



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Βέλτιστη Κατανομή Ισχύος και
Ρυθμού Μετάδοσης Ζεύξης
Ανόδου Ασύρματων Δικτύων
Υψηλών Ταχυτήτων με Χρήση
Κοστολόγησης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΒΑΜΒΑΚΑ Ι. ΠΑΝΑΓΙΩΤΗ

Επιβλέπων : Συμεών Παπαβασιλείου
Αναπληρωτής Καθηγητής

Αθήνα, Ιούλιος 2011



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Βέλτιστη Κατανομή Ισχύος και Ρυθμού Μετάδοσης Ζεύξης Ανόδου Ασύρματων Δικτύων Υψηλών Ταχυτήτων με Χρήση Κοστολόγησης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΒΑΜΒΑΚΑ Ι. ΠΑΝΑΓΙΩΤΗ

Επιβλέπων : Συμεών Παπαβασιλείου
Αναπληρωτής Καθηγητής

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

.....
Συμεών Παπαβασιλείου

Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Μιχαήλ Θεολόγου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ευστάθιος Συκάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2011

.....
ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ Ι. ΒΑΜΒΑΚΑΣ

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

© 2011 – Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξολοκλήρου ή τμήματος αυτής για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Βασικός σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη και ανάλυση της βέλτιστης συνδυαστικής κατανομής ισχύος και ρυθμού μετάδοσης στην ζεύξη ανόδου ασύρματων κυψελωτών δικτύων υψηλών ταχυτήτων (CDMA) επόμενης γενιάς. Τα προς μελέτη αυτά δίκτυα υποστηρίζουν ετερογενείς υπηρεσίες πραγματικού και μη χρόνου (real and non-real time services) συχνά αντικρουόμενες μεταξύ τους, με ποικίλους περιορισμούς ως προς την ποιότητά τους και την κατανάλωση των διαθέσιμων πόρων από το δίκτυο.

Για την υλοποίηση της συγκεκριμένης εργασίας, χρησιμοποιήθηκε εκτενώς ως «δάνειο» από την Οικονομική Επιστήμη, η έννοια της συνάρτησης ευχαρίστησης (utility function) των χρηστών του υπό μελέτη δικτύου. Η συγκεκριμένη συνάρτηση είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί ευρέως και σε τηλεπικοινωνιακής φύσης εφαρμογές, καθώς αντικατοπτρίζει τον βαθμό ικανοποίησης των χρηστών ανάλογα με την χρήση των πόρων του δικτύου και την ποιότητα των υπηρεσιών που τους παρέχονται, λαμβάνοντας όμως υπόψη και τις απαιτήσεις των χρηστών σε ρυθμό μετάδοσης και σε κατανάλωση ισχύος όπως επίσης και τις παρεμβολές που υπεισέρχονται εντός του δικτύου. Επιπλέον, η εν λόγω συνάρτηση σε συνδυασμό με την συνάρτηση κόστους (cost function) η οποία εισάγεται ακόλουθα ως βασικό εργαλείο λογικής κοστολόγησης της εκπεμπόμενης ισχύος των χρηστών, σχηματίζουν την συνάρτηση «καθαρής» ευχαρίστησης (net utility function) η οποία ορίζεται ως η αλγεβρική διαφορά τους. Για να καταστεί επομένως δυνατή η βέλτιστη κατανομή της ισχύος και του ρυθμού μετάδοσης, το πρόβλημα διαμορφώθηκε ως ένα μη συνεταιριστικό παίγνιο, δηλαδή μη προϋποθέτοντας την συνεργασία μεταξύ των χρηστών και η επίλυση του πραγματοποιήθηκε ακολουθώντας τις βασικές αρχές της Θεωρίας Παιγνίων. Οι χρήστες κινούμενοι πάντα εντός των φυσικών και τεχνικών περιορισμών που τους επιβάλλονται είτε από το δίκτυο είτε από τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά, επιδιώκουν ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο να μεγιστοποιήσουν τη λαμβανόμενη ευχαρίστησή τους χωρίς παράλληλα να προκαλούν άνω του ανεκτού ορίου παρεμβολές στους υπόλοιπους χρήστες εντός του κυψελωτού δικτύου στο οποίο εδρεύουν. Οι ανωτέρω απαιτήσεις εκφράζονται μέσω της συνάρτησης «καθαρής» ευχαρίστησης που προαναφέρθηκε, η οποία εμπεριέχοντας τις συναρτήσεις ευχαρίστησης και κοστολόγησης οδηγεί στον βέλτιστο καταμερισμό της ισχύος και του ρυθμού μετάδοσης, καθορίζοντας σε έναν βαθμό τις αποφάσεις που θα ληφθούν κατά την εξέλιξη του παιγνίου που εξετάζουμε, προσπαθώντας να επιβληθεί κοινωνική συμπεριφορά στους χρήστες.

Βασικό εργαλείο για την επίλυση του ανωτέρου διπαραμετρικού παιγνίου βελτιστοποίησης αποτέλεσε η χρήση της Θεωρίας Παιγνίων του Nash. Με βάση τις αρχές της, στην παρούσα διπλωματική εργασία αποδεικνύεται τόσο η ύπαρξη όσο και η μοναδικότητα του σημείου ισορροπίας κατά Nash για το μη συνεργατικό παίγνιο ταυτόχρονης κατανομής ισχύος εκπομπής και ρυθμού μετάδοσης στην άνω ζεύξη (Joint Uplink Power and Rate Allocation Non Cooperative Game – JUPRA). Για το σημείο ισορροπίας Nash που επιτυγχάνεται ταυτόχρονα και για τις δύο παραμέτρους (ισχύ και ρυθμό μετάδοσης) όλοι οι χρήστες επιτυγχάνουν ένα συγκεκριμένο κατώφλι σηματοθορυβικού λόγου ή μεταφέρουν τα δεδομένα τους με την μέγιστη ισχύ, έχοντας ως συνέπεια την τελική ισορροπία του συστήματος. Έπειτα αποδεικνύεται η σύγκλιση του μη συνεργατικού παιγνίου στο μοναδικό αυτό σημείο ισορροπίας και

παρουσιάζεται ένας κατανεμημένος, επαναληπτικός και χαμηλής πολυπλοκότητας αλγόριθμος ο οποίος θα οδηγήσει στον εντοπισμό του κατά Nash σημείου ισορροπίας για το παίγνιο (JUPRA algorithm).

Επιπρόσθετα, με απώτερο στόχο την επιβολή κοινωνικής συμπεριφοράς στους χρήστες, οι οποίοι εγωιστικά ανταγωνίζονται για την απόκτηση των απαιτούμενων πόρων από το δίκτυο, εισάγεται η έννοια της κοστολόγησης των πόρων του συστήματος και συγκεκριμένα της ισχύος μετάδοσης του κάθε χρήστη. Με γνώμονα την παραπάνω παρατήρηση, αποδεικνύεται αρχικά ότι το σημείο ισορροπίας κατά Nash του μη συνεργατικού παιγνίου ταυτόχρονης κατανομής ισχύος και ρυθμού μετάδοσης (JUPRA game), που αναφέρθηκε προηγουμένως δεν είναι αποδοτικό, και έπειτα εισάγεται η έννοια της κοστολόγησης της ισχύος μετάδοσης των χρηστών. Κατά αυτόν τον τρόπο, γίνεται η μοντελοποίηση δύο μη συνεργατικών παιγνίων ταυτόχρονης κατανομής ισχύος και ρυθμού μετάδοσης με χρήση γραμμικής και μη γραμμικής κοστολόγησης της ισχύος μετάδοσης των χρηστών αντίστοιχα. Επιπλέον, αποδεικνύεται η ύπαρξη και η μοναδικότητα του σημείου ισορροπίας κατά Nash του κάθε παιγνίου, η σύγκλιση των παιγνίων στο σημείο ισορροπίας τους και επισημαίνεται ο επαναληπτικός αλγόριθμός, ο οποίος χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό του σημείου ισορροπίας κατά Nash του κάθε παιγνίου.

Εν κατακλείδι, παράλληλα με την θεωρητική μοντελοποίηση των ανωτέρω προβλημάτων, πραγματοποιείται ένα σύνολο προσομοιώσεων για την καλύτερη αξιολόγηση και παρουσίαση των αποτελεσμάτων των εν λόγω αλγορίθμων για την αποδοτικότερη κατανομή ισχύος και ρυθμού μετάδοσης στην άνω ζεύξη των CDMA δικτύων επόμενης γενιάς. Επιπρόσθετα, παρατίθεται αναλυτική μελέτη και σύγκριση των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής, με αποτελέσματα ήδη δημοσιευμένων εργασιών στη διεθνή βιβλιογραφία, αποδεικνύοντας έμπρακτα τα οφέλη του προτεινόμενου μοντέλου.

Λέξεις Κλειδιά: <<ασύρματα δίκτυα, κατανομή πόρων με βάση την ευχαρίστηση των χρηστών, συνδυαστική κατανομή ισχύος και ρυθμού μετάδοσης, συνάρτηση ευχαρίστησης, ισορροπία κατά Nash, σύγκλιση, ποιότητα υπηρεσιών>>

Abstract

The main objective of this Diploma thesis is the efficient resource allocation in the uplink of high data rate cellular CDMA next generation wireless networks. These networks are expected to support multiple and heterogeneous services, ranging from real to non real time applications often with conflicting prerequisites and constraints with respect to their quality and the inner network resource demanding consumption.

Towards the implementation of this work, appropriate users' utility functions commonly used in Economic Sciences, are introduced. Utility function can be widely employed in communication services, as it reflects users' degree of satisfaction in relation to the expected tradeoff between his utility-based actual uplink throughput performance and the corresponding energy consumption per time slot. Furthermore, adopting appropriate pricing mechanisms, the net-utility function is introduced, which is expressed via the algebraic difference of the utility function and the introduced pricing function, with respect to user's uplink transmission power. Therefore, in order to achieve an optimal allocation of users' uplink transmission power and rate, the resource allocation problem is formulated as a non cooperative distributed game. The corresponding non-cooperative and distributed game is solved based on the principles of Game Theory, where users aim selfishly at maximizing their utility-based performance under the imposed physical limitations and their technical specifications.

Aiming at solving the above two parameter joint optimization problem, the Nash Equilibrium concept was adopted. Under the principles of Nash's Theory, in this Diploma Thesis the existence and uniqueness of the Nash Equilibrium for the Joint Uplink Power and Rate Allocation Non Cooperative Game (JUPRA game) is mathematically proved. At the Nash equilibrium point of JUPRA game, all users attain a specific value of Signal – to – Noise Ratio (SNR) or they transmit at their maximum power. JUPRA game's convergence to its unique Nash equilibrium is proven and a distributed, iterative and low complexity algorithm for computing the desired equilibrium point is presented.

Aiming at the efficiency of joint power and rate allocation, the users should take into consideration not only their limited battery life, where the optimal strategy is to transmit in low power levels, while fulfilling their QoS requirements, but also the cost they impose by their transmissions on other users via the interference they generate. A fundamental way introduced in the literature in order to deal with this selfish behavior of the users, who only aim to maximize their own utility by adjusting their own transmission power and rate, is pricing. Therefore, the inefficiency of JUPRA game's Nash equilibrium is discussed, and consequently pricing schemes with respect to user's uplink transmission power are adopted. Under these conditions, two different non cooperative games for the joint uplink transmission power and rate allocation considering linear and non linear (convex) pricing policies are formulated. For each game, the existence, uniqueness and the convergence to their unique Nash equilibrium point is proved, and a corresponding distributed iterative and low-complexity algorithm is presented. Finally, the performance of the proposed approach is evaluated via modeling and simulation, considering both linear and non-linear pricing, and compared against other existing game-theoretic approaches.

Keywords: Wireless networks, utility based resource allocation, joint power and rate allocation, utility function, Nash equilibrium, convergence, Quality-of-Service

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες προς τον επιβλέποντα καθηγητή της παρούσας διπλωματικής εργασίας, κ. Συμεών Παπαβασιλείου, ο οποίος εμπιστεύθηκε στο πρόσωπό μου την ανάθεση ενός ιδιαίτερα ενδιαφέροντος και απαιτητικού επιστημονικού έργου, διευρύνοντας τους πνευματικούς μου ορίζοντες μετά την πενταετή φοίτησή μου στο Ε.Μ.Π.

Επιπλέον, θα ήθελα ιδιαίτερα να ευχαριστήσω την υποψήφια διδάκτορα Ε.Μ.Π. κ. Ειρήνη-Ελένη Τσιροπούλου, η οποία σε ολόκληρη την διάρκεια της προσπάθειας περάτωσης της διπλωματικής μου εργασίας, υπήρξε πολύτιμος συνεργάτης και καθοδηγητής, παρέχοντας μου σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή την υποστήριξή της με τις γνώσεις της, τις συμβουλές της και την υπομονή της. Οφείλω να ευχαριστήσω επίσης όλα τα μέλη του εργαστηρίου NETMODE, οι οποίοι με υποδέχτηκαν θερμά και με βοήθησαν όποτε χρειάστηκε.

Τέλος, θα ήθελα να δηλώσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένειά μου, η οποία στην δημιουργική αυτή περίοδο, όπως και σε όλη την μέχρι τώρα ζωή μου υπήρξε πάντα δίπλα μου στις καλές και δύσκολες στιγμές, καθώς και στους φίλους μου των οποίων η συντροφιά μου έδωσε έμπνευση και αποφασιστικότητα.

Αφιερώνεται στην
οικογένειά μου

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	14
ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο	19
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	20
1.1. Πρόλογος.....	21
1.2. Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας.....	24
1.3. Δομή της διπλωματικής εργασίας.....	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο	29
ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΠΟΡΩΝ ΣΕ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΚΥΨΕΛΩΤΑ ΔΙΚΤΥΑ.....	30
2.1. Εισαγωγικά.....	31
2.2. Ασύρματα δίκτυα CDMA.....	31
2.3. Διάκριση υπηρεσιών στο βραχυπρόθεσμο διάστημα.....	35
2.3.1. Υπηρεσίες πραγματικού χρόνου.....	35
2.3.2. Υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου.....	37
2.4. Κατανομή πόρων σε ασύρματα CDMA δίκτυα.....	38
2.4.1. Κατανομή ισχύος σε ασύρματα CDMA δίκτυα χωρίς πολιτική κοστολόγησης.....	40
2.4.2. Κατανομή ισχύος σε ασύρματα CDMA δίκτυα με πολιτική γραμμικής κοστολόγησης.....	42
2.4.3. Κατανομή ισχύος σε ασύρματα CDMA δίκτυα με πολιτική κυρτής κοστολόγησης.....	48
2.4.4. Συνδυαστική κατανομή ισχύος και ρυθμού μετάδοσης σε ασύρματα CDMA δίκτυα.....	52
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ^ο	57
ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΡΥΘΜΟΥ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΣΕ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΚΥΨΕΛΩΤΑ ΔΙΚΤΥΑ.....	58
3.1. Εισαγωγικά.....	59
3.2. Χαρακτηριστικές παράμετροι δικτύου.....	60
3.3. Συνάρτηση ευχαρίστησης.....	62
3.4. Μη συνεργατικό παίγνιο συνδυαστικής κατανομής ισχύος και ρυθμού μετάδοσης στην άνω ζεύξη ασυρμάτου CDMA δικτύου.....	67
3.5. Εύρεση σημείου ισορροπίας κατά Nash για το μη συνεργατικό παίγνιο.....	68
3.6. Σύγκλιση του μη συνεργατικού παιγνίου.....	71
3.7. Αλγόριθμος συνδυαστικής κατανομής ισχύος και ρυθμού μετάδοσης στην άνω ζεύξη.....	74
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ^ο	77

ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΡΥΘΜΟΥ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΣΕ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΚΥΨΕΛΩΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΚΟΣΤΟΛΟΓΗΣΗΣ.....	78
4.1. Εισαγωγικά.....	79
4.2. Αναποτελεσματικότητα του σημείου ισορροπίας κατά Nash.....	80
4.3. Χαρακτηριστικές παράμετροι δικτύου.....	82
4.4. Συνάρτηση καθαρής ευχαρίστησης.....	83
4.5. Μη συνεργατικό παίγνιο συνδυαστικής κατανομής ισχύος και ρυθμού μετάδοσης στην άνω ζεύξη ασυρμάτου CDMA δικτύου με χρήση κοστολόγησης.....	84
4.6. Εύρεση σημείου ισορροπίας κατά Nash για το μη συνεργατικό παίγνιο με χρήση κοστολόγησης.....	85
4.7. Εισαγωγή γραμμικής κοστολόγησης.....	87
4.7.1. Συνάρτηση κόστους.....	87
4.7.2. Pareto βελτιστοποίηση του νέου σημείου ισορροπίας κατά Nash ως προς την ισορροπία χωρίς κοστολόγηση.....	89
4.8. Ανάγκη εισαγωγής μη γραμμικών μορφών κοστολόγησης.....	91
4.9. Εισαγωγή κυρτής κοστολόγησης.....	91
4.9.1. Συνάρτηση κόστους.....	92
4.10. Σύγκλιση του μη συνεργατικού παιγνίου με πολιτική κοστολόγησης.....	94
4.11. Αλγόριθμος συνδυαστικής κατανομής ισχύος και ρυθμού μετάδοσης στην άνω ζεύξη με πολιτική κοστολόγησης.....	95
4.12. Συμπεράσματα από την εισαγωγή σχημάτων κοστολόγησης.....	98
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ^ο	99
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ – ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ....	100
5.1. Εισαγωγικά.....	101
5.2. Σενάριο προσομοίωσης.....	102
5.3. Προσομοίωση κατανομής ισχύος και ρυθμού μετάδοσης χωρίς πολιτική κοστολόγησης.....	103
5.3.1. Αριθμητικά αποτελέσματα.....	104
5.3.2. Συγκρίσεις με την βιβλιογραφία.....	108
5.4. Προσομοίωση κατανομής ισχύος και ρυθμού μετάδοσης με χρήση κοστολόγησης.....	111
5.4.1. Αριθμητικά αποτελέσματα – Συγκρίσεις.....	111
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ^ο	117
ΕΠΙΛΟΓΟΣ.....	118
6.1. Επίλογος.....	119
6.2. Μελλοντική εργασία.....	120
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	122

