατανομή των πόρων του συστήματος.

8.2 Συμβολή & Καινοτομία της Προτεινόμενης Προσέγγισης

Στο παρόν κεφάλαιο της διδακτορικής διατριβής προτείνεται μία προσέγγιση, η οποία αποτελείται από τρεις διαδοχικές φάσεις, με σκοπό την επίτευξη της ενεργειακά αποδοτικής κατανομής των υποφερουσών και της ισχύος εκπομπής για το σύνολο των χρηστών οι οποίοι εδρεύουν εντός της SC-FDMA κυψέλης. Αρχικά, υιοθετείται ένα μοντέλο διαπραγματεύσεων μεταξύ πολλών χρηστών και συγκεκριμένα το μοντέλο διαπραγματεύσεων που έχει προταθεί από τον Rubinstein, με σκοπό την επίτευξη μίας εφικτής και σταθερής κατανομής του πλήθους των υποφερουσών στο σύνολο των χρηστών. Στη συνέχεια προτείνονται διάφορες ρεαλιστικές μέθοδοι αντιστοίχισης των συγκεκριμένων υποφερουσών σε κάθε χρήστη. Η τρίτη φάση της προτεινόμενης προσέγγισης στοχεύει στην ενεργειακά αποδοτική επίλυση του προβλήματος κατανομής των πόρων του συστήματος και για το λόγο αυτό μοντελοποιείται και επιλύεται ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης ως προς την ισχύ εκπομπής των χρηστών ανά κατανεμημένη υποφερούσα. Το συγκεκριμένο πρόβλημα βελτιστοποίησης προσδιορίζει τη βέλτιστη ισχύ εκπομπής του κάθε χρήστη σε κάθε υποφερούσα που του έχει ήδη κατανεμηθεί από τις δύο προηγούμενες φάσεις της προτεινόμενης προσέγγισης.

Τα βασικά χαρακτηριστικά της προτεινόμενης προσέγγισης, η συμβολή της, καθώς επίσης και οι διαφορές της από αντίστοιχες προσεγγίσεις της διεθνούς βιβλιογραφίας συνοψίζονται στα ακόλουθα σημεία:

1. Η συνάρτηση ευχαρίστησης των χρηστών ορίζεται ως μία γενικευμένη συνάρτηση εξαρτώμενη από τους πόρους του συστήματος. Η συνάρτηση χρησιμότητας των χρηστών αντιπροσωπεύει τη συσχέτιση ανάμεσα στον επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσής τους και την αντίστοιχη κατανάλωση ισχύος εκπομπής, σε αντίθεση με τις απλοϊκές προσεγγίσεις που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία [52], [54], σύμφωνα με τις οποίες η συνάρτηση χρησιμότητας εκφράζει το ρυθμό μετάδοσης των χρηστών υιοθετώντας τη φόρμουλα του Shannon. Επιπρόσθετα, προτείνεται ένα ενεργειακά αποδοτικό πρόβλημα κατανομής ισχύος εκπομπής και υποφερουσών (Energy-efficient Utility-based Subcarrier and Power Allocation - EUSPA), το οποίο μοντελοποιείται ως ένα μη συνεργατικό παίγνιο, στο οποίο κάθε χρήστης προσπαθεί να μεγιστοποιήσει την προσωπική του ευχαρίστηση από το διαμοιρασμό των πόρων του συστήματος. Αντίθετα, στην πρόσφατη βιβλιογραφία [52], [54] έχουν προταθεί κεντρικοποιημένα προβλήματα κατανομής των πόρων στα SC-FDMA ασύρματα δίκτυα, με σκοπό τη μεγιστοποίηση της συνολικής λαμβανόμενης ευχαρίστησης όλων των χρηστών από το διαμοιρασμό των πόρων του συστήματος.

2. Στην παρούσα προσέγγιση υιοθετείται ένα μοντέλο διαπραγματεύσεων μεταξύ πολλών χρηστών, το οποίο είναι το μοντέλο διαπραγματεύσεων που έχει προταθεί από τον Rubinstein. Με τη χρήση του συγκεκριμένου μοντέλου επιτυγχάνεται ο προσδιορισμός μίας εφικτής και σταθερής κατανομής του πλήθους των υποφερουσών. Σε αντίθεση, στη σύγχρονη βιβλιογραφία [52]-[54], [72], [73] με σκοπό την κατανομή των υποφερουσών στους χρήστες έχουν προταθεί διάφοροι ευρεστικοί αλγόριθμοι, οι οποίοι παρουσιάζουν το βασικό μειονέκτημα του μεγάλου χρόνου σύγκλισης στη λύση του προβλήματος.

3. Στην παρούσα προσέγγιση προτείνονται τρεις διαφορετικές πολιτικές κατανομής των συγκεκριμένων υποφερουσών σε κάθε χρήστη. Οι πολιτικές αυτές λαμβάνουν υπόψη το κέρδος του καναλιού του κάθε χρήστη ανά κατανεμημένη υποφέρουσα.

4. Προσδιορίζεται η βέλτιστη ισχύς εκπομπής των χρηστών ανά υποφέρουσα, δεδομένης της κατανομής των υποφερουσών που έχει πραγματοποιηθεί από τις δύο προηγούμενες φάσεις της προσέγγισης. Κατά αυτόν τον τρόπο το συνδυαστικό πρόβλημα καταλήγει σε ένα μοναδικό σημείο ισορροπίας, το οποίο είναι ενεργειακά αποδοτικό, αντί να υιοθετεί την πολιτική ισότιμης κατανομής ισχύος εκπομπής ανά χρήστη ανά υποφέρουσα (equal-bit-equal-power - EBEP) [52], [54].

5. Προτείνεται ένας επαναληπτικός, κατανεμημένος και χαμηλής πολυπλοκότητας αλγόριθμος, ο οποίος συγκλίνει σε σταθερή κατανομή ισχύος εκπομπής και αποδεικνύεται αναλυτικά η σύγκλισή του.

6. Η απόδοση της προτεινόμενης προσέγγισης αξιολογείται λεπτομερώς, προκειμένου να αποκτηθεί γνώση για τα λειτουργικά της χαρακτηριστικά και αποδεικνύεται η ανωτερότητά της ως προς την απόδοσή της μέσω αναλυτικών συγκριτικών αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των δημοσιεύσεων [52], [54].

8.3 Μοντέλο Συστήματος & Σχετικές Πληροφορίες

Στα πλαίσια του συγκεκριμένου κεφαλαίου μελετάται ανά χρονοσχισμή η άνω ζεύξη ενός SC-FDMA ασύρματου κυψελωτού δικτύου με εύρος ζώνης B Hz. Ο χρόνος χωρίζεται σε χρονοσχισμές και κάθε χρονοσχισμή διαρκεί 0.5 ms και είναι η βασική χρονική μονάδα για τη δρομολόγηση των δεδομένων. Το εύρος ζώνης του συστήματος B Hz χωρίζεται σε υποφέρουσες, των οποίων το σύνολο είναι $S_{sub} = \{s_i^j / i \in \mathcal{N} = \{1, 2, \dots, i, \dots, N\}, j = 1, 2, \dots, K_i\}$, όπου ο αριθμός K_i αντιπροσωπεύει το πλήθος των υποφερουσών που είναι δεσμευμένες από το χρήστη i και με $S_i = \{s_i^j / j = 1, 2, \dots, K_i\}$ συμβολίζεται το αντίστοιχο σύνολο των δεσμευμένων υποφερουσών από το χρήστη i . Το συνολικό πλήθος των χρηστών που εδρεύουν εντός της κυψέλης είναι N και το αντίστοιχο σύνολό τους συμβολίζεται με $\mathcal{N} = \{1, 2, \dots, i, \dots, N\}$.

Το συνολικό πλήθος των υποφερουσών είναι $S = \sum_{i=1}^N K_i$. Το κέρδος του καναλιού του χρήστη

$i \in \mathcal{N}$ στην υποφέρουσα $s_i^j \in S_i$ συμβολίζεται με G_{i,s_i^j} και η αντίστοιχη ισχύς εκπομπής του στη συγκεκριμένη υποφέρουσα με P_{i,s_i^j} . Η συνολική ισχύς εκπομπής κάθε χρήστη είναι άνω

φραγμένη από τη μέγιστη ισχύ εκπομπής του P_i^{Max} , δηλαδή $\sum_{j=1}^{K_i} P_{i,s_i^j} \leq P_i^{Max}$, η οποία

υπαγορεύεται από τους φυσικούς περιορισμούς που εισάγει το υλισμικό κάθε χρήστη.

Επιπρόσθετα, ο λαμβανόμενος σηματοθορυβικός λόγος, γ_{i,s_i^j} , στο σταθμό βάσης από το χρήστη i όταν μεταδίδει δεδομένα στην υποφέρουσα s_i^j δίδεται από τη σχέση:

$$\gamma_{i,s_i^j} = \frac{P_{i,s_i^j} G_{i,s_i^j}}{\sigma_{s_i^j}^2} \quad (87)$$

όπου με $\sigma_{s_i^j}^2$ συμβολίζεται ο θόρυβος που υπεισέρχεται από τη μετάδοση στην υποφέρουσα s .

Στη συνέχεια της ανάλυσης, με σκοπό να ληφθούν υπόψη τα διαφορετικά χαρακτηριστικά των χρηστών ανάλογα με την αιτούμενη υπηρεσία, κάθε χρήστης υιοθετεί μία κατάλληλη συνάρτηση χρησιμότητας U_{i,s_i^j} . Η συνάρτηση χρησιμότητας εκφράζει το επίπεδο

λαμβανόμενης ικανοποίησης κάθε χρήστη ως αποτέλεσμα των ενεργειών του και της κατανομής των πόρων του συστήματος.

Επιπρόσθετα, με σκοπό τη μελέτη και τον ορισμό των συναρτήσεων χρησιμότητας από την πλευρά των χρηστών, είναι απαραίτητη η μελέτη των μοναδικών χαρακτηριστικών του ασύρματου περιβάλλοντος δικτύωσης και ιδιαίτερα τα λάθη στη μετάδοση δεδομένων που παρατηρούνται στο δέκτη (τα οποία είναι στενά συνδεδεμένα με την τελική τιμή του σηματοθορυβικού λόγου). Αξίζει να σημειωθεί ότι για υψηλές τιμές του σηματοθορυβικού λόγου στο δέκτη, παρατηρείται χαμηλός λόγος σφαλμάτων και συνεπώς υψηλός ρυθμός μετάδοσης. Επιπλέον, η επίτευξη υψηλών τιμών σηματοθορυβικού λόγου, συνήθως απαιτούν υψηλή τιμή ισχύος εκπομπής, η οποία έχει ως επίπτωση τη μείωση της ζωής της μπαταρίας του ασύρματου χρήστη. Στη συγκεκριμένη προσέγγιση του παρόντος κεφαλαίου θεωρείται μία συνάρτηση χρησιμότητας, η οποία εκφράζει τη λαμβανόμενη ικανοποίηση του χρήστη στην υποφέρουσα $s_i^j \in S_i \subseteq S_{sub}$ που αυτός μεταδίδει δεδομένα και ορίζεται ως ο λόγος του επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης προς την αντίστοιχη κατανάλωση ισχύος εκπομπής στη συγκεκριμένη υποφέρουσα.

Συνεπώς, η συνάρτηση χρησιμότητας ορίζεται ως ακολούθως:

$$U_{i,s_i^j}(P_{i,s_i^j}) = \frac{R_{opt} f(\gamma_{i,s_i^j})}{P_{i,s_i^j}} \quad (88)$$

όπου με R_{opt} συμβολίζεται ο σταθερός ρυθμός μετάδοσης των χρηστών, η τιμή του οποίου εξαρτάται από το είδος της υπηρεσίας που αιτείται ο χρήστης και με $f(\gamma_{i,s_i^j})$ εκφράζεται η συνάρτηση απόδοσης, της οποίας οι ιδιότητες έχουν αναλυθεί σε προηγούμενα κεφάλαια στις παρούσες διδακτορικής διατριβής.

Με βάση τα προηγούμενα, η συνολική συνάρτηση χρησιμότητας του χρήστη i μπορεί να εκφρασθεί ως ακολούθως:

$$U_i(\mathbf{P}_{i,s_i^j} = [P_{i,s_i^1}, \dots, P_{i,s_i^{K_i}}], K_i) = \sum_{j=1}^{K_i} U_{i,s_i^j}(P_{i,s_i^j}) \quad (89)$$

όπου με K_i συμβολίζεται το πλήθος των υποφερουσών που έχουν κατανεμηθεί στο χρήστη i .

8.4 Μη Συνεργατικό Παίγνιο Συνδυαστικής Κατανομής Ισχύος Εκπομπής & Υποφερουσών σε SC-FDMA Ασύρματα Δίκτυα

Το μη συνεργατικό παίγνιο συνδυαστικής κατανομής ισχύος εκπομπής και υποφερουσών στη ζεύξη ανόδου SC-FDMA ασύρματων κυψελωτών δικτύων (Energy-efficiency Utility-based Subcarrier and Power Allocation - EUSPA) συμβολίζεται με

$G_{S-P} = \left[\mathcal{N}, \{S_i, \mathcal{P}_i\}, \left\{ U_i \left(\mathbf{P}_{i,s_i^j}, K_i \right) \right\} \right]$. Κάθε χρήστης $i \in \mathcal{N}$ επιλέγει ένα πλήθος από υποφέρουσες K_i και την αντίστοιχη ισχύ εκπομπής P_{i,s_i^j} για κάθε κατανεμημένη σε αυτόν υποφέρουσα $s_i^j \in S_i$, με στόχο τη μεγιστοποίηση της συνολικής συνάρτησης χρησιμότητας του U_i και την ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση της συνολικής ισχύος εκπομπής και την ικανοποίηση των απαιτήσεων του σε ποιότητα της υπηρεσίας. Συνεπώς, το πρόβλημα βελτιστοποίησης μπορεί να μοντελοποιηθεί ως ακολούθως:

$$\begin{aligned} \max_{\substack{P_{i,s_i^j} \in \mathcal{P}_i \\ 0 < K_i \leq S}} U_i(\mathbf{P}_{i,s_i^j} = [P_{i,s_i^1}, \dots, P_{i,s_i^{K_i}}], K_i) &= \sum_{j=1}^{K_i} U_{i,s_i^j}(P_{i,s_i^j}) \\ \text{s.t.} \quad \sum_{j=1}^{K_i} P_{i,s_i^j} &\leq P_i^{Max}, i \in \mathcal{N}, S = \sum_{i=1}^N K_i \end{aligned} \quad (90)$$

όπου με $\mathcal{P}_i = [0, P_i^{Max}]$ συμβολίζεται το πεδίο ορισμού της ισχύος εκπομπής κάθε χρήστη $i \in \mathcal{N}$, το οποίο είναι ένα φραγμένο σύνολο τιμών, με μέγιστη και ελάχιστη τιμή για την ισχύ εκπομπής. Καθώς παρατηρείται από το EUSPA πρόβλημα βελτιστοποίησης που ορίστηκε στη σχέση (90), η ισχύς εκπομπής του κάθε χρήστη P_{i,s_i^j} διαφοροποιείται ανά κάθε κατανεμημένη σε αυτόν υποφέρουσα, με στόχο την επίτευξη μίας ενεργειακά αποδοτικής κατανομής ισχύος εκπομπής στο σύνολο των χρηστών.

Πιο συγκεκριμένα, η επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης, όπως αυτό ορίστηκε στη σχέση (90) είναι ιδιαίτερα δύσκολη, εξαιτίας των ακόλουθων λόγων: (i) η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος (90) μοντελοποιείται ως μία σύνθετη συνάρτηση, η οποία εξαρτάται και από την κατανομή της ισχύος εκπομπής και των υποφερουσών και (ii) υπάρχει ένας πρόσθετος περιορισμός του προβλήματος βελτιστοποίησης ως προς τη μέγιστη ισχύ εκπομπής κάθε χρήστη, δηλαδή $\mathcal{P}_i = [0, P_i^{Max}]$ (συνεπώς οι περιορισμοί που εισάγονται στο πρόβλημα είναι ίσοι με το σύνολο των χρηστών).

Στη συνέχεια της ανάλυσης, στο πρώτο βήμα της προτεινόμενης προσέγγισης καθορίζεται μία εφικτή και σταθερή κατανομή του πλήθους των υποφερουσών στους χρήστες για το EUSPA παίγνιο, $\mathbf{K}^* = (K_1^*, K_2^*, \dots, K_i^*, \dots, K_N^*)$, με τη χρήση του μοντέλου διαπραγματεύσεων, όπως αυτό έχει προταθεί από τον Rubinstein [74]. Αξίζει να σημειωθεί ότι στο πρώτο βήμα της προτεινόμενης προσέγγισης προσδιορίζεται αποκλειστικά το πλήθος των υποφερουσών που θα κατανεμηθούν σε κάθε χρήστη που εδρεύει εντός της κυψέλης και δεν προσδιορίζεται ακόμη ποια συγκεκριμένη υποφέρουσα θα κατανεμηθεί σε κάθε χρήστη (subcarrier's ID). Συνεπώς, στη δεύτερη φάση της προτεινόμενης προσέγγισης προτείνονται διαφορετικές στρατηγικές αντιστοίχισης των υποφερουσών στους χρήστες, οι οποίες διαφοροποιούνται μεταξύ τους με βάση ποικίλους παράγοντες προτεραιότητας και με βάση τον διαφορετικό στόχο του προβλήματος ανά περίπτωση. Έπειτα δεδομένου του πλήθους των υποφερουσών

που καταλαμβάνει ο κάθε χρήστης (πρώτη φάση), υλοποιούνται οι στρατηγικές αντιστοίχισης των υποφερουσών στους χρήστες και κατά αυτόν τον τρόπο ολοκληρώνεται η κατανομή των υποφερουσών. Παράδειγμα στρατηγικής αντιστοίχισης υποφερουσών στους χρήστες αποτελεί η αντιστοίχιση διαδοχικών υποφερουσών με βάση το L-SC-FDMA σχήμα. Επίσης υπάρχουν εναλλακτικές στρατηγικές αντιστοίχισης, οι οποίες ευνοούν συγκεκριμένους χρήστες (π.χ. τους απομακρυσμένους χρήστες σε σχέση με τους κοντινούς στο σταθμό βάσης και αντιστρόφως) και κατανέμουν διάσπαρτα εντός του εύρους ζώνης τις υποφέρουσες στους χρήστες (D-SC-FDMA σχήμα). Σε επόμενη ενότητα του τρέχοντος κεφαλαίου παρουσιάζονται αναλυτικά οι διαφορετικές στρατηγικές αντιστοίχισης υποφερουσών και η απόδοσή τους και η επιρροή που ασκούν στο συνολικό πρόβλημα κατανομής των πόρων του συστήματος προσομοιώνεται και ποσοτικοποιείται μέσω αναλυτικών αριθμητικών αποτελεσμάτων.

Στη συνέχεια, δεδομένης της συγκεκριμένης κατανομής υποφερουσών στους χρήστες, στο τρίτο βήμα της προσέγγισης μοντελοποιείται ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης στο οποίο οι χρήστες στοχεύουν στη μεγιστοποίηση της συνάρτησης χρησιμότητάς τους $U_{i,s_i'}(P_{i,s_i'})$ σε κάθε κατανεμημένη σε αυτούς υποφέρουσα. Πιο συγκεκριμένα, το προτεινόμενο πρόβλημα βελτιστοποίησης χρησιμοποιεί την κατανομή υποφερουσών K_i^* για να προσδιορίσει τη βέλτιστη ισχύ εκπομπής του κάθε χρήστη i ανά υποφέρουσα. Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι η προσέγγιση που ακολουθείται στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, η οποία αποτελείται από τρεις διαδοχικές φάσεις για την επίτευξη της συνδυαστικής κατανομής της ισχύος εκπομπής και των υποφερουσών στους χρήστες είναι απαραίτητη εξαιτίας της αυξημένης πολυπλοκότητας του συνδυαστικού προβλήματος. Για το λόγο αυτό, η τελική λύση του προβλήματος που προσδιορίζεται από την προτεινόμενη προσέγγιση στο παρόν κεφάλαιο, ενώ είναι εφικτή και σταθερή, δεν είναι εγγυημένα η βέλτιστη λύση του συνδυαστικού προβλήματος κατανομής των πόρων. Παρόλα αυτά, η προτεινόμενη προσέγγιση εγγυάται βέλτιστη κατανομή ισχύος εκπομπής στις ήδη εκχωρημένες υποφέρουσες στους χρήστες και για το λόγο αυτό είναι μία ενεργειακά αποδοτική προσέγγιση του προβλήματος. Επιπρόσθετα, καθώς αποδεικνύεται αναλυτικά στα αριθμητικά αποτελέσματα που έχουν προκύψει από τις προσομοιώσεις, η προτεινόμενη προσέγγιση παρουσιάζει καλύτερη απόδοση από τις αντίστοιχες ευρεστικές μεθόδους κατανομής ισχύος εκπομπής και υποφερουσών στη βιβλιογραφία.

8.5 Κατανομή Υποφερουσών με Βάση το Μοντέλο Διαπραγματεύσεων

Με σκοπό την κατανομή ανά χρονοσχιμή των S υποφερουσών στους N χρήστες που εδρεύουν εντός της κυψέλης έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία διάφορες ευρεστικές μέθοδοι

[52]-[54], [71]-[73]. Ωστόσο όμως, οι προσεγγίσεις αυτές δεν είναι βέλτιστες και δε συγκλίνουν πάντα σε σταθερό σημείο ισορροπίας. Για το λόγο αυτό, στην παρούσα προτεινόμενη προσέγγιση, η κατανομή των υποφερουσών στους χρήστες γίνεται μέσω ενός μοντέλου διαπραγματεύσεων μεταξύ των χρηστών, το οποίο καταλήγει σε μία εφικτή και σταθερή λύση του προβλήματος.

Πιο αναλυτικά, ο Rubinstein στη δημοσίευση [74] μοντελοποιεί ένα παίγνιο διαπραγματεύσεων μεταξύ δύο χρηστών, οι οποίοι έχουν ως στόχο το διαμοιρασμό μίας πίττας μοναδιαίου μεγέθους. Το παίγνιο αυτό εκτείνεται στο χρόνο και οι χρήστες υποβάλλουν εκ περιτροπής τις προσφορές τους, έως ότου να συγκλίνουν σε ένα σταθερό σημείο ισορροπίας. Ο διαμοιρασμός της πίττας πραγματοποιείται μόνο όταν οι χρήστες καταλήξουν σε συμφωνία. Κάθε παίκτης, στο γύρο διαπραγματεύσεων t υποβάλλει προς διαπραγμάτευση έναν εφικτό διαμοιρασμό της πίττας $x_i(t)$ και ο αντίπαλός του μπορεί να συμφωνήσει με την προσφορά (Yes) ή να την απορρίψει (No). Η αποδοχή της προσφοράς λήγει τη διαπραγμάτευση. Σε περίπτωση όμως απόρριψης της προσφοράς, ο παίκτης που απέρριψε την προσφορά είναι υποχρεωμένος στον επόμενο γύρο διαπραγματεύσεων να υποβάλλει μία εναλλακτική διαπραγμάτευση του διαμοιρασμού της πίττας και ούτω καθεξής. Επιπλέον, δεν υπάρχουν κανόνες που δεσμεύουν τους παίκτες σε τυχόν προηγούμενες προσφορές που έχουν κάνει, δηλαδή το μοντέλο διαπραγματεύσεων δεν παρουσιάζει μνήμη στις επιλογές των χρηστών. Θεωρώντας το παίγνιο διαπραγματεύσεων άπειρου χρόνου, η ύπαρξη ενός μοναδικού σημείου ισορροπίας έχει αποδειχθεί στη δημοσίευση [74]:

$$x^* = (x_1^*, x_2^*) = \left(\frac{1}{1+\delta}, \frac{\delta}{1+\delta} \right) \quad (91)$$

όπου με δ συμβολίζεται ο συντελεστής έκπτωσης για κάθε παίκτη i . Συνοπτικά το παίγνιο διαπραγματεύσεων μπορεί να συνοψιστεί στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 39 Παίγνιο διαπραγματεύσεων μεταξύ δύο χρηστών.

Στην προτεινόμενη προσέγγιση του παρόντος κεφαλαίου, με σκοπό την κατανομή των υποφερουσών στους χρήστες, υιοθετείται μία επέκταση της θεωρίας του Rubinstein για το παίγνιο διαπραγματεύσεων μεταξύ δύο χρηστών. Η επέκταση αυτή εφαρμόζεται στο παίγνιο διαπραγματεύσεων μεταξύ N χρηστών, όπως αυτή προτάθηκε στη δημοσίευση [75]. Το παίγνιο διαπραγματεύσεων μεταξύ N χρηστών $G(t; 1, 2, \dots, i, \dots, N)$, με σκοπό το διαμοιρασμό μίας πίττας μεγέθους S μπορεί να οριστεί ως ακολούθως:

Ο παίκτης I κάνει την πρώτη πρόταση διαμοιρασμού της πίττας στον πρώτο γύρο διαπραγματεύσεων $t=1$, προτείνοντας έναν δυνατό διαμοιρασμό της πίττας: $x = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_N)$, όπου με x_i συμβολίζεται το τμήμα της πίττας που λαμβάνει κάθε χρήστης i και ισχύει $\sum_{i=1}^N x_i = 1$. Στη συνέχεια, οι παίκτες 2 έως N αποκρίνονται σειριακά στην πρόταση του πρώτου χρήστη, είτε θετικά αποδεχόμενοι την πρόταση (Y) είτε αρνητικά απορρίπτοντας την πρόταση (N). Στην περίπτωση κατά την οποία όλοι οι χρήστες αποδέχονται την πρόταση του πρώτου παίκτη I , τότε το παίγνιο τερματίζεται και κάθε παίκτης παίρνει το x_i κομμάτι της πίττας. Στην περίπτωση απόρριψης της πρότασης του πρώτου παίκτη το παίγνιο μεταβαίνει στον επόμενο γύρο διαπραγματεύσεων, στον οποίο ο παίκτης 2 προτείνει μία καινούργια πιθανή κατανομή της πίττας στους χρήστες $(3, \dots, i, \dots, N, 1)$, οι οποίοι αποκρίνονται ξανά σειριακά. Στην περίπτωση απόρριψης της πρότασης του χρήστη 2 από τους υπόλοιπους χρήστες στον γύρο διαπραγματεύσεων $t=2$, το παίγνιο συνεχίζεται στον επόμενο γύρο διαπραγματεύσεων στον οποίο ο παίκτης 3 προτείνει κατανομή της πίττας. Εάν η πρόταση x διαμοιρασμού της πίττας γίνει αποδεκτή από όλους τους χρήστες στο γύρο διαπραγματεύσεων t , τότε το όφελος κάθε παίκτη είναι $\delta^{t-1} x_i$, όπου με $\delta < 1$ συμβολίζεται ο κοινός συντελεστής έκπτωσης για όλους τους χρήστες. Σε περίπτωση έλλειψης συμφωνίας μεταξύ των χρηστών, το παίγνιο συνεχίζεται επί το άπειρον οδηγώντας σε μηδενικό κέρδος για όλους τους χρήστες. Για να ξεπεραστεί ένα τέτοιο ενδεχόμενο, δηλαδή της επί το άπειρον διαπραγματεύσεων μεταξύ των χρηστών, επιλέγεται μία τιμή του συντελεστή έκπτωσης δ κοντά στη μονάδα, η οποία οδηγεί το παίγνιο σε σύντομη σύγκλιση και σε αυτή την περίπτωση ο παίκτης που ξεκινάει πρώτος τις διαπραγματεύσεις είναι ελαφρώς ωφελημένος. Στη δημοσίευση [75] αποδεικνύεται ότι το σημείο ισορροπίας κατά Nash του παιγνίου διαπραγματεύσεων δίδεται από την ακόλουθη σχέση:

$$x = \left(\frac{1-\delta}{1-\delta^N}, \delta \cdot \frac{1-\delta}{1-\delta^N}, \dots, \delta^{N-1} \cdot \frac{1-\delta}{1-\delta^N}, \dots, \delta^{N-1} \cdot \frac{1-\delta}{1-\delta^N} \right) \quad (92)$$

Στην προτεινόμενη προσέγγιση του παρόντος κεφαλαίου, υιοθετείται το παίγνιο διαπραγματεύσεων του Rubinstein για N παίκτες με σκοπό την κατανομή των υποφερουσών στους χρήστες που εδρεύουν εντός της κυψέλης. Το σημείο ισορροπίας ως προς την κατανομή των υποφερουσών ορίζεται ως ακολούθως.

Ορισμός 12: Ένα διάνυσμα υποφερουσών $\mathbf{K}^* = (K_1^*, \dots, K_i^*, \dots, K_N^*)$ είναι σημείο ισορροπίας κατά Nash του EUSPA παιγνίου $G_{S-P} = [\mathcal{N}, \{S_i^*, \mathcal{P}_i\}, \{U_i(\mathbf{P}_{i,s_i^j}, K_i^*)\}]$, όπου $S_i^* = \{s_i^j / j = 1, \dots, K_i^*\}$, εάν ισχύει $U_i(\mathbf{P}_{i,s_i^j}, K_i^*, \mathbf{K}_i^*) \geq U_i(\mathbf{P}_{i,s_i^{j'}}, K_i^{j'}, \mathbf{K}_i^*)$ για κάθε χρήστη $i \in \mathcal{N}$ και για

όλες τις υποφέρουσες $S_i^* = \{1, \dots, K_i^*\} \in S_{sub}$, όπου με $K_i^* = (K_1^*, \dots, K_{i-1}^*, K_{i+1}^*, \dots, K_N^*)$ συμβολίζεται το διάνυσμα υποφερουσών ($N-1$ διάστασης) που έχουν κατανεμηθεί σε όλους τους χρήστες εξαιρουμένου του i .

Θεώρημα 9: Το σημείο ισορροπίας κατά Nash ως προς τις υποφέρουσες του παιγνίου $G_{S-P} = \left[\mathcal{N}, \{S_i^*, \mathcal{P}\}, \{U_i(P_{i,s_i}, K_i^*)\} \right]$ υπάρχει, είναι μοναδικό και δίδεται από τη σχέση

$$K_i^* = \frac{(1-\delta)\delta^{i-1}}{1-\delta^N} \cdot S, \quad 0 < \delta < 1, N \geq 2 \quad (93)$$

Απόδειξη: Η απόδειξη είναι άμεση εφαρμογή της αντίστοιχης απόδειξης που υπάρχει στη δημοσίευση [75], στην οποία αποδεικνύεται ότι το παίγνιο διαπραγματεύσεων μεταξύ N χρηστών, όπως αυτό προτάθηκε από τον Rubinstein ($N \geq 2$) συγκλίνει σε μοναδικό σημείο ισορροπίας. Στην συγκεκριμένη περίπτωση της προτεινόμενης προσέγγισης του παρόντος κεφαλαίου, η πίττα που είναι προς διαμοιρασμό μεταξύ των χρηστών είναι το συνολικό πλήθος των υποφερουσών του συστήματος. Συνεπώς, το σημείο ισορροπίας κατά Nash ως προς τις υποφέρουσες δίδεται από τη σχέση (93). ■

Με βάση το θεώρημα 9 προκύπτει μία λύση με κλειστό τύπο, η οποία καθορίζει την κατανομή του συνολικού αριθμού των υποφερουσών στους χρήστες. Ωστόσο όμως, λόγω του γεγονότος ότι οι υποφέρουσες είναι ένας διακριτός πόρος του συστήματος και όχι συνεχής μεταβλητή, χρησιμοποιείται η διαδικασία της στρογγυλοποίησης για να προσδιοριστεί ο ακέραιος αριθμός υποφερουσών K_i^* που θα κατανεμηθούν σε κάθε χρήστη. Συνεπώς, η κατανομή του πλήθους των υποφερουσών σε κάθε χρήστη δίδεται από την ακόλουθη σχέση

$$K_i^* = \left\lfloor \frac{(1-\delta)\delta^{i-1}}{1-\delta^N} \cdot S \right\rfloor, \quad 0 < \delta < 1, N \geq 2. \quad (94)$$

Τονίζεται ότι με βάση εκτεταμένες προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν στο προτεινόμενο μοντέλο κατανομής υποφερουσών με βάση τη σχέση (93) και την αντίστοιχη κατανομή τους με τη χρήση της στρογγυλοποίησης (δηλαδή τη σχέση (94)), προκύπτει ότι η διαφοροποίηση ως προς την κατανομή των υποφερουσών είναι μικρότερη από 1% ως προς το σύνολο των υποφερουσών.

Επιπλέον, αξίζει να σημειωθούν δύο σημαντικές παρατηρήσεις όσον αφορά την κατανομή των υποφερουσών:

1. Όσο νωρίτερα ένας παίκτης εισάγεται στο EUSPA παίγνιο, τόσο μεγαλύτερο μέρος των πόρων καταλαμβάνει. Για το λόγο αυτό, έχοντας ως στόχο την επίτευξη δικαιοσύνης και ισοτιμίας μεταξύ των ανταγωνιστικών χρηστών, καθώς και την επίτευξη ενός σύντομου χρονικού διαστήματος σύγκλισης του παιγνίου διαπραγματεύσεων, υιοθετείται ένας

συντελεστής έκπτωσης δ κοντά στη μονάδα. Ωστόσο όμως, εάν σκοπός του παιγνίου κατανομής πόρων είναι η διαφοροποίηση των χρηστών με βάση τις απαιτήσεις τους σε ποιότητα της υπηρεσίας ή η κατάταξή τους σε κλάσεις χρηστών ανάλογα με την αιτούμενη υπηρεσία, τότε θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί χαμηλότερη τιμή του συντελεστή έκπτωσης, δίνοντας κατά αυτόν τον τρόπο προτεραιότητα στους πρώτους χρήστες που εισάγονται στους γύρους διαπραγματεύσεων.