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1	Πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης συχνότητας (FDMA).....	32
Σχήμα 2	Πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης χρόνου (TDMA).....	32
Σχήμα 3	Μεταφορά δεδομένων σε ασύρματο δίκτυο που χρησιμοποιεί την τεχνική CDMA.....	34
Σχήμα 4	Διάνυσμα ισχύος x κυρίαρχο κατά Pareto και διάνυσμα ισχύος z βέλτιστο κατά Pareto ως προς το διάνυσμα ισχύος y	44
Σχήμα 5	Δομή ενός κυψελωτού ασυρμάτου δικτύου με έναν κεντρικό σταθμό βάσης και ένα σύνολο κινητών τερματικών.....	60
Σχήμα 6	Μορφές της συνάρτησης πραγματικής ρυθμαπόδοσης Q_i ανάλογα με το είδος της υπηρεσίας που εξυπηρετείται.....	64
Σχήμα 7	Η συνάρτηση πραγματικής ρυθμαπόδοσης Q_i συναρτήσει του ρυθμού μετάδοσης $R_{T,i}^*$ για υπηρεσίες πραγματικού χρόνου.....	65
Σχήμα 8	Συνάρτηση απόδοσης για διαφορετικά συστήματα διαμόρφωσης....	66
Σχήμα 9	Συνεχής συνάρτηση $f(x)$ στο διάστημα $[a, b]$, που λαμβάνει μία μέγιστη και μία ελάχιστη τιμή εντός του διαστήματος αυτού.....	70
Σχήμα 10	Αντιστοιχία βέλτιστων αποκρίσεων ως προς την ισχύ εκπομπής για ένα παίγνιο με δύο παίκτες. Το σημείο τομής είναι το σημείο ισορροπίας κατά Nash.....	72
Σχήμα 11	Γραμμική κοστολόγηση της εκπεμπόμενης ισχύος.....	88
Σχήμα 12	Σύνολο συναρτήσεων ευχαρίστησης στην κατάσταση ισορροπίας πριν και μετά την επιβολή κοστολόγησης.....	90
Σχήμα 13	Κυρτή κοστολόγηση της εκπεμπόμενης ισχύος.....	93
Σχήμα 14	Αναπαράσταση της CDMA κυψέλης για την οποία προσομοιώθηκε το σύστημα με τις αποστάσεις d_i των κινητών χρηστών.....	103
Σχήμα 15	Ισχύς εκπομπής των χρηστών στο σημείο ισορροπίας για το JUPRA παίγνιο.....	104
Σχήμα 16	Ευχαρίστηση των χρηστών στο σημείο ισορροπίας για το JUPRA παίγνιο.....	105
Σχήμα 17	Αριθμός επαναλήψεων του JUPRA αλγορίθμου για την σύγκλιση στο τελικό διάνυσμα της ισχύος.....	106
Σχήμα 18	Αριθμός επαναλήψεων του JUPRA αλγορίθμου για την σύγκλιση στο τελικό διάνυσμα της ισχύος.....	107
Σχήμα 19	Σύγκλιση του JUPRA αλγορίθμου στο τελικό διάνυσμα της ισχύος με τυχαίο σημείο εκκίνησης.....	107
Σχήμα 20	Σύγκλιση της ισχύος εκπομπής των χρηστών υπό τον JUPRA αλγόριθμο.....	108

Σχήμα 21	Ισχύς εκπομπής των χρηστών στην κατάσταση ισορροπίας υπό διαφορετικά σενάρια προσομοίωσης.....	109
Σχήμα 22	Ρυθμός μετάδοσης των χρηστών στην κατάσταση ισορροπίας υπό διαφορετικά σενάρια προσομοίωσης.....	110
Σχήμα 23	Βέλτιστος παράγοντας c_{best} για το JUPRA – LP παίγνιο.....	112
Σχήμα 24	Βέλτιστος παράγοντας c_{best} για το JUPRA – CP παίγνιο.....	112
Σχήμα 25	Μέση ισχύς εκπομπής των χρηστών στην άνω ζεύξη στην κατάσταση ισορροπίας υπό διαφορετικά σενάρια εκτέλεσης.....	113
Σχήμα 26	Μέσος ρυθμός μετάδοσης των χρηστών στην άνω ζεύξη στην κατάσταση ισορροπίας υπό διαφορετικά σενάρια εκτέλεσης.....	113

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

- 1.1. Πρόλογος**
- 1.2. Αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας**
- 1.3. Δομή της Διπλωματικής Εργασίας**

Πρόλογος

Τις τελευταίες δεκαετίες, η κοινωνία μας γίνεται μάρτυρας μίας άνευ προηγουμένου επανάστασης στον τομέα των τεχνολογικών εξελίξεων, στην παροχή υπηρεσιών και στην μετάδοση της πληροφορίας. Οι ραγδαίες μεταβολές στον τεχνολογικό κόσμο δεν θα μπορούσαν φυσικά να αφήσουν ανεπηρέαστο τον τομέα των σύγχρονων τηλεπικοινωνιών, ο οποίος με την απελευθέρωση των αγορών και την σταθερή έως τώρα αύξηση του πλήθους των χρηστών καλείται να ανταποκριθεί στα νέα δεδομένα που σχηματίζονται. Ιδιαίτερα στις ασύρματες τηλεπικοινωνίες, η εντυπωσιακή ανάπτυξη των νέων εφαρμογών και των τεχνολογικών επιτευγμάτων σε συνδυασμό με την εισαγωγή όλης αυτής της προόδου στις δραστηριότητες της καθημερινής ζωής των ανθρώπων, καθιστούν επιτακτική την ανάγκη τα σύγχρονα μη ενσύρματα δίκτυα να ανταποκριθούν ικανοποιητικά στις απαιτήσεις των καταναλωτών σε υψηλό επίπεδο ποιότητας για τις ποικίλες υπηρεσίες που έχουν έως τώρα διαμορφωθεί.

Η σημερινή κοινωνία της «πληροφορίας» όπως έχει επικρατήσει να αποκαλείται, παρουσιάζει πλέον τάσεις απομάκρυνσης από τις παραδοσιακές μεθόδους επικοινωνιών που κυριαρχούσαν στο παρελθόν και στρέφεται σε μοντέρνες τεχνολογίες όπως τα κινητά τηλέφωνα τρίτης και τέταρτης γενιάς, φορητούς υπολογιστές, τις διαδικτυακές υπηρεσίες κτλ. Στο νέο αυτό πλαίσιο, η επικοινωνία των χρηστών, η μετάδοση και η ανταλλαγή των δεδομένων προϋποθέτουν την ύπαρξη αξιόπιστων, γρήγορων και ευρείας κάλυψης ασυρμάτων επικοινωνιών. Η ανάπτυξη αυτή που αναφέραμε έως τώρα τόσο του πλήθους των χρηστών όσο και των διαθέσιμων υπηρεσιών, συνδυάζεται με μία ταυτόχρονη αύξηση του προς μετάδοση όγκου πληροφορίας γεγονός που εντείνει την απαίτηση σχεδιασμού όσο το δυνατόν πιο αποδοτικών ασύρματων δικτύων, με στόχο την ομαλή λειτουργία των επικοινωνιών που τόσο εξαρτάται από αυτές ο πολιτισμένος κόσμος. Για όλους τους λόγους που προαναφέρθηκαν, στην παρούσα μελέτη θα υιοθετηθεί η χρήση του μοντέλου ασύρματου δικτύου υψηλού ρυθμού μετάδοσης HDR (High Data Rate) το οποίο βασίζεται σε τεχνικές μετάδοσης και πολυπλέξης με διαίρεση κώδικα (Code Division Multiple Access-CDMA).

Καθώς αναφέρθηκε και προηγουμένως, το γεγονός ότι το σύνολο των υπηρεσιών που κυριαρχούν σήμερα στην σύγχρονη ασύρματη τηλεπικοινωνιακή εποχή, χαρακτηρίζεται από έντονη ετερογένεια, δημιουργεί και διαφορετικές απαιτήσεις από τους χρήστες ως προς την ποιότητα των υπηρεσιών αυτών (QoS – Quality of Service). Για τους λόγους αυτούς, ιδιαίτερα ωφέλιμη έχει αποδειχθεί μέσα από πρόσφατες μελέτες η υιοθέτηση της συνάρτησης ευχαρίστησης (utility function) από τον τομέα των οικονομικών επιστημών. Η εν λόγω συνάρτηση διευκολύνει την διατύπωση ευέλικτων αλγορίθμων ευκαιριακής δρομολόγησης για την αποδοτικότερη κατανομή των διαθέσιμων πόρων του δικτύου, ενώ εκφράζει

κατάλληλα τις διακυμάνσεις των απαιτήσεων των χρηστών που βρίσκονται εντός του δικτύου και την ανεκτικότητα τους ως προς τις υπηρεσίες που τους προσφέρονται. Παρατηρούμε επομένως ότι η χρήση της συνάρτησης ευχαρίστησης πλεονεκτεί σε σχέση με προηγούμενες θεωρήσεις της βιβλιογραφίας, καθώς αποκτούμε μια μονάδα εκτίμησης της ευχαρίστησης των χρηστών από το επίπεδο των υπηρεσιών αλλά και από τις επικρατούσες συνθήκες στο δίκτυο. Συνεπώς, η μοντελοποίηση της απόδοσης των χρηστών του δικτύου (ο καθένας με διαφορετικά χαρακτηριστικά και απαιτήσεις) είναι εφικτή μέσω κατάλληλα επιλεγμένων συναρτήσεων.

Ο κάθε ένας από τους χρήστες της μορφής των ασύρματων δικτύων που εξετάζουμε, επιδιώκει αυτόνομα την όσο το δυνατόν καλύτερη απόδοση και ποιότητα των υπηρεσιών που χρησιμοποιεί, σε συνάρτηση πάντα με την κίνηση στο δίκτυο αλλά και την διαθεσιμότητα των πόρων. Η παραπάνω λογική ωθεί τους χρήστες στην υιοθέτηση μίας εγωκεντρικής προσέγγισης στην προσπάθεια τους να επιτύχουν τις προδιαγραφές ποιότητας που επιζητούν. Συνέπεια αυτού είναι η επιβάρυνση του ίδιου του δικτύου, καθώς οι χρήστες εκφράζοντας αντικρουόμενα συμφέροντα στην πορεία εκτέλεσης του παιγνίου οδηγούν σε αύξηση των μεταξύ τους παρεμβολών και μη αρμονική κατανομή των πόρων που τους διατίθενται από το ασύρματο δίκτυο.

Ως πρώτη προσπάθεια αντιμετώπισης των δυσκολιών που περιγράφηκαν παραπάνω, τα τελευταία έτη αξιολογες ερευνητικές προσπάθειες έχουν αφιερωθεί στο πρόβλημα της βέλτιστης αποδοτικά κατανομής των διαθέσιμων πόρων στα ασύρματα δίκτυα. Μεταξύ των παραμέτρων για τις οποίες έχει παρουσιαστεί η ανάγκη για τον έλεγχο τους σε ασύρματα περιβάλλοντα, ιδιαίτερης σημασίας αποτελούν η ισχύς εκπομπής, αλλά και ο ρυθμός μετάδοσης των χρηστών. Στην έως τώρα υπάρχουσα βιβλιογραφία έχουν προταθεί διάφορες προσεγγίσεις οι οποίες χειρίζονται το πρόβλημα της κατανομής ισχύος ξεχωριστά με στόχο τον προσδιορισμό του ελάχιστου εφικτού και απαραίτητου επιπέδου εκπομπής ισχύος ώστε να ικανοποιούνται οι αξιώσεις των χρηστών του δικτύου για την ποιότητα των υπηρεσιών που τους παρέχονται από αυτό. Εκτός των άλλων, έχουν αρχίσει να παρουσιάζονται προσεγγίσεις οι οποίες βασίζονται στη Θεωρία Παιγνίων ως πολλά υποσχόμενες εναλλακτικές στη διατύπωση του προβλήματος του ελέγχου της κατανεμημένης ισχύος εκπομπής, μέσα από την υιοθέτηση μίας κατάλληλης συνάρτησης ευχαρίστησης των χρηστών του δικτύου. Ωστόσο, μία ανεξάρτητη κατανομή της ισχύος εκπομπής των χρηστών δεν θα λάμβανε υπόψη την έλλειψη επάρκειας του διαθέσιμου από το δίκτυο εύρους ζώνης, όπως επίσης και την αναγκαιότητα για τα ασύρματα δίκτυα επόμενης γενιάς να υποστηρίζουν πολλών επιπέδων και διαφορετικών χαρακτηριστικών υπηρεσίες με ποικίλες απαιτήσεις ισχύος η κάθε μία. Τελικά, η συνολική δομή του προβλήματος μπορεί να μοντελοποιηθεί με ένα μη συνεργατικό παίγνιο στο οποίο ακολουθώντας τη λογική που αναφέρθηκε και νωρίτερα καθορίζονται οι παράμετροι που επιθυμεί ο κάθε χρήστης ξεχωριστά. Η τελική σύγκλιση του παιγνίου θα οδηγήσει σε ένα σημείο ισορροπίας κατά Nash (Nash Equilibrium) για το οποίο θα γίνει εκτενής θεωρητική έρευνα και ανάλυση των ιδιοτήτων του.

Σε δεύτερο στάδιο, η ανάγκη μίας κοινωνικότερης συμπεριφοράς των χρηστών εντός του δικτύου η οποία θα αμβλύνει τις διαφορετικές τους διεκδικήσεις και θα

αναδεικνύει μία πιο συνεργατική χροιά στην υλοποίηση της κατανομής των πόρων, οδηγεί στην εισαγωγή της έννοιας της κοστολόγησης. Το ασύρματο δίκτυο κοστολογεί τους χρήστες ως προς την ισχύ εκπομπής μέσω μίας συνάρτησης κόστους (cost function) στοχεύοντας στον οικειοθελή περιορισμό της από τον κάθε χρήστη ξεχωριστά, ικανοποιώντας παράλληλα τις ποιοτικές του απαιτήσεις, ώστε να επιτύχει μείωση στο σύνολο των παρεμβολών και του θορύβου εντός του δικτύου, αύξηση στην χωρητικότητα του δικτύου αλλά και στην προστασία του ασύρματου τερματικού από την ταχύτατη εξάντληση της μπαταρίας του. Ταυτόχρονα, ο συνδυασμός των συναρτήσεων ευχαρίστησης που χαρακτηρίζει τον κάθε χρήστη και κόστους που επιβάλλεται από το δίκτυο, οδηγεί στην εισαγωγή μίας νέας έννοιας, αυτήν της καθαρής ευχαρίστησης, η οποία με την σειρά της μοντελοποιείται από μία νέα συνάρτηση, την συνάρτηση «καθαρής» ευχαρίστησης (net utility function) η οποία αποτελεί το πλέον αντιπροσωπευτικό μέγεθος της πραγματικής ικανοποίησης των χρηστών λαμβάνοντας υπόψη την ποιότητα των υπηρεσιών.

Τα ασύρματα δίκτυα πολλαπλής πρόσβασης διαίρεσης κώδικα (γνωστά ως Code Division Multiple Access networks – CDMA) έχουν αποτελέσει έως σήμερα αντικείμενο εκτενούς επιστημονικής έρευνας. Πιο συγκεκριμένα για την προς τα κάτω ζεύξη έχει ορισθεί η συνάρτηση ευχαρίστησης ως μία γραμμική σχέση ανάμεσα στην απόδοση των υπηρεσιών των χρηστών και την πραγματική ρυθμαπόδοση (ρυθμός μετάδοσης) που αυτοί λαμβάνουν, δηλαδή το πλήθος των ορθώς λαμβανόμενων bits στον σταθμό βάσης. Στην εξαγωγή της σχέσης αυτής έχουν ληφθεί υπόψη παράγοντες δικαιοσύνης, οι βραχυπρόθεσμες απαιτήσεις των χρηστών που χρησιμοποιούν ετερογενείς υπηρεσίες (πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου) και οι περιορισμοί που επιβάλει το φυσικό μέσο μεταφοράς. Τέλος, η χρήση επαναληπτικών αλγορίθμων ευκαιριακής δρομολόγησης επιτυγχάνει την επίλυση της ζητούμενης κατανομής πόρων κατά τον βέλτιστο τρόπο.

Σε αντίθεση με την κάτω ζεύξη, στην προς τα άνω ζεύξη των δικτύων αυτών, οι αυστηροί περιορισμοί που επιβάλλονται για την ισχύ εκπομπής διαφοροποιούν σε κάποιο βαθμό την προσπάθεια λύσης του προβλήματος, καθώς τα διαφορετικά χαρακτηριστικά (τόσο φυσικά όσο και στο είδος της υπηρεσίας που χρησιμοποιούν) για τους χρήστες ευνοούν μία εγωιστική απόπειρα των χρηστών να μεγιστοποιήσουν την συνάρτηση ευχαρίστησής τους, με άλλα λόγια να εξασφαλίσουν την καλύτερη αξιοποίηση των υπηρεσιών ως προς τους διαθέσιμους πόρους. Η όλη αυτή θεώρηση μπορεί να εκφραστεί μέσα από έναν μη συνεργατικό καταναμημένο αλγόριθμο όπου απλά κάθε μεμονωμένος κόμβος – ασύρματος χρήστης του δικτύου που ερευνούμε, επιδιώκει να εξασφαλίσει την μέγιστη ικανοποίηση του.

Με βάση λοιπόν τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, οι χρήστες υιοθετούν τη λογική μεγιστοποίησης της συνάρτησης καθαρής ευχαρίστησής τους, εφόσον όμως ληφθεί υπόψη η εισαγωγή της κοστολόγησης. Η κοστολόγηση των πόρων του συστήματος προκύπτει ως ένα ισχυρό εργαλείο για την επίτευξη ενός πιο δίκαιου κοινωνικά αποτελέσματος. Γραμμικής μορφής απόπειρες κοστολόγησης ως προς την ισχύ εκπομπής έχουν προταθεί στην βιβλιογραφία ώστε να ενθαρρύνουν τους χρήστες για αποδοτικότερη διαχείριση των πόρων του συστήματος. Κατά αυτόν τον τρόπο

επιτράπηκε η δόμηση ενός πιο εξελιγμένου παιγνίου σε σχέση με πριν, με ενδιαφέροντα αποτελέσματα. Η σύγκλιση του παιγνίου οδηγεί στην εύρεση του ζητούμενου σημείου ισορροπίας κατά Nash, η απόδειξη της ύπαρξης ή μη του οποίου μπορεί να αποδειχθεί και θεωρητικά. Οι μηχανισμοί γραμμικής κοστολόγησης υιοθετήθηκαν με στόχο τη «μεταφορά» της λύσης της ισορροπίας κατά Nash σε μία βέλτιστη κατά Pareto λύση, καθώς εξαιτίας της μη ιδανικής συμπεριφοράς των χρηστών και των ειδικών συνθηκών που επικρατούν εντός του δικτύου, το αρχικό κατά Nash σημείο ισορροπίας που μπορεί να εντοπιστεί δε συνεπάγεται ότι αποτελεί απαραίτητα τη βέλτιστη λύση του εξεταζόμενου προβλήματος. Επιπλέον, παρατηρούμε ότι η βλάβη που ένας χρήστης προκαλεί στους «γείτονές» του μέσω θορύβου και παρεμβολών, δεν είναι αναλογική της ισχύος εκπομπής του. Ως συνέπεια, μία κοστολόγηση κυρτής μορφής (εν γένει μη γραμμική μέθοδος κοστολόγησης) ανταποκρίνεται καλύτερα στην πραγματικότητα όπου το κόστος που καλείται να πληρώσει ένας χρήστης ώστε να του επιτραπεί να εκπέμψει αυξάνεται ραγδαία, εάν η ισχύς εκπομπής του ξεπεράσει ένα συγκεκριμένο όριο/κατώφλι.

Μία τέτοια θεώρηση αντικατοπτρίζει καλύτερα την σπουδαιότητα της ορθής διαχείρισης των πόρων του συστήματος και εξάγει περισσότερο ευέλικτα αποτελέσματα. Για το λόγο αυτό, η εισαγωγή της κοστολόγησης συνολικά, συνιστώντας το μέσο το οποίο θα ενθαρρύνει τη συνεργατική προσέγγιση των χρηστών μπορεί να οδηγήσει σε ένα βέλτιστο και δικαιότερο κοινωνικά αποτέλεσμα για το δίκτυο στο σύνολό του.

1.2

Αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία έχει ως βασικό της στόχο την συνδυαστική κατανομή της ισχύος εκπομπής και του ρυθμού μετάδοσης για κάθε ένα χρήστη ξεχωριστά εντός ενός ασύρματου CDMA μονοκυψελωτού δικτύου. Οι χρήστες μεταφέρουν δεδομένα προς τον σταθμό βάσης, δηλαδή αναφερόμαστε στην λειτουργία της άνω ζεύξης του δικτύου. Ακόλουθα, θα εισαχθούν τεχνικές κοστολόγησης ως προς την ισχύ που χρειάζονται οι χρήστες για να εκπέμψουν με παράλληλη ανάλυση των μεταβολών που επιφέρουν στην συνολική συμπεριφορά του συστήματος που εξετάζουμε. Επιπλέον, θα εξετασθεί η ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών προς τους χρήστες και ο βαθμός στον οποίο επηρεάζονται τόσο από την ετερογένεια που τις διακρίνει (real and non-real time services) όσο και από τις διαφορετικές συνθήκες που επιβάλλει ο διαχειριστής στο δίκτυο (κοστολογήσεις).

Όπως ήδη δηλώθηκε, στην εν λόγω έρευνα θα χρησιμοποιήσουμε εκτενώς την συνάρτηση ευχαρίστησης, εργαλείο το οποίο μας παρέχεται από την οικονομική επιστήμη και πιο συγκεκριμένα από την Μικροοικονομική Θεωρία. Η συνάρτηση

αυτή κατορθώνει με κανονικοποιημένο και συνδυαστικό τρόπο να εκφράσει την πραγματική ικανοποίηση του κάθε χρήστη από την ποιότητα των υπηρεσιών που απολαμβάνει, ανάλογα όμως με την φύση της υπηρεσίας που τον ενδιαφέρει (όπως διαφαίνεται από την ρυθμαπόδοση που αναμένει ο χρήστης) και τις διάφορες παραμέτρους του καναλιού μεταφοράς. Αυτό επιδιώκεται να γίνει με την ελάχιστη κατανάλωση ισχύος και τον μέγιστο ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων που ζητείται να σταλούν προς τον σταθμό βάσης. Η απαίτηση για μία δικαιότερη κατανομή των διαθέσιμων πόρων του δικτύου μας οδηγεί σε μία νέα προσέγγιση κατανομής των ανωτέρω μεγεθών η οποία περιλαμβάνει την έννοια της κοστολόγησης της εκπεμπόμενης ισχύος από τους χρήστες. Το νέο πρόβλημα που σχηματίζεται, επιχειρείται να επιλυθεί με μία νέα συνάρτηση, αυτήν της καθαρής ευχαρίστησης η οποία μπορεί να θεωρηθεί ως μία λογική εξέλιξη της συνάρτησης ευχαρίστησης η οποία μεταβλήθηκε ανάλογα ώστε να συμπεριλάβει την λογική της κοστολόγησης μέσα από την συνάρτηση κόστους. Η έννοια της κοστολόγησης αναδεικνύοντας την ανάγκη επιβολής κοινωνικής συμπεριφοράς στους χρήστες στην προσπάθεια του καθενός να καθορίσει την ισχύ και τον ρυθμό μετάδοσής του, συντελεί στον δικαιότερο και κοινωνικότερο καταμερισμό των ανωτέρω παραμέτρων για το σύνολο του δικτύου και στην εύρεση μίας λύσης η οποία ανταποκρίνεται σε κοινωνικά αποδεκτά κριτήρια και επιφέρει καλύτερη εκμετάλλευση και κατανομή των πόρων.

Στις δύο προσεγγίσεις ταυτόχρονης κατανομής ισχύος και ρυθμού μετάδοσης στην άνω ζεύξη των ασύρματων CDMA δικτύων που μόλις αναφέραμε (Joint Uplink Power & Rate Allocation - JUPRA - in wireless CDMA Networks with or without pricing schemes), βασικό κριτήριο αποτελεί η μεγιστοποίηση της συνάρτησης (καθαρής) ευχαρίστησης του κάθε χρήστη αυτόνομα σε σχέση με τους υπόλοιπους χρήστες με τους οποίους μοιράζεται το διαθέσιμο εύρος ζώνης του δικτύου. Με αυτόν τον τρόπο αντιπροσωπεύεται η ουσιαστική ικανοποίηση από την ποιότητα της υπηρεσίας που απολαμβάνει με την αντίστοιχη κατανάλωση των πόρων. Και στις δύο περιπτώσεις τα προβλήματα μοντελοποιούνται με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι δυνατή η διατύπωση ενός αντίστοιχου μη συνεργατικού παιγνίου. Με την βοήθεια των μαθηματικών εργαλείων που μας παρέχονται από την Θεωρία Παιγνίων, στην παρούσα διπλωματική ερευνητική εργασία αποδεικνύεται η σύγκλιση του παιγνίου σε ένα μοναδικό κατά Nash σημείο ισορροπίας (Nash Equilibrium – NE). Στο εν λόγω σημείο ισορροπίας, το σύστημα έχει κατορθώσει να γεφυρώσει τα αντικρουόμενα συμφέροντα και τις αντίπαλες πολιτικές των χρηστών του δικτύου, έτσι ώστε το τελικό διάνυσμα της ισχύος και του ρυθμού μετάδοσης να αποτελεί τη βέλτιστη επιλογή για κάθε χρήστη. Οποιαδήποτε άλλη τιμή πέραν του σημείου ισορροπίας στο οποίο καταλήξαμε, δεν θα ήταν επιθυμητή από τον κάθε χρήστη, δεδομένων των στρατηγικών των υπολοίπων χρηστών, καθώς θα οδηγούσε σε μείωση της συνάρτησης ευχαρίστησής του και για τον λόγο αυτό χαρακτηρίζεται ανεπιθύμητη. Η παρουσίαση του εκάστοτε παιγνίου γίνεται με αντίστοιχη αναφορά στον κατανομημένο αλγόριθμο που χρησιμοποιήθηκε (JUPRA and JUPRA-P algorithm).

Όπως έχει γίνει κατανοητό, η εισαγωγή της πολιτικής κοστολόγησης επιβάλλει σημαντικές αλλαγές στο εξεταζόμενο σύστημα, καθώς μετριάζει την αρχική εγωιστική πολιτική ρύθμισης των παραμέτρων που ακολούθησαν οι χρήστες στο

παίγνιο χωρίς κοστολόγηση. Συγκρίνοντας ακολούθως τα σημεία ισορροπίας κατά Nash όπως αυτά προέκυψαν από την σύγκλιση του κάθε παιγνίου ξεχωριστά, στην έρευνα μας θα αποδείξουμε την αναποτελεσματικότητα του σημείου ισορροπίας από το παίγνιο χωρίς κοστολόγηση σε σχέση με το παίγνιο με κάποιου είδους πολιτική κοστολόγησης. Η αυξημένη αποτελεσματικότητα για όλους τους χρήστες του δικτύου στο σημείο ισορροπίας κατά Nash μετά την εισαγωγή της συνάρτησης κόστους, θα αποδειχθεί ότι αποτελεί λύση βέλτιστη κατά Pareto σε σχέση με το αρχικό παίγνιο.

Ολοκληρώνοντας, εκτός από την θεωρητική επίλυση του προβλήματος που θα μελετήσουμε, στην παρούσα διπλωματική εργασία θα επιχειρήσουμε να επιβεβαιώσουμε τα θεωρητικά αποτελέσματα και πρακτικά, μέσω αναλυτικών προσομοιώσεων και αριθμητικών αποτελεσμάτων. Αυτό θα γίνει εφικτό μέσα από την υλοποίηση των αλγορίθμων που αναφερθήκαν νωρίτερα σε μορφή κώδικα και την ακόλουθη προσομοίωση τους στο υπολογιστικό περιβάλλον “Matlab”. Σε τελευταίο στάδιο, θα παρουσιαστούν τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των ανωτέρω προσομοιώσεων, θα συγκριθούν με τα θεωρητικά στοιχεία και μεταξύ τους και θα ακολουθήσει λεπτομερής σχολιασμός με εξαγωγή των αντίστοιχων συμπερασμάτων, καθώς και σύγκριση με αποτελέσματα από τη βιβλιογραφία, με σκοπό την ολοκληρωτική και πλήρη μελέτη του προβλήματος.

1.3

Δομή της Διπλωματικής Εργασίας

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται συνοπτικά η δομή της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Μετά το πρώτο εισαγωγικό κεφάλαιο, στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μία αναφορά των βασικών χαρακτηριστικών του συστήματος HDR και των ασύρματων κυψελωτών δικτύων CDMA, καθώς και μία λεπτομερειακή καταγραφή των μέχρι τώρα προσπαθειών για την κατανομή πόρων στα δίκτυα αυτά. Στο κεφάλαιο 3, παρουσιάζεται εκτενώς η συνολική θεωρητική επίλυση του προβλήματος του μη συνεταιριστικού παιγνίου της βέλτιστης συνδυαστικής κατανομής ισχύος εκπομπής και ρυθμού μετάδοσης (JUPRA game) στα ασύρματα δίκτυα που μελετούμε χωρίς πολιτική κοστολόγησης. Θα παρατεθούν όλοι οι αναγκαίοι ορισμοί από την Θεωρία Παιγνίων, θα ακολουθήσει η μοντελοποίηση του παιγνίου όπως δηλώνεται από τις παραμέτρους και τις συναρτήσεις που περικλείει (utility – cost – net utility functions) και τελικά η πορεία εντοπισμού του μοναδικού σημείου ισορροπίας κατά Nash (Nash equilibrium) μέσω της σύγκλισης του αλγορίθμου που δημιουργήθηκε για το αντίστοιχο παίγνιο. Στο τέταρτο κεφάλαιο εισάγεται η έννοια της κοστολόγησης ως προς την ισχύ μετάδοσης των χρηστών (pricing with respect to user’s uplink transmission power) με ανάλογη παρουσίαση του νέου παιγνίου προκύπτει (JUPRA – P game), των χαρακτηριστικών του και της πορείας επίλυσής του, ενώ ταυτόχρονα θα περιγραφεί η βελτίωση της κατανομής των ζητούμενων παραμέτρων σε σχέση με την

προηγούμενη θεώρηση. Το παίγνιο θα εξετασθεί για δύο βασικά σχήματα κοστολόγησης, γραμμικής και μη γραμμικής μορφής (ως εξέλιξη της προηγούμενης) και τέλος θα διατυπωθεί και πάλι ο αλγόριθμος υλοποίησης που χρησιμοποιείται. Στο 5^ο κεφάλαιο θα παρουσιαστούν λεπτομερώς τα αριθμητικά αποτελέσματα και για τις τρεις προαναφερθείσες προσεγγίσεις στην κατανομή ισχύος και ρυθμού μετάδοσης στα ασύρματα δίκτυα, όπως προέκυψαν από ένα σύνολο προσομοιώσεων, με αντίστοιχη σύγκριση τόσο μεταξύ τους όσο και με δεδομένα από ανάλογες μελέτες που έχουν γίνει έως τώρα στην υπάρχουσα βιβλιογραφία. Τέλος, στο 6^ο κεφάλαιο ακολουθεί ο επίλογος στον οποίο συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα στα οποία καταλήξαμε από την προσπάθεια επίλυσης του προβλήματος βέλτιστης κατανομής πόρων, ενώ γίνεται και μία εκτίμηση για την μελλοντική εφαρμογή αλλά και τις πιθανές επεκτάσεις της παρούσας ερευνητικής προσπάθειας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΠΟΡΩΝ ΣΕ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΚΥΨΕΛΩΤΑ ΔΙΚΤΥΑ

- 2.1. Εισαγωγικά**
- 2.2. Ασύρματα CDMA Δίκτυα**
- 2.3. Διάκριση Υπηρεσιών στο Βραχυπρόθεσμο
Διάστημα**
- 2.4. Κατανομή Πόρων σε Ασύρματα CDMA
Δίκτυα**

2.1

Εισαγωγικά

Πριν ασχοληθούμε αναλυτικά με την περιγραφή και δόμηση του μαθηματικού μοντέλου το οποίο θα αποτελέσει το θεωρητικό υπόβαθρο του προβλήματος αποδοτικής κατανομής πόρων, στο δεύτερο κεφάλαιο της διπλωματικής αυτής εργασίας, αξίζει να γίνει μία εισαγωγική παρουσίαση του ασύρματου περιβάλλοντος που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί. Χρησιμοποιώντας το μοντέλο HDR (High Data Rate) για την μετάδοση των δεδομένων με πολύ υψηλές ταχύτητες, το ασύρματο δίκτυο στο οποίο θα επιχειρηθεί η κατανομή πόρων αποτελείται από μία κυψέλη που συνίσταται από έναν σταθμό βάσης (Base Station) και ένα σύνολο από κινητούς χρήστες, οι οποίοι γίνονται αντιληπτοί από το δίκτυο ως τερματικά σημεία (Terminal Points) και ανταλλάσσουν τις διάφορες πληροφορίες με τον σταθμό βάσης χρησιμοποιώντας την τεχνική πρόσβασης CDMA. Για τον λόγο αυτόν θα εκτεθούν τα βασικά χαρακτηριστικά της CDMA μορφής κωδικοποίησης και των υπηρεσιών που εξυπηρετούνται μέσω αυτής, ενώ θα γίνει και μία ολοκληρωμένη αναφορά των μέχρι τώρα επιστημονικών ερευνών γύρω από την διαχείριση πόρων σε ασύρματα CDMA δίκτυα.

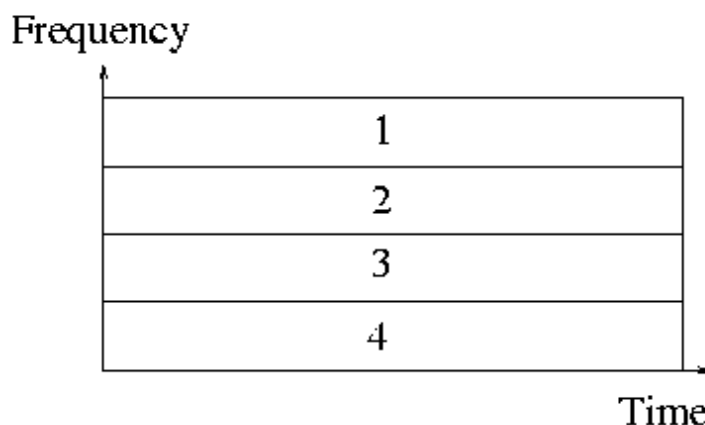
2.2

Ασύρματα Δίκτυα CDMA

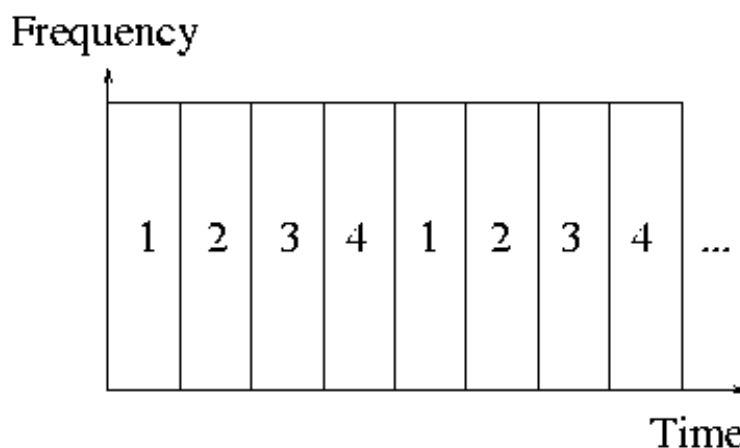
Η τεχνική CDMA (Code Division Multiple Access) ή στα ελληνικά τεχνική Πολλαπλής Πρόσβασης με Διαίρεση Κώδικα, αποτελεί μία μέθοδο προσπέλασης ραδιοδιαύλων με εφαρμογή σε πολλές σύγχρονες τηλεπικοινωνιακές τεχνολογίες. Στην εν λόγω μέθοδο, χρησιμοποιείται η διαδικασία εξαπλωμένου φάσματος σε συνδυασμό με ένα ειδικό σχήμα κωδικοποίησης σύμφωνα με το οποίο κάθε χρήστης ο οποίος επιθυμεί να αποστείλει ένα σύνολο δεδομένων έχει έναν ιδιαίτερο προσωπικό κώδικα που καθιστά εφικτή την ταυτόχρονη μετάδοση πληροφοριών στο ίδιο κανάλι από διαφορετικούς χρήστες.