2. Καθώς ο αριθμός των χρηστών αυξάνεται, οι πόροι που διατίθενται σε κάθε χρήστη μειώνονται, δεδομένου ότι οι συνολικοί πόροι είναι πεπερασμένοι και κατανέμονται μεταξύ περισσότερων παικτών.

Στη συνέχεια θα αναλυθεί η βέλτιστη κατανομή ισχύος ανά κάθε υποφέρουσα που έχει κατανεμηθεί ήδη στον κάθε χρήστη. Συνεπώς θεωρείται δεδομένη η κατανομή του πλήθους των υποφερουσών, καθώς επίσης και η αντιστοίχησή τους στους χρήστες με κατάλληλα επιλεγμένη στρατηγική.

8.6 *Ενεργειακά Αποδοτική Κατανομή Ισχύος Εκπομπής*

Σε αυτή την ενότητα για λόγους παρουσίας και χωρίς απώλεια της γενικότητας, γίνεται η υπόθεση ότι σε κάθε χρήστη i έχει κατανεμηθεί ένα σύνολο από υποφέρουσες K_i^* , οι οποίες είναι $s_i^1, s_i^2, \dots, s_i^j, \dots, s_i^{K_i^*}$. Προκειμένου να επιτευχθεί η κατανομή ισχύος εκπομπής στους χρήστες, λαμβάνοντας υπόψη την κατανομή υποφερουσών σε αυτούς, μοντελοποιείται ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης της λαμβανόμενης ικανοποίησης κάθε χρήστη ανά κάθε κατανεμημένη υποφέρουσα σε αυτόν. Συγκεκριμένα, μοντελοποιείται ένα αμιγές πρόβλημα βελτιστοποίησης κατανομής ισχύος εκπομπής, δεδομένης της κατανομής των υποφερουσών στους χρήστες, ως ακολούθως.

$$\begin{aligned} \max_{P_{i,s_i^j} \in \mathcal{R}} U_{i,s_i^j}(P_{i,s_i^j}) \\ \text{s.t.} \quad \sum_{j=1}^{K_i^*} P_{i,s_i^j} \leq P_i^{Max} \end{aligned} \quad (95)$$

Με βάση το ανωτέρω πρόβλημα βελτιστοποίησης, σε κάθε κατανεμημένη υποφέρουσα, κάθε χρήστης υπολογίζει τη βέλτιστη τιμή της ισχύος εκπομπής του σε αυτήν $P_{i,s_i^j}^* = [P_{i,s_i^1}^*, \dots, P_{i,s_i^{K_i^*}}^*]$ $\forall s_i^j \in S_i^* \subseteq S_{sub}$ και προσδιορίζει τη συνεπαγόμενη τιμή της συνάρτησης χρησιμότητάς του $U_i(P_i^*) = [U_{i,s_i^1}(P_{i,s_i^1}^*), U_{i,s_i^2}(P_{i,s_i^2}^*), \dots, U_{i,s_i^j}(P_{i,s_i^j}^*), \dots, U_{i,s_i^{K_i^*}}(P_{i,s_i^{K_i^*}}^*)]$. Έπειτα, μελετάται η ύπαρξη και η μοναδικότητα ενός βέλτιστου σημείου ισορροπίας ως προς την ισχύ εκπομπής των χρηστών για το υπό μελέτη πρόβλημα βελτιστοποίησης.

Θεώρημα 10: Το βέλτιστο σημείο ισορροπίας ως προς την ισχύ εκπομπής κάθε χρήστη για το υπό μελέτη πρόβλημα βελτιστοποίησης που δίδεται από τη σχέση (95), υπάρχει, είναι μοναδικό και συμβολίζεται ως $\mathbf{P}_{i,s_i^j}^* = [P_{i,s_i^j}^*, \dots, P_{i,s_i^{K_i}}^*]$, όπου $P_{i,s_i^j}^*$ είναι το μοναδικό ολικό μέγιστο της συνάρτησης χρησιμότητας του χρήστη i .

$$P_{i,s_i^j}^* = \min \left\{ \frac{\gamma_{i,s_i^j}^* \sigma_{s_i^j}^2}{G_{i,s_i^j}}, \left(P_i^{Max} - \sum_{\substack{u \neq j \\ u=1, \dots, K_i}} P_{i,s_i^u} \right) \right\} \quad (96)$$

Απόδειξη: Καθώς έχει περιγραφεί έως τώρα, η συνάρτηση απόδοσης $f(\gamma_{i,s_i^j})$ είναι σιγμοειδής συνάρτηση ως προς το σηματοθορυβικό λόγο γ_{i,s_i^j} . Επιπρόσθετα, ο σηματοθορυβικός λόγος γ_{i,s_i^j} που μετράται στο σταθμό βάσης για κάθε χρήστη i που μεταδίδει ανά κάθε κατανεμημένη σε αυτόν υποφέρουσα s_i^j , έχει γραμμική και ένα προς ένα σχέση με την ισχύ εκπομπής P_{i,s_i^j} του χρήστη, σύμφωνα με τη σχέση (87). Συνεπώς, η συνάρτηση του πλήθους των επιτυχώς μεταδιδόμενων *bits* από το χρήστη στο σταθμό βάσης, δηλαδή $R_{opt} f(\gamma_{i,s_i^j})$, είναι επίσης σιγμοειδής συνάρτηση ως προς την ισχύ εκπομπής P_{i,s_i^j} . Εξαιτίας του γεγονότος ότι η συνάρτηση $R_{opt} f(\gamma_{i,s_i^j})$ είναι σιγμοειδής συνάρτηση ως προς την ισχύ εκπομπής P_{i,s_i^j} , ο λόγος $\frac{R_{opt} f(\gamma_{i,s_i^j})}{P_{i,s_i^j}} = U_{i,s_i^j}(P_{i,s_i^j})$ είναι μία ημικοίλη συνάρτηση της ισχύος εκπομπής $P_{i,s_i^j} \in [0, P_i^{Max}]$, με βάση τη δημοσίευση [32]. Με χρήση του θεωρήματος του μηδενισμού της πρώτης παραγώγου $\frac{\partial U_{i,s_i^j}(P_{i,s_i^j})}{\partial P_{i,s_i^j}} = 0$ για την εύρεση του σημείου μεγίστου της συνάρτησης χρησιμότητας, εξάγεται η σχέση:

$$\gamma_{i,s_i^j} \frac{\partial f_{i,s_i^j}(\gamma_{i,s_i^j})}{\partial \gamma_{i,s_i^j}} - f_{i,s_i^j}(\gamma_{i,s_i^j}) = 0 \quad (97)$$

δεδομένου ότι ισχύει $\frac{\partial \gamma_{i,s_i^j}}{\partial P_{i,s_i^j}} = \frac{\gamma_{i,s_i^j}}{P_{i,s_i^j}}$, σύμφωνα με τη σχέση (87). Επιπρόσθετα, λαμβάνοντας υπόψη τη σιγμοειδή μορφή της συνάρτησης $f_{i,s_i^j}(\gamma_{i,s_i^j})$, η εξίσωση (97) έχει μοναδική λύση $\gamma_{i,s_i^j}^*$. Συνεπώς, η μοναδική τιμή της ισχύος εκπομπής $P_{i,s_i^j}^*$ που μεγιστοποιεί τη συνάρτηση χρησιμότητας $U_{i,s_i^j}(P_{i,s_i^j})$ είναι: $P_{i,s_i^j}^* = \frac{\gamma_{i,s_i^j}^* \sigma_{s_i^j}^2}{G_{i,s_i^j}}$. Ολοκληρώνοντας την απόδειξη, εξετάζεται η ειδική περίπτωση κατά την οποία η μέγιστη υπολειπόμενη ισχύς εκπομπής είναι μικρότερη

από P_{i,s_j}' . Σε αυτή την περίπτωση, η τιμή $U_{i,s_j'} \left(P_i^{Max} - \sum_{\substack{u \neq j \\ u=1, \dots, K_i^*}} P_{i,s_j^u} \right)$ είναι η μεγαλύτερη δυνατή τιμή της συνάρτησης χρησιμότητας $U_{i,s_j'}(P_{i,s_j'})$, δεδομένου ότι η συνάρτηση χρησιμότητας είναι γνησίως αύξουσα στο διάστημα $[0, P_{i,s_j}']$. Για το λόγο αυτό το ολικό σημείο μεγίστου της συνάρτησης χρησιμότητας $U_{i,s_j'}(P_{i,s_j'})$ δίδεται από τη σχέση (96). ■

8.7 EUSPA Αλγόριθμος & Στρατηγικές Αντιστοίχισης Υποφερουσών

Σε αυτή την ενότητα, με βάση την προηγούμενη ανάλυση, προτείνεται ένας επαναληπτικός κατανεμημένος και χαμηλής πολυπλοκότητας αλγόριθμος ο οποίος καθορίζει την κατανομή των υποφερουσών και της ισχύος εκπομπής στους χρήστες, καθώς επίσης μελετάται και η σύγκλισή του στο σημείο ισορροπίας του προτεινόμενου παιχνιδιού. Επιπρόσθετα, προτείνονται διαφορετικές στρατηγικές αντιστοίχισης του πλήθους των υποφερουσών στους χρήστες, και ως εκ τούτου, μελετούνται διαφορετικές παραλλαγές του EUSPA αλγορίθμου.

Η πρώτη παραλλαγή του EUSPA αλγορίθμου, η οποία στο εξής θα αναφέρεται ως Pure-EUSPA αλγόριθμος, κατανέμει τις υποφερουσες στους χρήστες με βάση το παίγνιο διαπραγματεύσεων του Rubinstein για N παίκτες/χρήστες και οι χρήστες καταλαμβάνουν μόνο διαδοχικές υποφερουσες του φάσματος (σύμφωνα με την L-SC-FDMA στρατηγική κατανομής υποφερουσών). Κατά αυτόν τον τρόπο, ο χρήστης 1 καταλαμβάνει τις πρώτες K_1^* υποφερουσες του φάσματος, ο χρήστης 2 τις επόμενες K_2^* υποφερουσες και ούτω καθεξής. Εναλλακτικά, στη δεύτερη παραλλαγή του EUSPA αλγορίθμου, η οποία αναφέρεται ως Maximum Gain Selection EUSPA (MGS-EUSPA) αλγόριθμος, ακολουθείται μία κατανεμημένη στρατηγική αντιστοίχισης υποφερουσών στους χρήστες, η οποία δίνει προτεραιότητα σε συγκεκριμένους χρήστες να επιλέξουν πρώτοι σε ποιες υποφερουσες θα μεταδώσουν δεδομένα. Πιο συγκεκριμένα, μελετούνται δύο διαφορετικές εναλλακτικές του MGS-EUSPA αλγορίθμου: (Α) ο Max Gain Selection-Far-EUSPA (MGS-F-EUSPA) αλγόριθμος, ο οποίος επιτρέπει στους πιο απομακρυσμένους χρήστες από το σταθμό βάσης να επιλέξουν πρώτοι σε ποιες υποφερουσες στις οποίες παρουσιάζουν καλύτερο κέρδος καναλιού θα μεταδώσουν δεδομένα και (Β) ο Max Gain Selection-Near-EUSPA (MGS-N-EUSPA) αλγόριθμος, ο οποίος επιτρέπει στους πιο κοντινούς χρήστες στο σταθμό βάσης να επιλέξουν πρώτοι σε ποιες υποφερουσες στις οποίες παρουσιάζουν καλύτερο κέρδος καναλιού θα μεταδώσουν δεδομένα. Όλες οι παραλλαγές του EUSPA αλγορίθμου αποτελούνται από δύο βασικά αλγοριθμικά τμήματα. Το πρώτο τμήμα κατανέμει και αντιστοιχεί τις υποφερουσες σε όλους τους χρήστες και το δεύτερο τμήμα, δεδομένης της

κατανομής των υποφερουσών, καθορίζει τη βέλτιστη κατανομή ισχύος εκπομπής των χρηστών .

EUSPA Αλγόριθμος

Βήμα 1^ο: (Κατανομή Υποφερουσών) Στην αρχή κάθε χρονοσχισμής t , υπολογίζεται η βέλτιστη κατανομή υποφερουσών $\mathbf{K}^* = (K_1^*, K_2^*, \dots, K_i^*, \dots, K_N^*)$ μέσω της σχέσης (94), με βάση το παίγνιο διαπραγματεύσεων μεταξύ N χρηστών που έχει προταθεί από τον Rubinstein.

(Αντιστοίχιση Υποφερουσών)

Βήμα 2a (Μόνο για Pure-EUSPA Αλγόριθμο): Ο χρήστης 1 καταλαμβάνει και μεταδίδει δεδομένα στις πρώτες K_1^* υποφερουσες, ο χρήστης 2 καταλαμβάνει τις επόμενες K_2^* υποφερουσες και ούτω καθεξής, έως ότου κατανεμηθούν όλες οι υποφερουσες στους χρήστες που εδρεύουν εντός της κυψέλης.

Βήμα 2b (Μόνο για MGS-F-EUSPA Αλγόριθμο): Ξεκινώντας από τον πιο απομακρυσμένο χρήστη i από το σταθμό βάσης, όλοι οι χρήστες επιλέγουν και μεταδίδουν δεδομένα στις K_i^* υποφερουσες που τους έχουν κατανεμηθεί και παρουσιάζουν σε αυτές το καλύτερο δυνατό κέρδος καναλιού.

Βήμα 2c (Μόνο για MGS-N-EUSPA Αλγόριθμο): Ξεκινώντας από τον πιο κοντινό χρήστη i στο σταθμό βάσης, όλοι οι χρήστες επιλέγουν και μεταδίδουν δεδομένα στις K_i^* υποφερουσες που τους έχουν κατανεμηθεί και παρουσιάζουν σε αυτές το καλύτερο δυνατό κέρδος καναλιού.

Βήμα 3^ο: (Βελτιστοποίηση Ισχύος Εκπομπής & Συνάρτησης Χρησιμότητας) Κάθε χρήστης i , $i \in \mathcal{N}$ υπολογίζει τη βέλτιστη ισχύ εκπομπής του με βάση τη σχέση (96) για κάθε κατανεμημένη σε αυτόν υποφερουσα $s_i^j \in \mathcal{S}_i^*$. Θέσε $k=0$.

Βήμα 4^ο: Θέσε $k:=k+1$, διέγραψε την υποφερουσα s από το σύνολο των διαθέσιμων υποφερουσών του χρήστη i , δηλαδή $K_i^{*(k+1)} = K_i^{*(k)} - \{s_i^j\}$, ανανέωσε τη μέγιστη ισχύ εκπομπής του χρήστη i , δηλαδή $P_i^{Max(k+1)} = P_i^{Max(k)} - P_{i,s_i^j}^*$, και εάν ισχύει $P_i^{Max(k+1)} \neq 0$ ή $\mathcal{S}_i^* \neq \emptyset$ τότε επέστρεψε στο βήμα 3. Σε κάθε άλλη περίπτωση τερμάτισε.

8.8 Σύγκλιση του EUSPA Αλγορίθμου

Οι δύο παραλλαγές του EUSPA αλγορίθμου (δηλαδή ο Pure-EUSPA αλγόριθμος και ο MGS - EUSPA αλγόριθμος) μπορούν να χαρακτηριστούν ως αλγόριθμοι μοναδικής τιμής και βέλτιστης απόκρισης. Η πολυπλοκότητα των προτεινόμενων EUSPA αλγορίθμων είναι χαμηλή, λόγω της απλότητας των υπολογισμών προκειμένου να καθοριστεί η κατανομή των υποφερουσών και της ισχύος εκπομπής. Συγκεκριμένα, στην προσέγγιση του παρόντος κεφαλαίου της διδακτορικής διατριβής εξετάζεται το παίγνιο διαπραγματεύσεων άπειρου

χρόνου [75] και η σύγκλιση του EUSPA αλγορίθμου ως προς την κατανομή των υποφερουσών είναι εξασφαλισμένη, εξαιτίας του κλειστού τύπου (94) που την προσδιορίζει. Συνεπώς, η σύγκλιση της συνολικής προσέγγισης σε σημείο ισορροπίας ως προς την κατανομή των υποφερουσών και της ισχύος εκπομπής καθορίζεται από το δεύτερο τμήμα του αλγορίθμου (δηλαδή την κατανομή ισχύος εκπομπής). Σημειώνεται επίσης ότι εάν είχε επιλεγεί το παίγνιο διαπραγματεύσεων πεπερασμένου χρόνου για την κατανομή των υποφερουσών, τότε η ταχύτητα σύγκλισης του αλγορίθμου θα επηρεαζόταν από την επιλογή του συντελεστή έκπτωσης δ . Πιο συγκεκριμένα, τιμές του συντελεστή έκπτωσης δ κοντά στη μονάδα, έχουν ως αποτέλεσμα την ταχύτερη σύγκλιση του αλγορίθμου στην κατανομή των υποφερουσών στους χρήστες.

Η σύγκλιση του EUSPA αλγορίθμου στη βέλτιστη κατανομή ισχύος στους χρήστες μπορεί να αποδειχθεί με τη χρήση της προσέγγισης της βέλτιστης απόκρισης. Με βάση το θεώρημα 10, η βέλτιστη απόκριση BR_i κάθε χρήστη $i \in \mathcal{N}$ δίδεται από την ακόλουθη σχέση.

$$BR_i(P_{i,s^j}) = \min \left\{ \frac{\gamma_{i,s^j}^* \sigma_{s^j}^2}{G_{i,s^j}}, \left(P_i^{Max} - \sum_{\substack{u \neq j \\ u=1, \dots, K_i^*}} P_{i,s^u} \right) \right\} \quad (98)$$

Θεώρημα 11: Ο EUSPA αλγόριθμος συγκλίνει στο μοναδικό σημείο ισορροπίας ως προς την ισχύ εκπομπής, ξεκινώντας από οποιαδήποτε αρχική τιμή της ισχύος εκπομπής.

Απόδειξη: Στο θεώρημα 10 είχε αποδειχθεί η μοναδικότητα του σημείου ισορροπίας ως προς την ισχύ εκπομπής των χρηστών, το οποίο συμβολίζεται ως $\mathbf{P}^* = (P_{1,s^1}^*, P_{2,s^2}^*, \dots, P_{i,s^i}^*, \dots, P_{N,s^N}^*)$. Εξ ορισμού το σημείο αυτό πρέπει να ικανοποιεί την ακόλουθη σχέση:

$$\mathbf{P}^* = \mathbf{BR}(\mathbf{P}^*) \quad (99)$$

όπου με $\mathbf{BR}(\mathbf{P}) = (BR_1(P_{1,s^1}^*), BR_2(P_{2,s^2}^*), \dots, BR_N(P_{N,s^N}^*))$ συμβολίζεται η βέλτιστη απόκριση όλων των χρηστών. Το βασικό σημείο για να αποδειχθεί η σύγκλιση του EUSPA αλγορίθμου στο μοναδικό σημείο ισορροπίας ως προς την ισχύ εκπομπής, είναι η απόδειξη ότι η συνάρτηση της βέλτιστης απόκρισης $\mathbf{BR}(\mathbf{P})$ είναι standard συνάρτηση [33]. Καθώς έχει διατυπωθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο, μία συνάρτηση είναι standard εάν για όλα τα $\mathbf{x} \geq 0$, ικανοποιεί τις ακόλουθες συνθήκες, όπου $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ είναι ένα σημείο ισορροπίας του προβλήματος βελτιστοποίησης.

- Θετική: $f(\mathbf{x}) > 0$;
- Μονοτονία: εάν $\mathbf{x} \geq \mathbf{x}'$ τότε $f(\mathbf{x}) \geq f(\mathbf{x}')$;
- Επεκτασιμότητα: για όλες τις τιμές $a > 1$, ισχύει $af(\mathbf{x}) \geq f(a\mathbf{x})$.

Οι συνθήκες αυτές μπορούν εύκολα να αποδειχθούν για τη συνάρτηση βέλτιστης απόκρισης $BR(\mathbf{P})$.

- Ισχύει $\mathbf{P} \succ 0$, συνεπώς $BR(\mathbf{P}) \succ 0$;
- Εάν $\mathbf{P}' \geq \mathbf{P}$ τότε μέσω της σχέσης (99) εξάγεται ότι $BR(\mathbf{P}') \geq BR(\mathbf{P})$;
- Για όλες τις τιμές $\alpha > 1$, τότε μέσω της σχέσης (99) εξάγεται ότι $\alpha BR(\mathbf{P}) \geq BR(\alpha \mathbf{P})$.

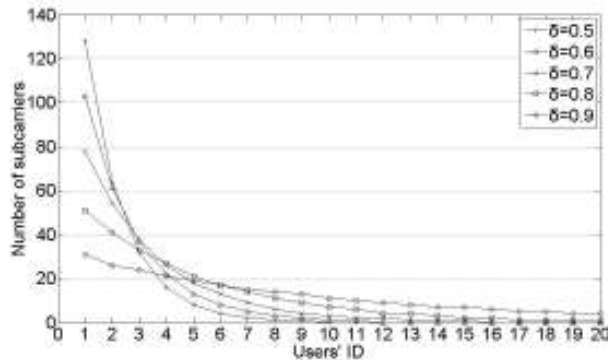
8.9 Αριθμητικά Αποτελέσματα

Σε αυτή την ενότητα, παρουσιάζονται ορισμένα αριθμητικά αποτελέσματα με σκοπό την αξιολόγηση της απόδοσης της προτεινόμενης προσέγγισης. Αρχικά, παρουσιάζονται ορισμένα αριθμητικά αποτελέσματα του προτεινόμενου EUSPA αλγορίθμου, ώστε να γίνουν αντιληπτά τα χαρακτηριστικά και η λειτουργία της προτεινόμενης προσέγγισης, καθώς επίσης και η αποτελεσματικότητά της. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται μία συγκριτική μελέτη με σκοπό να αποδείξει το όφελος και την ανωτερότητα της προσέγγισης του Rubinstein για την κατανομή των υποφερουσών σε σύγκριση με τις ευρεστικές μεθόδους [52], [54].

Πιο συγκεκριμένα, μελετάται η ζεύξη ανόδου ενός μονοκυψελικού SC-FDMA ασύρματου κυψελωτού δικτύου, το οποίο υποστηρίζει $N=20$ χρήστες, οι οποίοι έχουν συνεχώς δεδομένα να μεταδώσουν και βρίσκονται σε αποστάσεις $d_{i+1} = d_i + 50 [m]$, με $d_1=300m$ από το σταθμό βάσης. Η συγκεκριμένη τοπολογία έχει επιλεγεί ειδικά για να αποκαλύψει τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του EUSPA αλγορίθμου, δεδομένου ότι επιτρέπει την καλύτερη κατανόηση και την ερμηνεία των αντίστοιχων αποτελεσμάτων και παρατηρήσεων. Ωστόσο όμως, τονίζεται ότι παρόμοια αποτελέσματα θα λαμβάνονταν από οποιαδήποτε τυχαία τοπολογία και αν είχε θεωρηθεί. Ως εκ τούτου, στο συγκεκριμένο σενάριο προσομοίωσης, οι συνθήκες του καναλιού χρηστών χειροτερεύουν καθώς ο αύξων αριθμός του χρήστη αυξάνεται (δηλαδή $i = 1, 2, \dots, 20$). Κάθε προσομοίωση διαρκεί 10.000 χρονοσχιμές, ενώ το κέρδος του καναλιού των χρηστών μεταβάλλεται ανά χρονοσχιμή, ωστόσο όμως στη διάρκεια μίας χρονοσχιμής παραμένει σταθερό. Για το λόγο αυτό, γίνεται η υπόθεση ότι κάθε χρήστης είναι ακίνητος ή κινείται αργά. Ως εκ τούτου, το κέρδος του καναλιού των χρηστών μοντελοποιείται ως ακολούθως: $G_{i,s_i} = \Lambda_{i,s_i} / d_i^a$, όπου d_i είναι η απόσταση του χρήστη i από το σταθμό βάσης, a είναι ο εκθέτης απωλειών εξαιτίας της απόστασης, και Λ_{i,s_i} είναι μια λογαριθμοκανονική κατανομή τυχαίας μεταβλητής με τυπική απόκλιση $\delta \text{ dB}$. Επιπλέον, η μέγιστη ισχύς εκπομπής των χρηστών είναι $P_i^{\text{Max}} = 2 \text{ Watts}$ και $\sigma_{s_i}^2 = 5 \cdot 10^{-15}$.

8.9.1 Λειτουργία & Απόδοση της Προτεινόμενης Προσέγγισης

Σε αυτή την ενότητα για απλότητα στην παρουσίαση, μελετάται μόνο ο Pure-EUSPA αλγόριθμος. Επιπλέον, γίνεται η υπόθεση ότι οι χρήστες που βρίσκονται πιο κοντά στο



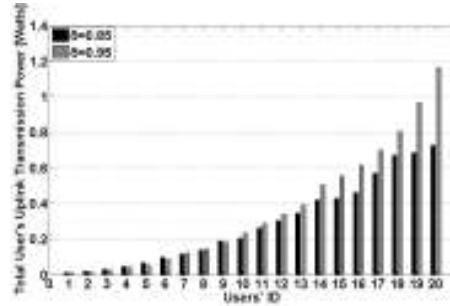
Σχήμα 40 Πλήθος κατανεμημένων υποφερουσών στους $N=20$ χρήστες, για διαφορετικές τιμές του συντελεστή έκπτωσης.

σταθμό βάσης, είναι αυτοί που εισέρχονται πρώτοι στη διαδικασία, ενώ οι απομακρυσμένοι χρήστες από το σταθμό βάσης εισέρχονται τελευταίοι.

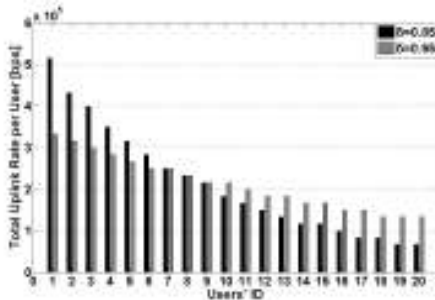
Το σχήμα 40 απεικονίζει τον αριθμό των υποφερουσών που έχουν κατανεμηθεί σε καθένα από τους $N=20$ χρήστες που εδρεύουν εντός της κυψέλης, για διαφορετικούς συντελεστές έκπτωσης. Σύμφωνα με τα αριθμητικά αποτελέσματα, καθώς ο συντελεστής έκπτωσης μειώνεται, οι πρώτοι χρήστες που εισάγονται στη διαδικασία των διαπραγματεύσεων είναι ωφελιμένοι σε σχέση με τους υπολοίπους και συνεπώς καταλαμβάνουν μεγαλύτερο μέρος από τις υποφέρουσες. Ωστόσο όμως, αν στόχος είναι η δίκαιη κατανομή υποφερουσών στους χρήστες, πρέπει να υιοθετηθεί ένας συντελεστής έκπτωσης δ κοντά στη μονάδα.

Τα σχήματα 41 και 42 απεικονίζουν την ισχύ εκπομπής και το ρυθμό μετάδοσης κάθε χρήστη στο σημείο ισορροπίας του προβλήματος βελτιστοποίησης (95) για δύο διαφορετικές τιμές του συντελεστή έκπτωσης σύμφωνα με τον Pure-EUSPA αλγόριθμο. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα αναδεικνύουν ότι η ισχύς εκπομπής των χρηστών έχει αντιστρόφως ανάλογη σχέση με την ποιότητα του καναλιού τους. Επιπρόσθετα, με βάση την προτεινόμενη προσέγγιση παρατηρείται ότι οι χρήστες δεν εξαντλούν τη μέγιστη ισχύ εκπομπής τους και συνεπώς η ενεργειακή ζωή τους επιμηκύνεται.

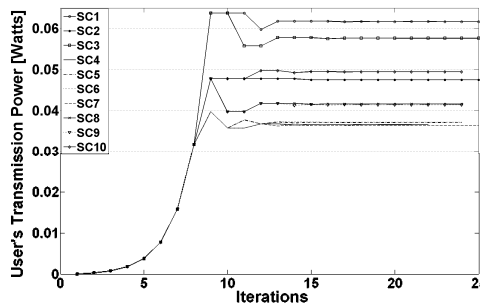
Επίσης, δεδομένου ότι περισσότερες υποφέρουσες κατανέμονται στους απομακρυσμένους χρήστες από το σταθμό βάσης (οι οποίοι εισέρχονται τελευταίοι στη διαδικασία των διαπραγματεύσεων) καθώς ο συντελεστής έκπτωσης αυξάνεται (δηλαδή $\delta=0.95$), παρατηρείται ότι η ισχύς εκπομπής των χρηστών αυτών αυξάνεται, καθώς ο συντελεστής έκπτωσης αυξάνεται. Για τον ίδιο λόγο, όπως παρατηρείται από τα αποτελέσματα του σχήματος 42, οι χρήστες που εισέρχονται πρώτοι στη διαδικασία των διαπραγματεύσεων και ταυτόχρονα είναι αυτοί που παρουσιάζουν καλύτερη ποιότητα καναλιού, επιτυγχάνουν υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης καθώς ο συντελεστής έκπτωσης μειώνεται. Αντίθετα, οι απομακρυσμένοι χρήστες από το σταθμό βάσης καταλαμβάνουν περισσότερες υποφέρουσες για υψηλές τιμές του συντελεστή έκπτωσης και τότε επιτυγχάνουν υψηλό ρυθμό μετάδοσης.



Σχήμα 41 Συνολική ισχύς εκπομπής των χρηστών για διαφορετικές τιμές του συντελεστή έκπτωσης.



Σχήμα 42 Συνολικός ρυθμός μετάδοσης των χρηστών για διαφορετικές τιμές του συντελεστή έκπτωσης.

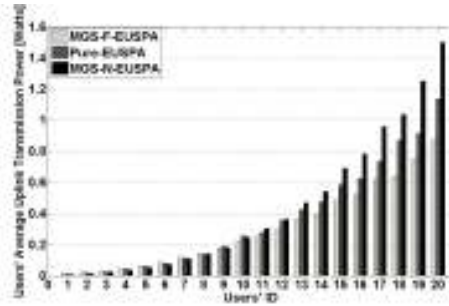


Σχήμα 43 Σύγκλιση της ισχύος εκπομπής των χρηστών

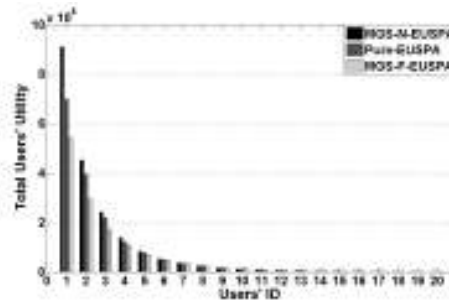
Το σχήμα 43 απεικονίζει την ισχύ εκπομπής ενός χρήστη για όλες τις κατανεμημένες σε αυτόν υποφέρουσες ως συνάρτηση των επαναλήψεων που απαιτούνται για να συγκλίνει ο Pure-EUSPA αλγόριθμος στο σημείο ισορροπίας. Παρατηρείται ότι η σύγκλιση του προτεινόμενου αλγορίθμου είναι πολύ γρήγορη αφού σε λιγότερο από είκοσι επαναλήψεις, η ισχύς εκπομπής του χρήστη σε όλες τις κατανεμημένες σε αυτόν υποφέρουσες έχει συγκλίνει.

8.9.2 Συγκριτική Μελέτη του Pure-EUSPA και του MGS-EUSPA Αλγορίθμου

Σε αυτή την υποενότητα παρουσιάζεται μια συγκριτική μελέτη των παραλλαγών του EUSPA αλγορίθμου, δηλαδή του Pure-EUSPA αλγορίθμου και των δύο παραλλαγών του Max Gain Selection EUSPA αλγορίθμου (δηλαδή του MGS-F-EUSPA ο οποίος δίνει



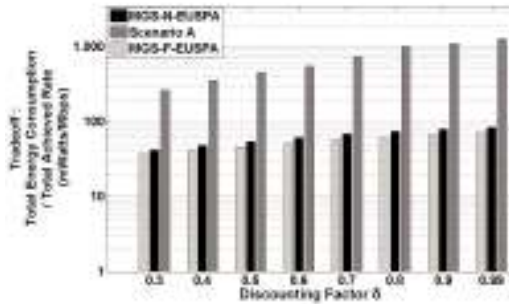
Σχήμα 44 Μέση ισχύς εκπομπής των χρηστών για τους MGS-N-EUSPA, Pure-EUSPA και MGS-F-EUSPA αλγορίθμους με συντελεστή έκπτωσης $\delta=0.95$.



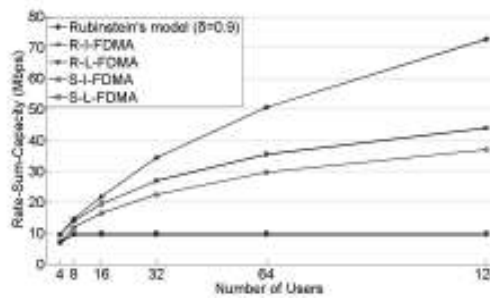
Σχήμα 45 Τιμές της συνάρτησης χρησιμότητας των χρηστών για τους MGS-N-EUSPA, Pure-EUSPA και MGS-F-EUSPA αλγορίθμους με συντελεστή έκπτωσης $\delta=0.95$.