Βασικό κριτήριο ανάπτυξης της τεχνικής πολλαπλής πρόσβασης που υλοποιείται από τα CDMA ασύρματα δίκτυα που εμείς εξετάζουμε, είναι η ανάγκη πολλοί διαφορετικοί χρήστες να αποστέλλουν και να λαμβάνουν δεδομένα την ίδια στιγμή στο ίδιο φυσικό κανάλι. Οι δύο άλλες βασικές μέθοδοι που επιτρέπουν την πολλαπλή πρόσβαση είναι η πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση χρόνου (TDMA – Time Division Multiple Access) και η πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση συχνότητας (FDMA – Frequency Division Multiple Access).

Μελετώντας λίγο περισσότερο τις ανωτέρω μεθόδους, παρατηρούμε ότι στην πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης συχνότητας, το εύρος των συχνοτήτων χωρίζεται σε τμήματα (slots), κάθε ένα από τα οποία αντιστοιχίζεται σε έναν από τους χρήστες του συστήματος και χρησιμοποιείται αποκλειστικά από αυτόν. Από την άλλη, στην πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση χρόνου, η παράμετρος η οποία ουσιαστικά καθορίζει την χρήση του καναλιού είναι ο χρόνος. Στον κάθε χρήστη αντιστοιχεί ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα εντός του οποίου του επιτρέπεται να αξιοποιεί το φάσμα του καναλιού στο σύνολό του και όχι ένα μέρος αυτού όπως στην πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση συχνότητας. Η διαφορετική λογική λειτουργίας των δύο αυτών τεχνικών μπορεί εύκολα να παρουσιαστεί και σχηματικά με τα ακόλουθα διαγράμματα:



Σχήμα 1: Πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης συχνότητας (FDMA).



Σχήμα 2: Πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης χρόνου (TDMA).

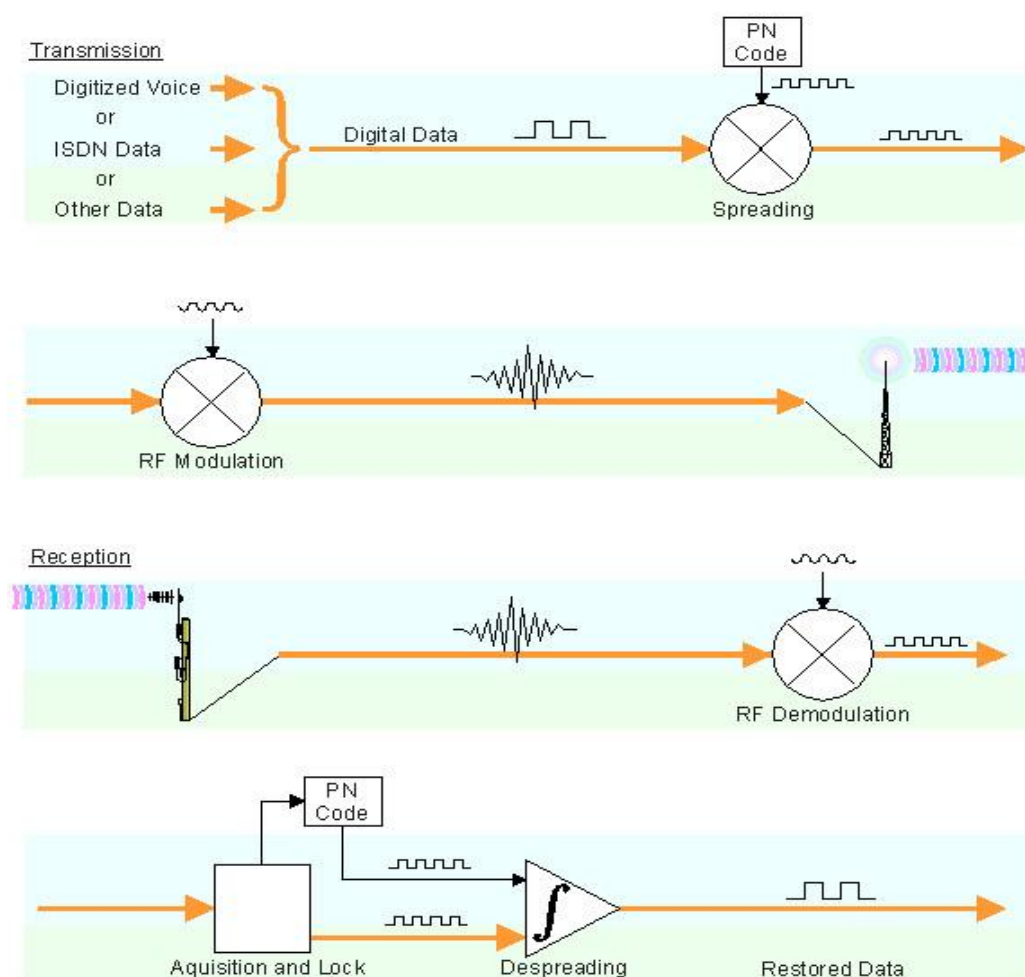
Η πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση κώδικα που εμείς θα χρησιμοποιήσουμε στην επίλυση του προβλήματος κατανομής πόρων σε ένα ασύρματο δίκτυο, σε αντίθεση με τις δύο προαναφερθείσες τεχνικές, δεν περιορίζεται ούτε ως προς την χρησιμοποίηση του φάσματος συχνοτήτων του καναλιού ούτε και από τον χρόνο. Βασικό της χαρακτηριστικό είναι η δυνατότητα που παρέχει στους χρήστες να μεταδίδουν δεδομένα σε ένα κανάλι ταυτόχρονα για όσο χρονικό διάστημα επιθυμούν χωρίς να

υπόκεινται σε περιορισμούς ως προς την συχνότητα, μέσω της αρχής της εξάπλωσης φάσματος. Ένας αποκλειστικός κώδικας για κάθε χρήστη εξαπλώνει το φασματικό περιεχόμενο του σήματος με τέτοιο τρόπο, ώστε στον παραλήπτη μόνο ο ίδιος κώδικας να μπορεί να ανακτήσει το σήμα. Αρνητικό στοιχείο της μεθόδου αυτής είναι ότι το σύνολο των σημάτων που μεταδίδονται χρησιμοποιώντας μοναδική κωδικοποίηση για τον κάθε χρήστη, λαμβάνονται στον παραλήπτη ως ανεπιθύμητος θόρυβος.

Η τεχνική CDMA χρησιμοποιείται ευρέως σε ασύρματα δίκτυα, καθώς επιφέρει αύξηση της χωρητικότητας της τηλεπικοινωνιακής κίνησης, ενώ βελτιώνεται η ποιότητα της φωνής και εξαλείφονται οι αρνητικές επιπτώσεις της εξασθένησης του σήματος λόγω του φαινομένου των πολλαπλών διαδρομών. Επίσης, η ισχύς εκπομπής που απαιτείται για την μετάδοση της πληροφορίας μειώνεται αισθητά και οι παρεμβολές περιορίζονται, καθιστώντας την μεταφορά των δεδομένων πιο αξιόπιστη.

Πιο αναλυτικά, παρουσιάζοντας τα βασικά σημεία της λειτουργίας της τεχνικής CDMA, εντοπίζουμε ότι το προς μετάδοση σήμα καταλαμβάνει εύρος ζώνης κατά πολύ μεγαλύτερο από αυτό που πραγματικά χρειάζεται για να μεταδώσει τα δεδομένα. Συνέπεια είναι να υπάρχει ανοχή στις παρεμβολές που εμφανίζονται αλλά και ότι πολλοί χρήστες μπορούν να μεταδώσουν το σήμα τους την ίδια στιγμή. Επιπλέον, ο κώδικας που αναφέρθηκε ότι κατά μοναδικό τρόπο χαρακτηρίζει τον εκάστοτε όγκο δεδομένων που μεταδίδεται, είναι ανεξάρτητος ως προς αυτά, ώστε η διαμόρφωση και η αποδιαμόρφωση να υλοποιούνται με σχετική ευκολία. Τέλος, ο εν λόγω κώδικας είναι ντετερμινιστικός αν και παρουσιάζεται ως τυχαίος για την προστασία του σήματος.

Για να γίνει πιο κατανοητός ο τρόπος λειτουργίας της τεχνικής πολλαπλής πρόσβασης CDMA έχουμε το ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 3: Μεταφορά δεδομένων σε ασύρματο δίκτυο που χρησιμοποιεί την τεχνική CDMA.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, για την τεχνική CDMA, προκειμένου να μεταδοθούν ορθά τα ζητούμενα σήματα, παράγεται ένας ψευδοτυχαίος κώδικας διαφορετικός για κάθε κανάλι και για κάθε διαδοχική σύνδεση. Το προκύπτον σήμα διαμορφώνει το φέρον το οποίο αφού ενισχυθεί αποστέλλεται. Στο στάδιο της λήψης πλέον, το λαμβανόμενο σήμα πολλαπλασιάζεται με το αντίστοιχο τοπικό που προκύπτει από έναν ταλαντωτή, έτσι ώστε να ανακτηθεί το εξαπλωμένο ψηφιακό σήμα ενώ και πάλι ένας ψευδοτυχαίος κώδικας παράγεται ώστε να αντιστοιχεί στο προσδοκώμενο σήμα. Τέλος, ο δέκτης αποκτά τον κώδικα και η φάση «κλειδώνει» τον κώδικά της σε αυτόν, με συνέπεια το λαμβανόμενο σήμα να συσχετίζεται με τον κώδικα και η πληροφορία εξάγεται.

2.3

Διάκριση Υπηρεσιών στο Βραχυπρόθεσμο Διάστημα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, πολλές φορές έως τώρα έχει αναφερθεί ο σημαντικός ρόλος που διαδραματίζει το είδος της υπηρεσίας που παρέχεται στον κάθε χρήστη από τα ασύρματα δίκτυα στην ορθή κατανομή των πόρων του συστήματος. Ο βασικός διαχωρισμός για την διατιθέμενη υπηρεσία ως προς τον ρυθμό μετάδοσης στο βραχυπρόθεσμο διάστημα είναι σε:

- Υπηρεσίες Πραγματικού Χρόνου (Real time Services) που αφορούν υπηρεσίες φωνής, βίντεο, υπηρεσίες live streaming κλπ).
- Υπηρεσίες μη Πραγματικού Χρόνου (Non Real time Services) που σχετίζονται με υπηρεσίες τύπου ηλεκτρονικού ταχυδρομείου, μεταφορά και «κατέβασμα» αρχείων και λοιπών δεδομένων, κλπ.

Η διάκριση των ειδών των υπηρεσιών είναι ιδιαίτερης σπουδαιότητας, καθώς ανάλογα προσδιορίζονται και οι απαιτήσεις σε ρυθμό μετάδοσης, ώστε οι χρήστες να μπορούν να απολαμβάνουν υψηλή ποιότητα υπηρεσίας με αποτέλεσμα την μέγιστη ικανοποίηση από την εξυπηρέτησή τους. Επιπλέον, οφείλουμε να τονίσουμε ότι ένας ακόμη παράγοντας διαφοροποίησης μεταξύ των δύο ανωτέρω κατηγοριών είναι το γεγονός ότι στις υπηρεσίες πραγματικού χρόνου απαιτείται ένα κατώτατο όριο επιτρεπτού ρυθμού μετάδοσης. Η τιμή αυτή έχει οριστεί στα 64 kbps και κάτω από αυτήν η υπηρεσία δεν μπορεί να ανταποκριθεί στις στοιχειώδεις ανάγκες του καταναλωτή και ουσιαστικά είναι επιζήμια και ανώφελη. Αντίθετα, στις υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου δεν υπάρχουν κάποια καθορισμένα όρια για την τιμή του ρυθμού μετάδοσης της υπηρεσίας.

2.3.1

Υπηρεσίες Πραγματικού Χρόνου

Στη σημερινή εποχή, η εντυπωσιακή επέκταση του διαδικτύου και της επικοινωνίας των ανθρώπων, έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη διαφόρων υπηρεσιών πραγματικού χρόνου, στις οποίες υπάρχει το αίτημα της μετάδοσης της πληροφορίας τη στιγμή που αυτό ζητείται. Τα ασύρματα δίκτυα σήμερα καλούνται να ανταπεξέλθουν στις νέες συνθήκες που σχηματίζονται από τις τάσεις αυτές.

Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν οι συνομιλίες μέσω διαδικτύου που εξυπηρετούν πολλαπλές δραστηριότητες της σύγχρονης κοινωνίας και έρχονται συμπληρωματικά με τις υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας. Επιπλέον, η μετάδοση εικόνας και βίντεο πέραν των ηχητικών μόνο σημάτων, σήμερα είναι κάτι περισσότερο από συνηθισμένη, συνιστώντας κλασικό παράδειγμα μορφής μίας υπηρεσίας πραγματικού χρόνου.

Όπως αναφέρθηκε και λίγο νωρίτερα, οι υπηρεσίες πραγματικού χρόνου έχουν ορισμένες προδιαγραφές, οι οποίες απαιτείται να εκπληρώνονται κάθε στιγμή. Σε διαφορετική περίπτωση ο καταναλωτής δε μπορεί να εξυπηρετηθεί επαρκώς και η παρεχόμενη υπηρεσία αποτυγχάνει ποιοτικά. Μερικά από τα βασικά χαρακτηριστικά των υπηρεσιών πραγματικού χρόνου είναι:

- Η ύπαρξη κατώτατου ορίου ρυθμαπόδοσης
- Διατήρηση σταθερής ρυθμαπόδοσης κατά τη διάρκεια παροχής της υπηρεσίας
- Άμεση ικανοποίηση του χρήστη από την ποιότητα της υπηρεσίας
- Άμεση διόρθωση της ρυθμαπόδοσης σε περίπτωση αστοχίας

Κάνοντας μία πιο λεπτομερειακή ανάλυση των παραπάνω χαρακτηριστικών, παρατηρούμε ότι για τις υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, ο τελικός ρυθμός μετάδοσης που επιτυγχάνεται χρειάζεται να περιορίζεται εντός ενός εύρους πεδίου τιμών. Όπως νωρίτερα εξηγήθηκε, είναι αναγκαίο η ρυθμαπόδοση που τελικά χαρακτηρίζει μία υπηρεσία πραγματικού χρόνου να είναι άνωθεν ενός συγκεκριμένου κατωφλίου. Σε αντίθετη περίπτωση, η υπηρεσία απλώς δε μπορεί να ανταποκριθεί στις βασικές απαιτήσεις του χρήστη. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι υπηρεσίες φωνής, στις οποίες για να γίνει εφικτή η στοιχειώδης μετάδοση του ηχητικού σήματος απαιτείται μεταφορά των πληροφοριών με ρυθμό τουλάχιστον 64 Kbps. Ωστόσο, η υπέρβαση της συγκεκριμένης τιμής δε σημαίνει ότι η εν λόγω υπηρεσία πραγματικού χρόνου αναβαθμίζεται ποιοτικά, αλλά αντίθετα κατασπαταλάται μέρος του διαθέσιμου εύρους ζώνης που θα μπορούσε πολύ πιο αποδοτικά να αξιοποιηθεί είτε σε κάποιου άλλου είδους υπηρεσία είτε στην εξυπηρέτηση μεγαλύτερου πλήθους χρηστών. Συνεπώς, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι για τις υπηρεσίες πραγματικού χρόνου αναγκαία συνθήκη αποδοτικής αξιοποίησης τους αποτελεί η επίτευξη μίας σταθερής τιμής για το ρυθμό μετάδοσης γύρω στα 64 Kbps με κάποια μικρά περιθώρια ανοχής είτε προς τα πάνω είτε προς τα κάτω (elasticity). Σε διαφορετική περίπτωση ως προς την απόδοση του ρυθμού μετάδοσης, η υπηρεσία δεν αξιοποιείται αποδοτικά και από τον χρήστη αλλά και από το δίκτυο.

Εν συνεχεία, εντοπίζουμε ότι εξίσου σημαντικό για το χρήστη στον οποίο παρέχεται η υπηρεσία σε πραγματικό χρόνο είναι να διατηρεί ανά πάσα στιγμή σταθερή τη ζητούμενη ρυθμαπόδοση, αλλά και να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις σε ποιότητα συνεχώς. Καθώς η απαίτηση για την μετάδοση των δεδομένων είναι άμεση ώστε π.χ. ο ήχος ή η εικόνα να μεταφέρονται τη χρονοσχισμή που πρέπει, κάθε αλλαγή στον ρυθμό μετάδοσης από την σταθερή τιμή των 64 Kbps είτε θα εκφυλίσει την υπηρεσία μέσω καθυστερήσεων ή αλλοίωσης στο σήμα, είτε

δεν θα επιφέρει καμία ουσιαστική αλλαγή και μάλιστα θα στερήσει από τους άλλους χρήστες το περιορισμένο εύρος ζώνης που διατίθεται.