προτεραιότητα επιλογής υποφερουσών στους απομακρυσμένους χρήστες από το σταθμό βάσης και του MGS-N-EUSPA που δίνει προτεραιότητα επιλογής στους πλησιέστερους χρήστες στο σταθμό βάσης.

Συγκεκριμένα, στα σχήματα 44 και 45 συγκρίνονται οι τιμές ισχύος εκπομπής και οι τιμές της συνάρτησης χρησιμότητας των χρηστών για τους τρεις διαφορετικούς προτεινόμενους αλγορίθμους. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα αναδεικνύουν τα οφέλη του MGS-F-EUSPA αλγορίθμου σε σχέση με τους Pure-EUSPA και MGS-N-EUSPA αλγορίθμους, ως προς τις χαμηλές τιμές ισχύος εκπομπής (σχήμα 44) και τις υψηλές τιμές της συνάρτησης χρησιμότητας (σχήμα 45). Η συμπεριφορά αυτή παρατηρείται διότι δίνοντας προτεραιότητα επιλογής υποφερουσών (όπου παρουσιάζουν καλύτερο κανάλι) στους απομακρυσμένους χρήστες από το σταθμό βάσης (οι οποίοι βρίσκονται ήδη σε μη ευνοϊκή κατάσταση εξαιτίας της απόστασής τους από το σταθμό βάσης), οι χρήστες αυτοί επιτυγχάνουν υψηλές τιμές της συνάρτησης χρησιμότητάς τους και εκπέμπουν με χαμηλές τιμές ισχύος εκπομπής. Η παρατήρηση αυτή είναι σημαντική, λαμβάνοντας ιδίως υπόψη την ανεπάρκεια των πόρων του συστήματος, τους φυσικούς περιορισμούς που εισάγει το υλισμικό των χρηστών και τη χρονικά μεταβαλλόμενη ποιότητα του καναλιού των χρηστών. Επιπρόσθετα, τονίζεται ότι και στους τρεις αλγορίθμους παρατηρείται αύξηση της ισχύος εκπομπής και μείωση των τιμών της συνάρτησης χρησιμότητας καθώς αυξάνει ο αύξων αριθμός του χρήστη, δηλαδή ισοδύναμα η ποιότητα του καναλιού του χειροτερεύει.



Σχήμα 46 Συσχέτιση ανάμεσα στην ισχύ εκπομπής και το ρυθμό μετάδοσης



Σχήμα 47 Συνολικός ρυθμός μετάδοσης ως συνάρτηση του πλήθους των χρηστών

8.9.3 Συσχέτιση Ισχύος Εκπομπής & Ρυθμού Μετάδοσης

Σε αυτή την υποενότητα μελετάται η συσχέτιση της ισχύος εκπομπής των χρηστών και του αντίστοιχου επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσής τους. Πιο συγκεκριμένα, ως μετρική αξιολόγησης των αποτελεσμάτων των αλγορίθμων χρησιμοποιείται ο λόγος της ισχύος εκπομπής προς τον αντίστοιχο επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσης. Η μετρική αυτή εκφράζει το «κόστος» κάθε χρήστη σε όρους ισχύος εκπομπής, με μονάδες bit/sec , για τον αντίστοιχο ρυθμό μετάδοσης που επιτυγχάνει. Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων μελετούνται τρία διαφορετικά σενάρια προσομοιώσεων: (α) ο Pure-EUSPA αλγόριθμος με υιοθέτηση μίας λογαριθμικής κοίλης συνάρτησης χρησιμότητας ως προς το σηματοθορυβικό λόγο, η οποία αντιπροσωπεύει το ρυθμό μετάδοσης του χρήστη με χρήση της φόρμουλας του Gauss [18], (β) ο MGS-N-EUSPA αλγόριθμος και (γ) ο MGS-F-EUSPA αλγόριθμος, υιοθετώντας και οι δύο τη συνάρτηση χρησιμότητας, όπως αυτή ορίστηκε στη σχέση (88) και ακολουθώντας βέλτιστη κατανομή ισχύος εκπομπής.

Ειδικότερα, το σχήμα 46 παρουσιάζει τη συσχέτιση ανάμεσα στη συνολική ισχύ εκπομπής όλων των χρηστών προς τον αντίστοιχο ρυθμό μετάδοσης ως συνάρτηση του συντελεστή έκπτωσης δ . Παρατηρείται ότι ο MGS-F-EUSPA αλγόριθμος, υιοθετώντας τη συνάρτηση χρησιμότητας όπως αυτή ορίστηκε στη σχέση (88) και ακολουθώντας βέλτιστη κατανομή ισχύος εκπομπής, επιτυγχάνει χαμηλότερο «κόστος», δηλαδή με χαμηλότερη ισχύ εκπομπής επιτυγχάνει υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης. Αυτό το αποτέλεσμα είναι σημαντικό λόγω του γεγονότος ότι επιτυγχάνεται μια πιο αποτελεσματική κατανομή των πόρων του συστήματος.

8.9.4 Συγκριτική Μελέτη με Ευρεστικές Προσεγγίσεις

Σε αυτή την υποενότητα παρουσιάζεται μια συγκριτική μελέτη της προτεινόμενης προσέγγισης κατανομής υποφερουσών στους χρήστες με χρήση του μοντέλου διαπραγματεύσεων σε σχέση με τις ευρεστικές μεθόδους που έχουν προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία [52], [54], όπου η κατανομή των υποφερουσών βασίζεται στη βελτίωση της οριακής χρησιμότητας των χρηστών. Ο κύριος στόχος αυτής της σύγκρισης είναι η ανάδειξη του μοντέλου διαπραγματεύσεων του Rubinstein, ως κατάλληλο εργαλείο για την κατανομή των υποφερουσών στους χρήστες. Επιπρόσθετα, για λόγους δικαιοσύνης στη σύγκριση και προκειμένου να υπάρχει μια κοινή βάση για όλα τα σενάρια, θεωρείται ότι υιοθετείται η ισότιμη κατανομή ισχύος εκπομπής σε όλες τις υποφέρουσες που έχουν κατανεμηθεί σε έναν χρήστη (equal-bit-equal-power - EBEP). Η μέγιστη ισχύς εκπομπής όλων των χρηστών είναι $P_i^{Max} = 0.25 \text{ Watts}$. Επιπλέον με στόχο τη μεγιστοποίηση του επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης υιοθετείται μία λογαριθμική συνάρτηση χρησιμότητας [18] ως προς το σηματοθορυβικό λόγο.

Ειδικότερα, το σχήμα 47 παρουσιάζει το συνολικό ρυθμό μετάδοσης όλων των χρηστών ως συνάρτηση του αυξανόμενου πλήθους χρηστών. Συγκεκριμένα. Μελετούνται πέντε διαφορετικά σενάρια προσομοιώσεων: (i) το R-L-FDMA: Localized-FDMA με N χρήστες με χρήση round-robin διαδικασίας [54], (ii) το S-L-FDMA: Localized-FDMA με δρομολόγηση με βάση την ποιότητα του καναλιού των χρηστών ανά υποφέρουσα [54], (iii) το R-I-FDMA: Interleaved-FDMA, δηλαδή οι υποφέρουσες που κατανέμονται στον ίδιο χρήστη ισαπέχουν εντός του συνολικού φάσματος μετάδοσης και εμπλέκονται N χρήστες με χρήση round-robin διαδικασίας, (iv) το S-I-FDMA: το I-FDMA με δρομολόγηση με βάση την ποιότητα του καναλιού των χρηστών ανά υποφέρουσα [54] και (v) το σενάριο διαπραγματεύσεων με χρήση της θεωρίας του Rubinstein με σκοπό την κατανομή των υποφερουσών στους χρήστες. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο σχήμα 47 αναδεικνύουν σαφώς την υπεροχή της προτεινόμενης προσέγγισης, η οποία παρουσιάζει τον υψηλότερο συνολικό ρυθμό μετάδοσης.

8.10 Ανακεφαλαιωτικά Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο της διδακτορικής διατριβής παρουσιάστηκε μία καινοτόμος προσέγγιση βέλτιστης ενεργειακά αποδοτικής κατανομής ισχύος εκπομπής και υποφερουσών σε SC-FDMA ασύρματα κυψελωτά δίκτυα τέταρτης γενιάς. Η προτεινόμενη προσέγγιση προσδιορίζει αρχικά την κατανομή υποφερουσών μέσω του μοντέλου διαπραγματεύσεων που έχει προταθεί από τον Rubinstein. Στη συνέχεια προτάθηκαν ορισμένες ρεαλιστικές πολιτικές αντιστοίχισης των συγκεκριμένων υποφερουσών στους χρήστες, λαμβάνοντας υπόψη χαρακτηριστικά όπως η ποιότητα του καναλιού τους. Έπειτα, διατυπώθηκε και επιλύθηκε ένα

πρόβλημα βελτιστοποίησης για τον προσδιορισμό της ισχύος εκπομπής κάθε χρήστη ανά κάθε υποφέρουσα που του είχε κατανεμηθεί. Βασικός στόχος του προβλήματος βελτιστοποίησης ήταν η μεγιστοποίηση της συνάρτησης χρησιμότητας κάθε χρήστη ανά κάθε κατανεμημένη σε αυτόν υποφέρουσα με σκοπό την εύρεση μίας ενεργειακά αποδοτικής κατανομής ισχύος εκπομπής. Τα λαμβανόμενα αριθμητικά αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι η προτεινόμενη προσέγγιση υπερτερεί σημαντικά έναντι των υπάρχουσών μεθόδων κατανομής πόρων που έχουν προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία.

Ολοκληρώνοντας το κεφάλαιο αξίζει να σημειωθεί ότι μεταξύ των βασικών χαρακτηριστικών της προτεινόμενης προσέγγισης, είναι η εισαγωγή μιας ευέλικτης μεθόδου, η οποία επιτρέπει: α) την υποστήριξη ετερογενών υπηρεσιών και χρηστών με διαφορετικές απαιτήσεις σε ποιότητα της υπηρεσίας, β) την εκχώρηση προτεραιοτήτων σε διαφορετικές κλάσεις χρηστών, ως προς την πρόσβαση των διαθέσιμων πόρων (π.χ. μέσω της χρήσης διαφορετικών συντελεστών έκπτωσης δ) και γ) τη μελέτη διαφορετικών συναρτήσεων χρησιμότητας (π.χ. μεγιστοποίηση του συνολικού ρυθμού μετάδοσης). Προς την κατεύθυνση αυτή, ιδιαίτερο ερευνητικό ενδιαφέρον παρουσιάζει η αξιολόγηση των επιδόσεων, η μελέτη και η ανάλυση των επιπτώσεων της χρήσης διαφορετικών συντελεστών έκπτωσης για το διαμοιρασμό των υποφερουσών για διαφορετικές τοπολογίες δικτύου και για ρεαλιστικές κατανομές των χρηστών.

9 Βέλτιστη Κατανομή Ισχύος Εκπομπής στη Ζεύξη Ανόδου σε Διεπίπεδα Φεμτο- κυψελωτά Δίκτυα με Υποστήριξη Πολλαπλών Υπηρεσιών

Στο παρόν κεφάλαιο της διδακτορικής διατριβής μελετάται το πρόβλημα της βέλτιστης και ενεργειακά αποδοτικής κατανομής ισχύος εκπομπής στη ζεύξη ανόδου διεπίπεδων φεμτο-κυψελωτών δικτύων με την ταυτόχρονη υποστήριξη πολλαπλών υπηρεσιών. Η μοντελοποίηση της προτεινόμενης προσέγγισης λαμβάνει υπόψη δύο βασικούς παράγοντες, καθώς επίσης και τους περιορισμούς που εισάγονται από αυτούς: (α) τη διεπίπεδη αρχιτεκτονική του δικτύου και (β) την ταυτόχρονη υποστήριξη υπηρεσιών πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου. Οι χρήστες που αιτούνται διαφορετικού είδους υπηρεσίες συνήθως παρουσιάζουν διαφορετικές και αντικρουόμενες απαιτήσεις σε ποιότητα της υπηρεσίας. Με σκοπό την αντιμετώπιση του ανωτέρω περιγραφέντος προβλήματος με μία καινοτόμο προσέγγιση, υιοθετείται η θεωρία μεγιστοποίησης της χρησιμότητας του δικτύου. Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, κάθε χρήστης (είτε ανήκει στη φεμτο-κυψέλη είτε στη μακρο-κυψέλη) υιοθετεί μία συνάρτηση χρησιμότητας, η οποία αντιπροσωπεύει κατάλληλα τις απαιτήσεις του σε ποιότητα της υπηρεσίας. Επιπρόσθετα, με σκοπό την ελαχιστοποίηση των παρεμβολών στους χρήστες που ανήκουν εντός της ίδιας κυψέλης, αλλά και των παρεμβολών από τους χρήστες που ανήκουν σε γειτονικές κυψέλες, καθώς επίσης στοχεύοντας στην αύξηση της προτεραιότητας των χρηστών που ανήκουν στην μακρο-κυψέλη (macrocell users - MUs), οι χρήστες που ανήκουν στις φεμτο-κυψέλες (femtocell users - FUs) κοστολογούνται με μία κυρτή συνάρτηση κοστολόγησης ως προς την ισχύ εκπομπής τους. Στη συνέχεια, εξαιτίας της φύσης του προβλήματος, το πρόβλημα μοντελοποιείται ως ένα μη συνεργατικό καταναμημένο παίγνιο και επιλύεται με χρήση της supermodular θεωρίας με σκοπό τον προσδιορισμό του σημείου ισορροπίας κατά Nash του παιγνίου. Έπειτα προτείνεται ένας επαναληπτικός, καταναμημένος και χαμηλής πολυπλοκότητας αλγόριθμος, ο οποίος προσδιορίζει το σημείο ισορροπίας κατά Nash. Εν κατακλείδι, η αποτελεσματικότητα της λειτουργίας της προτεινόμενης προσέγγισης αξιολογείται μέσω μοντελοποίησης και προσομοιώσεων, ενώ η υπεροχή της έναντι των άλλων προτεινόμενων προσεγγίσεων στη διεθνή βιβλιογραφία αποδεικνύεται με αναλυτικά αριθμητικά αποτελέσματα.

9.1 Σχετική βιβλιογραφία

Σημαντικές ερευνητικές προσπάθειες έχουν αφιερωθεί στη σύγχρονη βιβλιογραφία για το συνδυαστικό πρόβλημα της αύξησης της χωρητικότητας των ασύρματων κυψελωτών δικτύων, την επέκταση της κάλυψής τους και την εισαγωγή νέων υπηρεσιών, ενώ παράλληλα μελετάται η μείωση του κόστους τόσο των παρόχων, όσο και των ασύρματων χρηστών. Λαμβάνοντας υπόψη αυτούς τους στόχους, τα ασύρματα φεμτο-κυψελωτά δίκτυα αναδεικνύονται ως μια πολλά υποσχόμενη λύση, η οποία προσφέρει σημαντικά οικονομικά οφέλη, λόγω του χαμηλού κόστους εγκατάστασής τους πάνω από ένα υπάρχον ασύρματο κυψελωτό δίκτυο (μακροκυψέλη). Οι φεμτο-κυψέλες συνήθως εδρεύουν σε περιβάλλοντα όπου υπάρχει συνωστισμός ως προς την κίνηση του φορτίου, π.χ. χώροι γραφείων ή σπιτιού. Επιπρόσθετα, αυτού του τύπου οι κυψέλες αποτελούνται από ένα σταθμό βάσης (Access Point - AP), ο οποίος εκπέμπει με χαμηλή ισχύ εκπομπής και έχει μικρή ακτίνα κάλυψης, π.χ. 10-50m και συνδέονται με τον πάροχο του διαδικτύου [76]. Συνολικά, το ασύρματο δίκτυο που αποτελείται από μία μακρο-κυψέλη και πολλαπλές φεμτο-κυψέλες εντός αυτής, ονομάζεται διεπίπεδο φεμτο-κυψελωτό δίκτυο.

Οι χρήστες που ανήκουν στις φεμτο-κυψέλες απολαμβάνουν το προνόμιο της καλύτερης λήψης δεδομένων και του υψηλότερου ρυθμού μετάδοσης με λιγότερη ισχύ εκπομπής, εξαιτίας της κοντινής τους απόστασης με το σταθμό βάσης της φεμτο-κυψέλης. Επιπρόσθετα, οι φεμτο-χρήστες (Femto-Users - FUs) μεταδίδουν δεδομένα εντός ενός αδειοδοτημένου φάσματος το οποίο ανήκει στους παρόχους και μοιράζονται το ίδιο φάσμα με τους μακρο-χρήστες (Macro-Users - MUs), οι οποίοι έχουν μεγαλύτερη προτεραιότητα σε σχέση με τους φεμτο-χρήστες στην πρόσβαση του φάσματος εκπομπής και μετάδοσης δεδομένων. Με βάση την ανωτέρω δομή που περιγράφηκε είναι προφανής η ανάγκη ελέγχου και μείωσης των παρεμβολών ανάμεσα στα δύο επίπεδα αρχιτεκτονικής του δικτύου.

Λαμβάνοντας υπόψη τη διεπίπεδη αρχιτεκτονική, το σύστημα κοστολογεί τους φεμτο-χρήστες ώστε να διατηρήσει σε χαμηλά επίπεδα την ισχύ εκπομπής τους, ενώ ταυτόχρονα επιχειρεί την κάλυψη των αναγκών τους σε ποιότητα της υπηρεσίας. Η στρατηγική αυτή δίνει τη δυνατότητα στους μακρο-χρήστες να διατηρούν την επιθυμητή ποιότητα της υπηρεσίας, ανεξάρτητα από την τοποθέτηση και ανάπτυξη φεμτο-κυψελών εντός της μακρο-κυψέλης [77]. Επιπλέον, λόγω της απουσίας μιας συνολικής μονάδας, η οποία έχει συνολική γνώση και αρμοδιότητα να προσδιορίζει ταυτόχρονα την ισχύ εκπομπής των φεμτο-χρηστών και των μακρο-χρηστών, η επιλογή της μη κεντρικοποιημένης επίλυσης του προβλήματος προσδιορισμού της ισχύος εκπομπής των χρηστών είναι μονόδρομος.

Στις δημοσιεύσεις [78]-[81] προτείνεται ένας αλγόριθμος προσαρμογής του σηματοθορυβικού λόγου, ο οποίος έχει ως στόχο τη μείωση των παρεμβολών ανάμεσα στα δύο επίπεδα της αρχιτεκτονικής (δηλαδή, ανάμεσα στη μακροκυψέλη και τις φεμτοκυψέλες).

Επιπρόσθετα, η λαμβανόμενη ικανοποίηση των χρηστών που εδρεύουν εντός της μακροκυψέλης και των φεμτοκυψελών μοντελοποιείται με διαφορετικές συναρτήσεις χρησιμότητας. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση των μακρο-χρηστών η συνάρτηση χρησιμότητας εκφράζει τις ελάχιστες απαιτήσεις τους σε ποιότητα της υπηρεσίας σε σχέση με το σηματοθορυβικό λόγο, ενώ μέσω της συνάρτησης χρησιμότητας των φεμτο-χρηστών, επιβάλλεται κοστολόγηση σε αυτούς με στόχο να περιοριστούν οι παρεμβολές ανάμεσα στα δύο επίπεδα της αρχιτεκτονικής. Το συνολικό πρόβλημα μεγιστοποίησης της λαμβανόμενης ικανοποίησης των χρηστών μοντελοποιείται και επιλύεται ως ένα μη συνεργατικό παίγνιο.

Παρόμοια προσέγγιση έχει ακολουθηθεί στις δημοσιεύσεις [82], [83], όπου υιοθετείται κοινή συνάρτηση χρησιμότητας και για τους μακρο-χρήστες και για τους φεμτο-χρήστες. Στη συνέχεια, το πρόβλημα αντιμετωπίζεται μέσω της μοντελοποίησης ενός ενεργειακά αποδοτικού παιγνίου κατανομής ισχύος εκπομπής. Το παίγνιο αυτό καταλήγει στην εύρεση ενός σταθερού και εφικτού σημείου ισορροπίας για την ισχύ εκπομπής όλων των χρηστών. Επιπρόσθετες προσεγγίσεις, οι οποίες χρησιμοποιούν συναρτήσεις χρησιμότητας προτείνονται στις δημοσιεύσεις [84], [85].

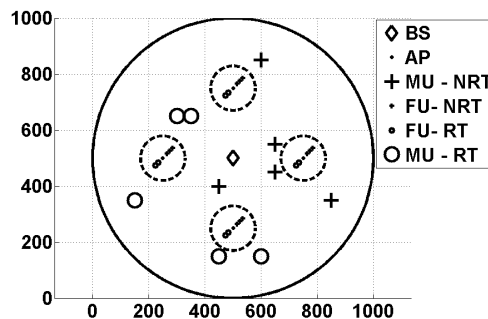
Στα πλαίσια του παρόντος κεφαλαίου της διδακτορικής διατριβής μελετάται το πρόβλημα της ενεργειακά αποδοτικής κατανομής ισχύος εκπομπής στη ζεύξη ανόδου ασύρματων διεπίπεδων φεμτοκυψελωτών δικτύων με την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλαπλών ειδών υπηρεσιών (δηλαδή υπηρεσιών πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου), οι οποίες εμφανίζουν ποικίλες και συνήθως αντικρουόμενες απαιτήσεις σε ποιότητα της υπηρεσίας. Το πρόβλημα μελετάται με τη χρήση της θεωρίας παιγνίων. Μία θεμελιώδης διαφορά και καινοτομία της προτεινόμενης προσέγγισης σε σχέση με άλλες προσεγγίσεις που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία έγκειται στον ορισμό των συναρτήσεων χρησιμότητας, οι οποίες αντιπροσωπεύουν την ευχαρίστηση που λαμβάνει ο χρήστης από το διαμοιρασμό των πόρων του συστήματος σε σχέση με το επίπεδο της διεπίπεδης αρχιτεκτονικής στο οποίο ανήκει και με το είδος της υπηρεσίας που αιτείται. Με βάση αυτή τη θεώρηση, η οποία αντικατοπτρίζεται από τη χρήση διαφορετικών συναρτήσεων χρησιμότητας ανά κατηγορία χρηστών και από την κατάλληλη μοντελοποίηση του συστήματος, όπως αναλύεται παρακάτω, είναι εφικτή μια πιο ρεαλιστική απεικόνιση των απαιτήσεων των χρηστών σε ποιότητα της υπηρεσίας, ενώ ταυτόχρονα λαμβάνονται υπόψη οι παρεμβολές που δημιουργούνται ανάμεσα στα διαφορετικά επίπεδα, αλλά και εντός του ίδιου επιπέδου, δίνοντας μεγαλύτερη προτεραιότητα στους μακρο-χρήστες. Ωστόσο όμως, η προσέγγιση που περιγράφηκε προηγουμένως, δεν επιτρέπει την άμεση εφαρμογή των υφιστάμενων προσεγγίσεων κατανομής ισχύος εκπομπής στους χρήστες στα φεμτοκυψελωτά δίκτυα και για το λόγο αυτό απαιτείται διαφορετική αντιμετώπιση του συνολικού προβλήματος.

9.2 Μοντέλο Συστήματος & Σχετικές Πληροφορίες

Στο παρόν κεφάλαιο της διδακτορικής διατριβής μελετάται ένα διεπίπεδο φεμτοκυψελωτό δίκτυο, το οποίο αποτελείται από μία μακροκυψέλη με σταθμό βάσης B_0 , ο οποίος εξυπηρετεί μία περιοχή \mathfrak{X} , με ακτίνα κάλυψης R_0 . Εντός της περιοχής \mathfrak{X} εδρεύουν F φεμτοκυψέλες με σταθμό βάσης B_i ($i=1, \dots, F$), η κάθε μία. Κάθε φεμτοκυψέλη υποστηρίζει μία περιοχή $\square \subset \mathfrak{X}$ και έχει ακτίνα κάλυψης $R_c \ll R_0$. Στην προτεινόμενη προσέγγιση γίνεται η παραδοχή ότι χρησιμοποιούνται κλειστής πρόσβασης φεμτοκυψέλες, δηλαδή η εγγραφή των χρηστών στη φεμτοκυψέλη είναι υποχρεωτική ώστε να εξυπηρετηθούν από το σταθμό βάσης της. Συνεπώς, ο σταθμός βάσης κάθε φεμτοκυψέλης γνωρίζει το πλήθος των χρηστών που εδρεύουν εντός της φεμτοκυψέλης. Το σύνολο των χρηστών συμβολίζεται με $S = S_m \cup S_f$ και τα σύνολα των μακρο-χρηστών και των φεμτο-χρηστών με S_m και S_f αντίστοιχα, και αποτελούνται από N_m και N_f πλήθος χρηστών. Εάν ο χρήστης $j \in S$ συνδέεται στο σταθμό βάσης B_i ($i=0, 1, \dots, F$), τότε η ισχύς εκπομπής του συμβολίζεται ως P_j . Επίσης, σ^2 είναι η διακύμανση του προσθετικού λευκού Gaussian θορύβου (AWGN) στο σταθμό βάσης B_i . Ο λαμβανόμενος σηματοθορυβικός λόγος γ_j του χρήστη j στο σταθμό βάσης B_i δίδεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\gamma_j = \frac{W}{R} \cdot \frac{G_{ij} P_j}{\sigma^2 + \sum_{j \neq i} G_{ij} P_j} \quad (100)$$

όπου W Hz είναι το συνολικό εύρος ζώνης, R bits/sec ο ρυθμός μετάδοσης, G_{ij} το κέρδος του καναλιού από το χρήστη j προς το σταθμό βάσης του και G_{ji} το αντίστοιχο κέρδος του καναλιού από το χρήστη j προς το σταθμό βάσης στον οποίο ανήκει ο χρήστης $i \neq j$. Το κέρδος του καναλιού μοντελοποιείται με βάση το απλοποιημένο μοντέλο απωλειών που έχει προταθεί στις IMT-2000 σχεδιαστικές αρχές [86].



Σχήμα 48 Τοπολογία δικτύου και τοποθέτηση χρηστών στο διεπίπεδο φεμτοκυψελωτό δίκτυο.

Στην παρούσα προτεινόμενη προσέγγιση, θεωρούνται ότι εξυπηρετούνται από το διεπίπεδο φεμτοκυβελωτό δίκτυο, ταυτόχρονα χρήστες που αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού (real-time - RT) και μη πραγματικού χρόνου (non-real-time - NRT). Για το λόγο αυτό στοχεύοντας στην υποστήριξη πολλαπλών υπηρεσιών με διαφορετικές απαιτήσεις σε ποιότητα της υπηρεσίας, ανατίθεται σε κάθε χρήστη μία κατάλληλα σχεδιασμένη συνάρτηση χρησιμότητας, της οποίας η μορφή εξαρτάται από το επίπεδο στο οποίο ανήκει ο χρήστης, αλλά και από το είδος της υπηρεσίας την οποία αιτείται. Η συνάρτηση χρησιμότητας κάθε χρήστη εκφράζει τη λαμβανόμενη ικανοποίησή του από το διαμοιρασμό των πόρων του συστήματος, αλλά και από την καταναλισκόμενη ισχύ εκπομπής του. Συνεπώς, η συνάρτηση χρησιμότητας μπορεί να ορισθεί ως ακολούθως:

$$U_j(P_j, \mathbf{P}_j) = \begin{cases} \frac{R_F f(\gamma_j)}{P_j}, j \in S_{m,RT} \\ \frac{\log(1 + D \cdot f(\gamma_j))}{P_j}, j \in S_{m,NRT} \\ \frac{R_F f(\gamma_j)}{P_j} - c(e^{P_j} - 1), j \in S_{f,RT} \\ \frac{\log(1 + D \cdot f(\gamma_j))}{P_j} - c(e^{P_j} - 1), j \in S_{f,NRT} \end{cases} \quad (101)$$

όπου R_F , D είναι θετικές σταθερές, με $S_{m,RT}$, $S_{m,NRT}$, $S_{f,RT}$, $S_{f,NRT}$ συμβολίζονται τα σύνολα των χρηστών υπηρεσιών πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου που ανήκουν στην μακροκυβέλη και τη φεμτοκυβέλη αντίστοιχα. Επίσης, με $f(\gamma_j) = (1 - e^{-A\gamma_j})^M$ συμβολίζεται η συνάρτηση απόδοσης των χρηστών, η οποία αντιπροσωπεύει την πιθανότητα επιτυχούς μετάδοσης ενός πακέτου δεδομένων υπό σταθερό ρυθμό μετάδοσης και εξαρτάται από το σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που υιοθετείται [64]. Επιπλέον, όπως φαίνεται στη σχέση (101), οι φεμτοχρήστες κοστολογούνται μέσω μίας κυρτής συνάρτησης κοστολόγησης ως προς την ισχύ εκπομπής τους, με στόχο την ελαχιστοποίηση των παρεμβολών μεταξύ των διαφορετικών επιπέδων αρχιτεκτονικής του δικτύου και δίνοντας κατά αυτόν τον τρόπο προτεραιότητα στην ικανοποίηση των απαιτήσεων σε ποιότητα της υπηρεσίας των μακροχρηστών. Η υιοθέτηση κατάλληλου μηχανισμού κοστολόγησης για την ισχύ εκπομπής των φεμτοχρηστών, προκαλεί καλύτερη απόδοση για το σύστημα και ενθαρρύνει τόσο τους φεμτοχρήστες όσο και τους μακροχρήστες να μοιράζονται τους πόρους του συστήματος ακόμα πιο αποτελεσματικά [22]. Επίσης, στη σχέση (101) με c συμβολίζεται ο παράγοντας κοστολόγησης.

Επιπρόσθετα, οι χρήστες οργανώνονται σε κατηγορίες ανάλογα με το είδος της υπηρεσίας που αιτούνται (δηλαδή υπηρεσίες πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου), αλλά και το επίπεδο στο οποίο ανήκουν (δηλαδή φεμτοχρήστες ή μακροχρήστες). Αναφορικά με τους χρήστες που αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, η συνάρτηση χρησιμότητας τους εκφράζει τη συσχέτιση ανάμεσα στα επιτυχώς μεταδιδόμενα *bits* στο σταθμό βάσης (είτε της μακροκυβέλης είτε της φεμτοκυβέλης) και την ισχύ εκπομπής τους. Στην προτεινόμενη

προσέγγιση, η ιδανική τιμή του ρυθμού μετάδοσης για την αιτούμενη υπηρεσία πραγματικού χρόνου αντιστοιχίζεται στο σημείο καμπής της σιγμοειδούς συνάρτησης επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης $R_j^*(P_j) = R_f f(\gamma_j)$ (π.χ. για υπηρεσία φωνής ισχύει $R_j^*(P_j) = 64Kbps$). Συνεπώς, στην περίπτωση κατά την οποία ο επιτεύξιμος ρυθμός μετάδοσης είναι μικρότερος από την αντίστοιχη τιμή στο σημείο καμπής $R_j^*(P_j)$, τότε η συνάρτηση χρησιμότητας φθίνει, υποδεικνύοντας με αυτόν τον τρόπο την προτεραιότητα και την ανάγκη του χρήστη να δεσμεύσει περισσότερους πόρους του συστήματος. Αναφορικά με τους χρήστες που αιτούνται υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου, η συνάρτηση χρησιμότητάς τους μοντελοποιείται με τη βοήθεια της φόρμουλας του Shannon και με αυτόν τον τρόπο αντιπροσωπεύεται η άπληστη συμπεριφορά των χρηστών αυτών για αυξημένο ρυθμό μετάδοσης.

9.3 Μη Συνεργατικό Παίγνιο Βέλτιστης Κατανομής Ισχύος Εκπομπής στη Ζεύξη Ανόδου σε Διεπίπεδα Φεμτο-κυψελωτά Δίκτυα με Υποστήριξη Πολλαπλών Υπηρεσιών

Καθώς το σύστημα εξελίσσεται, κατά την έναρξη κάθε χρονοσχιμής, ένας κατανεμημένος επαναληπτικός και χαμηλής πολυπλοκότητας αλγόριθμος κατανομής ισχύος εκπομπής στη ζεύξη ανόδου ασύρματων διεπίπεδων φεμτοκυψελωτών δικτύων (Uplink Power Control algorithm in Multi-Service two-tier Femtocells - UPC-MSF) είναι υπεύθυνος για τον προσδιορισμό της ισχύος εκπομπής όλων των χρηστών με στόχο τη μεγιστοποίηση της λαμβανόμενης ικανοποίησής τους από το διαμοιρασμό των πόρων του συστήματος, η οποία εκφράζεται από τις τιμές της συνάρτησης χρησιμότητας του κάθε χρήστη. Σε αυτή την ενότητα, αναλύονται οι βασικοί στόχοι της UPC-MSF προσέγγισης και ορίζεται ένα γενικό πρόβλημα βελτιστοποίησης, το οποίο επιλύεται με τη χρήση της θεωρίας παιγνίων.

Δεδομένου ότι κάθε χρήστης $j \in S = \{0, 1, \dots, N = N_m + N_f\}$ στο διεπίπεδο φεμτοκυψελωτό δίκτυο στοχεύει στη μεγιστοποίηση της συνάρτησης χρησιμότητάς του U_j , και λόγω της απουσίας συντονισμού μεταξύ των δύο επιπέδων, τόσο οι μακροχρήστες, όσο και οι φεμτοχρήστες είναι πρόθυμοι να συμμετάσχουν σε ένα μη συνεργατικό παίγνιο κατανομής των πόρων του συστήματος. Το μη συνεργατικό παίγνιο ορίζεται ως $G = [S, \{A_j\}_{j \in S}, \{U_j\}_{j \in S}]$, όπου S είναι το σύνολο των χρηστών/παικτών, $A_j = [0, P_j^{Max}] \times \square^N$ είναι το σύνολο των στρατηγικών του χρήστη j και U_j είναι η συνάρτηση χρησιμότητας του χρήστη j , η οποία ορίζεται στη σχέση (101). Επιπλέον, το προκύπτον ανά χρονοσχιμή μη συνεργατικό παίγνιο μπορεί να εκφραστεί ως το ακόλουθο πρόβλημα μεγιστοποίησης.

$$(UPC-MSF \text{ Παίγνιο}) \quad \max_{P_j \in A_j} U_i(P_j, \mathbf{P}_{-j}) \quad \forall j \in S = S_m \cup S_f \quad (102)$$

Αναφορικά με το UPC-MSF παίγνιο, βασικός στόχος είναι ο προσδιορισμός του σημείου ισορροπίας του, δηλαδή του διανύσματος ισχύος εκπομπής όλων των χρηστών που εδρεύουν εντός του διεπίπεδου φεμτοκυψελωτού δικτύου. Στο σημείο ισορροπίας του παιγνίου, κάθε χρήστης $j \in S$ μεγιστοποιεί εγωιστικά τη συνάρτηση χρησιμότητάς του, η οποία εκφράζεται από τη σχέση (101), δεδομένων των τιμών ισχύος εκπομπής των υπολοίπων χρηστών. Ένα τέτοιου είδους σημείο ισορροπίας για το παίγνιο που ορίστηκε στη σχέση (102), αποτελεί σημείο ισορροπίας κατά Nash.

Ορισμός 13: Το διάνυσμα ισχύος εκπομπής $\mathbf{P}^* = (P_1^*, P_2^*, \dots, P_N^*)$ είναι σημείο ισορροπίας κατά Nash του UPC-MSF παιγνίου, εάν για κάθε χρήστη $j \in S$, ισχύει $U_j(P_j^*, \mathbf{P}_{-j}^*) \geq U_j(P_j, \mathbf{P}_{-j}^*)$ για κάθε τιμή $P_j^* \in A_j$.

Με βάση τον παραπάνω ορισμό, παρατηρείται ότι κανένας χρήστης δε μπορεί να βελτιώσει περαιτέρω τη συνάρτηση χρησιμότητάς του με προσωπική αλλαγή της στρατηγικής του, δεδομένων των τιμών ισχύος εκπομπής των υπολοίπων χρηστών.

9.4 Προσδιορισμός Σημείου Ισορροπίας κατά Nash

Με σκοπό την απόδειξη ύπαρξης μοναδικού σημείου ισορροπίας κατά Nash του UPC-MSF παιγνίου, υιοθετείται η θεωρία των supermodular παιγνίων [22]. Το βασικό κίνητρο για τη χρήση της θεωρίας των supermodular παιγνίων για τη μελέτη του UPC-MSF παιγνίου, αντί να χρησιμοποιηθούν άλλες εναλλακτικές λύσεις, όπως αυτές που βασίζονται στην ημικοίλη συνάρτηση χρησιμότητας, είναι ότι οι συναρτήσεις χρησιμότητας των χρηστών είναι ετερογενείς ως προς τη φύση τους και δεν είναι ημικοίλες συναρτήσεις ως προς την ισχύ εκπομπής των χρηστών.

Ορισμός 14: Ένα παίγνιο $G = [S, \{A_j\}_{j \in S}, \{U_j\}_{j \in S}]$ είναι supermodular, εάν και μόνο αν ισχύει

$$\frac{\partial^2 U_j(\mathbf{P})}{\partial P_j \partial P_i} \geq 0, \quad \forall j \neq i \in S.$$

Επιπλέον, ένα supermodular παίγνιο έχει κάποιες επιθυμητές ιδιότητες. Αναφορικά με ένα supermodular παίγνιο, υπάρχει ένα τουλάχιστον σημείο ισορροπίας κατά Nash (pure strategy Nash equilibrium), οι βέλτιστες αποκρίσεις του παιγνίου είναι γνησίως αύξουσες συναρτήσεις και αν το σημείο ισορροπίας είναι μοναδικό, τότε είναι γενικά σταθερό. Ωστόσο όμως το UPC-MSF παίγνιο δεν είναι supermodular, με βάση τον παραπάνω ορισμό. Συνεπώς, το σύνολο των στρατηγικών των χρηστών θα πρέπει να τροποποιηθεί κατάλληλα, ώστε το προκύπτον παίγνιο να είναι supermodular. Προς αυτή την κατεύθυνση, γίνεται χρήση της

συνθήκης που δίδεται στον παραπάνω ορισμό, δηλαδή $\frac{\partial^2 U_j(\mathbf{P})}{\partial P_j \partial P_i} \geq 0, \forall j \neq i \in S$ και εξάγεται ότι η συνθήκη αυτή ικανοποιείται στο διάστημα $\gamma_j \geq \frac{\ln M}{A}$. Για το λόγο αυτό, τροποποιείται το σύνολο των στρατηγικών ως $\hat{A}_j = [P_j, P_j^{Max}]$, όπου η μικρότερη τιμή της ισχύος εκπομπής των χρηστών P_j εξάγεται από την επίλυση της σχέσης $\gamma_j \geq \frac{\ln M}{A}$, ενώ η μεγαλύτερη τιμή της P_j^{Max} προσδιορίζεται από τους φυσικούς και τεχνικούς περιορισμούς που θέτει το υλισμικό του κάθε χρήστη. Με βάση την προηγούμενη ανάλυση εξάγεται το ακόλουθο θεώρημα.

Θεώρημα 12: Το UPC-MSF παίγνιο $G = [S, \{\hat{A}_j\}_{j \in S}, \{U_j\}_{j \in S}]$ με το τροποποιημένο πεδίο στρατηγικών είναι supermodular.

Με βάση το ανωτέρω θεώρημα, εξάγεται ότι το UPC-MSF παίγνιο είναι supermodular, συνεπώς το σύνολό του από σημεία ισορροπίας κατά Nash \mathbf{E} είναι μη κενό και αποτελείται από ένα μέγιστο στοιχείο \mathbf{P}_L και από ένα ελάχιστο στοιχείο \mathbf{P}_S . Επιπρόσθετα, με βάση το «Corollary 1» της δημοσίευσης [22] εξάγεται ότι το στοιχείο $\mathbf{P}_S \in \mathbf{E}$ είναι το Pareto dominant σημείο ισορροπίας κατά Nash του UPC-MSF παιγνίου και για το λόγο αυτό η καλύτερη απόκριση κάθε χρήστη στο σημείο ισορροπίας κατά Nash είναι η μικρότερη δυνατή ισχύς εκπομπής από το σύνολο των σημείων ισορροπίας. Με βάση αυτή την παρατήρηση σχετικά με το UPC-MSF παίγνιο, είναι εγγυημένη η ενεργειακά αποδοτική κατανομή της ισχύος εκπομπής στους χρήστες.

Η σύγκλιση του UPC-MSF παιγνίου στο Pareto dominant σημείο ισορροπίας κατά Nash μπορεί να εξαχθεί με βάση τις ιδιότητες ενός supermodular παιγνίου [22]. Συνεπώς, αποδεικνύεται εύκολα, δεδομένου ότι η βέλτιστη απόκριση των χρηστών είναι μονότιμη:

$$BR_j(\mathbf{P}_{-j}) = \left\{ P_j \in \hat{A}_j : U_j(P_j, \mathbf{P}_{-j}) \geq U_j(P'_j, \mathbf{P}_{-j}), \forall P'_j \in \hat{A}_j \right\}$$

τότε κάθε χρήστης ανανεώνει την ισχύ εκπομπής του, ανεξάρτητα από την αρχική της τιμή, και αυτή συγκλίνει μονότονα στο μικρότερο δυνατό σημείο ισορροπίας κατά Nash $\mathbf{P}_S \in \mathbf{E}$.

9.5 UPC-MSF Αλγόριθμος

Με βάση την προηγούμενη ανάλυση, στην ενότητα αυτή προτείνεται ένας επαναληπτικός κατανεμημένος και χαμηλής πολυπλοκότητας αλγόριθμος κατανομής ισχύος εκπομπής, ο οποίος προσδιορίζει το Pareto dominant σημείο ισορροπίας κατά Nash του UPC-MSF παιγνίου. Ο UPC-MSF αλγόριθμος αποτελείται από δύο βασικά τμήματα, δηλαδή το τμήμα τους σταθμού βάσης και το τμήμα του χρήστη. Το τμήμα του σταθμού βάσης εδρεύει στο σταθμό βάσης κάθε φεμτοκυψέλης και είναι υπεύθυνο για την ευρυεκπομπή του συντελεστή

κοστολόγησης c στους φεμτοχρήστες, καθώς επίσης και για τη συλλογή των τιμών των συναρτήσεων χρησιμότητας από τους χρήστες. Το τμήμα δικτύου εδρεύει σε κάθε φεμτοχρήστη και μακροχρήστη, ο οποίος παίζει μη συνεργατικά το μοντελοποιημένο παίγνιο και δεδομένου του συντελεστή κοστολόγησης οι χρήστες προσδιορίζουν με καταναμημένο τρόπο τη βέλτιστη ισχύ εκπομπής τους. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται έως ότου ο αλγόριθμος συγκλίνει στο Pareto dominant σημείο ισορροπίας κατά Nash P_S του UPC-MSF παιγνίου. Στη συνέχεια περιγράφονται τα δύο τμήματα του προτεινόμενου αλγορίθμου.

UPC-MSF AP/BS's Part Algorithm (c_{best} Identification)

Βήμα 1^ο: Κάθε σταθμός βάσης, κάθε φεμτοκυψέλης ανακοινώνει τον αρχικό συντελεστή κοστολόγησης $c=0$ σε όλους τους φεμτοχρήστες, οι οποίοι εδρεύουν εντός της κάλυψής του. Ο συντελεστής κοστολόγησης θεωρείται ότι είναι ίδιος για όλες τις φεμτοκυψέλες, οι οποίες εδρεύουν εντός της ίδιας μακροκυψέλης.

Βήμα 2^ο: Κάθε φεμτοχρήστης και μακροχρήστης προσδιορίζει το Pareto dominant σημείο ισορροπίας κατά Nash P_{S_j} , $\forall j \in S$ (με βάση τον αλγόριθμο *UPC-MSF_User's Part Algorithm*) και υπολογίζει την τιμή της συνάρτησης χρησιμότητάς του (χωρίς την κοστολόγηση για τους φεμτοχρήστες).

Βήμα 3^ο: Αύξησε το συντελεστή κοστολόγησης $c := c + \Delta c$. Κάθε σταθμός βάσης κάθε φεμτοκυψέλης ανακοινώνει τον ανανεωμένο συντελεστή κοστολόγησης στους χρήστες που εδρεύουν εντός της κάλυψής του.

Βήμα 4^ο: Εάν οι τιμές της συνάρτησης χρησιμότητας για όλους τους χρήστες, $\forall j \in S$, δε βελτιώνονται, δηλαδή $U_j(c) > U_j(c + \Delta c)$, τότε σταμάτα και θέσε ως την καλύτερη επιλογή του συντελεστή κοστολόγησης την τιμή $c_{best} = c$. Σε κάθε άλλη περίπτωση επέστρεψε στο βήμα 2.

UPC-MSF User's Part Algorithm (Power Allocation)

Βήμα 1^ο: Στην αρχή κάθε χρονοσχιμής t , κάθε χρήστης, είτε είναι μακροχρήστης είτε είναι φεμτοχρήστης (δηλαδή $\forall j \in S = S_m \cup S_f$), εκπέμπει με μία τυχαία τιμή ισχύος εκπομπής $P_{S_j}^{(0)}$ από το σύνολο των εφικτών τιμών ισχύος εκπομπής (δηλαδή $0 \leq P_{S_j}^{(0)} \leq P_i^{Max}$). Θέσε $k=0$ και συνεπώς $P_{S_j}^{(0)}$, $\forall j \in S = S_m \cup S_f$.

Βήμα 2^ο: Δεδομένων των τιμών της ισχύος εκπομπής των χρηστών, οι οποίες έμμεσα αναφέρονται από τους σταθμούς βάσης της μακροκυψέλης και των φεμτοκυψελών μέσω της ευρυεκπομπής των συνολικών παρεμβολών $\sum_{j \in S} G_{ji} P_j$, κάθε χρήστης προσδιορίζει τις παρεμβολές που ο ίδιος δέχεται $\sum_{j \neq i} G_{ji} P_j$ και υπολογίζει τη βέλτιστη απόκρισή του

$$BR_j(\mathbf{P}_j) = \arg \max_{P_j \in \mathcal{A}_j} U_j(P_j, \mathbf{P}_j)$$

Με αυτόν τον τρόπο θέτει ως ισχύ εκπομπής $P_{S_j}^{(k)} = \min(BR_j)$.

Βήμα 3^ο: Εάν η τιμή της ισχύος εκπομπής συγκλίνει (δηλαδή ισχύει $|P_{S_j}^{(k+1)} - P_{S_j}^{(k)}| \leq \varepsilon$, όπου ε είναι μία μικρή θετική τιμή, π.χ. $\varepsilon = 10^{-7}$), τότε σταμάτα.

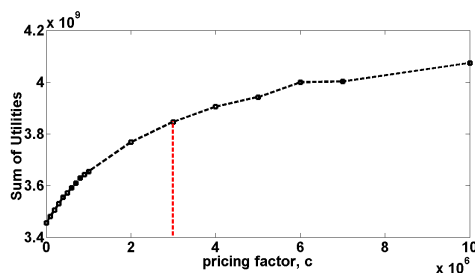
Βήμα 4^ο: Σε κάθε άλλη περίπτωση θέσε $k=k+1$ και επέστρεψε στο βήμα 2.

Ολοκληρώνοντας την ενότητα αυτή, πρέπει να τονισθεί ότι ο προτεινόμενος UPC-MSF αλγόριθμος μπορεί να χαρακτηριστεί ως ένας μονότιμος χαμηλής πολυπλοκότητας βέλτιστης απόκρισης κατανεμημένος και επαναληπτικός αλγόριθμος, ο οποίος υλοποιείται για κάθε μακροχρήστη και φεμτοχρήστη ξεκινώντας από μία τυχαία εφικτή τιμή της ισχύος εκπομπής, επιλεγμένη από το τροποποιημένο πεδίο στρατηγικών του κάθε χρήστη \mathcal{A}_j .

9.6 Αριθμητικά Αποτελέσματα

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται ορισμένα ενδεικτικά αριθμητικά αποτελέσματα με σκοπό την απεικόνιση της λειτουργίας και των χαρακτηριστικών της προτεινόμενης προσέγγισης, ενώ μέσω μίας συγκριτικής μελέτης αναδεικνύονται τα οφέλη από την υιοθέτηση της προτεινόμενης προσέγγισης. Καθ' όλη τη διάρκεια των προσομοιώσεων θεωρείται μία CDMA μακροκυψέλη, στην οποία εδρεύουν F φεμτοκυψέλες. Εντός της μακροκυψέλης υπάρχουν 10 μακροχρήστες, εκ των οποίων οι 5 αιτούνται υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου (π.χ. υπηρεσίες δεδομένων), ενώ οι υπόλοιποι 5 αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου (π.χ. υπηρεσίες φωνής). Οι μακροχρήστες είναι τυχαία κατανεμημένοι εντός της μακροκυψέλης, η οποία έχει ακτίνα $R_0=500m$. Κάθε φεμτοκυψέλη έχει ακτίνα $R_c=50m$ και εξυπηρετεί 5 φεμτοχρήστες, εκ των οποίων οι 3 χρήστες απαιτούν υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου και οι 2 χρήστες αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου. Η μέγιστη δυνατή ισχύς εκπομπής, είτε για τους μακροχρήστες είτε για τους φεμτοχρήστες έχει ορισθεί ως $P_j^{Max} = 0.2W$, ενώ ισχύουν τα ακόλουθα $W = 10^6 Hz$, $R = 10^4 bits/sec$ και $\sigma^2 = 5 \cdot 10^{-15} W$. Αποκλειστικά για λόγους παρουσίασης και με βάση τις αντίστοιχες προσεγγίσεις στην πρόσφατη βιβλιογραφία, γίνεται η υπόθεση ότι οι χρήστες πραγματικού χρόνου υιοθετούν ως συνάρτηση απόδοσης: $f(\gamma_j) = (1 - e^{-0.5\gamma_j})^M$, με $M = 40$ [22].

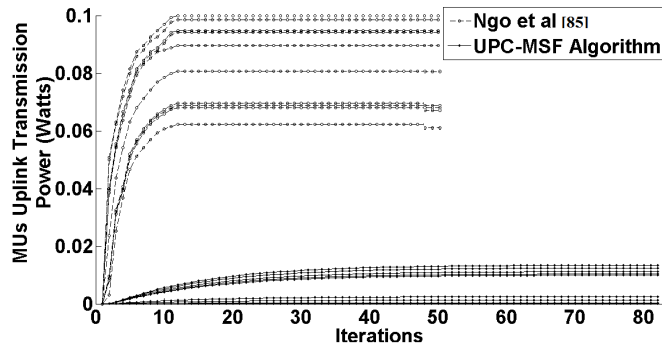
Το σχήμα 49 κατασκευάζεται από το σύνολο των τιμών της ισχύος εκπομπής των χρηστών, καθώς αυτές συγκλίνουν στο Pareto βέλτιστο σημείο ισορροπίας κατά Nash για κάθε τιμή του συντελεστή κοστολόγησης c . Η αύξηση του συντελεστή κοστολόγησης c τερματίζεται εάν οι τιμές της συνάρτησης χρησιμότητας των χρηστών (είτε των μακροχρηστών είτε των φεμτοχρηστών) δεν μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω και κατά αυτόν τον τρόπο προσδιορίζεται η βέλτιστη τιμή του συντελεστή κοστολόγησης $c=c_{best}$. Με βάση το διάγραμμα παρατηρείται



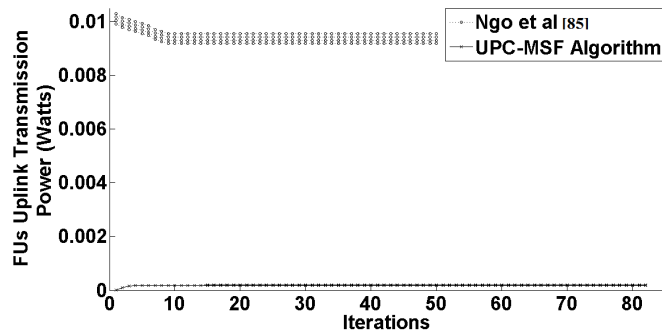
Σχήμα 49 Αθροισμα των τιμών των συναρτήσεων χρησιμότητας των χρηστών στο σημείο ισορροπίας ως συνάρτηση του συντελεστή κοστολόγησης c

ότι η γραφική παράσταση του αθροίσματος των τιμών των συναρτήσεων χρησιμότητας των χρηστών αυξάνει ακόμα και για τιμές μεγαλύτερες του βέλτιστου συντελεστή κοστολόγησης c_{best} . Το γεγονός αυτό οφείλεται στην παρατήρηση ότι οι τιμές της συνάρτησης χρησιμότητας ορισμένων χρηστών αυξάνουν ταχέως, ωστόσο οι αντίστοιχες τιμές ορισμένων άλλων χρηστών μειώνονται βραδέως. Παρόλα αυτά, καθώς έχει προταθεί στο πρώτο τμήμα του αλγορίθμου, ο βέλτιστος συντελεστής κοστολόγησης προσδιορίζεται στο σημείο που οι τιμές των συναρτήσεων χρησιμότητας αυξάνουν για το σύνολο των χρηστών. Συνεπώς, με βάση την προηγούμενη ανάλυση και το υπό μελέτη σενάριο των προσομοιώσεων προσδιορίζεται ο βέλτιστος συντελεστής κοστολόγησης $c=10^3$.

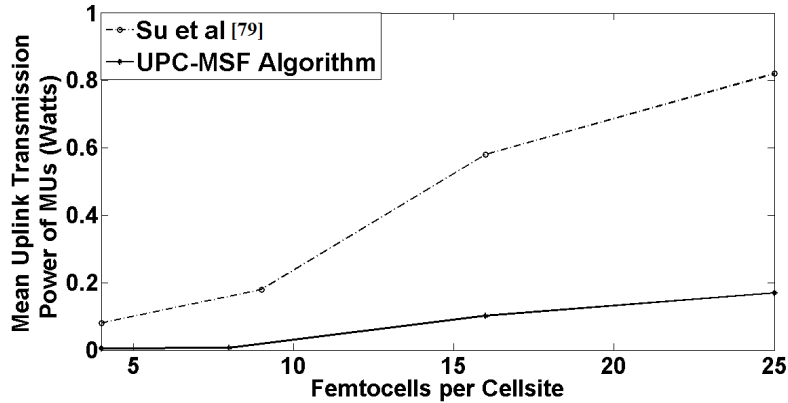
Στα σχήματα 50 και 51 παρουσιάζεται η ισχύς εκπομπής των μακροχρηστών και φεμτοχρηστών αντίστοιχα, ως συνάρτηση του πλήθους των επαναλήψεων που απαιτούνται από τον προτεινόμενο αλγόριθμο ώστε να συγκλίνει στο Pareto βέλτιστο σημείο ισορροπίας κατά Nash του παιγνίου. Στα ίδια σχήματα συγκρίνονται τα αποτελέσματα του UPC-MSF αλγορίθμου και τα αντίστοιχα αποτελέσματα του αλγορίθμου που έχει προταθεί στη δημοσίευση [85], στην οποία οι συγγραφείς προτείνουν ένα συνδυαστικό πρόβλημα κατανομής ισχύος εκπομπής και ελέγχου αποδοχής κλήσεων με στόχο τον έλεγχο και τη μείωση των παρεμβολών σε ένα διεπίπεδο φεμτοκυψελωτό ασύρματο δίκτυο. Για τους λόγους της προσομοίωσης γίνεται η θεώρηση ότι εντός της μακροκυψέλης εδρεύουν $F=4$ φεμτοκυψέλες. Από τα αριθμητικά αποτελέσματα παρατηρείται ότι η σύγκλιση του αλγορίθμου είναι ιδιαίτερα ταχύς, δεδομένου ότι χρειάζονται λιγότερες από 80 επαναλήψεις για τον UPC-MSF αλγόριθμο ώστε να συγκλίνει στο Pareto βέλτιστο σημείο ισορροπίας και για τους μακροχρήστες αλλά και για τους φεμτοχρήστες, ενώ για πρακτικά σενάρια προσομοίωσης παρατηρείται ότι χρειάζονται λιγότερες από 30 επαναλήψεις ώστε οι τιμές της ισχύος εκπομπής να φθάσουν πρακτικά τις τελικές τιμές τους. Επιπλέον, τα αποτελέσματα αποκαλύπτουν ότι η προτεινόμενη προσέγγιση επιτυγχάνει σημαντικά χαμηλότερη ισχύ εκπομπής και για τους μακροχρήστες, αλλά και για τους φεμτοχρήστες σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές που προκύπτουν από τη δημοσίευση [85], εξαιτίας των ακόλουθων λόγων: (α) τον κατάλληλο σχεδιασμό των συναρτήσεων χρησιμότητας των χρηστών,



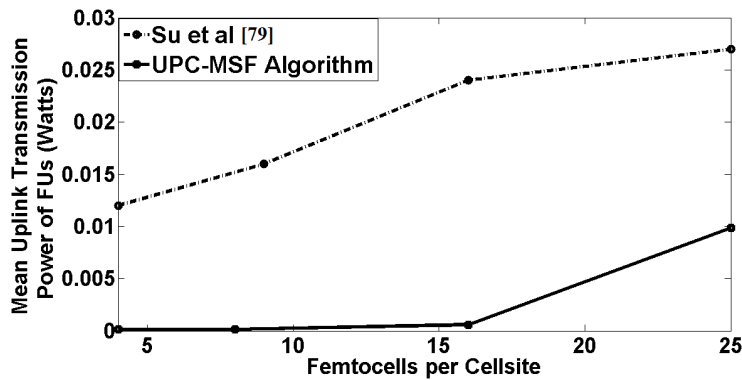
Σχήμα 50 Σύγκλιση της ισχύος εκπομπής των μακροχρηστών



Σχήμα 51 Σύγκλιση της ισχύος εκπομπής των φεμτοχρηστών



Σχήμα 52 Μέση τιμή της ισχύος εκπομπής των μακροχρηστών ως συνάρτηση του πλήθους των φεμτοκυψελών



Σχήμα 53 Μέση τιμή της ισχύος εκπομπής των φεμτοχρηστών ως συνάρτηση του πλήθους των φεμτοκυψελών

(β) την κατηγοριοποίηση των χρηστών με βάση το επίπεδο της αρχιτεκτονικής δικτύου στο οποίο ανήκουν, αλλά και με βάση το είδος της υπηρεσίας που αιτούνται, (γ) τη χρήση κυρτής κοστολόγησης ως προς την ισχύ εκπομπής των χρηστών και (δ) τη μη συνεργατική φύση του UPC-MSF προβλήματος.

Επιπρόσθετα, στα σχήματα 52 και 53 γίνεται σύγκριση της μέσης τιμής της ισχύος εκπομπής των μακροχρηστών και των φεμτοχρηστών αντίστοιχα, ως συνάρτηση του πλήθους των φεμτοκυψελών που εδρεύουν εντός της μακροκυψέλης. Επιπρόσθετα, τα αριθμητικά αποτελέσματα που προκύπτουν από τον UPC-MSF αλγόριθμο συγκρίνονται με τα αντίστοιχα αριθμητικά αποτελέσματα της δημοσίευσης [79]. Με βάση τα διαγράμματα παρατηρείται ότι, καθώς το πλήθος των φεμτοκυψελών που εδρεύουν εντός της μακροκυψέλης αυξάνεται, η μέση τιμή της ισχύος εκπομπής των μακροχρηστών και των φεμτοχρηστών επίσης αυξάνεται, εξαιτίας των αυξημένων παρεμβολών μεταξύ των δύο επιπέδων αρχιτεκτονικής του δικτύου. Παράλληλα, αναδεικνύεται το γεγονός ότι η προτεινόμενη UPC-MSF προσέγγιση επιτυγχάνει καλύτερα αποτελέσματα ως προς την εξοικονόμηση ισχύος εκπομπής σε σχέση με την προσέγγιση της δημοσίευσης [79].

9.7 Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο της διδακτορικής διατριβής μελετήθηκε το πρόβλημα της βέλτιστης κατανομής ισχύος εκπομπής στη ζεύξη ανόδου ασύρματων διεπίπεδων φεμτοκυψελωτών δικτύων με την ταυτόχρονη υποστήριξη πολλαπλών υπηρεσιών. Με στόχο την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλαπλών υπηρεσιών με διαφορετικές απαιτήσεις σε ποιότητα και τη μελέτη των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του διεπίπεδου δικτύου, προτάθηκε μία γενική προσέγγιση βελτιστοποίησης με τη χρήση κατάλληλα σχεδιασμένων συναρτήσεων χρησιμότητας. Με βάση την προτεινόμενη προσέγγιση εισήχθη ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης με στόχο την κατανομή της ισχύος, το οποίο ονομάστηκε UPC-MSF και επιλύθηκε με χρήση της θεωρίας παιγνίων. Επιπρόσθετα, μέσω αναλυτικών αριθμητικών αποτελεσμάτων αξιολογήθηκε η απόδοση της προτεινόμενης προσέγγισης και η υπεροχή της σε σχέση με παραπλήσιες προσεγγίσεις της διεθνούς βιβλιογραφίας αναδείχθηκε μέσω αναλυτικών συγκριτικών αριθμητικών αποτελεσμάτων. Τέλος, σημειώνεται ότι η προτεινόμενη προσέγγιση διευκολύνει τη δημιουργία ενός γενικού πλαισίου, όπου η λήψη αποφάσεων για τη βέλτιστη ισχύ εκπομπής πραγματοποιείται στους ασύρματους χρήστες (στους μακροχρήστες και στους φεμτοχρήστες). Η προοπτική αυτή είναι πλήρως ευθυγραμμισμένη με τις τρέχουσες προσπάθειες για την υλοποίηση «έξυπνων» αυτόνομων χρηστών, όπως οραματίζεται το πρότυπο 3GPP LTE και LTE-Advanced για τα τέταρτης και επόμενης γενιάς ασύρματα δίκτυα.

10 Συνδυαστική Κατανομή Ισχύος Εκπομπής & Ρυθμού Μετάδοσης στη Ζεύξη Ανόδου σε Διεπίπεδα Φεμτοκυψελωτά Δίκτυα με Υποστήριξη Πολλαπλών Υπηρεσιών

Στο παρόν κεφάλαιο της διδακτορικής διατριβής μελετάται το συνδυαστικό πρόβλημα της βέλτιστης κατανομής ισχύος εκπομπής και ρυθμού μετάδοσης στη ζεύξη ανόδου διεπίπεδων φεμτοκυψελωτών δικτύων με την ταυτόχρονη υποστήριξη πολλαπλών υπηρεσιών, με τη χρήση της θεωρίας παιγνίων και των συναρτήσεων χρησιμότητας. Σε κάθε χρήστη αντιστοιχίζεται μία κατάλληλα σχεδιασμένη συνάρτηση χρησιμότητας, η οποία εκφράζει το βαθμό ικανοποίησης του χρήστη από το διαμοιρασμό των πόρων του συστήματος και εξαρτάται από την ισχύ εκπομπής του χρήστη και από το ρυθμό μετάδοσής του. Η συνάρτηση χρησιμότητας του χρήστη διαφοροποιείται ανάλογα με το είδος της υπηρεσίας την οποία αιτείται (δηλαδή υπηρεσίες πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου), αλλά και από το επίπεδο αρχιτεκτονικής του δικτύου στο οποίο ανήκει ο χρήστης (δηλαδή μακροχρήστης ή φεμτοχρήστης). Επιπρόσθετα, καθώς επεξηγήθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο της διδακτορικής διατριβής, στοχεύοντας στην ελαχιστοποίηση των παρεμβολών που προκαλούν οι φεμτοχρήστες εντός της ίδιας κυψέλης, αλλά και ανάμεσα στα διαφορετικά επίπεδα αρχιτεκτονικής του δικτύου, κάθε φεμτοχρήστης κοστολογείται ως προς την ισχύ εκπομπής του με μία κυρτή συνάρτηση κοστολόγησης. Η κοστολόγηση αυτή έχει ως αποτέλεσμα να δίδεται προτεραιότητα στην εξυπηρέτηση των απαιτήσεων σε ποιότητα της υπηρεσίας των μακροχρηστών και βελτιώνεται η προτεινόμενη κατανομή των πόρων του συστήματος από την κοινωνική σκοπιά επίλυσης του προτεινόμενου προβλήματος. Επιπρόσθετα, εξαιτίας της μη συνεργατικής φύσης του προτεινόμενου προβλήματος, το πρόβλημα μοντελοποιείται ως ένα μη συνεργατικό παίγνιο κατανομής ισχύος εκπομπής και ρυθμού μετάδοσης (Utility-based uplink Power and Rate Allocation game in Multi-Service two-tier Femtocell networks - UPRA-MSF) στο οποίο κάθε χρήστης στοχεύει στη μεγιστοποίηση της συνάρτησης χρησιμότητάς του με βάση τους περιορισμούς που θέτει το υλισμικό του. Στη συνέχεια αποδεικνύεται αναλυτικά η ύπαρξη και η μοναδικότητα του σημείου ισορροπίας κατά Nash του UPRA-MSF παιγνίου ως προς την ισχύ εκπομπής και το ρυθμό μετάδοσης. Επιπρόσθετα, προτείνεται ένας επαναληπτικός κατανεμημένος και χαμηλής πολυπλοκότητας αλγόριθμος για τον προσδιορισμό του μοναδικού σημείου

ισορροπίας κατά Nash του UPRA-MSF παιγνίου και η σύγκλισή του αποδεικνύεται αναλυτικά. Τέλος, η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης προσέγγισης αξιολογείται μέσω μοντελοποίησης και αναλυτικών προσομοιώσεων, ενώ η υπεροχή της έναντι των άλλων σχετικών προτεινόμενων προσεγγίσεων στη διεθνή βιβλιογραφία αποδεικνύεται μέσω συγκριτικών αριθμητικών αποτελεσμάτων.