Επιπλέον, ο χρονοδρομολογητής όντας υπεύθυνος για την αρμονική παροχή των υπηρεσιών πραγματικού χρόνου οφείλει να είναι σε θέση σε οποιαδήποτε στιγμή να διορθώνει κάθε μορφή αστοχίας που μπορεί να υποβαθμίσει τη διατιθέμενη υπηρεσία. Με αυτόν τον τρόπο η βλάβη για τον χρήστη θα είναι στιγμιαία κάθε φορά. Ωστόσο, είναι απαραίτητο να λαμβάνονται συνεχώς αποφάσεις από το χρονοδρομολογητή που μπορεί να αφορούν ακόμη και την απόρριψη εξυπηρέτησης κάποιων χρηστών, ώστε συνολικά να μην εντοπίζεται ελαττωματική διαχείριση πόρων και όσοι χρήστες κατορθώνουν τελικά να εξυπηρετηθούν να μένουν επαρκώς ικανοποιημένοι.

2.3.2

Υπηρεσίες μη Πραγματικού Χρόνου

Οι υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου τα τελευταία χρόνια εμφανίζουν ολοένα και περισσότερες εφαρμογές στα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων υπηρεσιών αποτελεί η διακίνηση ενός όγκου δεδομένων μεταξύ των χρηστών και των παρόχων μίας υπηρεσίας. Ενδεικτικά, το σύνολο των δεδομένων που μεταδίδεται σήμερα στο διαδίκτυο έχει ξεπεράσει κάθε έως τώρα εκτίμηση αγγίζοντας την τάξη μεγέθους κάποιων Exabyte και συνεχώς αυξάνεται. Το ποσό αυτό αντικατοπτρίζει σε πόσο μεγάλο βαθμό οι υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου επηρεάζουν τις σύγχρονες δραστηριότητες του ανθρώπου. Βασικό στοιχείο αυτών των υπηρεσιών είναι η μερική ανοχή του χρήστη σε μεταβολές του ρυθμού μετάδοσης και σε εμφάνιση καθυστερήσεων, καθώς βασική απαίτησή του είναι η τελική λήψη του εκάστοτε αρχείου.

Μερικά από τα βασικά χαρακτηριστικά των υπηρεσιών μη πραγματικού χρόνου διατυπώνονται ακολούθως:

- Απαίτηση όσο το δυνατόν υψηλότερου ρυθμού μετάδοσης
- Δυνατότητα λειτουργίας ακόμη και με χαμηλές τιμές ρυθμού μετάδοσης
- Δυνατότητα διακύμανσης του προσφερόμενου ρυθμού μετάδοσης
- Ελάχιστες απαιτήσεις αντίδρασης από τον χρονοδρομολογητή.

Αρχικά, ουσιαστική επιδίωξη των χρηστών στους οποίους παρέχεται μία υπηρεσία μη πραγματικού χρόνου είναι η επίτευξη όσο το δυνατόν υψηλότερης ρυθμαπόδοσης, ώστε η λήψη του αρχείου να γίνει όσο το δυνατόν ταχύτερα. Αυτό επιτυγχάνεται με την κατάλληλη επιλογή του χρήστη από την κάθε χρονοσχισμή, απαιτώντας την ανάλογη ευελιξία του δρομολογητή στο σκέλος της λήψης αποφάσεων. Με αυτόν τον τρόπο η διαχείριση των πόρων του συστήματος γίνεται πιο αποδοτικά και αυξάνεται η απόδοση συνολικά για το σύστημα.

Ουσιαστική διαφοροποίηση μεταξύ των δύο κατηγοριών υπηρεσιών που εξετάζουμε, είναι το γεγονός ότι οι υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου δεν εμφανίζουν κάποιου είδους περιορισμούς σχετικά με τις τιμές της ρυθμιστικής τους. Ο ισχυρισμός αυτός γίνεται αποδεκτός αν αναλογιστεί κανείς ότι ακόμη και για χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης, ένα αρχείο εν τέλει θα αποσταλεί και θα ληφθεί από τον παραλήπτη – χρήστη, απλά η όλη διαδικασία θα διαρκέσει περισσότερο χρόνο. Αν οι ρυθμοί μετάδοσης είναι υψηλοί, το αρχείο θα αποσταλεί πολύ γρηγορότερα με συνέπεια να αυξάνεται και η ικανοποίηση του χρήστη από την υπηρεσία. Επομένως, παρατηρούμε ότι τα επίπεδα στα οποία κυμαίνεται ο ρυθμός μετάδοσης επηρεάζουν ουσιαστικά την ικανοποίηση του χρήστη.

Τέλος, με βάση το γεγονός ότι ο ρυθμός μετάδοσης δεν αποτελεί φραγμό στην παροχή της υπηρεσίας μη πραγματικού χρόνου, ο χρονοδρομολογητής δεν απαιτείται κάθε στιγμή να εξετάζει την κατάσταση κατανομής πόρων του δικτύου. Επιδίωξη είναι η τελική αποστολή των δεδομένων που θα αυξήσει τη χρησιμότητα του συστήματος στο σύνολό του και όχι η στιγμιαία μεγέθυνση της ικανοποίησης των χρηστών λόγω αύξησης της ταχύτητας της μετάδοσης των δεδομένων. Επίσης, είναι απαραίτητο να επισημανθεί, ότι στην περίπτωση που σε ένα ασύρματο δίκτυο ένας χρονοδρομολογητής κληθεί να παράσχει υπηρεσίες πραγματικού και μη χρόνου ταυτόχρονα, προτεραιότητα πρέπει να δοθεί στους χρήστες πραγματικού χρόνου παρέχοντάς τους το αναγκαίο εύρος ζώνης. Οι χρήστες μη πραγματικού χρόνου θα εξυπηρετηθούν με το υπόλοιπο του διαθέσιμου εύρους ζώνης που διατίθεται. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η μέγιστη ικανοποίηση των χρηστών του δικτύου, καθώς όλοι εξυπηρετούνται βέλτιστα.

2.4

Κατανομή Πόρων σε Ασύρματα CDMA Δίκτυα

Το πρόβλημα της αποδοτικής κατανομής πόρων σε ασύρματα CDMA, μέχρι στιγμής έχει αποτελέσει αντικείμενο ενδελεχούς επιστημονικής έρευνας. Τα τελευταία χρόνια, στη διαθέσιμη βιβλιογραφία για την ανάλυση του εν λόγω θέματος έχει προστεθεί αξιόλογος αριθμός μελετών και δημοσιεύσεων. Έως τώρα έχουν υιοθετηθεί πολλές και διαφορετικές προσεγγίσεις ως προς τη μεθοδολογία και τη λογική της επίλυσης του ελέγχου των παραμέτρων στα ασύρματα CDMA δίκτυα, με στόχο τη βέλτιστη αποδοτικά διαχείριση των πόρων που διατίθενται.

Βασικός κοινός παρονομαστής όλων των ανωτέρω ερευνών, αλλά και της προσπάθειας που περιλαμβάνεται στην παρούσα διπλωματική εργασία, αποτελεί η αξιοποίηση των βασικών μαθηματικών αρχών που προέρχονται από τον κλάδο της Θεωρίας Παιγνίων. Καθοριστικός επιπλέον παράγοντας στην απόπειρα καλύτερης κατανόησης και ανάλυσης των χαρακτηριστικών και της συμπεριφοράς των χρηστών στην κατανομή πόρων στα ασύρματα δίκτυα που εξετάζουμε, έχει αποτελέσει η

εισαγωγή της συνάρτησης χρησιμότητας, η οποία είναι έννοια προερχόμενη από την Μικροοικονομία. Τα μέχρι τώρα αποτελέσματα που έχουν συγκεντρωθεί στην βιβλιογραφία είναι ιδιαίτερος ενθαρρυντικά, επιβεβαιώνοντας τα συγκριτικά πλεονεκτήματα που προκύπτουν στην κατεύθυνση επίλυσης του προβλήματος με αυτά τα ισχυρά θεωρητικά εργαλεία σε σχέση με διαφορετικές απόπειρες.

Ιδιαίτερης σημασίας θα ήταν να αναφέρουμε ότι η πρόοδος που έχει έως τώρα συντελεστεί δεν έχει εξαντλήσει τα περιθώρια περαιτέρω μελέτης του προβλήματος. Ο ισχυρισμός αυτός μπορεί εύκολα να αποδειχτεί, αν παρατηρηθεί η εξελικτική πορεία της έρευνας μέσα από το σύνολο των διαθέσιμων δημοσιεύσεων. Η αρχική επίλυση του προβλήματος μέσω του σχηματισμού ενός μη συνεταιριστικού παίγνιου με βασική παράμετρο τον έλεγχο κατανομής της ισχύος των χρηστών, παρότι κατορθώνει να κατανείμει τις παραμέτρους αποδοτικά, έγινε κατανοητό ότι δεν οδηγεί σε μία δίκαιη κοινωνικά λύση για τους χρήστες – παίκτες. Για το λόγο αυτό το μη συνεργατικό παίγνιο συμπληρώθηκε κατάλληλα ώστε να μπορεί να προσαρμόσει πολιτικές κοστολόγησης. Αρχικά επιχειρήθηκε να τιμολογηθεί γραμμικά η ισχύς εκπομπής, ώστε η χρήστες να υιοθετήσουν μία περισσότερο κοινωνική συμπεριφορά, λαμβάνοντας υπόψη την επιβάρυνση που προκαλούν στους γειτονικούς τους χρήστες. Πράγματι, αποδείχθηκε θεωρητικά και πειραματικά, ότι η εν λόγω προσέγγιση αποδίδει και τα αποτελέσματά της συνολικά ευνοούν και τον κάθε χρήστη ξεχωριστά όσο και το σύστημα του δικτύου στο σύνολό του. Ακόλουθα, μία πιο ρεαλιστική θεώρηση για την τιμολόγηση της ισχύος στην οποία εκπέμπουν οι χρήστες, αποτέλεσε η αντικατάσταση της γραμμικής συνάρτησης κόστους με μία αντίστοιχη κυρτής μορφής – μη γραμμική πολιτική κοστολόγηση της ισχύος εκπομπής. Τα αποτελέσματα και πάλι ήταν ενθαρρυντικά καθώς παρατηρήθηκε εκ νέου μείωση στην ισχύ εκπομπής (ζητούμενο για την μείωση των παρεμβολών, την επιμήκυνση της ζωής της μπαταρίας των ασύρματων χρηστών και για την πιο ομαλή και αρμονική λειτουργία του συστήματός μας) και αυξημένη ικανοποίηση του συνόλου των χρηστών. Νεώτερες προσεγγίσεις επίλυσης του προβλήματος, στο ίδιο πάντα πλαίσιο βασισμένο στην Θεωρία Παιγνίων, εισήγαγαν ακόμη μία παράμετρο για τη βέλτιστη κατανομή των πόρων του δικτύου εκτός από την ισχύ εκπομπής, αυτήν του ρυθμού μετάδοσης των δεδομένων. Επιχειρήθηκε ξεχωριστός προσδιορισμός των βέλτιστων τιμών για τις δύο παραμέτρους αλλά και κατάλληλη κατανομή τους για την εύρεση του τελικού διανύσματος των χρηστών (δηλαδή την ζητούμενη ισορροπία κατά Nash). Σε αυτήν την περίπτωση, οι πολιτικές (γραμμικής) κοστολόγησης (πάλι όμως μόνο ως προς την ισχύ εκπομπής) συνόδεψαν την όλη προσπάθεια με αποτελέσματα αντίστοιχα των προηγούμενων. Τέλος, τελευταία γίνονται απόπειρες συνδυαστικής και ταυτόχρονης κατανομής της ισχύος και του ρυθμού μετάδοσης στα ασύρματα CDMA δίκτυα, ως μία ακόμη πιο βελτιωμένη θεώρηση που θα βελτιώσει περισσότερο την αποδοτικότητα του συστήματος.

Με βάση λοιπόν το πλαίσιο που παρουσιάστηκε ανωτέρω, στην έρευνα που περικλείεται στη διπλωματική αυτή εργασία, χρησιμοποιώντας το έως τώρα θεωρητικό και πειραματικό υπόβαθρο, θα επιχειρηθεί μία πιο σύνθετη επίλυση του προβλήματος. Η διαχείριση και κατανομή της ισχύος εκπομπής και ρυθμού μετάδοσης των χρηστών υλοποιείται συνδυαστικά, αξιοποιώντας τα προτερήματα

των εργαλείων που μας παρέχει η Θεωρία Παιγνίων, συνοδεύεται όμως τόσο από γραμμική όσο και από κυρτή κοστολόγηση της ισχύος. Φυσικά, η ερευνητική προσπάθεια δε σταματά εδώ, καθώς τα περιθώρια εκ νέου εξέλιξης της διαδικασίας επίλυσης είναι πολλά και τα όρια της μεγιστοποίησης της απόδοσης της κατανομής πόρων δεν έχουν ακόμη διερευνηθεί.

Εν συνεχεία, περιγράφονται αναλυτικά οι κυριότερες έως τώρα επιστημονικές μελέτες για την επίλυση του προβλήματος που μας ενδιαφέρει, οι οποίες αποτέλεσαν και τα θεμέλια στα οποία θα στηριχθεί η προσέγγιση που επιχειρείται στην εν λόγω διπλωματική εργασία.

Για να γίνουν ευκολότερα κατανοητές οι έννοιες της Θεωρίας Παιγνίων που χρησιμοποιούνται εκτενώς στην βιβλιογραφία αλλά και στη θεωρητική εξέταση του προβλήματος στην παρούσα διπλωματική εργασία, υποθέτουμε για το σύνολο των παιγνίων που θα εμφανιστούν τα παρακάτω:

- Ένα σύνολο παικτών, έστω γνωστό ως σύνολο S το οποίο αποτελείται από N χρήστες οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι εντός της κυψέλης.
- Ένα σύνολο από πιθανές ενέργειες, δηλαδή ο χώρος των εφικτών στρατηγικών A_i για κάθε χρήστη $i \in S$, ο οποίος προσδιορίζεται από τους φυσικούς περιορισμούς επί των πόρων α_i που χαρακτηρίζουν κάθε χρήστη, παραδείγματος χάριν ένας φυσικός περιορισμός για την ισχύ εκπομπής είναι $0 \leq P_i \leq P_i^{max}$ όπου $\alpha_i = P_i$ ή ένας ταυτόχρονος περιορισμός για δύο παραμέτρους π.χ. την ισχύ εκπομπής μαζί με τον ρυθμό μετάδοσης, δηλαδή $0 \leq P_i \leq P_i^{max}$ και $0 \leq R_i \leq R_i^{max}$ όπου $\alpha_i = (P_i, R_i)$.

Όποτε χρειάζεται, οι έννοιες που εμφανίζονται επεξηγούνται μέσω των αντίστοιχων ορισμών.

2.4.1

Κατανομή Ισχύος σε Ασύρματα CDMA Δίκτυα Χωρίς Πολιτική Κοστολόγησης

Βασικό και πρωταρχικό βήμα στην κατεύθυνση επίλυσης της κατανομής πόρων στα ασύρματα CDMA δίκτυα αποτέλεσε η σωστή διατύπωση του προβλήματος ως ένα μη συνεργατικό παίγνιο. Οι βασικές αρχές της Θεωρίας Παιγνίων και η συνάρτηση χρησιμότητας αποτέλεσαν σημαντικά εργαλεία με τα οποία έγινε δυνατή η ορθή κατανομή των πόρων όπως ζητείται.

Στο [8] επιχειρείται μία εισαγωγική αντιμετώπιση του προβλήματος κατανομής ισχύος σε ασύρματα CDMA δίκτυα με χρήση της Θεωρίας Παιγνίων. Σε κάθε χρήστη αντιστοιχίζεται μία συνάρτηση ευχαρίστησης, έστω $f(x_i)$ για την οποία θέλουμε να ισχύει η σχέση:

$$f_i(x \wedge y) + f_i(x \vee y) \geq f_i(x) + f_i(y) \quad (2.1)$$

όπου οι x, y είναι στρατηγικές που ακολουθούν οι χρήστες εντός ενός συνόλου A .

Ανάλογα με το αν ικανοποιείται η σχέση αυτή, η συνάρτηση $f(x_i)$ χαρακτηρίζεται ως supermodular ή submodular και κατ' επέκταση και το ίδιο το παίγνιο. Μία στρατηγική x^* για έναν παίκτη i του παιγνίου χαρακτηρίζεται σημείο ισορροπίας κατά Nash αν ισχύει:

$$x_i^* \in \operatorname{argopt}_{x_i \in A_i(x_{-i}^*)} f_i(x_i, x_{-i}^*) \quad (2.2)$$

Η λογική βελτιστοποίησης της κατανομής ισχύος για το παίγνιο που εξετάζουμε μέσω της μεγιστοποίησης της τιμής της συνάρτησης ευχαρίστησης, μπορεί να συνοψισθεί μέσω της «βέλτιστης απόκρισης του συστήματος»:

$$BR_i^*(x_{-i}) = \max \left[\operatorname{argmax}_{x_i \in A_i(x_{-i}^*)} f_i(x_i, x_{-i}^*) \right] \quad (2.3)$$

Ακόλουθα, στην εν λόγω έρευνα αποδεικνύονται η σύγκλιση μέσω διαφόρων αλγορίθμων και η μοναδικότητα του ζητούμενου σημείου ισορροπίας κατά Nash.

Μεταβαίνοντας στο στάδιο όπου η ανωτέρω μαθηματική παρουσίαση χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της ισχύος σε ένα ασύρματο περιβάλλον επικοινωνίας, η ισορροπία κατά Nash για την ισχύ εκπομπής των χρηστών συνοψίζεται στη σχέση:

$$p_i^* = \min\{p_i \in A_i \text{ s.t. } p_i \geq I_i(p^*)\} \quad (2.4)$$

όπου $I_i(p)$ ένα καθορισμένο κατώτατο επίπεδο ισχύος.

Ορισμός 2.α

Σημείο Ισορροπίας κατά Nash (Nash Equilibrium)

Το σημείο ισορροπίας κατά Nash είναι ένα σύνολο στρατηγικών $a^* = (a_1^*, \dots, a_N^*)$, τέτοιο ώστε κανένας χρήστης δεν έχει την πρόθεση να αλλάξει στρατηγική, διότι δε μπορεί να βελτιώσει ατομικά την καθαρή ευχαρίστησή του.

$$U_i^{net}(a_i^*, a_{-i}^*) \geq U_i^{net}(a_i, a_{-i}^*) \text{ for all } a_i \in A_i, \forall i \in S \quad (2.5)$$

όπου $a_{-i}^* = (a_1^*, \dots, a_{i-1}^*, a_{i+1}^*, \dots, a_N^*)$.

Στο [9], η προσπάθεια να αυξηθεί βέλτιστα η φασματική απόδοση του εξεταζόμενου συστήματος υλοποιήθηκε με χρήση συναρτήσεων χρησιμότητας ως λογαριθμικές συναρτήσεις του σηματοθορυβικού τους λόγου (SIR – Signal to Interference Ratio) αναλογικές της χωρητικότητας του Shannon. Συνεπώς η αναγκαία συνάρτηση ευχαρίστησης είναι της μορφής:

$$U_i = \ln(1 + \gamma_i) \quad (2.6)$$

όπου γ_i (ή αλλιώς SIR) είναι ο σηματοθορυβικός λόγος του i -οστού χρήστη.

Στο [1] πραγματοποιείται μία βασική παρουσίαση του προβλήματος και εν συνεχεία παρουσιάζεται η συνάρτηση χρησιμότητας (ή ευχαρίστησης) ως μέσο έκφρασης της ικανοποίησης της ποιότητας κάθε υπηρεσίας (QoS) ως εξής:

$$\frac{E[\textit{benefit}]}{E[\textit{energy cost}]} = \frac{LRq(\gamma_i) b}{Mp_i J} \quad (2.7)$$

όπου M είναι το ολικό μέγεθος του πακέτου, L τα bits πληροφορίας που αποστέλλονται και $q(\gamma_i)$ είναι κατάλληλα επιλεγμένη συνάρτηση που συμβολίζει την πιθανότητα ορθής λήψης ενός πακέτου στον σταθμό βάσης.

Με πιο απλά λόγια, η συνάρτηση χρησιμότητας ισούται με τον λόγο των bits πληροφορίας που μεταδίδονται επιτυχώς στο σταθμό βάσης ανά Joule ενέργειας που καταναλώνεται για την μετάδοσή τους.

Ωστόσο, για μηδενική ισχύ εκπομπής p_i , κάθε χρήστης θεωρητικά θα εμφάνιζε άπειρη ικανοποίηση από την υπηρεσία, γεγονός το οποίο φυσικά δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα, καθώς για μηδενική ισχύ εκπομπής απλά καμία υπηρεσία δεν είναι διαθέσιμη. Για τον λόγο αυτό εισάγεται μία νέα συνάρτηση, η $f(\gamma_i)$ γνωστή στην διεθνή βιβλιογραφία ως “efficiency function” (συνάρτηση απόδοσης), η χρήση της οποίας λύνει το πρόβλημα αυτό. Η συνάρτηση ευχαρίστησης πλέον παίρνει την μορφή:

$$U_i = \frac{LRf(\gamma_i)}{Mp_i} b/J \quad (2.8)$$

Σκοπός είναι η μεγιστοποίηση της ικανοποίησης του κάθε χρήστη, όποτε παραγωγίζοντας ως προς την ισχύ, η τελική συνθήκη από την οποία βρίσκουμε τα ζητούμενα μεγέθη είναι:

$$\gamma_i \frac{df(\gamma_i)}{d\gamma_i} - f(\gamma_i) = 0 \quad (2.9)$$

Οι περισσότερες από τις θεωρήσεις που ακολουθούν, περιλαμβάνουν πρωταρχικά ανάλυση του προβλήματος χωρίς κάποια κοστολόγηση προτού στην συνέχεια εφαρμοστεί κάποια γραμμική (ή μη γραμμική) τιμολόγηση της ισχύος.

2.4.2

Κατανομή Ισχύος σε Ασύρματα CDMA Δίκτυα με Πολιτική Γραμμικής Κοστολόγησης

Έχει έως τώρα γίνει σαφές, ότι η απλή επίλυση του μη συνεταιριστικού παιγνίου με χρήση μίας συνάρτησης χρησιμότητας, οδηγεί σε μία ικανοποιητική κατανομή των πόρων του δικτύου, αλλά χωρίς να χαρακτηρίζεται από στοιχεία δικαιοσύνης και συνεργασίας μεταξύ των χρηστών του συστήματος. Η εισαγωγή της γραμμικής πολιτικής κοστολόγησης της ισχύος εκπομπής, έφερε ιδιαίτερα ενθαρρυντικά αποτελέσματα στην αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετές τέτοιες θεωρήσεις, οι οποίες με χρήση της συνάρτησης καθαρής ευχαρίστησης (η οποία περιλαμβάνει και την συνάρτηση κόστους) οδηγούν το παίγνιο σε σύγκλιση με ταυτόχρονη εύρεση ενός βέλτιστου κατά Pareto Nash σημείου ισορροπίας.

Ορισμός 2.β

Pareto Βέλτιστη Λύση (Pareto Optimal Solution)

Ένα σύνολο στρατηγικών $(\bar{\alpha}_1, \dots, \bar{\alpha}_N)$ είναι Pareto βέλτιστη λύση του μη συνεταιριστικού παιγνίου, εάν δεν υπάρχει κανένα άλλο σύνολο στρατηγικών για το οποίο ένας ή περισσότεροι χρήστες μπορούν να βελτιώσουν τις τιμές της καθαρής ευχαρίστησής τους χωρίς μείωση των τιμών της καθαρής ευχαρίστησης των άλλων χρηστών.

Με άλλα λόγια, για ένα παίγνιο κατανομής ισχύος παρόμοιο με αυτό που εξετάζουμε σε ένα ασύρματο δίκτυο, ένα διάνυσμα ισχύος \bar{P} (ή κατ' επέκταση διάνυσμα ρυθμού μετάδοσης \bar{R} για την περίπτωση ταυτόχρονης κατανομής των μεγεθών) είναι Pareto βέλτιστη λύση του παιγνίου, εάν δεν υπάρχει άλλο διάνυσμα ισχύος (ή ρυθμού μετάδοσης) το οποίο να είναι Pareto κυρίαρχη λύση σε σχέση με το διάνυσμα ισχύος \bar{P} (ή \bar{R}).

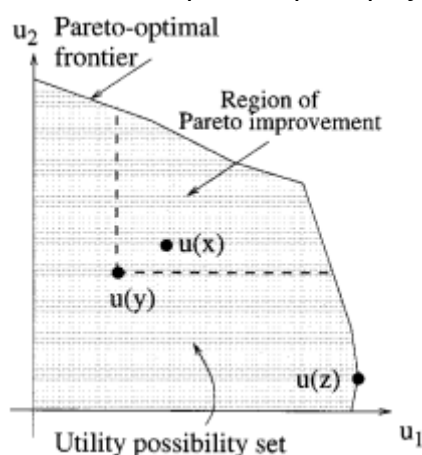
Ορισμός 2.γ

Pareto Κυρίαρχη Λύση (Pareto Dominant Solution)

Ένα σύνολο στρατηγικών $\bar{\alpha} = (\bar{\alpha}_1, \dots, \bar{\alpha}_N)$ είναι Pareto κυρίαρχη λύση σε σχέση με κάποια άλλη λύση του παιγνίου $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_N)$ εάν για όλους τους χρήστες $i \in S$, ισχύει $U_i^{net}(\bar{\alpha}) \geq U_i^{net}(\alpha)$ και για μερικούς χρήστες του δικτύου ισχύει $i \in S$ $U_i^{net}(\bar{\alpha}) > U_i^{net}(\alpha)$.

Για να γίνει πιο κατανοητή η διαφορά μεταξύ της βέλτιστης και κυρίαρχης λύσης κατά Pareto, έστω ένα σύστημα με δύο παίκτες, των οποίων το σύνολο της

ευχαρίστησης συνοψίζεται στο σχήμα ακόλουθα. Κάθε παράμετρος (έστω η ισχύς εκπομπής ή ο ρυθμός μετάδοσης) η οποία επιφέρει βελτίωση κατά Pareto σε σχέση με την τιμή της συνάρτησης $u_i(y)$ τοποθετείται στην περιοχή βελτίωσης κατά Pareto (Region of Pareto Improvement). Από το διάγραμμα φαίνεται ότι το x είναι ένα τέτοιο σημείο. Μια Pareto βέλτιστη λύση δεν είναι απαραίτητα κυρίαρχη ως προς τα υπόλοιπα σημεία ενός συνόλου. Για παράδειγμα το σημείο z είναι βέλτιστο κατά Pareto, ωστόσο από την στιγμή που $u_2(z) < u_2(y)$, το σημείο z δεν είναι κυρίαρχο κατά Pareto ως προς το y , ανεξάρτητα από το γεγονός ότι $u_1(z) < u_1(y)$. Συνεπώς, όπως εντοπίζουμε και στο σχήμα που ακολουθεί, το σημείο x είναι Pareto κυρίαρχη λύση ως προς το y , ενώ το z είναι Pareto βέλτιστη λύση ως προς το y .



Σχήμα 4: Διάνυσμα ισχύος x κυρίαρχο κατά Pareto και διάνυσμα ισχύος z βέλτιστο κατά Pareto ως προς το διάνυσμα ισχύος y .

Στο [9] η αντικειμενική συνάρτηση βελτιστοποίησης για τον κάθε χρήστη του συστήματος ορίζεται (“cost function”) ως ακόλουθα:

$$J_i = P_i - U_i \tag{2.10}$$

όπου P_i είναι το διάνυσμα της ισχύος στο οποίο εκπέμπει ο χρήστης i και U_i η συνάρτηση χρησιμότητας, λογαριθμικής μορφής ως προς τον σηματοθορυβικό λόγο. Θεωρώντας λοιπόν μία γραμμική κοστολόγηση ως προς το P_i , και μία παράμετρο u_i που δηλώνει την απαίτηση του κάθε χρήστη για υψηλό σηματοθορυβικό λόγο γ_i (ή SIR), η ανωτέρω σχέση εκφράζεται ως εξής:

$$J_i(p_i, p_{-i}) = \lambda_i p_i - u_i \ln(1 + \gamma_i), \quad p_i \geq 0 \quad \forall i \tag{2.11}$$

Η επίλυση του παιγνίου συνίσταται στην ελαχιστοποίηση του J_i του κάθε χρήστη, καθώς σε αντίθεση με όσα αναφέρθηκαν στην εισαγωγή όπου η συνάρτηση καθαρής ευχαρίστησης είναι η αλγεβρική διαφορά της συνάρτησης κόστους από την συνάρτηση ευχαρίστησης, σε αυτήν την περίπτωση η εν λόγω συνάρτηση προκύπτει αντίθετα (δηλαδή γραμμική τιμολόγηση μείον χρησιμότητα). Στην προσπάθεια

εύρεσης του σημείου ισορροπίας, οι συγγραφείς εισάγουν μία νέα συνάρτηση, την «συνάρτηση αντίδρασης» Φ_i (reaction function) του κάθε χρήστη, η οποία αποτελεί τη βέλτιστη απόκριση του χρήστη στις εκάστοτε συνθήκες του συστήματος σύμφωνα με την σχέση:

$$p_i = \Phi_i(\bar{y}_{-i}, a_i) \quad (2.12)$$

όπου \bar{y}_{-i} το επίπεδο της ισχύος του κάθε χρήστη που λαμβάνει ο τερματικός σταθμός, ενώ a_i μία ειδική παράμετρος για τον κάθε χρήστη, λαμβάνοντας υπόψη όλους τους φυσικούς περιορισμούς που επιβάλλονται. Το παίγνιο συγκλίνει σταδιακά στο ζητούμενο σημείο ισορροπίας σύμφωνα με τον κλειστό τύπο:

$$p_i^* = \frac{1}{h_i} \left\{ \frac{L}{L-1} \left[a_i - \frac{1}{L+M^*-1} \sum_{j \in M^*} a_j \right] \right\}, \quad (2.13)$$

$$i \in M^* := \{1, 2, \dots, M^*\}$$

ενώ ακόλουθα αποδεικνύεται η μοναδικότητά του.

Επιπλέον, μία σημαντική συνιστώσα που υιοθετείται στην έρευνα αυτή είναι η κεντρική ή μη τιμολόγηση που εισάγεται στους χρήστες είτε από τον τερματικό σταθμό είτε από το είδος των υπηρεσιών που αφορούν τον κάθε χρήστη σχετικά με την τιμή της παραμέτρου u_i .

Στο [1], αφού παρουσιαστεί το μη συνεταιριστικό παίγνιο επίλυσης του γνωστού μας προβλήματος κατανομής, εισάγεται ένας παράγοντας κόστους ως προς την ισχύ:

$$C_j = \frac{LR}{M} t_j p_j \quad \frac{b}{J} \quad (2.14)$$

με την παράμετρο t_j να προκύπτει ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του δικτύου. Ο παράγοντας αυτός υιοθετείται τελικά σαν μία συνάρτηση κόστους $V_j = C_j$ με αποτέλεσμα την τελική συνάρτηση καθαρής ευχαρίστησης:

$$U'_i = U_i - V_i \quad b/J \quad (2.15)$$

Όπως και στο πρόβλημα χωρίς κοστολόγηση, παραγωγίζοντας τη συνάρτηση ευχαρίστησης ως προς την ισχύ, η τελική συνθήκη βελτιστοποίησης για την εύρεση του σημείου ισορροπίας κατά Nash είναι:

$$\gamma_i \frac{df(\gamma_i)}{d\gamma_i} - f(\gamma_i) - t p_i^2 = 0 \quad (2.16)$$

Στο [2], οι συγγραφείς παρουσιάζουν μία συνάρτηση χρησιμότητας όμοια με ωρύτερα. Ωστόσο, επισημαίνοντας την ανεπάρκεια του σημείου ισορροπίας κατά

Nash χωρίς κάποια πολιτική κοστολόγησης, το πρόβλημα με γραμμικό κόστος διαμορφώνεται ως ακολούθως:

$$u_j^c(\mathbf{p}) = u_j(\mathbf{p}) - c_j(p_j, p_{-j}) \quad (2.17)$$

Η συνθήκη βελτιστοποίησης του προβλήματος είναι:

$$\max_{p_j \in P_j} u_j^c(p_j, p_{-j}) = u_j(\mathbf{p}) - c_j(p_j, p_{-j}) \quad (2.18)$$

Η μοναδικότητα του σημείου ισορροπίας αποδεικνύεται, ενώ οι αλγόριθμοι μέσω των οποίων γίνεται η σύγκλιση είναι:

Αλγόριθμος 1 (Τερματικά)

1. Όρισε το αρχικό διάνυσμα ισχύος $p(0) = \underline{p}$ (δηλαδή την κατώτερη επιτρεπτή τιμή) για $t = 0$ καθώς και $k = 1$.
2. $\forall k$ για τις διαθέσιμες χρονοσχισμές:
 - i. Δεδομένου του $p(\tau_{k-1})$, υπολόγισε την καλύτερη απόκριση:

$$r_j(\tau_k) = \arg \max_{p_j \in P_j} u_j^c(p_j, p_{-j}(\tau_{k-1}))$$
 - ii. Όρισε $p_j(\tau_k) = \min(r_j(\tau_k))$

Αλγόριθμος 2 (Δίκτυο)

1. Όρισε $c = 0$ και ανακοίνωσε το στα τερματικά
2. Προσδιόρισε το u_j για όλους τους χρήστες στην ισορροπία, και αύξησε το c κατά Δc
3. Εάν $u_j^c \leq u_j^{c+\Delta c}$ για όλους τους χρήστες, τότε επέστρεψε στο βήμα 2, αλλιώς σταμάτα και όρισε $c_{BEST} = c$.

Στο [3], οι συγγραφείς καταφεύγουν στην τακτική γραμμικής κοστολόγησης. Στην συγκεκριμένη έρευνα, η συνάρτηση καθαρής ευχαρίστησης η οποία ορίζεται ως η διαφορά μίας κοίλης «απλής» συνάρτησης ευχαρίστησης ως προς τον σηματοθορυβικό λόγο και μίας συνάρτησης κόστους ως προς την ισχύ εκπομπής. Επίσης επιδιώκεται να παρακαμφθούν οι καθυστερήσεις και οι παρεμβολές που εισάγονται από ένα πλήθος παραμέτρων του καναλιού, όπως η κωδικοποίηση, η διαμόρφωση και αποδιαμόρφωση του σήματος κλπ. Για το λόγο αυτό η χωρητικότητα του καναλιού αναδεικνύεται ως μέσο για την καλύτερη διαχείριση του ελέγχου της ισχύος και αφήνεται σε κατώτερα επίπεδα η απόφαση για το αν αυτή η χωρητικότητα θα διατεθεί στις παραπάνω διαδικασίες. Θεωρώντας όλες τις παρεμβολές ως θόρυβο και εξετάζοντας την περίπτωση ενός μονοκυψελωτού CDMA δικτύου, προτείνεται η ακόλουθη συνάρτηση καθαρής ευχαρίστησης:

$$u_i = B \log_2(1 + \gamma_i) - a_i p_i \text{ bits/sec} \quad (2.19)$$

Το παίγνιο μοντελοποιείται με βάση την παρακάτω συνθήκη βελτιστοποίησης:

$$\max_{p_i \in P_i} u_i(p_i, p_{-i}) \text{ για όλους τους χρήστες} \quad (2.20)$$

όπου η ισχύς εκπομπής υπόκειται στους γνωστούς φυσικούς περιορισμούς.