10.1 Σχετική βιβλιογραφία

Αναφορικά με τα διεπίπεδα ασύρματα φεμτοκυψελωτά δίκτυα, οι κύριες ερευνητικές προσπάθειες έχουν επικεντρωθεί στο πρόβλημα της βέλτιστης κατανομής ισχύος εκπομπής, ενώ δεν έχει μελετηθεί το πρόβλημα της συνδυαστικής βέλτιστης κατανομής ισχύος εκπομπής και ρυθμού μετάδοσης και η ταυτόχρονη μελέτη πολλαπλών υπηρεσιών με ποικίλες απαιτήσεις σε ποιότητα της υπηρεσίας. Οι χρήστες οργανώνονται σε δύο κύριες κατηγορίες, τους φεμτοχρήστες και τους μακροχρήστες και σε κάθε χρήστη αντιστοιχίζεται μία γενικευμένη συνάρτηση χρησιμότητας [80]. Επιπρόσθετα, οι φεμτοχρήστες κοστολογούνται με γραμμικά σχήματα κοστολόγησης ως προς την ισχύ εκπομπής τους, με σκοπό τη μείωση των παρεμβολών μεταξύ των διαφορετικών κυψελών, αλλά και των παρεμβολών εντός της ίδιας κυψέλης και την παραχώρηση προτεραιότητας στους μακροχρήστες, οι οποίοι σε αντίθεση με τους φεμτοχρήστες έχουν χειρότερη ποιότητα καναλιού, εξαιτίας της μεγάλης απόστασής τους από το σταθμό βάσης. Στις δημοσιεύσεις [78]-[81] προτείνεται ένας κατανεμημένος αλγόριθμος ρύθμισης του σηματοθορυβικού λόγου με χρήση των συναρτήσεων χρησιμότητας με σκοπό τη μείωση των παρεμβολών που προκαλούνται στη μακροκυψέλη από τις φεμτοκυψέλες που εδρεύουν εντός αυτής. Ο συγκεκριμένος προτεινόμενος αλγόριθμος καταλήγει σε μία σταθερή κατανομή ισχύος εκπομπής στους χρήστες. Επιπλέον, στις δημοσιεύσεις [82], [83], μελετάται το πρόβλημα βέλτιστης κατανομής ισχύος εκπομπής στους μακροχρήστες και στους φεμτοχρήστες, οι οποίοι υιοθετούν την ίδια συνάρτηση χρησιμότητας. Το πρόβλημα μοντελοποιείται ως ένα ενεργειακά αποδοτικό μη συνεργατικό παίγνιο, το οποίο επιλύεται και καταλήγει σε μία εφικτή ενεργειακά αποδοτική και βέλτιστη κατανομή ισχύος εκπομπής στους χρήστες.

Από την άλλη πλευρά, λόγω της ανάγκης υποστήριξης πολλαπλών υπηρεσιών και στοχεύοντας στη μέγιστη αποτελεσματικότητα της κατανομής των πόρων του συστήματος, σημαντικές ερευνητικές προσπάθειες έχουν αφιερωθεί στο συνδυαστικό πρόβλημα της κατανομής ισχύος εκπομπής και ρυθμού μετάδοσης σε μονοεπίπεδα μακροκυψελωτά ασύρματα δίκτυα [57], [68]. Οι βασικές προσεγγίσεις που έχουν προταθεί στην πρόσφατη βιβλιογραφία είναι κυρίως τρεις. Πρώτον, στη δημοσίευση [55], οι συγγραφείς ακολουθούν μια προσέγγιση δύο βημάτων, επιλύοντας σειριακά και ξεχωριστά τα προβλήματα της βέλτιστης κατανομής ισχύος εκπομπής και ρυθμού μετάδοσης. Δεύτερον, το συνδυαστικό

πρόβλημα της βέλτιστης κατανομής ισχύος εκπομπής και ρυθμού μετάδοσης μελετάται ως ένα μονοπαραμετρικό πρόβλημα ως προς το λόγο του ρυθμού μετάδοσης προς την ισχύ εκπομπής [59] και ανανεώνει τις τιμές του ρυθμού μετάδοσης και της ισχύος εκπομπής στο ίδιο βήμα του αλγορίθμου. Τρίτον, στη δημοσίευση [87], το συνδυαστικό πρόβλημα της βέλτιστης κατανομής ισχύος εκπομπής και ρυθμού μετάδοσης αντιμετωπίζεται ως ένα διπαραμετρικό πρόβλημα, στο οποίο οι χρήστες προσδιορίζουν ανεξάρτητα και ταυτόχρονα τις βέλτιστες τιμές της ισχύος εκπομπής και του ρυθμού μετάδοσης.

Η προσέγγιση που παρουσιάζεται στο παρόν κεφάλαιο της διδακτορικής διατριβής προσπαθεί να καλύψει το κενό που υπάρχει στη διεθνή βιβλιογραφία σχετικά με τη συνδυαστική κατανομή ισχύος εκπομπής και ρυθμού μετάδοσης στους χρήστες σε διεπίπεδα φεμτοκυψελωτά δίκτυα.

10.2 Συμβολή & Καινοτομία

Η βασική συμβολή και καινοτομία της προτεινόμενης προσέγγισης στο παρόν κεφάλαιο της διδακτορικής διατριβής συνοψίζεται στα ακόλουθα σημεία:

1. Προτείνεται και εισάγεται μια ολιστική προσέγγιση βέλτιστης κατανομής ισχύος εκπομπής και ρυθμού μετάδοσης με τη χρήση συναρτήσεων χρησιμότητας, με σκοπό την υποστήριξη πολλαπλών υπηρεσιών σε διεπίπεδα ασύρματα φεμτοκυψελωτά δίκτυα. Κάθε χρήστης υιοθετεί μία κατάλληλα σχεδιασμένη συνάρτηση χρησιμότητας, η οποία εκφράζει το βαθμό της ικανοποίησής του σε σχέση με τους πόρους του συστήματος που του έχουν κατανεμηθεί και εξαρτάται από το επίπεδο αρχιτεκτονικής του δικτύου στο οποίο ανήκει ο χρήστης, αλλά και από το είδος της υπηρεσίας που αιτείται.
2. Προτείνεται και λαμβάνεται υπόψη στη συνολική συνάρτηση χρησιμότητας των φεμτοχρηστών μία κυρτή συνάρτηση κοστολόγησης ως προς το σηματοθορυβικό λόγο του φεμτοχρήστη, σε αντίθεση με τις στρατηγικές κοστολόγησης που έχουν προταθεί στη σύγχρονη διεθνή βιβλιογραφία, οι οποίες είναι είτε γραμμικές συναρτήσεις ως προς την ισχύ εκπομπής του χρήστη [22], ή ως προς το σηματοθορυβικό λόγο [41], είτε κυρτές συναρτήσεις ως προς την ισχύ εκπομπής [64]. Το προτεινόμενο σχήμα κοστολόγησης βελτιώνει το κοινωνικό όφελος των χρηστών και μειώνει τις παρεμβολές που προκαλούνται από τους φεμτοχρήστες είτε εντός της ίδιας κυψέλης είτε ανάμεσα σε διαφορετικές κυψέλες.
3. Με βάση τη μη συνεργατική φύση του προτεινόμενου προβλήματος, μοντελοποιείται ένα μη συνεργατικό παίγνιο κατανομής ισχύος και ρυθμού μετάδοσης με την ταυτόχρονη υποστήριξη πολλαπλών υπηρεσιών σε διεπίπεδα ασύρματα φεμτοκυψελωτά δίκτυα (Utility-based uplink Power and Rate Allocation game in Multi-Service two-tier Femtocell networks - UPRa-MSF). Με σκοπό την επίλυση του

προτεινόμενου προβλήματος ως ένα μη συνεργατικό και μη κυρτό παίγνιο με την ταυτόχρονη υιοθέτηση πολλαπλών μορφών ως προς τη συνάρτηση χρησιμότητας ανάλογα με το είδος της υπηρεσίας που αιτείται ο χρήστης και το επίπεδο αρχιτεκτονικής στο οποίο ανήκει, ακολουθείται η προσέγγιση της απόδειξης ότι η συνάρτηση χρησιμότητας είναι μία ημικοίλη συνάρτηση. Με τον τρόπο αυτό εξάγεται η ύπαρξη ενός μοναδικού σημείου ισορροπίας κατά Nash του UPRA-MSF παιγνίου.

4. Προτείνεται ένας επαναληπτικός κατανεμημένος και χαμηλής πολυπλοκότητας αλγόριθμος με σκοπό τον προσδιορισμό του μοναδικού σημείου ισορροπίας κατά Nash του UPRA-MSF παιγνίου και αποδεικνύεται αναλυτικά η σύγκλισή του.
5. Η απόδοση της προτεινόμενης προσέγγισης ποσοτικοποιείται μέσω αναλυτικών αριθμητικών αποτελεσμάτων, ενώ η υπεροχή της σε σχέση με αντίστοιχες ερευνητικές προσπάθειες που έχουν προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία αναδεικνύεται μέσω αναλυτικών συγκριτικών αποτελεσμάτων.

10.3 Μοντέλο Συστήματος & Συναρτήσεις Χρησιμότητας

Στο παρόν κεφάλαιο της διδακτορικής διατριβής μελετάται η ζεύξη ανόδου ενός διεπίπεδου ασύρματου φεμτοκυψελωτού δικτύου με χρήση τεχνολογίας CDMA, το οποίο υποστηρίζει $N(t)$ χρήστες που έχουν συνεχώς δεδομένα να μεταδώσουν ανά κάθε χρονοσχιμή t και με $S(t) = S_{MRT}(t) \cup S_{FRT}(t) \cup S_{MNRT}(t) \cup S_{FNRT}(t)$ συμβολίζεται το αντίστοιχο σύνολο, το οποίο αποτελείται από μακροχρήστες (MUs) και φεμτοχρήστες (FUs), οι οποίοι αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου (RT) με αυστηρούς περιορισμούς ως προς την ελάχιστη απαιτούμενη ποιότητα της υπηρεσίας (δηλαδή $S_{MRT}(t)$ και $S_{FRT}(t)$) και μη πραγματικού χρόνου (NRT) υπηρεσίες (δηλαδή $S_{MNRT}(t)$ και $S_{FNRT}(t)$). Επιπρόσθετα, με $N_{MRT}(t)$, $N_{FRT}(t)$, $N_{MNRT}(t)$ και $N_{FNRT}(t)$ συμβολίζεται το πλήθος των μακροχρηστών και των φεμτοχρηστών που αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου αντίστοιχα. Ωστόσο, σε όλη την υπόλοιπη ανάλυση στο παρόν κεφάλαιο, με σκοπό την απλότητα στην παρουσίαση, παραλείπεται ο συμβολισμός της συγκεκριμένης χρονοσχιμής t .

Επιπλέον, το διεπίπεδο ασύρματο φεμτοκυψελωτό δίκτυο που μελετάται στο παρόν κεφάλαιο της διδακτορικής διατριβής αποτελείται από μία μακροκυψέλη με σταθμό βάσης B_0 , η οποία εξυπηρετεί μία περιοχή \mathfrak{X} και έχει ακτίνα κάλυψης R_0 . Επιπρόσθετα, στοχεύοντας στην κατασκευή της διεπίπεδης αρχιτεκτονικής του δικτύου, εντός της περιοχής κάλυψης \mathfrak{X} της μακροκυψέλης, εδρεύουν F φεμτοκυψέλες, με σταθμό βάσης B_i ($i=1, \dots, F$) η καθεμία. Κάθε φεμτοκυψέλη εξυπηρετεί μία περιοχή $\square \subset \mathfrak{X}$ και αποτελεί ένα δίσκο με ακτίνα κάλυψης $R_c \ll R_0$. Επιπλέον, οι φεμτοκυψέλες θεωρούνται ότι είναι κλειστής πρόσβασης, δηλαδή η εγγραφή των χρηστών στη φεμτοκυψέλη είναι υποχρεωτική, ώστε αυτοί να

εξυπηρετηθούν από το σταθμό βάσης της φεμτοκυψέλης. Για το λόγο αυτό, ο σταθμός βάσης κάθε φεμτοκυψέλης γνωρίζει το ακριβές πλήθος των χρηστών που εξυπηρετούνται από αυτόν και εδρεύουν εντός της φεμτοκυψέλης. Έστω ότι ο χρήστης $j \in S$ συνδέεται στο σταθμό βάσης B_i ($i=0, 1, \dots, F$), τότε η ισχύς εκπομπής του συμβολίζεται με p_j και ο ρυθμός μετάδοσής του με r_j . Εξαιτίας των φυσικών και τεχνικών περιορισμών που θέτει το υλισμικό του κάθε χρήστη, η ισχύς εκπομπής, καθώς επίσης και ο ρυθμός μετάδοσής του είναι άνω και κάτω φραγμένες μεταβλητές, δηλαδή $p_{j \min} \leq p_j \leq p_j^{Max}$ και $r_{j \min} \leq r_j \leq r_j^{Max}$. Επιπλέον, κάθε χρονοσχισμή είναι ένα σταθερό χρονικό διάστημα, στο οποίο μπορούν να μεταδίδονται ένα ή περισσότερα πακέτα δεδομένων. Στην αρχή κάθε χρονοσχισμής, ένας αλγόριθμος συνδυαστικής κατανομής ισχύος εκπομπής και ρυθμού μετάδοσης με την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλαπλών υπηρεσιών σε διεπίπεδα φεμτοκυψελωτά δίκτυα είναι υπεύθυνος για τη λήψη αποφάσεων με έναν κατανεμημένο τρόπο σχετικά με την ισχύ εκπομπής και το ρυθμό μετάδοσης του κάθε χρήστη. Ακόμα γίνεται η υπόθεση ότι το κέρδος των καναλιών των χρηστών, η ισχύς εκπομπής τους, καθώς επίσης και ο ρυθμός μετάδοσής τους παραμένουν σταθερά κατά τη διάρκεια μίας χρονοσχισμής. Ο συνολικός θόρυβος εντός της μακροκυψέλης αναφέρεται ως λευκός προσθετικός Γκαουσιανός θόρυβος (AWGN) με σταθερή φασματική πυκνότητα ισχύος I_0 [22]. Ως εκ τούτου, ο συνολικός θόρυβος που δέχεται ο χρήστης $j \in S$ αποτελείται από τις παρεμβολές που προκαλούν οι υπόλοιποι χρήστες εντός της διεπίπεδης αρχιτεκτονικής και από το λευκό θόρυβο AWGN και δίδεται από την ακόλουθη σχέση.

$$I(\mathbf{p}_j) = \sum_{j' \neq j} G_{ji} P_{j'} + I_0 \quad (103)$$

όπου με $\mathbf{p}_j = (p_1, p_2, \dots, p_{j-1}, p_{j+1}, \dots, p_N)$ και $\mathbf{r}_j = (r_1, r_2, \dots, r_{j-1}, r_{j+1}, \dots, r_N)$ συμβολίζεται η ισχύς εκπομπής και ο ρυθμός μετάδοσης όλων των υπολοίπων χρηστών, εκτός του χρήστη j και με $N = N_{MRT} + N_{FRT} + N_{MNRT} + N_{FNRT}$ συμβολίζεται το συνολικό πλήθος χρηστών που εδρεύουν εντός του διεπίπεδου ασύρματου φεμτοκυψελωτού δικτύου. Το κέρδος του καναλιού του χρήστη j αναφορικά με τον σταθμό βάσης από τον οποίο εξυπηρετείται ο χρήστης $i \neq j$ συμβολίζεται με G_{ji} . Τα κέρδη των καναλιών των χρηστών μοντελοποιούνται κατάλληλα χρησιμοποιώντας την πρόταση IMT-2000 [86].

Ο αντίστοιχος σηματοθορυβικός λόγος γ_j του χρήστη j στο σταθμό βάσης B_i δίδεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\gamma_j(r_j, \mathbf{p}_j, \mathbf{p}_j) = \frac{W}{r_j} \cdot \frac{G_{ji} P_j}{I_0 + \sum_{j' \neq j} G_{ji} P_{j'}} \quad (104)$$

όπου με W [Hz] συμβολίζεται το διαθέσιμο εύρος ζώνης του συστήματος.

10.4 Απαιτήσεις σε ΠτΥ Πολλαπλών Υπηρεσιών & Σχεδιασμός Συναρτήσεων Χρησιμότητας

Με στόχο την υποστήριξη πολλαπλών υπηρεσιών με διαφορετικές απαιτήσεις σε ποιότητα της υπηρεσίας, σε κάθε χρήστη αντιστοιχίζεται μία συνάρτηση χρησιμότητας, η οποία εξαρτάται από δύο βασικούς παράγοντες: (α) το επίπεδο της αρχιτεκτονικής του δικτύου στο οποίο ανήκει ο χρήστης, δηλαδή αν είναι μακροχρήστης ή φεμτοχρήστης και (β) το είδος της υπηρεσίας που αιτείται, δηλαδή υπηρεσία πραγματικού ή μη πραγματικού χρόνου. Επισημαίνεται ότι η έννοια της συνάρτησης χρησιμότητας χρησιμοποιείται συνήθως στην μικροοικονομική θεωρία και αναφέρεται στο επίπεδο της ικανοποίησης που λαμβάνει ο χρήστης ως αποτέλεσμα των ενεργειών του .

Συνήθως, ο χρήστης $j, j \in S$, που εδρεύει εντός του διεπίπεδου φεμτοκυψελωτού (είτε είναι μακροχρήστης είτε φεμτοχρήστης), επιθυμεί υψηλό σηματοθορυβικό λόγο γ_j , με την ταυτόχρονη κατανάλωση χαμηλής ισχύος εκπομπής p_j και τη μετάδοση με υψηλό ρυθμό μετάδοσης r_j . Επιπρόσθετα, ένας χρήστης ο οποίος αιτείται υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου, π.χ. μετάδοση δεδομένων, χαρακτηρίζεται από υψηλές προσδοκίες σε ρυθμό μετάδοσης, ενώ οι απαιτήσεις σε ποιότητα υπηρεσίας ενός χρήστη που αιτείται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, π.χ. φωνής, βίντεο συνομιλίας, χαρακτηρίζονται από αυστηρούς περιορισμούς στην καθυστέρηση και στον κατώτατο επιθυμητό ρυθμό μετάδοσης. Σύμφωνα με τα παραπάνω χαρακτηριστικά των υπηρεσιών που αιτούνται οι χρήστες, μοντελοποιείται μία κατάλληλη συνάρτηση χρησιμότητας, η οποία είναι συνεχής και $C^{(n)}$ φορές παραγωγίσιμη ως προς την ισχύ εκπομπής p_j και το ρυθμό μετάδοσης r_j και ο τύπος της εξαρτάται από το επίπεδο αρχιτεκτονικής του δικτύου στο οποίο ανήκει ο χρήστης και από το είδος της υπηρεσίας που αιτείται.

$$U_j(p_j, r_j, p_j, r_j) = \begin{cases} \frac{r_j f_j(\gamma_j)}{p_j}, j \in S_{MRT} \\ \frac{r_j \log(1 + \gamma_j)}{p_j}, j \in S_{MNRT} \\ \frac{r_j f_j(\gamma_j)}{p_j} - c(e^{\gamma_j} - 1), j \in S_{FRT} \\ \frac{r_j \log(1 + \gamma_j)}{p_j} - c(e^{\gamma_j} - 1), j \in S_{FNRT} \end{cases} \quad (105)$$

όπου με $f_j(\gamma_j)$ συμβολίζεται η συνάρτηση απόδοσης του χρήστη $j, j \in S_{MRT} \cup S_{FRT}$ και με c ο συντελεστής κοστολόγησης. Καθώς έχει αναλυθεί και σε προηγούμενα κεφάλαια της διδακτορικής διατριβής, η συνάρτηση απόδοσης αντιπροσωπεύει την πιθανότητα επιτυχούς μετάδοσης ενός πακέτου δεδομένων για το χρήστη j και είναι μια γνησίως αύξουσα συνάρτηση ως προς το σηματοθορυβικό λόγο γ_j . Η συνάρτηση απόδοσης κάθε χρήστη

εξαρτάται από τα σχήματα μετάδοσης που χρησιμοποιεί, δηλαδή από τα σχήματα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης και μπορεί να παρασταθεί ως μία γνησίως αύξουσα σιγμοειδής συνάρτηση ως προς την ισχύ εκπομπής του χρήστη [1]. Ένας κλασικός τύπος που χρησιμοποιείται στη διεθνή βιβλιογραφία για τη συνάρτηση απόδοσης είναι ο ακόλουθος:

$$f_j(\gamma_j) = (1 - e^{-A\gamma_j})^M \quad (106)$$

όπου A, M είναι θετικές σταθερές ($A=0.5, M=80$ [22]).

Επιπρόσθετα, καθώς παρατηρείται από τη σχέση (105), προτείνεται μία κυρτή συνάρτηση κοστολόγησης ως προς το σηματοθορυβικό λόγο των φεμτοχρηστών γ_j , εξαιτίας της βασικής παρατήρησης ότι οι επιπτώσεις που προκαλεί ένας χρήστης στους υπόλοιπους χρήστες δεν είναι ισοδύναμες σε όλο το πεδίο τιμών του σηματοθορυβικού λόγου, όπως ισχυρίζονται τα γραμμικά σχήματα κοστολόγησης [22], [41]. Ο ρόλος του μηχανισμού κοστολόγησης είναι να αποθαρρύνει τους φεμτοχρήστες να προκαλούν μείωση του σηματοθορυβικού λόγου των μακροχρηστών, μεταδίδοντας με υψηλές τιμές της ισχύος εκπομπής και αντίστοιχα λαμβάνοντας υψηλές τιμές του σηματοθορυβικού λόγου. Με τον τρόπο αυτό δίδεται η δυνατότητα στο σύστημα να δώσει υψηλή προτεραιότητα στην ικανοποίηση των απαιτήσεων σε ποιότητα της υπηρεσίας των μακροχρηστών.

Επιπλέον, όπως παρατηρείται από τη σχέση (105), οι χρήστες που εδρεύουν εντός του διεπίπεδου ασύρματου φεμτοκυψελωτού δικτύου οργανώνονται σε τέσσερις βασικές κλάσεις/ομάδες με βάση το είδος της υπηρεσίας που αιτούνται, δηλαδή υπηρεσία πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου και με βάση το επίπεδο της αρχιτεκτονικής του δικτύου στο οποίο ανήκουν, δηλαδή μακροχρήστες ή φεμτοχρήστες. Σε κάθε κλάση χρηστών αντιστοιχίζεται μία διαφορετική συνάρτηση χρησιμότητας. Αναφορικά με τους χρήστες που αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, η συνάρτηση χρησιμότητάς τους αντιπροσωπεύει τη συσχέτιση που υπάρχει ανάμεσα στο πλήθος των επιτυχώς μεταδιδόμενων *bits* στο σταθμό βάσης, δηλαδή $r_j \cdot f_j(\gamma_j)$ ως προς την αντίστοιχη κατανάλωση ισχύος εκπομπής p_j . Στην προτεινόμενη προσέγγιση, η ιδανική τιμή του ρυθμού μετάδοσης ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις του χρήστη σε ποιότητα της υπηρεσίας αντιστοιχίζεται στο σημείο καμπής της σιγμοειδούς συνάρτησης ως προς το σηματοθορυβικό λόγο $r_j \cdot f_j(\gamma_j)$. Ο προτεινόμενος σχεδιασμός της συνάρτησης χρησιμότητας των χρηστών που αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα να δηλώσει την προτεραιότητά του στην κατοχή πρόσθετων πόρων του συστήματος, στην περίπτωση όπου ο ρυθμός μετάδοσής του αντιστοιχεί σε τιμή σηματοθορυβικού λόγου μικρότερη από αυτή στο σημείο καμπής της συνάρτησης $r_j \cdot f_j(\gamma_j)$. Για το λόγο αυτό η συνάρτηση χρησιμότητας φθίνει γρήγορα για τιμές του σηματοθορυβικού λόγου μικρότερες από αυτής στο σημείο καμπής της συνάρτησης επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης $r_j \cdot f_j(\gamma_j)$. Επιπλέον, αναφορικά με τους χρήστες που

αιτούνται υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου, η συνάρτηση χρησιμότητάς τους σχεδιάζεται με τη χρήση της φόρμουλας του Shannon και με τον τρόπο αυτό αντικατοπτρίζεται στη συνάρτηση χρησιμότητας η άπληστη συμπεριφορά των χρηστών που αιτούνται υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου για την επίτευξη ολοένα και υψηλότερου ρυθμού μετάδοσης.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι ο στόχος κάθε χρήστη είναι να ελέγξει και να ρυθμίσει την ισχύ εκπομπής του και το ρυθμό μετάδοσής του μέσω ενός κατανεμημένου τρόπου με στόχο να μεγιστοποιήσει τη λαμβανόμενη ικανοποίησή του από το διαμοιρασμό των πόρων του συστήματος (δηλαδή να μεγιστοποιήσει τη συνάρτηση χρησιμότητάς του) ανεξάρτητα από το επίπεδο του δικτύου στο οποίο ανήκει, αλλά και από το είδος της υπηρεσίας την οποία αιτείται. Στην επόμενη ενότητα, μοντελοποιείται και προτείνεται ένα μη συνεργατικό παίγνιο κατανομής ισχύος εκπομπής και ρυθμού μετάδοσης στη ζεύξη ανόδου διεπίπεδων ασύρματων φεμτοκυβελωτών δικτύων με την ταυτόχρονη υποστήριξη πολλαπλών υπηρεσιών, με σκοπό τη μεγιστοποίηση της συνάρτησης χρησιμότητας κάθε χρήστη με έναν κατανεμημένο τρόπο.

10.5 Μη Συνεργατικό Παίγνιο Συνδυαστικής Κατανομής

Ισχύος Εκπομπής & Ρυθμού Μετάδοσης στη Ζεύξη

Ανόδου σε Διεπίπεδα Φεμτοκυβελωτά Δίκτυα με

Υποστήριξη Πολλαπλών Υπηρεσιών

10.5.1 Μοντελοποίηση Προβλήματος

Στην προτεινόμενη προσέγγιση στο παρόν κεφάλαιο της διδακτορικής διατριβής μοντελοποιείται το μη συνεργατικό παίγνιο συνδυαστικής κατανομής ισχύος εκπομπής και ρυθμού μετάδοσης σε διεπίπεδα ασύρματα φεμτοκυβελωτά δίκτυα με την ταυτόχρονη υποστήριξη πολλαπλών υπηρεσιών. Το παίγνιο συνίσταται από δύο μεταβλητές: την ισχύ εκπομπής p_j και το ρυθμό μετάδοσης r_j , οι τιμές των οποίων πρέπει να βελτιστοποιηθούν με σκοπό τη μεγιστοποίηση της συνάρτησης χρησιμότητας των χρηστών. Για το λόγο αυτό, στην αρχή της κάθε χρονοσχισμής ένας κατανεμημένος αλγόριθμος συνδυαστικής κατανομής ισχύος εκπομπής και ρυθμού μετάδοσης (UPRA-MSF αλγόριθμος) είναι υπεύθυνος για τον προσδιορισμό της βέλτιστης τιμής της ισχύος εκπομπής p_j και του ρυθμού μετάδοσης r_j , οι τιμές των οποίων προσδιορίζονται από τη μεγιστοποίηση της συνάρτησης χρησιμότητας κάθε χρήστη. Σε αυτή την ενότητα, παρουσιάζονται, αναλύονται και ορίζονται οι βασικοί στόχοι του UPRA-MSF παιγνίου. Το UPRA-MSF ορίζεται ως $G = [S, \{P_j, R_j\}, \{U_j(p_j, r_j)\}]$, όπου με $S = \{1, 2, \dots, N\}$ συμβολίζεται το σύνολο των μακροχρηστών και των φεμτοχρηστών που

εδρεύουν εντός του διεπίπεδου φεμτοκυψελωτού δικτύου, με $P_j = [p_{j\min}, p_j^{Max}]$ και $R_j = [r_{j\min}, r_j^{Max}]$ τα σύνολα των στρατηγικών του χρήστη j ως προς την ισχύ εκπομπής και το ρυθμό μετάδοσης αντίστοιχα, τα οποία ορίζουν ένα καρτεσιανό γινόμενο $A_j = P_j \times R_j$ και με U_j συμβολίζεται η συνάρτηση χρησιμότητας κάθε χρήστη, όπως αυτή ορίστηκε στη σχέση (105). Το UPRA-MSF παίγνιο ορίζεται ως ένα κατανεμημένο πρόβλημα μεγιστοποίησης της συνάρτησης χρησιμότητας των χρηστών, στο οποίο κάθε χρήστης ανανεώνει την ισχύ εκπομπής και το ρυθμό μετάδοσής του με έναν αυτόνομο τρόπο, με σκοπό τη μεγιστοποίηση της συνάρτησης χρησιμότητάς του. Το αποτέλεσμα του παιγνίου είναι τα διανύσματα ισχύος εκπομπής $\mathbf{p}^* = (p_1^*, p_2^*, \dots, p_N^*)^T \in P = P_1 \times P_2 \times \dots \times P_N$ και ρυθμού μετάδοσης $\mathbf{r}^* = (r_1^*, r_2^*, \dots, r_N^*)^T \in R = R_1 \times R_2 \times \dots \times R_N$ όλων των χρηστών.

(UPRA-MSF παίγνιο)

$$\begin{aligned} & \max_{(p_j, r_j) \in A_j} U_j(p_j, r_j, \mathbf{p}_{-j}, \mathbf{r}_{-j}), \\ & \text{s.t. } p_{j\min} \leq p_j \leq p_j^{Max}, \quad r_{j\min} \leq r_j \leq r_j^{Max} \end{aligned} \quad (107)$$

Το βασικό χαρακτηριστικό του UPRA-MSF μη συνεργατικού παιγνίου είναι η ταυτόχρονη και συγχρονισμένη βελτιστοποίηση της συνάρτησης χρησιμότητας του κάθε χρήστη, όχι μόνο ως προς την ισχύ εκπομπής p_j , αλλά και ως προς το ρυθμό μετάδοσης r_j . Τονίζεται ότι η συνάρτηση χρησιμότητας κάθε χρήστη εξαρτάται από δύο μεταβλητές: p_j και r_j . Επιπρόσθετα, η ύπαρξη ενός σημείου ισοροπίας για το UPRA-MSF παίγνιο ανεξάρτητα ως προς την ισχύ εκπομπής ή το ρυθμό μετάδοσης, δεν εγγυάται την ύπαρξη ενός σημείου ισοροπίας και ως προς τις δύο μεταβλητές. Για το λόγο αυτό, στοχεύοντας στην επίλυση του UPRA-MSF παιγνίου με μία μεταβλητή, αντικαθίσταται ο λόγος του ρυθμού μετάδοσης r_j προς την ισχύ εκπομπής p_j , με μία νέα μεταβλητή, η οποία ορίζεται ως ακολούθως:

$$x_j = \frac{r_j}{p_j} \quad (108)$$

Συνεπώς, οι συναρτήσεις χρησιμότητας που παρουσιάστηκαν στη σχέση (105) μπορούν να γραφθούν εκ νέου με τη χρήση της μεταβλητής x_j ως ακολούθως:

$$v_j(x_j) = \begin{cases} x_j \left(1 - e^{-\frac{A_j d_j}{x_j}} \right)^M, & j \in S_{MRT} \\ x_j \frac{\ln \left(1 + \frac{d_j}{x_j} \right)}{\ln 10}, & j \in S_{MNRT} \\ x_j \left(1 - e^{-\frac{A_j d_j}{x_j}} \right)^M - c \left(e^{\frac{d_j}{x_j}} - 1 \right), & j \in S_{FRT} \\ x_j \frac{\ln \left(1 + \frac{d_j}{x_j} \right)}{\ln 10} - c \left(e^{\frac{d_j}{x_j}} - 1 \right), & j \in S_{FNRT} \end{cases} \quad (109)$$

όπου $\gamma_j = \frac{1}{x_j} \cdot \frac{WG_{jl}}{I} = \frac{d_j}{x_j}$ και $d_j = \frac{WG_{jl}}{I}$. Συνεπώς, το UPRA-MSF παίγνιο, όπως αυτό παρουσιάστηκε στη σχέση (107), μπορεί να επαναδιατυπωθεί ως ένα παίγνιο με μία μεταβλητή (Single variable Utility-based uplink Power and Rate Allocation game in Multi-Service two-tier Femtocell networks - S-UPRA-MSF game). Το S-UPRA-MSF παίγνιο με τη μία ελεύθερη μεταβλητή $G_S = [S, \{A_j\}, \{v_j(x_j)\}]$ μπορεί να μοντελοποιηθεί ως ακολούθως:

(S-UPRA-MSF παίγνιο)

$$\begin{aligned} \max_{x_j = \frac{r_j}{p_j} \in A_j} v_j(x_j = \frac{r_j}{p_j}), \\ \text{s.t. } p_{j \min} \leq p_j \leq p_j^{Max}, \quad r_{j \min} \leq r_j \leq r_j^{Max} \end{aligned} \quad (110)$$

Στην επόμενη ενότητα χρησιμοποιείται η θεωρία παιγνίων κατά Nash με σκοπό την αναλυτική εξεύρεση του σημείου ισορροπίας του υπό μελέτη S-UPRA-MSF παιγνίου.

10.5.2 Σημείο Ισορροπίας κατά Nash του S-UPRA-MSF Παιγνίου

Η έννοια του σημείου ισορροπίας κατά Nash είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος για την αντιμετώπιση και επίλυση ενός μη συνεργατικού παιγνίου. Το βασικό χαρακτηριστικό του σημείου ισορροπίας κατά Nash είναι ότι αποτελεί μια προβλέψιμη, σταθερή και προσδιορίσιμη λύση του μη συνεργατικού παιγνίου, στο οποίο διαφορετικές κλάσεις χρηστών με πιθανώς αντικρουόμενα και αντιφατικά συμφέροντα ανταγωνίζονται μεταξύ τους και εν τέλει καταλήγουν σε ένα σημείο ισορροπίας από το οποίο κανένας χρήστης/παίκτης δεν επιθυμεί να αποκλίνει. Πιο συγκεκριμένα, στο σημείο ισορροπίας κατά Nash κανένας χρήστης δεν έχει το κίνητρο να αλλάξει το λόγο του ρυθμού μετάδοσης προς την ισχύ εκπομπής του, διότι η συνάρτηση χρησιμότητάς του δεν μπορεί περαιτέρω να βελτιωθεί με προσωπικές και αυτόνομες αλλαγές στην στρατηγική του, δεδομένων των στρατηγικών των υπολοίπων χρηστών, δηλαδή της ισχύος εκπομπής p_j , του ρυθμού μετάδοσης r_j και του λόγου $x_j = \frac{r_j}{p_j}$ όλων των υπολοίπων χρηστών.

Ορισμός 15: Το διάνυσμα $\mathbf{x}^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_N^*)$, όπου $x_j = \frac{r_j}{p_j}$, είναι ένα σημείο ισορροπίας κατά Nash του S-UPRA-MSF παιγνίου, εάν για κάθε χρήστη $j \in S = \{1, 2, \dots, N\}$, ισχύει $v_j(x_j^*, p_j^*, r_j^*) \geq v_j(x_j, p_j^*, r_j^*)$.

Με βάση τον παραπάνω ορισμό, παρατηρείται ότι κανένας χρήστης δεν μπορεί να βελτιώσει την προσωπική του συνάρτηση χρησιμότητας μεταβάλλοντας μεμονωμένα τη στρατηγική του, x_j , με δεδομένες τις στρατηγικές των υπόλοιπων χρηστών, $x_j = \frac{r_j}{p_j}$.

Επιπλέον, πρέπει να τονισθεί ότι, λόγω της εγωιστικής συμπεριφοράς των χρηστών, σε γενικές γραμμές ένα μη συνεργατικό παίγνιο δεν έχει πάντοτε και αναγκαστικά σημείο ισορροπίας κατά Nash, επειδή είναι πιθανό ότι οι χρήστες δεν θα συμφωνήσουν και συμβιβαστούν με ένα σταθερό αποτέλεσμα. Ωστόσο, η απουσία ενός σημείου ισορροπίας κατά Nash μεταφράζεται σε ένα εγγενώς ασταθές σύστημα. Για το λόγο αυτό, ένα από τα πιο σημαντικά στοιχεία της προτεινόμενης προσέγγισης είναι η διερεύνηση και η απόδειξη της ύπαρξης σημείου ισορροπίας κατά Nash για το S-UPRA-MSF παίγνιο και αντίστοιχα για το UPRA-MSF παίγνιο.

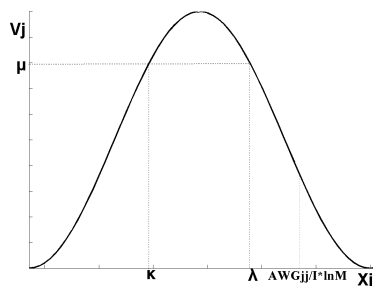
Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν προταθεί διάφορες αναλυτικές μέθοδοι για την εξέταση της ύπαρξης του σημείου ισορροπίας κατά Nash σε ένα μη συνεργατικό παίγνιο, όπως τα supermodular παίγνια [22], η προσέγγιση της ημικοίλης συνάρτησης χρησιμότητας [59], το Extreme Value Θεώρημα, σε συνδυασμό με τον Εσσιανό πίνακα της αντικειμενικής συνάρτησης [64] κλπ. Στην προτεινόμενη προσέγγιση, θα χρησιμοποιηθεί η ιδιότητα της ημικοίλης συνάρτησης χρησιμότητας με στόχο την απόδειξη της ύπαρξης και της μοναδικότητας του σημείου ισορροπίας κατά Nash του S-UPRA-MSF παιγνίου.

Ορισμός 16 [88]: Η συνάρτηση v_j είναι γνησίως ημικοίλη αν και μόνο αν για κάθε ζεύγος διαφορετικών τιμών x_j και x'_j από το κυρτό πεδίο ορισμού $A_j = P_j \times R_j$ της v_j και για $0 < \theta < 1$ ισχύει

$$v_j(x'_j) > v_j(x_j) \Rightarrow v_j[\theta x_j + (1-\theta)x'_j] > v_j(x_j)$$



Σχήμα 54 Μορφή της συνάρτησης χρησιμότητας του χρήστη j : (a) $j \in S_{MNRT} \cup S_{FNRT}$, (b) $j \in S_{MRT}$, όπου η μορφή της συνάρτησης χρησιμότητας του χρήστη $j \in S_{FRT}$ μπορεί να είναι είτε της μορφής (a) είτε (b), ανάλογα με την τιμή της παραμέτρου $d_j = \frac{WG_{jj}}{I}$.



Σχήμα 55 Ημικοίλη συνάρτηση $v_j(x_j)$.

Επιπρόσθετα, καθώς εξάγεται εύκολα από τον παραπάνω ορισμό, κάθε κοίλη συνάρτηση είναι ημικοίλη, αλλά το αντίστροφο δεν ισχύει σε κάθε περίπτωση.

Ορισμός 17 [88]: Δεδομένου ότι η συνάρτηση $v_j : A_j \subseteq \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ είναι διπλά παραγωγίσιμη $C^{(2)}$

ως προς $x_j \in A_j$, δηλαδή η συνάρτηση $\frac{\partial^2 v_j}{\partial x_j^2}$ υπάρχει και είναι συνεχής, τότε η συνάρτηση v_j

είναι κοίλη, αν και μόνο αν ισχύει $\frac{\partial^2 v_j}{\partial x_j^2} \leq 0$ για κάθε $x_j \in A_j$.

Με βάση τον παραπάνω ορισμό, αρχικά επιχειρείται η απόδειξη ότι η συνάρτηση v_j κάθε χρήστη j , $j \in S = \{1, 2, \dots, N\}$ είναι κοίλη ως προς $x_j \in A_j$, ώστε να εξασφαλιστεί η ύπαρξη και η μοναδικότητα ενός σημείου ισορροπίας κατά Nash του S-UPRA-MSF παιγνίου. Συνεπώς, αρχικά γίνεται η μελέτη της μορφής των τεσσάρων διαφορετικών συναρτήσεων χρησιμότητας των χρηστών, ανάλογα με την κλάση στην οποία ανήκει ο καθένας. Πιο αναλυτικά, στο σχήμα 54 παρουσιάζεται η μορφή των συναρτήσεων χρησιμότητας v_j ως προς το λόγο x_j .

Θεώρημα 13: Η συνάρτηση χρησιμότητας του χρήστη j , $j \in S = \{1, 2, \dots, N\}$ είναι ημικοίλη στο τροποποιημένο πεδίο ορισμού των στρατηγικών:

$$\gamma_j > \frac{\ln M}{A} \text{ ή ισοδύναμα } 0 < x_j < \frac{AWG_{jj}}{I \ln M}$$

Απόδειξη: Με βάση τον ορισμό 17, ο στόχος είναι να αποδειχθεί ότι η συνάρτηση χρησιμότητας v_j κάθε χρήστη j , $j \in S = \{1, 2, \dots, N\}$, όπως αυτή ορίστηκε στη σχέση (109), για τις τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις είναι ημικοίλη στο τροποποιημένο πεδίο ορισμού των στρατηγικών. Για το λόγο αυτό, η συνάρτηση χρησιμότητας v_j πρέπει να υπακούει την ακόλουθη συνθήκη σε συγκεκριμένο διάστημα του πεδίου ορισμού, ώστε να είναι κοίλη συνάρτηση.

$$\frac{\partial^2 v_j}{\partial x_j^2} \leq 0 \tag{111}$$

Στη συνέχεια έχουν εξεταστεί ξεχωριστά οι τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις για τη συνάρτηση χρησιμότητας και προσδιορίζεται το πεδίο τιμών του σηματοθορυβικού λόγου όπου η σχέση (111) ικανοποιείται. Πιο αναλυτικά, προκύπτουν τα ακόλουθα πεδία τιμών του σηματοθορυβικού λόγου:

- Μακροχρήστες με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου:

$$\frac{\partial^2 v_j}{\partial x_j^2} \leq 0 \Leftrightarrow \gamma_j > \frac{\ln M}{A} \tag{112}$$

- Μακροχρήστες με υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου:

$$\frac{\partial^2 v_j}{\partial x_j^2} \leq 0 \Leftrightarrow \gamma_j > 0 \quad (113)$$

- Φεμτοχρήστες με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου:

$$\frac{\partial^2 v_j}{\partial x_j^2} \leq 0 \Leftrightarrow \gamma_j > \frac{\ln M}{A} \quad (114)$$

- Φεμτοχρήστες με υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου:

$$\frac{\partial^2 v_j}{\partial x_j^2} \leq 0 \Leftrightarrow \gamma_j > 0 \quad (115)$$

Με σκοπό την ολοκλήρωση της απόδειξης, γίνεται συνδυασμός των ανισώσεων που προέκυψαν από τις σχέσεις (112)-(115) και προσδιορίζεται το πεδίο τιμών του σηματοθορυβικού λόγου γ_j και κατά αντιστοιχία το πεδίο τιμών του x_j , στο οποίο η συνθήκη της δεύτερης παραγώγου $\frac{\partial^2 v_j}{\partial x_j^2} \leq 0$ ικανοποιείται ταυτόχρονα για τις τέσσερις διαφορετικές εκδοχές της συνάρτησης χρησιμότητας. Συνεπώς, εξάγεται το συμπέρασμα ότι και οι τέσσερις συναρτήσεις χρησιμότητας είναι κοίλες ως προς x_j στο πεδίο τιμών $\gamma_j > \frac{\ln M}{A}$ και δεδομένου ότι ισχύει $\gamma_j = \frac{1}{x_j} \cdot \frac{WG_{ij}}{I}$, προκύπτει το αντίστοιχο πεδίο τιμών $x_j < \frac{AWG_{ij}}{I \ln M}$. ■

Το ακόλουθο θεώρημα διατυπώνεται με βάση την προηγούμενη ανάλυση.

Θεώρημα 14: Στο S-UPRA-MSF παίγνιο $G_S = [S, \{A_j\}, \{v_j(x_j)\}]$ υπάρχει ένα μοναδικό σημείο ισορροπίας κατά Nash εάν για όλους τους χρήστες $j \in S = \{1, 2, \dots, N\}$ ισχύει:

1. A_j είναι ένα μη κενό κυρτό και συμπαγές υποσύνολο του Ευκλείδειου χώρου \square^N .
2. $v_j(\mathbf{x})$ είναι συνεχής στο \mathbf{x} και ημικοίλη στο x_j .

Απόδειξη: Κάθε χρήστης έχει ένα πεδίο στρατηγικών A_j το οποίο ορίζεται από μία ελάχιστη τιμή $x_{j \min} = \frac{r_{j \min}}{p_j^{MAX}}$, μία μέγιστη τιμή $x_j^{MAX} = \frac{r_j^{MAX}}{p_{j \min}}$, όπου $r_{j \min}, p_{j \min} > 0$ και από όλες τις ενδιάμεσες τιμές. Επιπλέον, γίνεται η θεώρηση ότι η μέγιστη τιμή x_j^{MAX} είναι μεγαλύτερη ή ίση της ελάχιστης τιμής $x_{j \min}$, δηλαδή ισχύει $x_j^{MAX} > x_{j \min}$. Συνεπώς, με βάση την παρατήρηση αυτή, η πρώτη συνθήκη που αναφέρθηκε προηγουμένως ισχύει. Η ισχύς της δεύτερης συνθήκης πηγάζει από το θεώρημα 13, όπου έχει αποδειχθεί ότι η συνάρτηση v_j είναι κοίλη στο πεδίο τιμών $x_j \in \left(0, \frac{AWG_{ij}}{I \ln M}\right) \subseteq A_j, \forall j \in S$ και συνεπώς είναι ημικοίλη στο συγκεκριμένο πεδίο τιμών. Επιπρόσθετα, η συνάρτηση χρησιμότητας v_j είναι συνεχής στο \mathbf{x} , ως σύνθεση

συνεχών συναρτήσεων. Με σκοπό την ολοκλήρωση της συγκεκριμένης απόδειξης αναφέρεται ότι η ημικοίλη συνάρτηση χρησιμότητας v_j έχει μοναδικό σημείο ολικού μεγίστου στο πεδίο τιμών $x_j \in A_j, \forall j \in S$ του S-UPRA-MSF παίγνιου. Το μοναδικό σημείο μεγίστου αναφέρεται ως βέλτιστη στρατηγική, συμβολίζεται ως BR_j και ορίζεται ως ακολούθως:

$$BR_j = \{x_j \in A_j : v_j(x_j, \mathbf{x}_{-j}) \geq v_j(x'_j, \mathbf{x}_{-j}), \forall x'_j \in A_j\} \quad (116) \blacksquare$$

Στην ανάλυση που ακολουθεί θα αποδειχθεί με βάση την ανάλυση που έχει προταθεί στη δημοσίευση [59] ότι και η συνάρτηση χρησιμότητας $U_j(p_j, r_j)$ είναι επίσης ημικοίλη στο πεδίο τιμών (p_j, r_j) και ότι το UPRA-MSF παίγνιο έχει μοναδικό σημείο ισορροπίας κατά Nash στο πεδίο στρατηγικών $\{P_j, R_j\}$. Με βάση το θεώρημα 13, η τροποποιημένη συνάρτηση χρησιμότητας v_j είναι ημικοίλη ως προς x_j στο πεδίο τιμών $x_j \in \left(0, \frac{AWG_{j\bar{j}}}{I \ln M}\right)$. Συνεπώς, τα πεδία τιμών της μορφής $\left\{x_j \in \left(0, \frac{AWG_{j\bar{j}}}{I \ln M}\right) \middle| v_j(x_j) \geq \mu\right\}$ είναι υπονήφια πεδία τιμών, στα οποία η τροποποιημένη συνάρτηση χρησιμότητας v_j είναι ημικοίλη (Σχήμα 55).

Επίπροσθετα, για κάθε τιμή $\mu \in \square$ και για κάθε διάνυσμα $\mathbf{p}_{-j} \in P_{-j} = P_1 \times \dots \times P_{j-1} \times P_{j+1} \times \dots \times P_N$ και $\mathbf{r}_{-j} \in R_{-j} = R_1 \times \dots \times R_{j-1} \times R_{j+1} \times \dots \times R_N$, ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις:

$$\begin{aligned} & \left\{x_j \in \left(0, \frac{AWG_{j\bar{j}}}{I \ln M}\right) \middle| v_j(x_j) \geq \mu\right\} = \\ & \left\{(p_j, r_j) \in [p_{j\min}, p_j^{MAX}] \times [r_{j\min}, r_j^{MAX}] \middle| v_j\left(\frac{r_j}{p_j}, \mathbf{p}_{-j}, \mathbf{r}_{-j}\right) \geq \mu\right\} = \\ & \left\{(p_j, r_j) \in [p_{j\min}, p_j^{MAX}] \times [r_{j\min}, r_j^{MAX}] \middle| U_j(r_j, p_j, \mathbf{p}_{-j}, \mathbf{r}_{-j}) \geq \mu\right\} \end{aligned}$$

Επιπρόσθετα, δεδομένου του πεδίου τιμών στο οποίο η τροποποιημένη συνάρτηση χρησιμότητας v_j είναι ημικοίλη ως προς x_j , δηλαδή $x_j \in \left(0, \frac{AWG_{j\bar{j}}}{I \ln M}\right) \subseteq A_j, \forall j \in S$, καθώς παρατηρείται από το σχήμα 55, προκύπτει η ακόλουθη σχέση:

$$\left\{x_j \in \left(0, \frac{AWG_{j\bar{j}}}{I \ln M}\right) \middle| v_j(x_j) \geq \mu\right\} = [\kappa, \lambda]$$

Συνεπώς, ορίζεται το αντίστοιχο πεδίο τιμών στο \square^2 .

$$\begin{aligned} & \left\{(p_j, r_j) \in [p_{j\min}, p_j^{MAX}] \times [r_{j\min}, r_j^{MAX}] \middle| v_j\left(\frac{r_j}{p_j}, \mathbf{p}_{-j}, \mathbf{r}_{-j}\right) \geq \mu\right\} = \\ & \left\{(p_j, r_j) \in [p_{j\min}, p_j^{MAX}] \times [r_{j\min}, r_j^{MAX}] \middle| \kappa p_j \leq r_j \leq \lambda p_j\right\} \end{aligned} \quad (117)$$

Με βάση τις σχέσεις (105), (117) και τον ορισμό 16, εξάγεται ότι η συνάρτηση U_j είναι ημικοίλη στο (p_j, r_j) . Συνεπώς, ακολουθώντας την ίδια λογική με το θεώρημα 14 για τη συνάρτηση χρησιμότητας $U_j(p_j, r_j)$, εξάγεται ότι το UPRA-MSF παίγνιο

$G = [S, \{P_j, R_j\}, \{U_j(p_j, r_j)\}]$ εμφανίζει σημείο ισορροπίας κατά Nash (p^*, r^*) . Άρα, για κάθε χρήστη $j \in S$ ισχύει,

$$U_j(r_j, p_j, p_j^*, r_j^*) \leq U_j(p^*, r^*), \forall (p_j, r_j) \in A_j = P_j \times R_j \quad (118)$$

Στη συνέχεια ορίζεται η τιμή $l = \min\left(\frac{r_j^{MAX}}{p_j^{min}}, \frac{AWG_{jj}}{I \ln M}\right)$. Συνεπώς, προκύπτουν δύο βασικές περιπτώσεις για τις τιμές p_j^{MAX} , r_j^{MAX} και l .

$$\text{Περίπτωση Α: } \frac{r_j^{MAX}}{p_j^{MAX}} < l, \text{ Περίπτωση Β: } \frac{r_j^{MAX}}{p_j^{MAX}} > l$$

Έπειτα, αποδεικνύεται ότι υπάρχει $(p'_j, r'_j) \in [p_j^{min}, p_j^{MAX}] \times [r_j^{min}, r_j^{MAX}]$ τέτοιο ώστε $x_j = \frac{r'_j}{p'_j}$, για κάθε μία από τις υπό μελέτη περιπτώσεις.

Αναφορικά με την περίπτωση Α προκύπτουν δύο υποπεριπτώσεις:

–Περίπτωση Α1: $x_j \in \left[\frac{r_j^{min}}{p_j^{MAX}}, \frac{r_j^{MAX}}{p_j^{MAX}}\right]$. Θεωρείται ότι $p'_j = p_j^{MAX}$ και $r'_j = x_j p_j^{MAX}$. Επιπλέον, ο ρυθμός μετάδοσης r'_j είναι κάτω και άνω φραγμένος, δεδομένου ότι ισχύει: $r'_j \geq \frac{r_j^{min}}{p_j^{MAX}} p_j^{MAX} = r_j^{min}$ και $r'_j \leq \frac{r_j^{MAX}}{p_j^{MAX}} p_j^{MAX} = r_j^{MAX}$.

–Περίπτωση Α2: $x_j \in \left[\frac{r_j^{MAX}}{p_j^{MAX}}, l\right]$. Θεωρείται ότι $r'_j = r_j^{MAX}$ και $p'_j = \frac{r_j^{MAX}}{x_j}$. Επιπλέον, η ισχύς εκπομπής p'_j είναι κάτω και άνω φραγμένη, δεδομένου ότι ισχύει: $p'_j \geq \frac{r_j^{MAX}}{p_j^{MAX}} = p_j^{min}$ και $p'_j \leq r_j^{MAX} l \leq p_j^{MAX}$.

Περίπτωση Β: $\frac{r_j^{MAX}}{p_j^{MAX}} > l$. Στην περίπτωση αυτή, το διάστημα του x_j στο οποίο η τροποποιημένη συνάρτηση χρησιμότητας v_j είναι ημικοίλη είναι το $x_j \in (0, l) \subseteq \left(0, \frac{r_j^{MAX}}{p_j^{MAX}}\right)$. Συνεπώς, θεωρείται ότι $p'_j = p_j^{MAX}$ και $r'_j = x_j p_j^{MAX}$. Άρα ο ρυθμός μετάδοσης r'_j είναι κάτω και άνω φραγμένος, δεδομένου ότι ισχύει: $r'_j \geq \frac{r_j^{min}}{p_j^{MAX}} p_j^{MAX} = r_j^{min}$ και $r'_j \leq \frac{r_j^{MAX}}{p_j^{MAX}} p_j^{MAX} = r_j^{MAX}$.

Συνεπώς, προκύπτει από τη σχέση (118) ότι για καθεμία από τις περιπτώσεις που παρουσιάστηκαν ισχύει η ανίσωση του ορισμού του σημείου ισορροπίας κατά Nash:

$$\begin{aligned} U_j(r_j, p_j, p_j^*, r_j^*) &= v_j(x_j, p_j^*, r_j^*) = v_j\left(\frac{r'_j}{p'_j}, p_j^*, r_j^*\right) \\ &= U_j(r'_j, p'_j, p_j^*, r_j^*) \leq U_j(r_j^*, p_j^*) \end{aligned}$$

10.6 UPRA-MSF Αλγόριθμος

Σε αυτή την ενότητα, με βάση την προηγούμενη ανάλυση προτείνεται ένας επαναληπτικός, κατανεμημένος και χαμηλής πολυπλοκότητας αλγόριθμος κατανομής ισχύος εκπομπής και ρυθμού μετάδοσης σε διεπίεδα ασύρματα φεμτοκυψελωτά δίκτυα (UPRA-MSF αλγόριθμος), ο οποίος προσδιορίζει το μοναδικό σημείο ισορροπίας κατά Nash (p^*, r^*) του UPRA-MSF παιχνιδιού. Το θεμελιώδες χαρακτηριστικό του προτεινόμενου αλγορίθμου είναι ότι οι χρήστες ανανεώνουν αυτόνομα τις τιμές της ισχύος εκπομπής τους και του ρυθμού μετάδοσής τους στην ίδια επανάληψη του αλγορίθμου και συνεπώς προσδιορίζεται ταυτόχρονα το σημείο ισορροπίας κατά Nash του παιχνιδιού και ως προς τις δύο ελεύθερες μεταβλητές.

Ειδικότερα, ο προτεινόμενος αλγόριθμος διακρίνεται σε δύο βασικά μέρη. Το τμήμα του δικτύου υλοποιείται σε κάθε σταθμό βάσης της κάθε φεμτοκυψέλης (Access Point - AP) και είναι υπεύθυνο μόνο για την ευρυεκπομπή του συντελεστή κοστολόγησης σε όλους τους χρήστες, λαμβάνοντας από αυτούς μόνο την πληροφορία των τιμών της συνάρτησης χρησιμότητάς τους. Το δεύτερο μέρος του αλγορίθμου, δηλαδή το τμήμα του χρήστη, υλοποιείται από κάθε χρήστη, ο οποίος παίζει μη συνεργατικά το UPRA-MSF παιχνίδι και δεδομένου του συντελεστή κοστολόγησης προσδιορίζει τη βέλτιστη τιμή της ισχύος εκπομπής και του ρυθμού μετάδοσής του με έναν κατανεμημένο τρόπο. Η ανωτέρω περιγραφείσα διαδικασία επαναλαμβάνεται επαναληπτικά μέχρι ο UPRA-MSF αλγόριθμος να συγκλίνει στο σημείο ισορροπίας κατά Nash (p^*, r^*) . Στη συνέχεια περιγράφονται τα αντίστοιχα τμήματα του αλγορίθμου.

UPRA-MSF Αλγόριθμος (Τμήμα Δικτύου)

Βήμα 1^ο: Κάθε σταθμός βάσης εντός κάθε φεμτοκυψέλης ανακοινώνει μία αρχική τιμή για το συντελεστή κοστολόγησης $c=0$ στους φεμτοχρήστες $j, j \in S_i, i = \{1, 2, \dots, F\}$ που βρίσκονται εντός της ακτίνας κάλυψής του. Ο συντελεστής κοστολόγησης είναι ο ίδιος για όλους τους φεμτοχρήστες που εδρεύουν εντός των φεμτοκυψελών που βρίσκονται εντός της υπό μελέτης μακροκυψέλης.

Βήμα 2^ο: Κάθε χρήστης, είτε μακροχρήστης είτε φεμτοχρήστης, προσδιορίζει την ισχύ εκπομπής του και το ρυθμό μετάδοσής του στο σημείο ισορροπίας κατά Nash, δηλαδή (p_j^*, r_j^*) , με βάση το δεύτερο τμήμα του UPRA-MSF αλγορίθμου και υπολογίζει την αντίστοιχη τιμή της συνάρτησης χρησιμότητάς του (χωρίς τη συνάρτηση κοστολόγησης).

Βήμα 3^ο: Ο συντελεστής κοστολόγησης αυξάνεται με ένα σταθερό βήμα Δc , δηλαδή $c := c + \Delta c$. Η νέα τιμή του συντελεστή κοστολόγησης ανακοινώνεται σε όλους τους φεμτοχρήστες από τον κάθε σταθμό βάσης σε κάθε φεμτοκυψέλη.

Βήμα 4^ο: Εάν οι τιμές της συνάρτησης χρησιμότητας για όλους τους χρήστες, είτε μακροχρήστες είτε φεμτοχρήστες, δε βελτιώνονται, δηλαδή $U_j(c) > U_j(c + \Delta c)$, τότε σταμάτα και θέσε $c_{best} = c$. Σε κάθε άλλη περίπτωση επέστρεψε στο βήμα 2.

UPRA-MSF Αλγόριθμος (Τμήμα Χρήστη)

Βήμα 1^ο: Στην αρχή κάθε χρονοσχημής t και στην πρώτη επανάληψη του αλγορίθμου $k=0$, κάθε χρήστης j , $j \in S = \{1, 2, \dots, N\}$ αρχικοποιεί τις τιμές της ισχύος εκπομπής και του ρυθμού μετάδοσής του. Συνεπώς, στην πρώτη επανάληψη του αλγορίθμου $k=0$ προκύπτουν τα ακόλουθα διανύσματα: $\mathbf{p} = (p_1^{(0)}, p_2^{(0)}, \dots, p_N^{(0)})$ και $\mathbf{r} = (r_1^{(0)}, r_2^{(0)}, \dots, r_N^{(0)})$, όπου $p_j^{(0)} = p_{j \min}$, $p_{j \min} > 0$ και $r_j^{(0)} = r_j^{MAX}$.

Βήμα 2^ο: Στην επόμενη επανάληψη του αλγορίθμου $k > 0$, υπολόγισε το λόγο $x_j^{(k)}$, ως ακολούθως:

$$x_j^{(k)} = \arg \max_{x_j \in \left[\frac{r_{j \min}^{MAX}}{p_j^{MAX}}, \frac{r_j^{MAX}}{p_{j \min}} \right]} v_j \left(x_j = \frac{r_j}{p_j}, \mathbf{p}_j^{(k)}, \mathbf{r}_j^{(k)} \right)$$

Βήμα 3^ο: Προσδιόρισε για κάθε χρήστη την τιμή της ισχύος εκπομπής $p_j^{(k+1)}$ και του ρυθμού μετάδοσης $r_j^{(k+1)}$ ως ακολούθως:

$$(p_j^{(k+1)}, r_j^{(k+1)}) = \begin{cases} \text{if } \frac{AWG_{jj}}{I \ln M} > \frac{r_j^{MAX}}{p_j^{MAX}} : \begin{cases} (p_j^{MAX}, x_j^{(k)} p_j^{MAX}), & \text{if } x_j^{(k)} \leq \frac{r_j^{MAX}}{p_j^{MAX}} \\ \left(\frac{r_j^{MAX}}{x_j^{(k)}}, r_j^{MAX} \right), & \text{if } x_j^{(k)} > \frac{r_j^{MAX}}{p_j^{MAX}} \end{cases} \\ \text{else } (p_j^{MAX}, x_j^{(k)} p_j^{MAX}) \end{cases}$$

Βήμα 4^ο: Εάν οι τιμές της ισχύος εκπομπής και του ρυθμού μετάδοσης συγκλίνουν (δηλαδή $|r_j^{(k)} - r_j^{(k+1)}| \leq \varepsilon$, $|p_j^{(k)} - p_j^{(k+1)}| \leq \varepsilon$, $\varepsilon = 10^{-7}$) τότε σταμάτα.

Βήμα 5^ο: Σε κάθε άλλη περίπτωση, θέσε $k = k + 1$ και επέστρεψε στο βήμα 2.

Σύμφωνα με τον προτεινόμενο UPRA-MSF αλγόριθμο, δεδομένου ότι η ισχύς εκπομπής και ο ρυθμός μετάδοσης κάθε χρήστη j , $j \in S = \{1, 2, \dots, N\}$, αρχικοποιείται στην ελάχιστη και στη μέγιστη τιμή αντίστοιχα και δεδομένου ότι οι αλληλουχίες $p_j^{(k)}$, $r_j^{(k)}$ είναι μονότονα αύξουσες και φθίνουσες αντίστοιχως, εξάγεται ότι συγκλίνουν στο ζεύγος τιμών $(\mathbf{p}^*, \mathbf{r}^*)$, το οποίο είναι το σημείο ισορροπίας κατά Nash του παιγνίου. Επιπλέον, λόγω της μονότονης συμπεριφοράς των αλληλουχιών $p_j^{(k)}$, $r_j^{(k)}$ και δεδομένου ότι αυτές είναι φραγμένες, εξάγεται ότι οι αλληλουχίες αυτές πάντα συγκλίνουν προς το ίδιο βέλτιστο ζεύγος $(\mathbf{p}^*, \mathbf{r}^*)$, ανεξάρτητα από την αρχική τιμή της ισχύος εκπομπής και του ρυθμού μετάδοσης.

10.7 Αριθμητικά Αποτελέσματα

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται ορισμένα αριθμητικά αποτελέσματα που απεικονίζουν τη λειτουργία και τα χαρακτηριστικά της προτεινόμενης προσέγγισης. Επιπλέον, η συνολική αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης προσέγγισης αποδεικνύεται μέσω αντιπροσωπευτικών συγκρίσεων με αντίστοιχες προσεγγίσεις που έχουν προταθεί στην πρόσφατη διεθνή βιβλιογραφία. Καθ'όλη τη μελέτη, εξετάζεται η ζεύξη ανόδου μίας μακροκυψέλης στην οποία εδρεύουν ορισμένες φεμτοκυψέλες δημιουργώντας κατά αυτόν τον τρόπο ένα διεπίπεδο ασύρματο φεμτοκυψελωτό δίκτυο, το οποίο χρησιμοποιεί CDMA τεχνολογία και υποστηρίζει χρήστες που έχουν συνεχώς δεδομένα να μεταδώσουν και αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου. Το κέρδος του καναλιού των χρηστών μοντελοποιείται με τη χρήση των προδιαγραφών IMT-2000 [86]. Επιπλέον, για λόγους ευκολότερης κατανόησης των αριθμητικών αποτελεσμάτων γίνεται η θεώρηση ότι όλοι οι χρήστες που αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, είτε μακροχρήστες είτε φεμτοχρήστες, υιοθετούν το ίδιο σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης, δηλαδή την ίδια συνάρτηση απόδοσης, η οποία ορίζεται ως η σιγμοειδής συνάρτηση $f_j(\gamma_j) = (1 - e^{-0.5\gamma_j})^{80}$ [22]. Στη συνέχεια των προσομοιώσεων χρησιμοποιούνται οι παράμετροι που παρατίθενται στον πίνακα 7.

10.7.1 Ιδιότητες του Σημείου Ισορροπίας κατά Nash του UPRA-MSF παιχνιδιού

Σε αυτή την υποενότητα μελετάται μία μακροκυψέλη με χρήση τεχνολογίας CDMA και ακτίνα κάλυψης $R_0 = 290m$ στην οποία εδρεύουν $F = 8$ φεμτοκυψέλες με ακτίνα κάλυψης $R_c = 40 - 50m$. Το σύστημα υποστηρίζει 10 μακροχρήστες, όπου $N_{MNR} = 5$ και 16 FUs, ενώ κάθε φεμτοκυψέλη εξυπηρετεί 2 χρήστες (έναν που αιτείται υπηρεσία πραγματικού χρόνου και έναν μη πραγματικού χρόνου). Οι χρήστες βρίσκονται κατανεμημένοι εντός της ακτίνας κάλυψης της μακροκυψέλης/φεμτοκυψέλης και συγκεκριμένα οι χρήστες που αιτούνται υπηρεσία πραγματικού χρόνου βρίσκονται πλησιέστερα στο σταθμό βάσης της κυψέλης στην οποία ανήκουν, σε αντίθεση με τους χρήστες που αιτούνται υπηρεσία μη πραγματικού χρόνου. Ο επιθυμητός ρυθμός μετάδοσης των χρηστών που αιτούνται υπηρεσία πραγματικού χρόνου είναι $r_{target} = 96Kbps$.

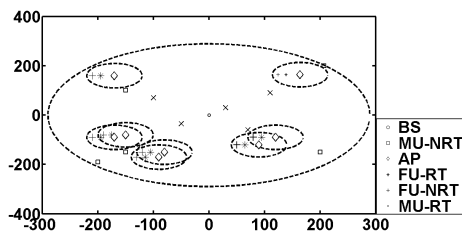
Στην περίπτωση κατά την οποία ο επιτεύξιμος ρυθμός μετάδοσης ενός χρήστη λαμβάνει τιμές μικρότερες από τον επιθυμητό, τότε η συνάρτηση χρησιμότητάς του φθίνει γρήγορα. Με βάση το είδος της υπηρεσίας που αιτούνται οι χρήστες, αλλά και με βάση το επίπεδο αρχιτεκτονικής του δικτύου στο οποίο ανήκουν, οι χρήστες οργανώνονται σε τέσσερις κλάσεις. Η ανωτέρω περιγραφείσα τοπολογία του δικτύου παρουσιάζεται στο σχήμα 56.