Η ισχύς για την οποία προκύπτει η μέγιστη τιμή της συνάρτησης καθαρής ευχαρίστησης δίνεται από τον κλειστό τύπο:

$$\hat{p} = F(\bar{p}) = F(Mp + b) \quad (2.21)$$

Στην ανωτέρω σχέση ισχύουν:

$$\begin{aligned} F_i(x) &= \bar{p}_i \text{ εάν } x_i \geq \bar{p}_i \\ F_i(x) &= x_i \text{ εάν } 0 \leq x_i \leq \bar{p}_i \\ F_i(x) &= 0 \text{ εάν } x_i \leq 0 \end{aligned}$$

και M είναι ένας $n \times n$ πίνακας του οποίου τα στοιχεία είναι:

$$m_{ij} = 0 \text{ και } m_{ij} = -\left(\frac{B}{W}\right) \frac{h_j}{h_i} \text{ για κάθε } i \neq j \quad (2.22)$$

ενώ b είναι μία σταθερά που προκύπτει με βάση τα χαρακτηριστικά του καναλιού.

Δεν θα επεκταθούμε στη συλλογιστική της απόδειξης της σύγκλισης και της μοναδικότητας του κατά Nash σημείου ισορροπίας (που γίνεται μέσω της απαγωγής σε άτοπο) που περικλείεται στην δημοσίευση αυτή, ωστόσο στο τέλος οι συγγραφείς καταλήγουν ότι το παίγνιο τελικά διαμορφώνεται ως εξής:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} p(k) = \bar{p} \quad (2.23)$$

όπου για κάθε χρήστη η τιμή \bar{p} είναι το ζητούμενο σημείο ισορροπίας.

Ο καταναμημένος αλγόριθμος που χρησιμοποιείται είναι:

1. Όρισε την αρχική τιμή του διανύσματος της ισχύος $\mathbf{p}(\mathbf{0}) = \mathbf{p}$.
2. Για κάθε χρονοσχισμή τ_k δοσμένης της τιμής $p(\tau_{k-1})$ υπολόγισε την τιμή $\hat{p}_l(\tau_k) = \arg \max_{p_l \in P_l} u_l(p_l, \mathbf{p}_{-l}(\tau_{k-1}))$ για το σύνολο των χρηστών.

Ακολουθώς, γίνεται αντίστοιχη ανάλυση αλλά αυτήν την φορά για ένα ασύρματο CDMA δίκτυο με j κυψέλες. Η συνάρτηση καθαρής ευχαρίστησης μεταβάλλεται ως εξής:

$$u_{ij} = B \log_2(1 + \gamma_{ij}) - a_{ij}p_i + C_{ij} \quad (2.24)$$

Θεωρείται ότι:

$$C_{ij} = a_{ij}p_{max} \quad (2.25)$$

και τελικά έχουμε:

$$u_{ij} = B \frac{\gamma_{ij}}{\ln 2} - a_{ij}p_i + a_{ij}p_{max} \quad (2.26)$$

Σε αντιστοιχία με πριν, το παίγνιο καταλήγει σε σημείο ισορροπίας κατά Nash για το σύνολο των χρηστών στο πολυκυβελωτό δίκτυο.

Ο αλγόριθμος που υλοποιεί τη συγκεκριμένη κατανομή είναι:

1. Αν ο χρήστης i έχει αντιστοιχηθεί σε κάποιον τερματικό σταθμό πήγαινε στο βήμα 2. Διαφορετικά προσδιόρισε τον j τερματικό σταθμό για τον οποίο ισχύει $j = \arg \max_j u_{ij}$
2. Για το πλήθος των διαθέσιμων χρονοσχισμών τ_k και για το σύνολο των χρηστών υπολόγισε $\hat{p}_i(\tau_k) = \arg \max_{p_i \in P_i} u_{ii}(p_i, \mathbf{p}_{-i}(\tau_{k-1}))$.
3. Υπολόγισε εκ νέου την συνάρτηση ευχαρίστησης και ανακατένειμε εκ νέου τους χρήστες στον βέλτιστο τερματικό σταθμό.

2.4.3

Κατανομή Ισχύος σε Ασύρματα CDMA Δίκτυα με Πολιτική Κυρτής Κοστολόγησης

Η ανάγκη για μία προσέγγιση επίλυσης του προβλήματος η οποία ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα της φύσης των δικτύων αυτών όσο το δυνατόν περισσότερο, οδήγησε στην αντικατάσταση της κοστολόγησης με γραμμική μορφή από κοστολόγηση της ισχύος με κυρτή μορφή. Βασική αιτία αυτής της αλλαγής «τακτικής» αποτέλεσε η αδυναμία της γραμμικής συνάρτησης κόστους να παρουσιάσει ορθά τη βλάβη που προκαλεί στους γείτονές του ένας χρήστης εκπέμποντας, καθώς το σύνολο των παρεμβολών και του θορύβου που οφείλονται στην εξυπηρέτησή του δεν είναι αναλογικό της ισχύος εκπομπής. Επομένως μία κυρτή συνάρτηση κοστολόγησης της ισχύος, στην οποία το κόστος που οι χρήστες καλούνται να πληρώσουν στο σύστημα από την υπέρμετρη κατανάλωση πόρων αυξάνεται εκθετικά, συνιστά μία πιο ρεαλιστική προσέγγιση.

Στο [13], για υπηρεσίες πραγματικού χρόνου (real time services) σε ασύρματα CDMA δίκτυα υλοποιείται μία συνολική θεώρηση του προβλήματος, από την οποία καταλήγουμε στο συμπέρασμα, ότι μία πολιτική κυρτής κοστολόγησης μπορεί να οδηγήσει το σύστημα συνολικά σε μια βέλτιστη κατάσταση ισορροπίας ευνοώντας όλες τις πλευρές. Αρχικά, στο στάδιο μοντελοποίησης του προβλήματος στο αντίστοιχο παίγνιο, χρησιμοποιείται η ακόλουθη συνάρτηση χρησιμότητας:

$$U_i(R_i^*, P_i, P_{-i}) = \frac{T_i(R_{Max,i}^* f(\gamma_i), P_i, \mathbf{P}_{-i})}{P_i} \quad (2.27)$$

Βασική συνθήκη για την επίλυση του προβλήματος ελέγχου της ισχύος στην άνω ζεύξη (UPC – Uplink Power Control παίγνιο) αποτελεί η μεγιστοποίηση της συνάρτησης ευχαρίστησης. Με άλλα λόγια:

$$\text{UPC Game: } \max_{P_i \in A_i} U_i = \max_{P_i \in A_i} U_i(P_i, \mathbf{P}_{-i}) \quad (2.28)$$

Η ανωτέρω συνθήκη οδηγεί στην εύρεση του σημείου ισοροπίας κατά Nash:

$$P_i^* = \min \left\{ \frac{\gamma_i^* R_{max,i}^* I_{-i}(\bar{\mathbf{P}}_{-i})}{W G_i}, P_i^{Max} \right\} \quad (2.29)$$

για το οποίο εύκολα αποδεικνύεται η σύγκλιση και μοναδικότητα. Για το εν λόγω όμως σημείο, δηλαδή το τελικό διάνυσμα της ισχύος P_i^* , αναγνωρίζεται η ανεπάρκεια του κατά Pareto σε σχέση με ένα κεντρικά οργανωμένο πρόβλημα με αντίστοιχες πολιτικές κοστολόγησης.

Όπως και πριν, για την επίτευξη μίας πιο κοινωνικά ευέλικτης λύσης κρίνεται αναγκαία η εισαγωγή μίας συνάρτησης κόστους, η οποία θα κοστολογεί την ισχύ εκπομπής των χρηστών. Αντίθετα όμως με παλαιότερες αντιλήψεις περί γραμμικής τιμολόγησης, στην παρούσα έρευνα η κοστολόγηση που εισάγεται είναι κυρτής μορφής, ώστε να ανταποκριθεί καλύτερα τόσο σε ένα ρεαλιστικό μοντέλο ασυρμάτου δικτύου, όσο και στη βελτίωση της ικανοποίησης των χρηστών σε σχέση με νωρίτερα. Το παίγνιο διαμορφώνεται κατάλληλα, με τη συνάρτηση καθαρής ευχαρίστησης να αντικαθιστά τη συνάρτηση ευχαρίστησης από πριν. Συνεπώς έχουμε:

$$U_i^{net}(P_i, \mathbf{P}_{-i}) = \frac{T_i(R_{Max,i}^* f(\gamma_i), P_i, P_{-i})}{P_i} - c_i(P_i, \mathbf{P}_{-i}) \quad (2.30)$$

όπου $c_i(P_i, P_{-i})$ είναι η συνάρτηση κόστους εκθετικής μορφής:

$$c_i(P_i, P_{-i}) = c(e^{P_i} - 1) \quad (2.31)$$

Το νέο πρόβλημα που προκύπτει με την τιμολόγηση της ισχύος των χρηστών - παικτών (UPCP – Uplink Power Control with Pricing) διαμορφώνεται με βάση την ακόλουθη συνθήκη βελτιστοποίησης:

$$\text{UPCP Game: } \max_{P_i \in A_i} U_i^{net}(P_i, \mathbf{P}_{-i}) = \frac{T_i(R_{Max,i}^* f(\gamma_i), P_i, P_{-i})}{P_i} - c_i(P_i, \mathbf{P}_{-i}) \quad (2.32)$$

Αποδεικνύεται και μαθηματικά ότι το νέο πιο σύνθετο παίγνιο που διαμορφώθηκε, συγκλίνει και αυτό σε ένα μοναδικό σημείο ισορροπίας κατά Nash, βέλτιστο κατά Pareto σε σχέση με το παίγνιο χωρίς κοστολόγηση. Ταυτόχρονα όπως παρουσιάζεται και πρακτικά, η ικανοποίηση των χρηστών συνολικά βελτιώνεται μαζί με την κοινωνική δικαιοσύνη που παρέχεται από το σύστημα.

Η συλλογιστική διαδικασία που περιγράφεται και στο παραπάνω παίγνιο (με πολιτική κοστολόγησης - UPCP) συνοψίζεται στον ακόλουθο αλγόριθμο, ο οποίος αποτελείται από δύο τμήματα, ένα που διαμορφώνεται από τους χρήστες και ένα που υλοποιείται από τον σταθμό βάσης του δικτύου. Συνοπτικά έχουμε:

UPCP Algorithm:

Μέρος 1° (Καθορίζεται από το δίκτυο):

Βήμα 1: Καθορίζεται η παράμετρος κοστολόγησης c ίση με το μηδέν για όλους τους χρήστες του συστήματος.

Βήμα 2: Κάθε χρήστης προσδιορίζει το διάνυσμα της ισχύος εκπομπής για το σημείο ισορροπίας του P_{net}^* (σύμφωνα και με το δεύτερο τμήμα του αλγορίθμου) και διαμορφώνει ακόλουθα την χρησιμότητα του U_i^{net} .

Βήμα 3: Η παράμετρος κοστολόγησης c αυξάνεται κατά Δc (δηλαδή $c=c+\Delta c$) και ανακοινώνεται σε όλους τους χρήστες.

Βήμα 4: Αν οι συναρτήσεις καθαρής ευχαρίστησης δε βελτιώνονται, δηλαδή αν $U_i^{net}(c) > U_i^{net}(c + \Delta c)$ για όλους τους χρήστες, τότε η εκτέλεση του αλγορίθμου σταματά και ορίζεται $c_{best} = c$. Διαφορετικά, επιστροφή στο Βήμα 2.

Μέρος 2° (Καθορίζεται από τον κάθε χρήστη):

Βήμα 1: Τη στιγμή έναρξης κάθε χρονοσχισής t , κάθε χρήστης i του συστήματος εκπέμπει με μια τυχαίως επιλεγμένη ισχύ εκπομπής εντός των επιτρεπτών ορίων (δηλαδή $0 \leq P_i^{*(0)} \leq P_i^{Max}$). Ορίζεται $l = 0$ και ως εκ τούτου $P_i^{*(0)}$ για κάθε χρήστη.

Βήμα 2: Με βάση τις ισχύεις εκπομπής των χρηστών στην άνω ζεύξη των δικτύων που ανακοινώνονται από τον κεντρικό τερματικό σταθμό όταν αναμεταδίδει τη συνολική του παρεμβολή $I^{(l)}(P^{(l)})$, ακόλουθα κάθε χρήστης υπολογίζει την παρεμβολή που του προκαλεί το σύνολο των υπόλοιπων χρηστών $I_{-i}^{(l)}(P_{-i}^{(l)})$ και προσδιορίζει εκ νέου την ισχύ εκπομπής του $P_i^{*(l+1)}$.

Βήμα 3: Αν οι ισχύεις εκπομπής συγκλίνουν (δηλαδή $|P_i^{*(l+1)} - P_i^{*(l)}| \leq 10^{-5}$) τότε η εκτέλεση του αλγορίθμου σταματά.

Βήμα 4: Ορίζεται $l = l + 1$ και επιστροφή στο βήμα 2.

Στο [5], οι συγγραφείς προτείνουν μία ανάλογη προσέγγιση σε σχέση με αμέσως πιο πριν, για την κατανομή των πόρων που είναι διαθέσιμοι σε ασύρματα CDMA δίκτυα, αυτήν τη φορά περιλαμβάνοντας στην έρευνα και υπηρεσίες μη

πραγματικού χρόνου. Και στην περίπτωση αυτή, η επίλυση του παιγνίου (MSUPC – Multi Service Uplink Power Control) υλοποιείται με χρήση μίας συνάρτησης ευχαρίστησης υπό τις αρχές της Θεωρίας Παιγνίων. Ωστόσο, για να γίνει ορατή η διαφορά στην ποιότητα των διαφορετικών ειδών υπηρεσιών, η συνάρτηση χρησιμότητας υλοποιείται με δύο διαφορετικούς τρόπους που καθορίζονται από την συνάρτηση ρυθμαπόδοσης (throughput) ως προς τον ρυθμό μετάδοσης R_i . Πιο αναλυτικά, η δομή της συνάρτησης ευχαρίστησης για τους χρήστες ανάλογα με την υπηρεσία που τους ενδιαφέρει είναι η ακόλουθη:

$$U_i(P_i, \mathbf{P}_{-i}) = \frac{T_i(R_i^*)}{P_i} = \begin{cases} \frac{T_i(R_i^{Max} \cdot f_i(\gamma_i))}{P_i} & non - real\ time\ users \\ \frac{T_i((R_{T,i}^* + EF_i) \cdot f_i(\gamma_i))}{P_i} & real\ time\ users \end{cases} \quad (2.33)$$

όπου για τους χρήστες μη πραγματικού χρόνου ο ρυθμός μετάδοσης δίνεται $R_i^* \in [0, R_i^{Max}]$ ενώ για τους χρήστες πραγματικού χρόνου έχουμε $R_i^* \in [0, R_{T,i}^* + EF_i]$. Συνθήκη βελτιστοποίησης του προβλήματος αποτελεί και πάλι η μεγιστοποίηση της ισχύος και για τις δύο κατηγορίες χρηστών, δηλαδή:

MSUPC Game:

$$\max_{A_i} U_i = \max_{A_i} U_i(P_i, \mathbf{P}_{-i}) \text{ όπου } 0 \leq P_i \leq P_i^{Max} \quad (2.34)$$

Το παίγνιο και σε αυτήν την περίπτωση συγκλίνει σε ένα σημείο ισορροπίας κατά Nash, διαφοροποιημένο όμως ανάλογα με το είδος της υπηρεσίας που αφορά τον κάθε χρήστη του συστήματος. Επομένως για την ισχύ εκπομπής στην κατάσταση ισορροπίας κατά Nash (του οποίου η σύγκλιση και μοναδικότητα αποδεικνύονται) έχουμε:

$$P_i^* = \begin{cases} \min \left\{ \frac{\gamma_i^*(R_{T,i}^* + EF_i) I_{-i}(\bar{\mathbf{P}}_{-i})}{WG_i}, P_i^{Max} \right\} & real\ time\ users \\ \min \left\{ \frac{\gamma_i^* R_i^{Max} I_{-i}(\bar{\mathbf{P}}_{-i})}{WG_i}, P_i^{Max} \right\} & non - real\ time\ users \end{cases} \quad (2.35)$$

Στα [11], [14] και κατ' επέκταση στο [10] με ακριβώς την ίδια λογική υλοποιείται το παίγνιο χωρίς κάποια κοστολόγηση (η αναφορά έγινε εδώ για λόγους συνοχής της παρουσίασης των ερευνών).

Κατ' απόλυτη αναλογία με προηγουμένως, το ανωτέρω ευρεθέν σημείο ισορροπίας αποδεικνύεται ανεπαρκές ως προς την δικαιοσύνη της κατανομής των πόρων και την κοινωνική συνύπαρξη των χρηστών. Για το λόγο αυτό, οι συγγραφείς καταφεύγουν στην λογική της κοστολόγησης της ισχύος εκπομπής των χρηστών, χρησιμοποιώντας μάλιστα την κυρτή κοστολόγηση έναντι της γραμμικής.