Τα σχήματα 57 και 58 απεικονίζουν τη σύγκλιση της ισχύος εκπομπής των μακροχρηστών

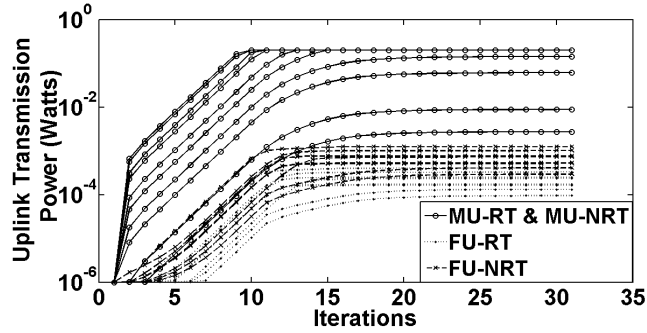
και των φεμοτοχρηστών και τη σύγκλιση του ρυθμού μετάδοσης των μακροχρηστών αντίστοιχα ως συνάρτηση των επαναλήψεων που χρειάζεται ο UPRA-MSF αλγόριθμος για να συγκλίνει στο σημείο ισορροπίας κατά Nash. Με βάση τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται σε αυτά τα δύο σχήματα, εξάγεται το συμπέρασμα ότι καθώς η ποιότητα του καναλιού των χρηστών χειροτερεύει (δηλαδή πιο απομακρυσμένοι χρήστες από το σταθμό βάσης) και προκειμένου να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις τους σε ποιότητα της υπηρεσίας, αυξάνουν την ισχύ εκπομπής τους (Σχήμα 57), ενώ ο ρυθμός μετάδοσής τους μειώνεται, ιδιαίτερα για τους πιο απομακρυσμένους χρήστες, εξαιτίας του γεγονότος ότι το κανάλι τους είναι ιδιαίτερα κακό (το φαινόμενο παρατηρείται σε ένταση για τους απομακρυσμένους χρήστες που αιτούνται υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου). Αντίθετα, αναφορικά με τους μακροχρήστες που αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου παρατηρείται από το σχήμα 58 ότι επιτυγχάνουν τον επιθυμητό ρυθμό μετάδοσης, ιδιαίτερα εκείνοι που βρίσκονται κοντά στο σταθμό βάσης της μακροκυψέλης. Επιπρόσθετα, αναφορικά με τους φεμοτοχρήστες, είτε αυτούς που αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού είτε μη πραγματικού χρόνου, παρατηρείται από το σχήμα 57 ότι η ισχύς εκπομπής τους είναι ιδιαίτερα χαμηλή, εξαιτίας του γεγονότος ότι βρίσκονται ιδιαίτερα κοντά στο σταθμό βάσης, συνεπώς οι συνθήκες του καναλιού τους είναι ευνοϊκές. Επιπλέον, μελετώντας το χρόνο σύγκλισης του UPRA-MSF αλγορίθμου

Πίνακας 7 Παράμετροι Προσομοιώσεων

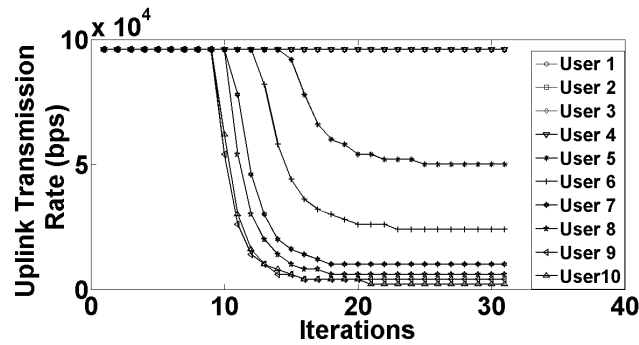
W	$3.84 * 10^6 \text{ Hz}$
r_j^{MAX}	96000 bps
$r_{j \text{ min}}$	0.1 bps
p_j^{MAX}	0.2 Watts
$p_{j \text{ min}}$	10^{-6} Watts
C_{best}	13



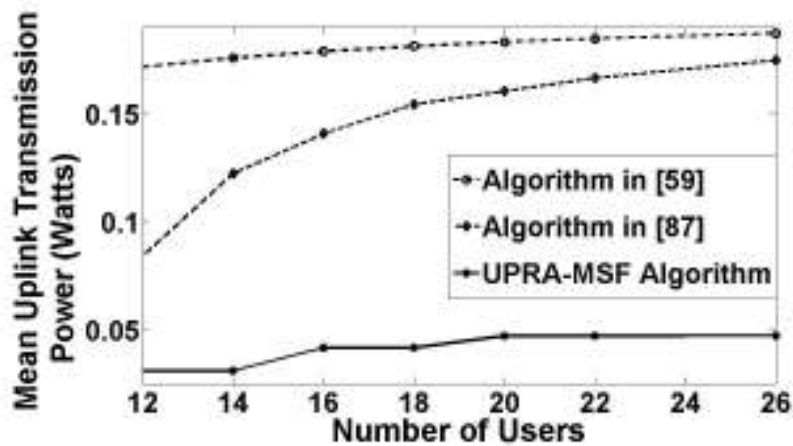
Σχήμα 56 Τοπολογία του διεπίπεδου ασύρματου φεμοτοκυψελωτού δικτύου και κατανομή των χρηστών σε αυτό.



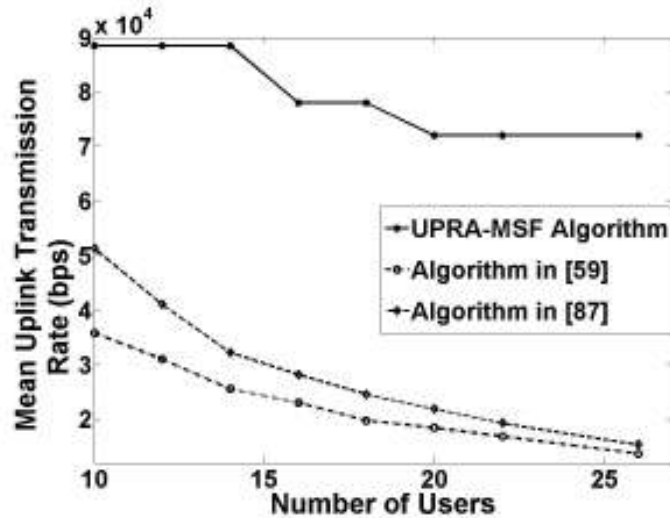
Σχήμα 57 Σύγκλιση της ισχύος εκπομπής των μακροχρηστών και των φεμτοχρηστών για τον UPRA-MSF αλγόριθμο.



Σχήμα 58 Σύγκλιση του ρυθμού μετάδοσης των μακροχρηστών για τον UPRA-MSF αλγόριθμο.



Σχήμα 59 Μέση ισχύς εκπομπής των χρηστών ως συνάρτηση του πλήθους των χρηστών για τρία συγκριτικά σενάρια.



Σχήμα 60 Μέση τιμή του ρυθμού μετάδοσης ως συνάρτηση του πλήθους των χρηστών για τρία συγκριτικά σενάρια.

παρατηρείται ότι η σύγκλιση του συγκεκριμένου αλγορίθμου είναι ιδιαίτερα ταχύς, διότι χρειάζονται λιγότερες από 20 επαναλήψεις για να συγκλίνει ο αλγόριθμος στο σημείο ισορροπίας για όλους τους χρήστες (μακροχρήστες και φεμτοχρήστες).

10.7.2 Αυξανόμενο Πλήθος Χρηστών

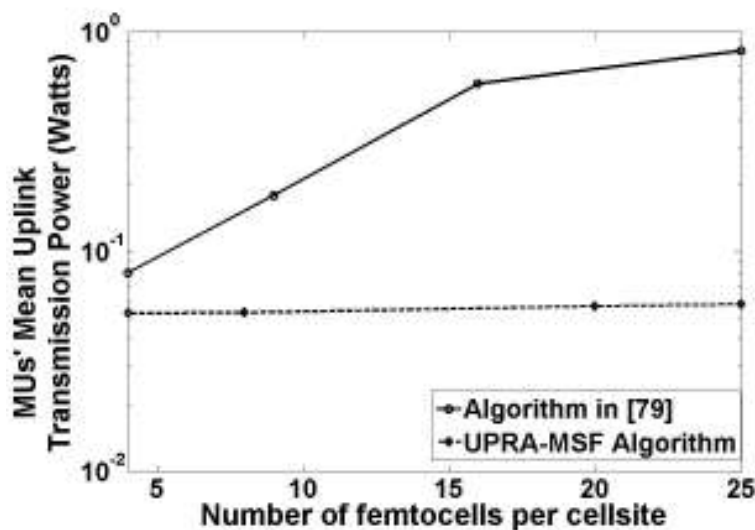
Στη συνέχεια παρουσιάζονται ορισμένα συγκριτικά αριθμητικά αποτελέσματα τα οποία αναδεικνύουν την απόδοση και την υπεροχή της προτεινόμενης προσέγγισης, καθώς ο αριθμός των χρηστών του συστήματος αυξάνεται, λαμβάνοντας υπόψη τρία διαφορετικά σενάρια: (α) UPRA-MSF αλγόριθμος, όπου το 50 % των οι χρήστες είναι μακροχρήστες, (β) συνδυαστική κατανομή ισχύος εκπομπής και ρυθμού μετάδοσης σε ένα ασύρματο δίκτυο ενός επιπέδου με χρήστη τεχνολογίας CDMA, όπως αυτή παρουσιάστηκε στη δημοσίευση [87], όπου το πρόβλημα της συνδυαστικής κατανομής των πόρων μελετάται ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης με δύο ελεύθερες μεταβλητές, δηλαδή την ισχύ εκπομπής και το ρυθμό μετάδοσης και (γ) κατανομή ισχύος εκπομπής και ρυθμού μετάδοσης σε ενός επίπεδου CDMA ασύρματο δίκτυο, όπως αυτή προτάθηκε στη δημοσίευση [59]. Η επιλογή για σύγκριση με την προτεινόμενη προσέγγιση των αλγορίθμων που παρουσιάστηκαν στις δημοσιεύσεις [87] και [59] έγινε με σκοπό τη συγκριτική μελέτη της συνδυαστικής κατανομής ισχύος εκπομπής και ρυθμού μετάδοσης στους χρήστες με τη χρήση των συναρτήσεων χρησιμότητας. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να τονιστεί ότι, όπως αναφέρθηκε στην αρχή του παρόντος κεφαλαίου, το συνδυαστικό πρόβλημα της κατανομής ισχύος εκπομπής και ρυθμού μετάδοσης στους χρήστες δεν έχει ακόμη μελετηθεί στα διεπίπεδα ασύρματα φεμτοκυψελωτά δίκτυα και συνεπώς τα μόνα διαθέσιμα συγκριτικά σενάρια μπορούσαν να αναζητηθούν στα μονοεπίπεδα ασύρματα κυψελωτά δίκτυα.

Πιο συγκεκριμένα, στα σχήματα 59 και 60 παρουσιάζεται η μέση ισχύς εκπομπής και ο ρυθμός μετάδοσης των χρηστών ως συνάρτηση του αυξανόμενου πλήθους χρηστών εντός του διεπίπεδου συστήματος (είτε μακροχρήστες είτε φεμτοχρήστες). Τα αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι ο UPRA-MSF αλγόριθμος έχει συνολικά την καλύτερη απόδοση, ως προς τη χαμηλή ισχύ εκπομπής και τον υψηλό ρυθμό μετάδοσης, εξαιτίας του γεγονότος ότι λαμβάνει υπόψη τα χαρακτηριστικά της διεπίπεδης αρχιτεκτονικής του δικτύου, τις συγκεκριμένες απαιτήσεις των χρηστών σε ποιότητα της υπηρεσίας, οι οποίες εκφράζονται κατάλληλα μέσω της προσεκτικά και αντιπροσωπευτικά σχεδιασμένης συνάρτησης χρησιμότητας, και την κυρτή συνάρτηση κοστολόγησης ως προς το σηματοθορυβικό λόγο των φεμτοχρηστών.

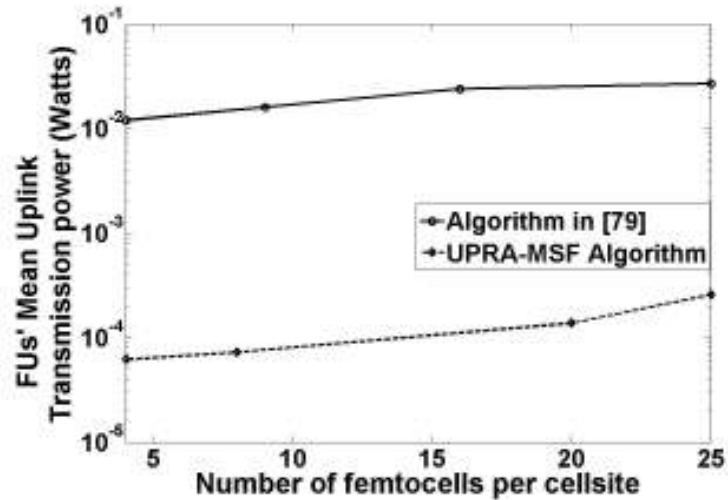
10.7.3 Αυξανόμενο Πλήθος Φεμτοκυψελών

Σε αυτή την υποενότητα παρουσιάζεται μια συγκριτική μελέτη, η οποία αναδεικνύει τα οφέλη του προτεινόμενου UPRA-MSF αλγορίθμου, καθώς ο αριθμός των φεμτοκυψελών που εδρεύουν εντός της μακροκυψέλης αυξάνεται. Συγκεκριμένα, γίνεται σύγκριση της ισχύος εκπομπής των μακροχρηστών (Σχήμα 61) και των φεμτοχρηστών (Σχήμα 62), όπως αυτή προέκυψε από τον UPRA-MSF αλγόριθμο και από τον αλγόριθμο που προτάθηκε στη δημοσίευση [79], ο οποίος προτείνει μία ενεργειακά αποδοτική κατανομή της ισχύος εκπομπής με χρήση συναρτήσεων χρησιμότητας σε διεπίπεδα ασύρματα φεμτοκυψελωτά δίκτυα με εξυπηρέτηση ενός είδους υπηρεσίας.

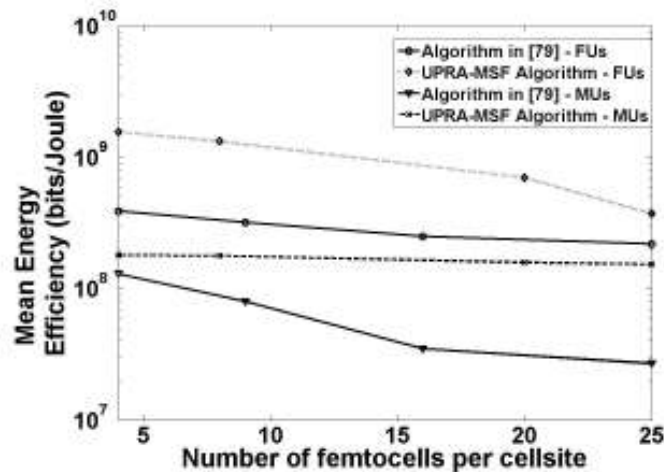
Τα αποτελέσματα αποκαλύπτουν την ανωτερότητα του UPRA-MSF αλγορίθμου όσον αφορά την εξοικονόμηση ενέργειας, λόγω της χρήσης κυρτής κοστολόγησης ως προς το σηματοθορυβικό λόγο των φεμτοχρηστών, σε αντίθεση με την προσέγγιση της δημοσίευσης [79] στην οποία υιοθετείται γραμμική κοστολόγηση ως προς την ισχύ εκπομπής των



Σχήμα 61 Μέση τιμή της ισχύος εκπομπής των μακροχρηστών ως συνάρτηση του πλήθους των φεμτοκυψελών.



Σχήμα 62 Μέση τιμή της ισχύος εκπομπής των φεμτοχρηστών ως συνάρτηση του πλήθους των φεμτοκυψελών.



Σχήμα 63 Μέση ενεργειακή απόδοση των χρηστών ως συνάρτηση του πλήθους των φεμτοκυψελών.

χρηστών. Τέλος, το σχήμα 63 απεικονίζει σαφώς την ανωτερότητα του UPRA-MSF αλγορίθμου παρουσιάζοντας τη μέση ενεργειακή απόδοση των μακροχρηστών και των φεμτοχρηστών σε μονάδες $[bits / Joule]$.

10.8 Ανακεφαλαίωση & Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο της διδακτορικής διατριβής μελετήθηκε το πρόβλημα της βέλτιστης συνδυαστικής κατανομής ισχύος εκπομπής και ρυθμού μετάδοσης στη ζεύξη ανόδου διεπίπεδων ασύρματων φεμτοκυψελωτών δικτύων με την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλαπλών υπηρεσιών. Με στόχο την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλαπλών υπηρεσιών με διαφορετικές απαιτήσεις σε ποιότητα της υπηρεσίας, καθώς επίσης και τη μελέτη των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών της διεπίπεδης αρχιτεκτονικής σε ένα κοινό πλαίσιο μελέτης προτάθηκε μία κατάλληλα σχεδιασμένη συνάρτηση χρησιμότητας. Με βάση την ανάλυση

αυτή, προτάθηκε ένα κατανομημένο μη συνεργατικό πρόβλημα βελτιστοποίησης για την κατανομή της ισχύος εκπομπής και του ρυθμού μετάδοσης σε διεπίπεδα ασύρματα φεμτοκυβελωτά δίκτυα με την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλαπλών υπηρεσιών, το οποίο αντιμετωπίστηκε ως ένα μη συνεργατικό παίγνιο και επιλύθηκε αναλυτικά, προσδιορίζοντας το σημείο ισορροπίας κατά Nash. Επιπρόσθετα, μέσω μοντελοποίησης και προσομοιώσεων αξιολογήθηκε η απόδοση της προτεινόμενης προσέγγισης, ενώ η υπεροχή της έναντι των άλλων σχετικών προσεγγίσεων που έχουν προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία αποδειχθηκε μέσω συγκριτικών προσομοιώσεων. Τέλος, σημειώνεται ότι η προτεινόμενη προσέγγιση διευκολύνει τη δημιουργία ενός γενικού πλαισίου, όπου η νοημοσύνη και η διαδικασία λήψης αποφάσεων βρίσκονται στους φεμτοχρήστες και στους μακροχρήστες, προάγοντας την αυτονομία τους.

11 Συμπεράσματα & Μελλοντική Έρευνα

Η παρούσα διδακτορική διατριβή πραγματεύεται το πρόβλημα της βέλτιστης κατανομής πόρων και εξυπηρέτησης πολλαπλών υπηρεσιών στη ζεύξη ανόδου ασύρματων δικτύων τρίτης, τέταρτης και επόμενης γενιάς. Έμφαση δίδεται στο πρόβλημα της ταυτόχρονης εξυπηρέτησης χρηστών, οι οποίοι αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου και υπηρεσίες δεδομένων, οι οποίες με τη σειρά τους χαρακτηρίζονται από βραχυπρόθεσμες και μακροπρόθεσμες απαιτήσεις σε ποιότητα των υπηρεσιών. Παράλληλα, ο σχεδιασμός κατάλληλων και αντιπροσωπευτικών συναρτήσεων χρησιμότητας, οι οποίες θα αντιπροσωπεύουν τις ποικίλες και ετερογενείς απαιτήσεις των χρηστών σε ποιότητα της υπηρεσίας κάτω από ένα ομογενές πρίσμα αποτέλεσε μία βασική πρόκληση της παρούσας διδακτορικής διατριβής. Επιπρόσθετα, η ορθή μοντελοποίηση και επίλυση των προβλημάτων βελτιστοποίησης με σκοπό την κατανομή των πόρων του συστήματος ήταν στο επίκεντρο της μελέτης για διαφορετικές τεχνολογίες και αρχιτεκτονικές συστημάτων ασύρματης δικτύωσης. Τέλος, υψίστης σημασίας ήταν η επιβεβαίωση των θεωρητικών μοντέλων και αποτελεσμάτων μέσω προσομοιώσεων, και η σύγκρισή τους με σχετικές προσεγγίσεις της διεθνούς βιβλιογραφίας με στόχο την ανάδειξη της συνεισφοράς της προτεινόμενης έρευνας σε διεθνές επίπεδο. Οι παραπάνω επιδιώξεις, καθώς και η εκ φύσεως πολυπλοκότητα του συστήματος που μελετάται καθιστούν το όλο πρόβλημα πολύπλοκο και τη θεωρητική και αναλυτική του αντιμετώπιση μονόδρομο.

11.1 Συμπεράσματα

Λαμβάνοντας υπόψη τις ανωτέρω περιγραφείσες ερευνητικές προκλήσεις, η απαρχή της ερευνητικής δραστηριότητας στόχευσε στη μελέτη των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών ως προς την ποιότητα της υπηρεσίας, των χρηστών που αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου. Το ιδιαίτερο ενδιαφέρον των υπηρεσιών αυτών είναι οι αυστηρές βραχυπρόθεσμες απαιτήσεις τους σε ρυθμό μετάδοσης και η μη ανεκτικότητα σε καθυστερήσεις εξυπηρέτησης. Με σκοπό την επίτευξη της εξυπηρέτησης των χρηστών που αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου μοντελοποιήθηκε μία αντιπροσωπευτική συνάρτηση χρησιμότητας για κάθε χρήστη, η οποία εκφράζει τον επιθυμητό ρυθμό μετάδοσης των χρηστών σε συνάρτηση με τις απαιτήσεις τους σε ποιότητα της υπηρεσίας σε σχέση με την αντίστοιχη καταναλισκόμενη ισχύ εκπομπής.

Συμπέρασμα 1: Η εξυπηρέτηση χρηστών που αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου (π.χ. φωνής, βίντεο διάσκεψης κλπ.) απαιτεί την ορθή μοντελοποίηση των απαιτήσεών τους σε ποιότητα της υπηρεσίας μέσω μίας αντιπροσωπευτικής συνάρτησης χρησιμότητας.

Επιπρόσθετα, κατά την παρουσία εντός του ασύρματου δικτύου χρηστών που αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου, το πρόβλημα της βέλτιστης κατανομής ισχύος εκπομπής σε αυτούς αυξάνει κατακόρυφα σε δυσκολία, εξαιτίας των ποικίλων και συχνά αντικρουόμενων απαιτήσεών τους σε ποιότητα της υπηρεσίας. Για το λόγο αυτό κρίνεται αναγκαία η διαφοροποίηση των χρηστών με βάση το είδος της υπηρεσίας που αιτούνται και η εξατομικευμένη αντιμετώπισή τους με σκοπό τη βέλτιστη κατανομή των πόρων σε αυτούς.

Συμπέρασμα 2: Σε ασύρματα δίκτυα, όπου εδρεύουν χρήστες που αιτούνται πολλαπλών ειδών υπηρεσίες απαιτείται η εξατομικευμένη αντιμετώπισή τους με βάση το είδος της αιτούμενης υπηρεσίας. Ο στόχος αυτός επιτυγχάνεται μέσω διαφοροποιημένων συναρτήσεων χρησιμότητας.

Παράλληλα, είναι γνωστό ότι οι χρήστες προκαλούν επιπτώσεις κατά τη μετάδοση των δεδομένων τους στους υπόλοιπους χρήστες που εδρεύουν εντός της ασύρματης κυψέλης. Συνεπώς, η χρήση κατάλληλης πολιτικής κοστολόγησης αποτελεί ένα εργαλείο που μπορεί να οδηγήσει στην κοινωνικότερη συμπεριφορά των χρηστών, και να βελτιώσει το κοινωνικό αλλά και το προσωπικό όφελος τους, δίνοντας κίνητρο στους χρήστες να αξιοποιούν τους πόρους του ασύρματου δικτύου πιο αποδοτικά. Επιπλέον, έγινε η υπόθεση ότι οι επιπτώσεις των χρηστών κατά τη μετάδοσή τους δεν είναι αναλογικά οι ίδιες σε όλο το εύρος της ισχύος εκπομπής τους, όπως τα γραμμικά σχήματα κοστολόγησης της ισχύος εκπομπής υποστήριζαν στη διεθνή βιβλιογραφία. Για το λόγο αυτό κρίθηκε αναγκαία η εισαγωγή της καινοτόμου ιδέας της κυρτής κοστολόγησης της ισχύος εκπομπής κάθε χρήστη, με σκοπό να τεθούν αυστηρά κριτήρια και περιορισμοί στους χρήστες με απώτερο στόχο τη βελτίωση της κατανομής των πόρων του συστήματος. Τα αριθμητικά αποτελέσματα που προέκυψαν επιβεβαίωσαν απόλυτα την αρχική υπόθεση.

Συμπέρασμα 3: Η κατάλληλη και ορθή κοστολόγηση των χρηστών ως προς τη χρήση των πόρων του συστήματος τονώνει την κοινωνική συμπεριφορά των χρηστών, βελτιώνει το κοινωνικό και το προσωπικό όφελος των χρηστών και αποτελεί κίνητρο για τους χρήστες να αξιοποιούν τους πόρους του συστήματος πιο αποδοτικά.

Επιπρόσθετα, με βάση τις παραπάνω παρατηρήσεις αντιμετωπίστηκε το πρόβλημα της κατανομής ισχύος εκπομπής σε ασύρματα δίκτυα με την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλαπλών υπηρεσιών και τη χρήση κυρτής κοστολόγησης ως προς την ισχύ εκπομπής. Τα αποτελέσματα της συνολικής μοντελοποίησης και προσομοίωσης απέδειξαν το διττό όφελος της ικανοποίησης πολλαπλών και ετερογενών απαιτήσεων ποιότητας υπηρεσίας, αλλά και

την ταυτόχρονη επίτευξη χαμηλότερων τιμών ισχύος εκπομπής, με αποτέλεσμα την επιμήκυνση της ενεργειακής ζωής των χρηστών.

Συμπέρασμα 4: Η ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλαπλών υπηρεσιών των χρηστών και η χρήση κυρτής κοστολόγησης οδηγεί σε απόλυτα λελογισμένη χρήση των πόρων του συστήματος.

Η εξέλιξη της ανωτέρω περιγραφείσας ερευνητικής δραστηριότητας, η οποία είχε ως κύριο άξονα μελέτης την αποδοτική κατανομή των πόρων του συστήματος, οδήγησε στην παρατήρηση ότι εκτός από την ισχύ εκπομπής των χρηστών, ένας επιπρόσθετος κρίσιμος πόρος των χρηστών που έπρεπε να ελεγχθεί και να κατανεμηθεί κατά το βέλτιστο τρόπο είναι ο ρυθμός μετάδοσης των χρηστών. Με την ταυτόχρονη βέλτιστη κατανομή της ισχύος εκπομπής και του ρυθμού μετάδοσης παρατηρήθηκε η βελτίωση του προσωπικού οφέλους των χρηστών και η αποδοτικότερη κατανομή των πόρων του συστήματος.

Συμπέρασμα 5: Η ταυτόχρονη κατανομή των κρίσιμων πόρων των χρηστών, δηλαδή της ισχύος εκπομπής και του ρυθμού μετάδοσής τους, επιφέρει βελτίωση του προσωπικού οφέλους των χρηστών και αποδοτικότερη κατανομή των πόρων του συστήματος.

Στη συνέχεια της διδακτορικής έρευνας μελετήθηκε το ζήτημα της κατανομής διακριτών πόρων στους χρήστες σε ασύρματα δίκτυα τα οποία χρησιμοποιούσαν την τεχνολογία της διαίρεσης συχνότητας για τη μετάδοση των δεδομένων. Μέσω της μελέτης των συγκεκριμένων προβλημάτων παρατηρήθηκε η αυξημένη πολυπλοκότητα του προβλήματος συνδυαστικής κατανομής ενός συνεχούς και ενός διακριτού πόρου στους χρήστες και προτάθηκε ως μία πρώτη προσέγγιση μία ευρεστική μέθοδος κατανομής των πόρων.

Συμπέρασμα 6: Η συνδυαστική κατανομή συνεχών και διακριτών πόρων στους χρήστες παρουσιάζει αυξημένη πολυπλοκότητα και οι ευρεστικές μέθοδοι αποτελούν ένα αξιόπιστο εργαλείο προσέγγισης της βέλτιστης λύσης.

Επιπρόσθετα, με σκοπό την αντιμετώπιση της δυσκολίας κατανομής της ισχύος εκπομπής (συνεχής πόρος) και των υποφερούσων (διακριτός πόρος) σε SC-FDMA ασύρματα δίκτυα μελετήθηκαν τα μοντέλα διαπραγματεύσεως, τα οποία αποτελούν ένα ισχυρό εργαλείο για την κατανομή συνεχών και προσεγγιστικά διακριτών μεγεθών. Συγκεκριμένα με τη χρήση της θεωρίας διαπραγματεύσεων επιτεύχθηκε η εύρεση σημείου ισορροπίας ως προς την κατανομή των υποφερούσων στους χρήστες και με τη χρήση κατάλληλων πολιτικών αντιστοίχισης των υποφερούσων στους χρήστες και την ταυτόχρονη βέλτιστη κατανομή της ισχύος εκπομπής σε αυτούς επιτεύχθηκε συνολικά μία αποδοτικότερη κατανομή των πόρων

του συστήματος σε σύγκριση με την ευρεστική μέθοδο που προτάθηκε στα πλαίσια της διδακτορικής έρευνας.

Συμπέρασμα 7: Η θεωρία διαπραγματεύσεων αποτελεί ένα δυναμικό εργαλείο για την κατανομή των πόρων σε ασύρματα δίκτυα.

Επιπρόσθετα, στα πλαίσια της διδακτορικής έρευνας μελετήθηκαν διεπίπεδα ασύρματα κυψελωτά δίκτυα και συγκεκριμένα τα διεπίπεδα φεμτοκυψελωτά δίκτυα τέταρτης και μεταγενέστερης γενιάς. Βασικό γνώρισμα αυτού του τύπου των δικτύων είναι η διεπίπεδη αρχιτεκτονική τους, η οποία απαιτεί διαφορετική μοντελοποίηση, σχεδιασμό και αντιμετώπιση σε σχέση με τα προηγούμενα μοντέλα που μελετήθηκαν. Συνεπώς, έχοντας ως κύριο στόχο την επίτευξη εξυπηρέτησης πολλαπλών υπηρεσιών και τη βέλτιστη κατανομή πόρων σε διεπίπεδα ασύρματα δίκτυα το πρώτο βήμα ήταν η κατάλληλη μοντελοποίηση των συναρτήσεων χρησιμότητας των χρηστών. Βασική παρατήρηση αποτέλεσε το γεγονός ότι τα χαρακτηριστικά γνώρισμα των χρηστών πλέον δε διαφοροποιούνταν αποκλειστικά από το είδος της υπηρεσίας που αιτούνταν, αλλά και από το επίπεδο της αρχιτεκτονικής στο οποίο ανήκουν. Για το λόγο αυτό, σχεδιάστηκε μία πολύκλαδη συνάρτηση χρησιμότητας, η οποία διαφοροποιείται με βάση το είδος της υπηρεσίας που αιτείται ένας ασύρματος χρήστης και το επίπεδο της αρχιτεκτονικής του δικτύου στο οποίο ανήκει.

Συμπέρασμα 8: Σε πολυεπίπεδα ασύρματα δίκτυα η συνάρτηση χρησιμότητας των χρηστών πρέπει να διαφοροποιείται με βάση το είδος της υπηρεσίας που αιτείται ο χρήστης και με βάση το επίπεδο της αρχιτεκτονικής του δικτύου στο οποίο ανήκει.

Συμπέρασμα 9: Η κατηγοριοποίηση των χρηστών στα πολυεπίπεδα ασύρματα δίκτυα με βάση το είδος της υπηρεσίας που αιτούνται και με βάση το επίπεδο της αρχιτεκτονικής του δικτύου στο οποίο ανήκουν συνεπάγεται την αποδοτικότερη κατανομή των πόρων του δικτύου, δεδομένου του ορθού σχεδιασμού και επίλυσης του αντίστοιχου προβλήματος βελτιστοποίησης.

Επιπλέον, μέσω της μελέτης των πολυεπίπεδων αρχιτεκτονικών δικτύων ανέκυψε η άμεση ανάγκη του ταυτόχρονου ελέγχου και κατανομής της ισχύος εκπομπής των χρηστών και του ρυθμού μετάδοσής τους. Με βάση τη γνώση που αποκομίστηκε, εξάχθηκε η παρατήρηση ότι η συνδυαστική κατανομή των κρίσιμων πόρων των χρηστών, δηλαδή της ισχύος εκπομπής και του ρυθμού μετάδοσής τους, λαμβάνοντας ταυτόχρονα υπόψη τις πολλαπλές αιτούμενες υπηρεσίες από τους χρήστες, αλλά και τη διεπίπεδη αρχιτεκτονική του υπό μελέτη ασύρματος δικτύου, αποτελεί τη βέλτιστη λύση του προβλήματος.

Συμπέρασμα 10: Η συνδυαστική κατανομή των πόρων του συστήματος με την ταυτόχρονη διαφοροποίηση των χρηστών με βάση το είδος της αιτούμενης από αυτούς υπηρεσίας και το επίπεδο της αρχιτεκτονικής στο οποίο ανήκουν οδηγεί σε βέλτιστη λύση.

Ολοκληρώνοντας την ενότητα αυτή αξίζει να σημειωθεί ότι τα ανωτέρω συμπεράσματα αποτελούν τα βασικά εξαγόμενα της διδακτορικής έρευνας και δραστηριότητας, συνοψίζοντας τις βασικές παρατηρήσεις για το ζήτημα της βέλτιστης κατανομής πόρων και εξυπηρέτησης πολλαπλών υπηρεσιών σε ασύρματα δίκτυα τρίτης, τέταρτης και επόμενης γενεάς.

11.2 Μελλοντική Έρευνα

Με σκοπό την ολοκλήρωση της μελέτης στα πλαίσια της διδακτορικής δραστηριότητας, η παρούσα υποενότητα αναδεικνύει και προτείνει πιθανές μελλοντικές ερευνητικές θεματικές κατευθύνσεις, οι οποίες αποτελούν λογική συνέχεια της παρούσας διδακτορικής έρευνας. Παράλληλα, επισημαίνεται η κρισιμότητα και η επικαιρότητα των προτεινόμενων θεματικών ερευνητικών κατευθύνσεων και προτείνεται μεθοδολογία αρχικής αντιμετώπισής τους. Επιπρόσθετα σημειώνεται ότι, μέρος των ερευνητικών αντικειμένων που θα παρουσιαστούν αφορά τρέχουσες ερευνητικές προσπάθειες οι οποίες βασίστηκαν, υιοθέτησαν ή εξέλιξαν τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης.

***Ερευνητική Κατεύθυνση 1:** Βέλτιστη Συνδυαστική Κατανομή Ισχύος Εκπομπής και Ρυθμού Μετάδοσης με Υποστήριξη Πολλαπλών Υπηρεσιών σε Διεπίπεδα Φεμτοκυψελωτά Ασύρματα Δίκτυα: Διπαραμετρικό Πρόβλημα*

Στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής μελετήθηκε το πρόβλημα της βέλτιστης κατανομής ισχύος εκπομπής και ρυθμού μετάδοσης σε διεπίπεδα φεμτοκυψελωτά δίκτυα ως ένα μονοπαραμετρικό πρόβλημα με την αντικατάσταση του λόγου του ρυθμού μετάδοσης προς την ισχύ εκπομπής του κάθε χρήστη με μία νέα μεταβλητή. Ο ορισμός και η αντιμετώπιση του προβλήματος ως ένα διπαραμετρικό πρόβλημα με τον ταυτόχρονο ανεξάρτητο προσδιορισμό των δύο ελεύθερων μεταβλητών, δηλαδή της ισχύος εκπομπής και του ρυθμού μετάδοσης, αποτελεί ιδιαίτερα ερευνητικά ενδιαφέρον και επίκαιρο θέμα. Με σκοπό τον ορισμό του αντίστοιχου προβλήματος αρχικά θα πρέπει να ορισθεί μία κατάλληλα σχεδιασμένη συνάρτηση χρησιμότητας, η οποία θα διαφοροποιείται με βάση το είδος της υπηρεσίας που αιτείται ο χρήστης (δηλαδή υπηρεσίες πραγματικού χρόνου ή υπηρεσίες δεδομένων) και με βάση το επίπεδο της αρχιτεκτονικής του δικτύου στο οποίο ανήκει. Έπειτα, θα ορισθεί ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης ως προς τους δύο πόρους του συστήματος και θα επιλυθεί αναλυτικά με σκοπό την εξεύρεση σημείου ισορροπίας για το διαμοιρασμό

των πόρων του συστήματος, μεγιστοποιώντας ταυτόχρονα τη λαμβανόμενη ικανοποίηση κάθε χρήστη. Τέλος, για να επιβεβαιωθεί ο σχεδιασμός, η μοντελοποίηση και η επίλυση του προβλήματος κρίνεται αναγκαίο να εξαχθούν αναλυτικά αριθμητικά αποτελέσματα του προβλήματος κατανομής των πόρων, καθώς επίσης και συγκριτικά αποτελέσματα με ίδιας λογικής προσεγγίσεις από τη διεθνή βιβλιογραφία (αν τέτοιου είδους προσεγγίσεις είναι διαθέσιμες) με σκοπό να αναδειχθεί η ανωτερότητα της προτεινόμενης προσέγγισης.

Ερευνητική Κατεύθυνση 2: Επιλογή Κυψέλης και Βέλτιστη Κατανομή Πόρων σε Διεπίδα Φεμτοκυψελωτά Ασύρματα Δίκτυα

Στις προσεγγίσεις που μελετήθηκαν έως τώρα στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής, το πλήθος των χρηστών που εξυπηρετούνταν από κάθε κυψέλη (είτε από τη μακροκυψέλη είτε από την εκάστοτε φεμτοκυψέλη) ήταν σταθερό και δεδομένο. Ωστόσο όμως, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το πρόβλημα αυτόνομης επιλογής κυψέλης από κάθε χρήστη από την οποία αυτός θα εξυπηρετηθεί. Βασικός παράγοντας επιλογής κυψέλης από κάθε χρήστη θα είναι η μεγιστοποίηση της λαμβανόμενης ικανοποίησής του από την εξυπηρέτηση των απαιτήσεών του σε ποιότητα της υπηρεσίας. Παρόλα αυτά αξίζει να σημειωθεί ότι η αυτόνομη επιλογή κυψέλης από τους χρήστες έχει το μειονέκτημα της ελλειπούς πληροφόρησης των επιλογών κυψέλης των υπόλοιπων χρηστών. Για το λόγο αυτό μία προτεινόμενη προσέγγιση είναι η διαδικασία μάθησης των χρηστών για τις επιλογές τους, με βάση τις προγενέστερες αποφάσεις τους στο άμεσο παρελθόν, δεδομένου ότι τα χαρακτηριστικά του δικτύου δε μεταβάλλονται ραγδαία σε μικρό χρονικό διάστημα υπό φυσιολογικές συνθήκες. Έπειτα από την επίτευξη της επιλογής κυψέλης από το σύνολο των χρηστών, το πλήθος των χρηστών που εδρεύει σε κάθε κυψέλη θα είναι δεδομένο και θα πραγματοποιείται ένας αλγόριθμος βέλτιστης κατανομής των πόρων του διεπίπεδου συστήματος. Με αυτά τα βήματα θα ολοκληρωθεί η επιλογή κυψέλης από τους χρήστες και η ταυτόχρονη κατανομή των πόρων του συστήματος σε αυτούς.

Ερευνητική Κατεύθυνση 3: Βέλτιστη Κατανομή Πόρων σε Γνωσιακά (Cognitive) Δίκτυα

Με βάση τη γνώση που αποκομίστηκε στα πλαίσια της διδακτορικής έρευνας, η ερευνητική δραστηριότητα μπορεί να επεκταθεί στην αντιμετώπιση του ζητήματος της βέλτιστης κατανομής πόρων σε γνωσιακά ασύρματα δίκτυα. Αξιοποιώντας τη γνώση από τη διαφοροποίηση των συναρτήσεων χρησιμότητας με βάση το είδος της υπηρεσίας που αιτείται ο χρήστης και το επίπεδο της αρχιτεκτονικής του δικτύου από το οποίο εξυπηρετείται, κατά αντιστοιχία μπορούν να σχεδιαστούν κατάλληλες συναρτήσεις χρησιμότητας για τους πρωτεύοντες και δευτερεύοντες χρήστες ενός γνωσιακού ασύρματου δικτύου, με βάση το είδος της υπηρεσίας την οποία αιτούνται. Έπειτα, η μοντελοποίηση του αντιπροσωπευτικού

προβλήματος κατανομής πόρων και η επίλυσή του θα οδηγήσει σε μία ερευνητικά υποσχόμενη προσέγγιση.

Ερευνητική Κατεύθυνση 4: Βέλτιστη Κατανομή Πόρων σε Ετερογενή Ασύρματα Δίκτυα

Τα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα αποτελούνται από διαφορετικού τύπου και τεχνολογίας υποδίκτυα, όπως είναι τα κυψελωτά δίκτυα (CDMA (3GPPG2), OFDMA, SCFDMA (LTE, LTE-Advanced)), WLANs (WiFi, WiMAX), αυτοοργανούμενα δίκτυα (ad-hoc) κ.ά.. Κύριος μελλοντικός στόχος είναι η επίτευξη της αυτόνομης επιλογής τύπου δικτύου ή/και επιπέδου αρχιτεκτονικής δικτύου από το χρήστη και η ταυτόχρονη βέλτιστη κατανομή των πόρων των επιμέρους δικτύων, με στόχο την εξυπηρέτηση διαφορετικού τύπου υπηρεσιών. Προς αυτή την κατεύθυνση, θα πρέπει να μοντελοποιηθούν κατάλληλα τα κριτήρια και οι παράμετροι που θα υποδεικνύουν στο χρήστη την επιλογή του τύπου δικτύου και έπειτα δεδομένης της επιλογής αυτής και της κατανομής των χρηστών στα υπάρχοντα δίκτυα θα επιχειρηθεί η βέλτιστη κατανομή των πόρων των δικτύων στους χρήστες, με στόχο την κάλυψη των απαιτήσεών τους σε ποιότητα της υπηρεσίας. Βασική πρόκληση θα αποτελέσει ο σχεδιασμός κατάλληλων συναρτήσεων χρησιμότητας, οι οποίες θα λαμβάνουν υπόψη τις διαφορετικές δυνατές επιλογές των χρηστών ως προς τον τύπο δικτύου από το οποίο θα εξυπηρετούνται και το είδος της υπηρεσίας που θα αιτείται ο χρήστης.

Ολοκληρώνοντας την αναφορά στις μελλοντικές ερευνητικές κατευθύνσεις θα ήθελα να τονίσω ότι οι θεματικές ενότητες που προαναφέρθηκαν είναι ορισμένοι βασικοί κατευθυντήριοι δρόμοι της άμεσης μελλοντικής έρευνας. Ωστόσο όμως, η ερευνητική δραστηριότητα είναι ένα αέναο ταξίδι, το οποίο οδηγεί σε ανεξερεύνητες και ιδιαίτερα ενδιαφέρουσες ερευνητικές περιοχές.

Δημοσιεύσεις στα Πλαίσια της Διδακτορικής Διατριβής

A. Δημοσιεύσεις σε Διεθνή Περιοδικά

1. Eirini Eleni Tsiropoulou, P. Vamvakas, George Katsinis and Symeon Papavassiliou, “Combined Power and Rate Allocation in Self-Organized Multi-Service Two-Tier Femtocell Networks”, Computer Communications, Elsevier, 2014 (under review)
2. E.E. Tsiropoulou, P. Vamvakas, and S. Papavassiliou, "Joint Utility-based Uplink Power and Rate Allocation in Wireless Networks: A Non-cooperative Game Theoretic Framework", Elsevier Physical Communications Journal, Vol. 9, pp. 299–307, December 2013.
3. E. E. Tsiropoulou, George Katsinis and Symeon Papavassiliou, “Distributed Uplink Power Control in Multi-Service Wireless Networks via a Game Theoretic Approach with Convex Pricing”, in IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, Vol. 23, Issue 1, pp. 61-68, 2012.
4. E. E. Tsiropoulou and Symeon Papavassiliou, “Utility-based Uplink Joint Power & Subcarrier Allocation in SC-FDMA Wireless Networks”, in International Journal of Electronics, Taylor & Francis, Vol. 98, Issue 11, pp. 1581-1587, 2011.
5. E. E. Tsiropoulou, T. Kastrinogiannis, and S. Papavassiliou, ”QoS-Driven Uplink Power Control in Multi-Service CDMA Wireless Networks - A Game Theoretic Framework,” Journal of Communications, Academy Publisher, vol. 4, No 9, pp. 654-668, Oct. 2009.

B. Δημοσιεύσεις σε Διεθνή Συνέδρια

1. E.E. Tsiropoulou, G. Katsinis and S. Papavassiliou, “On the Problem of Optimal Cell Selection & Uplink Power Control in Open Access Multi-Service Two-Tier Femtocell Networks,” in Ad-hoc, Mobile and Wireless Networks (LNCS) Springer, 2014.
2. E. E. Tsiropoulou, G. K. Katsinis, P. Vamvakas and Symeon Papavassiliou, “Efficient Uplink Power Control in Multi-Service Two-Tier Femtocell Networks via a Game Theoretic Approach,” International Workshop on Computer-Aided Modeling Analysis and Design of Communication Links and Networks (CAMAD), Berlin, 2013.
3. Eirini Eleni Tsiropoulou, Aggelos Kapoukakis and Symeon Papavassiliou, “ Energy-efficient Subcarrier Allocation in SC-FDMA Wireless Networks based on Multilateral Model of Bargaining,” IFIP Networking 2013, Brooklyn, 2013.

4. E.E. Tsiropoulou, P. Vamvakas, and S. Papavassiliou, "Energy Efficient Uplink Joint Resource Allocation Non-cooperative Game with Pricing" in Proc. of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2012), April 2012. (**Best Paper Award**).
5. E.E. Tsiropoulou, G. Katsinis, and S. Papavassiliou, "Utility-based Power Control via Convex Pricing for the Uplink in CDMA Wireless Networks," European Wireless 2010, April 2010.
6. E. E. Tsiropoulou, T. Kastrinogiannis, and S. Papavassiliou, "Realization of QoS Provisioning in Autonomic CDMA Networks under Common Utility-Based Framework" in Proc. of IEEE WoWMoM workshop on Autonomic and Opportunistic Communications, AOC'09, June, 2009.
7. E.E. Tsiropoulou, T. Kastrinogiannis, and S. Papavassiliou, "A Utility-based Power Allocation Non-cooperative Game for the Uplink in Multi-Service CDMA Wireless Networks," Proc. of IEEE International Wireless Communications and Mobile Computing Conference, pp. 365-370, Leipzig, Germany, June 2009.
8. T. Kastrinogiannis, E. E. Tsiropoulou, and S. Papavassiliou, "Utility-Based Uplink Power Control in CDMA Wireless Networks with Real-Time Services," in Ad-hoc, Mobile and Wireless Networks (LNCS) Springer, vol. 5198, p.p. 307-320, Sept. 2008.
9. G. I. Tsiropoulos, D. G. Stratogiannis, E. E. Tsiropoulou and P. G. Cottis, "Energy Distribution Networks Evolution towards Smart Grid Networks Incorporating Power Line Communications Technology & Services", in Proc. WSPLC, 2008.

C. Κεφάλαια σε Επιστημονικά Βιβλία

1. E.E. Tsiropoulou, T. Kastrinogiannis and S. Papavassiliou, "Non-cooperative Power Control in CDMA Wireless Networks", in "Game Theory for Wireless Communications and Networking" book, Auerbach Publications, CRC Press, Taylor&Francis Group, 2010.
2. G. I. Tsiropoulos, D. G. Stratogiannis and E. E. Tsiropoulou, Mobile and Wireless Communications Network layer and circuit level design, Chapter 1: Call Admission Control in Mobile and Wireless Networks, pp. 1-26, INTECH, January 2010.

Βιβλιογραφία

- [1] Lee, J.-W. R., Mazumdar, R., Shroff, N. B.: “Joint resource allocation and base-station assignment for the downlink in CDMA networks,” *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 14, no. 1, Feb. 2006.
- [2] Kastrinogiannis, T. , Papavassiliou, S., Kastrinogiannis, K., Soulios, D.: “A Utility-Based Resource Allocation Approach for the Downlink in CDMA Wireless networks with Multimedia Services”, *Proc. of the 18th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, September 2007.
- [3] Meshkati, F., Poor, H. V., Schwartz, S. C., Balan, R.: “Energy-Efficient Resource Allocation in Wireless Networks with Quality-of-Service Constraints”, preprint, Princeton University, 2005.
- [4] Meshkati, F., Poor H. V., Schwartz S. C.: “A Non-Cooperative Power Control Game in Delay-Constrained Multiple-Access Networks”, *Proc. of the IEEE International Symp. on Info. Theory (ISIT)*, Adelaide, Australia, September 2005.
- [5] Meshkati, F., Goldsmith A. J., Poor H. V., Schwartz S. C.: “A Game-Theoretic Approach to Energy-Efficient Modulation in CDMA Networks with Delay Constraints”, *Proc. of IEEE Radio and Wireless Symposium*, vol., no., pp.11-14, January 2007.
- [6] Duan, X., Niu, Z. , Zheng, J. :“A Dynamic Utility-Based Radio Resource Management Scheme for Mobile Multimedia DSCDMA Systems,” in *Proc. IEEE Global Telecom. Conf. 2002 (GLOBECOM’02)*, Taipei, Taiwan, Nov. 2002.
- [7] Kastrinogiannis, T., Papavassiliou, S. :“Probabilistic Short-term Delay and Throughput Requirements of Multimedia Services in High Throughput Wireless Networks,” in *Proc. of IEEE Sarnoff Symposium on Advances in Wired and Wireless Communications*, April 2007.
- [8] Shenker S.: “Fundamental design issues for the future Internet,” *IEEE J. Selected Areas Commun.*, vol. 13, pp. 1176–1188, 1995.
- [9] D. J. Goodman and N. B. Mandayam, “Power control for wireless data,” *IEEE Pers. Commun.*, vol. 7, pp. 48–54, Apr. 2000.
- [10] H. Ji and C.-Y. Huang, “Non-cooperative uplink power control in cellular radio systems,” *Wireless Netw.*, vol. 4, pp. 233–240, Apr. 1998.
- [11] S. Lu, V. Bharghavan, and R. Srikant, “Fair scheduling in wireless packet networks,” *IEEE/ACM Trans. on Netw.*, vol. 7, no. 4, pp. 473–489, 1999.

- [12] M. Andrews, L. Qian, and A. Stolyar, "Optimal utility based multi-user throughput allocation subject to throughput constraints," *in proc. of IEEE INFOCOM '05*, vol. 4, pp. 2415-2424, Mar. 2005.
- [13] F. Berggren, and R. Jantti, "Asymptotically fair transmission scheduling over fading channels," *IEEE Trans on Wireless Commun.*, vol. 3, no.1, pp. 326- 336, Jan. 2004.
- [14] Y. Liu, S. Gruhl, and E. Knightly, "WCFQ: An opportunistic wireless scheduler with statistical fairness bounds," *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, vol. 2, no. 5, p.p. 1017-1028 Sept. 2003.
- [15] X. Liu, E. K. P. Chong, and N. B. Shroff, "A framework for opportunistic scheduling in wireless networks," *Computer Networks*, vol. 41, pp. 451–474, Mar. 2003.
- [16] J.-W. Lee, R.R. Mazumdar, and N. B. Shroff, "Opportunistic power scheduling for dynamic multi-server wireless systems," *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, vol. 5, no.6, pp. 1506-1515, Jun. 2006.
- [17] T. Alpcan, T. Basar, R. Srikant, and E. Altman, "CDMA uplink power control as a noncooperative game," *Wireless Networks*, vol. 8, pp. 659–669, Nov. 2002.
- [18] S. Gunturi and F. Paganini, "Game theoretic approach to power control in cellular CDMA," *in Proc. of 58th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)*, pp. 2362–2366, Orlando, FL, Oct. 2003.
- [19] K.-K. Leung and C. W. Sung, "An opportunistic power control algorithm for cellular network," *IEEE/ACM Trans. on Netw.*, vol.14, no.3, pp. 470-478, Jun. 2006.
- [20] C. W. Sung and W. S. Wong, "A noncooperative power control game for multirate CDMA data networks," *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, vol. 2, pp. 186–194, Jan. 2003.
- [21] E. Altman and Z. Altman, "S-modular games and power control in wireless networks," *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 48, pp. 839–842, May 2003.
- [22] C. U. Saraydar, N. B. Mandayam, and D. J. Goodman, "Efficient power control via pricing in wireless data networks," *IEEE Trans. on Commun.*, vol. 50, pp. 291–303, Feb. 2002.
- [23] F. Meshkati, H. V. Poor, S. C. Schwartz, and N. B. Mandayam, "An energy-efficient approach to power control and receiver design in wireless data networks," *IEEE Trans. on Commun.*, vol. 52, pp. 1885–1894, Nov. 2005.
- [24] S. Ulukus and R.D. Yates, "Adaptive power control and MMSE interference suppression," *ACM Wireless Networks*, vol. 4, no. 6, pp. 489-496, Nov. 1998.
- [25] F. Meshkati, M. Chiang, H. V. Poor, and S. C. Schwartz, "A game-theoretic approach to energy-efficient power control in multicarrier CDMA systems," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications (JSAC)*, vol. 24, pp. 1115–1129, Jun. 2006.

- [26] N. Feng, S.-C. Mau, and N. B. Mandayam, "Pricing and power control for joint network-centric and user-centric radio resource management," *IEEE Trans. on Commun.*, vol. 52, pp. 1547–1557, Sept. 2004.
- [27] C. W. Sung, K. W. Shum, and K.-K. Leung, "Stability of distributed power and signature sequence control for CDMA systems—a game-theoretic framework," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 52, no. 4, pp. 1775–1780, Apr. 2006.
- [28] H. P. Shiang and M. van der Schaar, "Feedback-driven interactive learning in dynamic wireless resource management for delay sensitive users," *IEEE Trans. Veh. Tech.*, to appear.
- [29] T. Kastrinogiannis, and S. Papavassiliou, "Utility based Short-term throughput driven scheduling approach for efficient resource allocation in CDMA wireless networks", in *Wireless Personal Comm.*, Springer (Published online: 13 Nov. 2008).
- [30] T. Kastrinogiannis, E. E. Tsiropoulou, and S. Papavassiliou, "Utility-based uplink power control in CDMA wireless networks with real-time services," in *Ad-hoc, Mobile and Wireless Networks (LNCS)*, Springer, vol. 5198, p.p. 307-320, Sept. 2008.
- [31] C. Long, Q. Zhang, B. Li, H. Yang, and X. Guan, "Non-cooperative power control for wireless ad hoc networks with repeated games," *IEEE JSAC*, vol. 25, no. 6, pp. 1101-1112, Aug. 2007.
- [32] V. Rodriguez, "An analytical foundation for resource management in wireless communication," in *Proc. of GLOBECOM '03*, vol. 2, no. 2, pp. 898-902, 1-5 Dec. 2003.
- [33] R.D. Yates, "A framework for uplink power control in cellular radio systems," *IEEE JSAC*, vol. 13, pp. 1341 - 1347, Sept. 1995.
- [34] V. Shah, N. B. Mandayam, and D. J. Goodman, "Power control for wireless data based on utility and pricing," in *Proc. of 9th IEEE International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Commun. (PIMRC)*, pp. 1427–1432, Boston, MA, Sept. 1998.
- [35] T. Kastrinogiannis and S. Papavassiliou, "Game Theoretic Distributed Uplink Power Control in CDMA Networks with Real-Time Services," *Computer Communications Journal*, Elsevier, vol. 32, no. 2, p.p. 376-385, Feb. 2009.
- [36] E. E. Tsiropoulou, T. Kastrinogiannis and S. Papavassiliou, "QoS-Driven Uplink Power Control in Multi-Service CDMA Wireless Networks - A Game Theoretic Framework," *Journal of Communications*, Academy Publisher, Oct. 2009.
- [37] C. Goffman, *The Calculus: An Introduction*. Harper & Row, Publisher, 1971
- [38] X. Lin, N. B. Shroff, and R. Srikant, "A Tutorial on Cross-Layer Optimization in Wireless Networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Comm.* vol. 24, No 8, pp. 1452-1463, June 2006.

- [39] Dahai Xu, Ying Li, M. Chiang, and A. Calderbank, "Elastic service availability: utility framework and optimal provisioning," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 26, No.6, pp.55-65, Aug. 2008.
- [40] C.U. Saraydar, N.B. Mandayam, and D.J. Goodman, "Pareto efficiency of pricing-based power control in wireless datanetworks", *IEEE WCNC*, vol. 1, pp 231-235, 1999.
- [41] M. Rasti, A.R. Sharafat, and B.Seyfe, "Pareto-efficient and goal-driven power control in wireless networks: a game-theoretic approach with a novel pricing scheme," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 17, no. 2 p.p. 556-569, Apr. 2009.
- [42] E.E. Tsiropoulou, G. Katsinis, and S. Papavassiliou, "Utility-based Power Control via Convex Pricing for the Uplink in CDMA Wireless Networks," *European Wireless 2010*, April 2010.
- [43] E.E. Tsiropoulou, T. Kastrinogiannis, and S. Papavassiliou, "A Utility-based Power Allocation Non-cooperative Game for the Uplink in Multi-Service CDMA Wireless Networks," *Proc. of IEEE International Wireless Communications and Mobile Computing Conference*, pp. 365-370, Leipzig, Germany, June 2009.
- [44] L. Chen and J. Leneutre, "On the Power and Rate Control in IEEE 802.11 WLANs - A Game Theoretical Approach," *16th International Conference on Computer Communications and Networks, ICCCN*, pp. 450 – 456, 2007.
- [45] F. Meshkati, H. V. Poor, S. C. Schwartz, and N. B. Mandayam, "An energy-efficient approach to power control and receiver design in wireless data networks," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 53 , issue: 11, pp. 1885 - 1894, 2005
- [46] P. Marbach, R. Berry, "Downlink resource allocation and pricing for wireless networks," *IEEE INFOCOM 2002*, vol. 3, pp. 1470 – 1479, 2002.
- [47] Liu Peijuan, Zhang Peifang, S. Jordan, M.L. Honig, "Single-cell forward link power allocation using pricing in wireless networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 3, issue 2, pp. 533 – 543, 2004.
- [48] T. Alpcan, L. Pavel, and N. Stefanovic, "A control theoretic approach to noncooperative game design," in *Proc. of 48th IEEE Conf. on Decision and Control, Shanghai, China*, December 2009.
- [49] R. Johari, and J. N. Tsitsiklis, "A Scalable Network Resource Allocation Mechanism With Bounded Efficiency Loss," *IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS*, vol. 24, no. 5, May 2006.
- [50] R. Wilson, *Nonlinear Pricing*. Oxford University Press Inc, USA, 1993.
- [51] Liu Shao, T. Basar, R. Srikant, "Exponential-RED: a stabilizing AQM scheme for low- and high-speed TCP protocols," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 13, issue 5, pp. 1068 – 1081, 2005.

- [52] Junsung, L., Myung, H.G., Kyungjin, Oh, and Goodman, D.J. (2006), “Channel-Dependent Scheduling of Uplink Single Carrier FDMA Systems,” *Proc. IEEE 64th Vehicular Technology Conference*, 1-5.
- [53] Wong, I.C., Oteri, O., and McCoy, W. (2009), “Optimal resource allocation in uplink SC-FDMA systems,” *IEEE Trans. on Wireless Com.*, 8, no. 5, 2161-2165.
- [54] Junsung, L., Myung, H.G., Kyungjin, Oh, Goodman, D.J. (2006), “Proportional Fair Scheduling of Uplink Single-Carrier FDMA Systems,” *IEEE 17th Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, 1-6.
- [55] M. Hayajneh and C. T. Abdallah. “Distributed joint rate and power control game-theoretic algorithms for wireless data,” *IEEE Commun. Letters*, vol. 8, no.8, pp. 511-513, August 2004.
- [56] W. Zhao and M. Lu, “Distributed Rate and Power Control for CDMA Uplink,” *In Proceedings 2004 IEEE Wireless Telecommunications Symposium*, pp. 9-14, Pomona, CA, May 2004.
- [57] M. R. Musku, A. T. Chronopoulos, and D. C. Popescu, “Joint Rate and Power Control Using Game Theory,” *IEEE CCNC'2006*, vol.2, pp.1258 - 1262, Jan. 2006.
- [58] P.Zhou; W. Liu; W. Yuan; W. Cheng; “Energy-Efficient Joint Power and Rate Control via Pricing in Wireless Data Networks,” *IEEE Wireless Communications and Networking Conference, WCNC*, pp. 1091-1096, April 2008.
- [59] M.R. Musku, A.T. Chronopoulos, D.C. Popescu, A. Stefanescu, “A game-theoretic approach to joint rate and power control for uplink CDMA communications,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 58, issue 3, pp. 923-932, 2010.
- [60] Zhu Han, K.J.R. Liu, “Noncooperative power-control game and throughput game over wireless networks,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 53, issue 10, pp. 1625 – 1629, 2005.
- [61] F. Berggren, Seong-Lyun Kim, “Energy-efficient control of rate and power in DS-CDMA systems,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 3, issue 3, pp. 725 – 733, 2004.
- [62] E.E.Tsiropoulou, T. Kastrinogiannis, and S. Papavassiliou, “Uplink Power Control in QoS-aware Multi-Service CDMA Wireless Networks,” *Journal of Communications (JCM)*, Vol 4:9, pp. 654-668, October 2009.
- [63] Cristinel Mortici, “Some connections of monotonicity with Weierstrass extreme value theorem,” *International Journal of Mathematical Education in Science and Technology*, vol. 42, issue 3, pp. 396-399, February 2011.
- [64] E. E. Tsiropoulou, G. Katsinis, S. Papavassiliou, “Distributed Uplink Power Control in Multi-Service Wireless Networks via a Game Theoretic Approach with Convex

- Pricing,” *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 23, issue 1, pp. 61-68, 2012.
- [65] E.E.Tsiropoulou, P.Vamvakas, and S. Papavassiliou, “Energy Efficient Uplink Joint Resource Allocation Non-cooperative Game with Pricing”, *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2012)*, April 2012.
- [66] C. W. Sung, K. W. Shum and K. K. Leung, ”Stability of Distributed Power and signature Sequence Control for CDMA Systems – A Game-Theoretic Framework”, *IEEE Transactions On Information Theory*, vol. 52, No. 4, pp. 1775-1780, Apr. 2006.
- [67] Mingbo Xiao, N.B Shroff, E.K.P. Chong, “A utility-based power-control scheme in wireless cellular systems,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 11, pp. 210 – 221, 2003.
- [68] M.R. Musku, A.T. Chronopoulos, D.C. Popescu, “Joint rate and power control with pricing,” *IEEE Global Telecommunications Conference, GLOBECOM*, vol. 6, 2005.
- [69] Hyung G. Myung, David J. Goodman, “Single Carrier FDMA: A New Air Interface for Long Term Evolution,” *John Wiley & Sons, Ltd*, 2008.
- [70] Hyung G. Myung, Junsung Lim, David J. Goodman, “Single carrier FDMA for uplink wireless transmission,” *IEEE Vehicular Technology Magazine*, Vol. 1, Issue 3, pp. 30 – 38, Feb. 2007.
- [71] H.G. Myung, J. Lim, and D.J. Goodman, “Peak-to-Average Power Ratio of Single Carrier FDMA Signals with Pulse Shaping,” *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pp. 1-5, Helsinki, Finland, Sep. 2006.
- [72] F.I. Sokmen, T. Girici, “Uplink resource allocation algorithms for Single-Carrier FDMA systems,” *European Wireless Conference (EW)*, pp. 339 – 345, 2010.
- [73] D.J. Dechene, A. Shami, “Energy Efficient Resource Allocation in SC-FDMA Uplink with Synchronous HARQ Constraints,” *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 1-5, 2011.
- [74] Ariel Rubinstein, “Perfect Equilibrium in a Bargaining Model,” *Econometrica, Econometric Society*, vol. 50, no. 1, pp. 97-109, January, 1982.
- [75] Geir B. Asheim, “A unique solution to n-person sequential bargaining,” *Games and Economic Behavior, Elsevier*, vol. 4, no. 2, pp. 169-181, April, 1992.
- [76] V. Chandrasekhar, A. Gatherer, and J. G. Andrews, “Femtocell networks: a survey,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 46, No 9, pp. 59-67, September 2008.
- [77] G. d. I. Roche, A. Valcarce, D. Lopez-Perez, and J. Zhang, “Access control mechanisms for femtocells,” *IEEE Comm. Mag.*, vol. 48, no. 1, pp. 33–39, Jan. 2010.

- [78] V. Chandrasekhar, J. G. Andrews, T. Muharemovic, Z. Shen, and A. Gatherer, "Power control in two-tier femtocell networks", *IEEE Trans. on Wireless Comm.*, vol. 8, no. 8, pp. 4316 – 4328, Aug. 2009.
- [79] T. Su, W. Zheng, W. Li, D. Ling, and X. Wen, "Energy-efficient power optimization with Pareto improvement in two-tier femtocell networks," *IEEE 23rd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, pp. 2512 - 2517, 2012.
- [80] V. G. Douros, S. Troumpis, and G. Polyzos, "Power control under best response dynamics for interference mitigation in a two – tier femtocell network," *10th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks (WiOpt)*, pp. 398 - 405, May 2012.
- [81] V. Chandrasekhar, J. G. Andrews, T. Muharemovic, Z. Shen, and A. Gatherer, "Distributed power control in femtocell – underlay cellular networks," *IEEE GLOBECOM*, pp. 1 – 6, 2009.
- [82] Z. Lu, Y. Sun, X. Wen, T. Su, and D. Ling, "An energy – efficient power control algorithm in femtocell networks," *7th International conference on Computer Science & Education (ICCSE)*, pp. 395- 400, 2012.
- [83] W. Zheng, T. Su, W. Li, Z. Lu, and X. Wen, "Distributed Energy – Efficient power optimization in two – tier femtocell networks," *2012 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 5767 – 5771
- [84] E. J. Hong, S. Y. Yun, and Dong-Ho Cho, "Decentralized power control scheme in femtocell networks: a game theoretic approach," *IEEE 20th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, pp. 415 – 419, 2009.
- [85] D. T. Ngo, L. B. Le, T. Le-Ngoc, E. Hossain, and D.I. Kim, "Distributed interference management in two – tier cdma femtocell networks," *IEEE Trans. on Wireless Communications*, vol. 11, no. 3, pp. 979 – 989, 2012.
- [86] "Guidelines for evaluation of radio transmission technologies for IMT-2000," *ITU Recommendation M.1225*, 1997.
- [87] E.E. Tsiropoulou, P. Vamvakas, and S. Papavassiliou, "Joint Utility-based Uplink Power and Rate Allocation in Wireless Networks: A Non-cooperative Game Theoretic Framework", *Elsevier Physical Communications Journal*, Vol. 9, pp. 299–307, December 2013.
- [88] Alpha C. Chiang, "Fundamental Methods of Mathematical Economics," *McGraw-Hill Inc*, Third Edition, 1984.