Κατά αυτόν τον τρόπο προκύπτει ένα νέο πιο σύνθετο παίγνιο (Multi Service Uplink Power Control with Convex Pricing – MSUPC-CP game), το οποίο χρησιμοποιεί την ίδια ακριβώς συνάρτηση κόστους με πριν ($c_i(P_i, P_{-i}) = c(e^{P_i} - 1)$), αλλά η συνάρτηση ευχαρίστησης διαφοροποιείται ως ακολούθως:

$$U_i^{net}(P_i, \mathbf{P}_{-i}) = \frac{T_i(R_i^*)}{P_i} - c_i(P_i, \mathbf{P}_{-i})$$

$$= \begin{cases} \frac{T_i(R_i^{Max} \cdot f_i(\gamma_i))}{P_i} - c_i(P_i, \mathbf{P}_{-i}) & \text{non - real time users} \\ \frac{T_i((R_{T,i}^* + EF_i) \cdot f_i(\gamma_i))}{P_i} - c_i(P_i, \mathbf{P}_{-i}) & \text{real time users} \end{cases} \quad (2.36)$$

Για το λόγο αυτό, η συνθήκη βελτιστοποίησης διαμορφώνεται σε αντιστοιχία με πριν και για τα δύο είδη χρηστών:

MSUPC-CP Game:

$$\max_{P_i \in A_i} U_i^{net} = \max_{P_i \in A_i} U_i^{net}(P_i, \mathbf{P}_{-i}) = \frac{T_i(R_i^*)}{P_i} - c_i(P_i, \mathbf{P}_{-i}) \quad (2.37)$$

$$\text{όπου } 0 \leq P_i \leq P_i^{Max}$$

Και σε αυτήν την περίπτωση, το νέο σημείο ισορροπίας κατά Nash ύστερα από την εισαγωγή της κυρτής τιμολόγησης της ισχύος εκπομπής των χρηστών συμπεραίνεται ως βέλτιστο κατά Pareto σε σχέση με προηγουμένως και δικαιότερο κοινωνικά για το σύστημα.

Ο αλγόριθμος σύγκλισης του παιγνίου είναι ο ίδιος με το [13], καθώς αναλύθηκε προηγουμένως.

2.4.4

Συνδυαστική Κατανομή Ισχύος και Ρυθμού Μετάδοσης σε Ασύρματα CDMA Δίκτυα

Νέες προσθήκες στην βιβλιογραφία πραγματεύονται το πρόβλημα της βέλτιστης κατανομής πόρων διπαραμετρικά, δηλαδή οι χρήστες καθορίζουν κατά την πορεία

σύγκλισης του παιγνίου σε ένα σημείο ισορροπίας τόσο την ισχύ όσο και τον ρυθμό μετάδοσης τους. Στο [18] υιοθετείται μία λογική ξεχωριστής επίλυσης του προβλήματος κατανομής, δηλαδή η ισχύς και ο ρυθμός μετάδοσης κατανέμονται ανεξάρτητα σε δύο διαφορετικά βήματα. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή εισάγει καθυστερήσεις στην υλοποίηση του αλγορίθμου. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται επαρκώς στο [4]. Η ανάγκη για παροχή υπηρεσιών με διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης οδήγησε στην ανάγκη για έλεγχο της κατανομής όχι μόνο της ισχύος (που είχε έως τώρα διερευνηθεί σε μεγάλο βαθμό) αλλά και στη διαχείριση του τρόπου με τον οποίο κατανέμεται ο ρυθμός μετάδοσης (bit rate) των χρηστών. Με αυτόν τον τρόπο, οι διαφορετικές υπηρεσίες παρέχονται στους χρήστες με βέλτιστο τρόπο λαμβάνοντας υπόψη το είδος και την ποιότητα τους (QoS). Ταυτόχρονα, η λογική της κοστολόγησης της ισχύος εκπομπής εφαρμόζεται και εδώ με στόχο την επίτευξη ενός πιο δίκαιου κοινωνικά αποτελέσματος μέσω της μείωσης των παρεμβολών εντός του δικτύου και τη συνεργασία των χρηστών.

Πιο συγκεκριμένα, οι συγγραφείς καταφεύγουν στην υιοθέτηση μίας συνάρτησης ευχαρίστησης, η οποία αντικατοπτρίζει το πλήθος των επιτυχώς μεταδιδόμενων bits ανά μονάδα ενέργειας. Στο παίγνιο που δομείται (Energy Efficient Noncooperative Joint Power and Rate Control Game – ENPRG) η συνάρτηση χρησιμότητας που παραπάνω αναφέραμε έχει την ακόλουθη μορφή:

$$u_i = \frac{T_i}{p_i} \quad (2.38)$$

όπου το T_i εκφράζει τον επιτυχώς μεταδιδόμενο ρυθμό μετάδοσης που φτάνει στο σταθμό βάσης και προκύπτει από την σχέση:

$$T_i = r_i \ln(\gamma_i) \quad (2.39)$$

όπου κατά τα γνωστά r_i και γ_i είναι ο ρυθμός μετάδοσης και ο σηματοθορυβικός λόγος αντίστοιχα. Η συνθήκη βελτιστοποίησης του προβλήματος με δύο παραμέτρους πλέον εκφράζεται ως εξής:

$$\text{ENPRG: } \max_{p_i \in P_i, r_i \in R_i} u_i(\mathbf{p}, \mathbf{r}) \quad (2.40)$$

Ουσιαστικά και πάλι επιδιώκεται η μεγιστοποίηση της συνάρτησης χρησιμότητας, ωστόσο πλέον το σημείο ισορροπίας κατά Nash στο οποίο αποδεικνύεται ότι καταλήγει το παίγνιο, αφορά δύο διάνυσματα, ένα για την ισχύ εκπομπής των χρηστών \mathbf{p} , και άλλο ένα διάνυσμα για τον ρυθμό μετάδοσης τους \mathbf{r} εντός πάντοτε των φυσικών και τεχνικών περιορισμών που επιβάλλονται.

Και στο νέο αυτόν τρόπο αντιμετώπισης του προβλήματος βέλτιστης κατανομής των πόρων στα ασύρματα CDMA δίκτυα, η κοστολόγηση χρησιμοποιείται για να βελτιώσει τις αδυναμίες του ευρεθέντος ωρύτερα Nash Equilibrium. Στην εν λόγω

έρευνα εισάγεται γραμμική κοστολόγηση και το νέο παίγνιο που σχηματίζεται (Energy Efficient Noncooperative Joint Power and Rate Control Game with Power Interference Pricing – ENPRGP), έχει την ακόλουθη συνάρτηση καθαρής ευχαρίστησης (μέσω μίας νέας παραμέτρου κοστολόγησης c_i):

$$u_i = \frac{T_i}{p_i} - c_i p_i \quad (2.41)$$

Η συνθήκη βελτιστοποίησης είναι:

$$\text{ENPRGP: } \max_{p_i \in P_i, r_i \in R_i} u_i^p(\mathbf{p}, \mathbf{r}) = \frac{r_i \ln(\lambda \gamma_i)}{p_j} - c_i p_i \quad (2.42)$$

Και σε αυτήν την περίπτωση, το παίγνιο συγκλίνει σε ένα νέο και μοναδικό σημείο ισορροπίας κατά Nash και για τα δύο ζητούμενα μεγέθη, βέλτιστο κατά Pareto σε σχέση με πριν, ενώ όλοι οι χρήστες στο δίκτυο βελτιώνουν την ευχαρίστησή τους με ταυτόχρονη μείωση της ισχύος εκπομπής και κατ' επέκταση του συνόλου των παρεμβολών.

Ο κεντρικός αλγόριθμος ο οποίος οδηγεί σε σύγκλιση το σύνθετο παίγνιο της συνδυαστικής κατανομής ισχύος και ρυθμού μετάδοσης με κοστολόγηση (ENPRGP) συνίσταται από δύο βασικά τμήματα, τα οποία αναφέρονται παρακάτω:

Μέρος 1° (Εύρεση Nash Equilibrium για το ENPRGP παίγνιο):

1. Για τη χρονοσχισμή θ ($t_{i0} = 0$) για κάθε χρήστη τότε:
2. Όρισε το $\mathbf{p}(\mathbf{0})$ ως ένα τυχαίο διάνυσμα ισχύος.
3. Για το σύνολο των χρηστών, σε κάθε χρονοσχισμή.
4. Υπολόγισε την βέλτιστη τιμή του ρυθμού μετάδοσης, δηλαδή:

$$r_i^* = \arg \max_{r_i \in R^+} u_i^p(\mathbf{p}, \mathbf{r})$$

5. Όρισε τον ρυθμό μετάδοσης ως εξής: $r_i(t_k) = \min(r_i^*, r^{max})$.
6. Με βάση το προηγούμενο διάνυσμα της ισχύος $\mathbf{p}(t_{k-1})$, υπολόγισε:

$$p_i^* = \arg \max_{p_i \in R^+} u_i^p(\mathbf{p}, \mathbf{r})$$

7. Όρισε την ισχύ εκπομπής ως εξής: $p_i(t_k) = \min(p_i^*, p^{max})$.
8. Εάν $\|p_i(t_k) - p_i(t_{k-1})\| \leq \varepsilon$ τότε:
9. Σταμάτα.
10. Δήλωσε το $p_i(t_k)$ ως το ζητούμενο σημείο ισορροπίας κατά Nash.
11. Διαφορετικά, θέσε $k = k + 1$ και επέστρεψε στο βήμα 2.

Μέρος 2° (Εύρεση της βέλτιστης παραμέτρου κοστολόγησης c_{best}):

1. Όρισε την παράμετρο c ίση με το θ και ανακοίνωσε το σε όλους τους χρήστες.

2. Για την τιμή του u_i στην κατάσταση ισορροπίας, αύξησε το c κατά Δc (δηλαδή $c = c + \Delta c$) και ενημέρωσε όλου τους χρήστες.
3. Εάν $u_i^c \leq u_i^{c+\Delta c}$ για κάθε χρήστη.
4. Επέστρεψε στο βήμα 2.
5. Διαφορετικά.
6. Σταμάτα και δήλωσε $c_{best} = c$.

Στα ίδια πλαίσια κινούνται οι συγγραφείς στο [12] και [7].

Τέλος, στην ίδια λογική αντιμετώπισης του προβλήματος συνδυαστικά για την ισχύ και τον ρυθμό μετάδοσης κινούνται και οι συγγραφείς στο [6]. Στη συγκεκριμένη έρευνα, αρχικά παρουσιάζεται μία ξεχωριστή κατανομή των δύο ζητούμενων παραμέτρων, στο οποίο η μορφή της συνάρτησης χρησιμότητας παρουσιάζει σημαντικές ομοιότητες με νωρίτερα. Εν συνεχεία όμως, οι συγγραφείς για να κατορθώσουν μία ταυτόχρονη κατανομή των δύο αυτών μεγεθών, μοντελοποιούν το πρόβλημα σε ένα μη συνεργατικό παίγνιο στο οποίο η συνάρτηση ευχαρίστησης λαμβάνει την ακόλουθη μορφή:

$$u_j(x_j) = \frac{L}{M} x_j \left(1 - e^{-\frac{c_j}{2x_j}} \right)^M \quad (2.43)$$

όπου L είναι το πλήθος των μεταφερόμενων bits σε ένα πακέτο μεγέθους M , c_j μία παράμετρος εξαρτώμενη από τις συνθήκες του διαύλου μεταφοράς και τέλος η μεταβλητή x_j η οποία προκύπτει ως ο λόγος του ρυθμού μετάδοσης ως προς την ισχύ, δηλαδή:

$$x_j = \frac{r_j}{p_j} \quad (2.44)$$

Η συνθήκη βελτιστοποίησης του προβλήματος ουσιαστικά δεν μεταβάλλεται, καθώς και πάλι βασική επιδίωξη για την ορθή σύγκλιση του παιγνίου στο σημείο ισορροπίας είναι η μεγιστοποίηση της συνάρτησης χρησιμότητας, αυτήν την φορά ως προς τη νέα μεταβλητή x_j . Η συλλογιστική πορεία που ακολουθείται αποδεικνύει την ύπαρξη του σημείου ισορροπίας κατά Nash. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η ζητούμενη ταυτόχρονη διαχείριση των δύο αυτών μεγεθών. Για το εν λόγω παίγνιο, ο κατανομημένος αλγόριθμος σύγκλισης είναι ο ακόλουθος:

1. Αρχικοποίησε τις τιμές του ρυθμού μετάδοσης όλων των χρηστών του παιγνίου (όπως εκφράζεται από το διάνυσμα $r(t_0)$) και το διάνυσμα της ισχύος $p(t_0)$ για την χρονοσχιμή t_0 με αποδεκτές και εντός των φυσικών περιορισμών τιμές (έστω \bar{r}_j και \underline{p}_j).
2. Για την εκάστοτε χρονοσχιμή t_k ο κάθε χρήστης ξεχωριστά υπολογίζει:

$$x_j(t_k) = \arg \max_{x_j \in \left[\frac{r_j}{p_j}, \frac{\bar{r}_j}{\bar{p}_j} \right]} u_j(x, p_{-j}(t_k))$$

Προσδιορίζονται εκ νέου οι τιμές για τον ρυθμό $r_j(t_{k+1})$ και της ισχύ $p_j(t_{k+1})$ μετάδοσης.

3. Εάν $\max\{\|r(t_k) - r(t_{k+1})\|, \|p(t_k) - p(t_{k+1})\|\} \leq \epsilon$ τότε σταμάτα. Διαφορετικά θέσε $k = k + 1$ και επέστρεψε στο βήμα 2.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΡΥΘΜΟΥ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΣΕ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΚΥΨΕΛΩΤΑ ΔΙΚΤΥΑ

- 3.1. Εισαγωγικά**
- 3.2. Χαρακτηριστικές Παράμετροι Δικτύου**
- 3.3. Συνάρτηση Ευχαρίστησης**
- 3.4. Μη Συνεργατικό Παίγνιο Συνδυαστικής Κατανομής Ισχύος και Ρυθμού Μετάδοσης στην Άνω Ζεύξη Ασύρματου CDMA Δικτύου (JUPRA)**
- 3.5. Εύρεση Σημείου Ισορροπίας κατά Nash για το Μη Συνεργατικό (JUPRA) Παίγνιο**
- 3.6. Σύγκλιση του Μη Συνεργατικού Παιγνίου**
- 3.7. Αλγόριθμος Συνδυαστικής Κατανομής Ισχύος και Ρυθμού Μετάδοσης στην Άνω Ζεύξη**

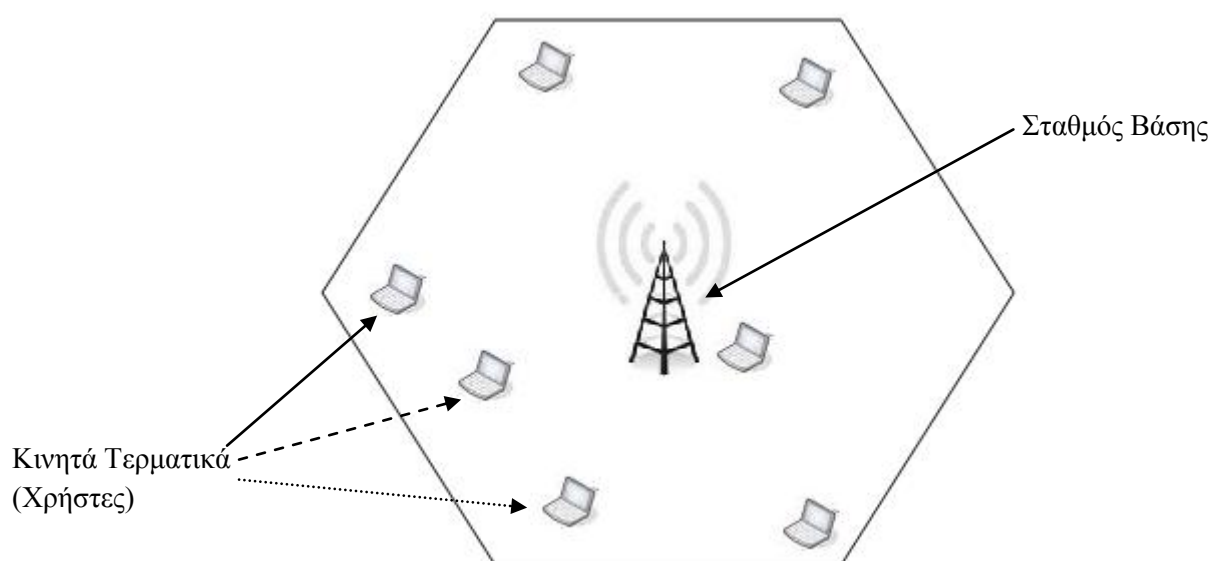
Εισαγωγικά

Στο 3^ο κεφάλαιο θα ασχοληθούμε με την ανάλυση του μαθηματικού προτύπου μέσω του οποίου καθίσταται δυνατή η θεωρητική επίλυση του προβλήματος της συνδυαστικής κατανομής της ισχύος εκπομπής και του ρυθμού μετάδοσης σε ασύρματα δίκτυα 3^{ης} και 4^{ης} γενιάς. Υποθέτουμε την άνω ζεύξη ενός κυψελωτού ασύρματου δικτύου τελευταίας (3^{ης} ή 4^{ης}) γενιάς, στο οποίο η πρόσβαση γίνεται μέσω της τεχνικής CDMA. Για το εν λόγω πρόβλημα ακολουθείται μία προσέγγιση επίλυσης, η οποία στηρίζεται στην υιοθέτηση μίας συνάρτησης ευχαρίστησης των χρηστών και στις βασικές αρχές της Θεωρίας Παιγνίων. Βασική επιδίωξη της προσπάθειας αυτής αποτελεί η όσο το δυνατόν αποδοτικότερη αξιοποίηση των πόρων του συστήματος και η υποστήριξη υπηρεσιών με ικανοποιητικούς ρυθμούς μετάδοσης.

Κατ' αρχήν, κάθε χρήστης συνδέεται με μία γενικής μορφής συνάρτηση ευχαρίστησης, η οποία είναι ικανή να υποστηρίζει πολλαπλές υπηρεσίες και αντιπροσωπεύει κατάλληλα το βαθμό ικανοποίησης του κινητού αυτού χρήστη σε συνάρτηση με την εκάστοτε κατανομή των πόρων του συστήματος, σε αντίθεση με τη μέχρι τώρα υιοθετημένη στην βιβλιογραφία συνάρτηση ευχαρίστησης, η οποία εκφράζει απλώς το λόγο των επιτυχώς μεταφερθέντων bits πληροφορίας στον σταθμό βάσης, προς το ποσό της ενέργειας που καταναλώθηκε για τη μεταφορά/μετάδοση των δεδομένων. Ακολουθώντας, δομείται το αντίστοιχο μη συνεργατικό παίγνιο (Joint Utility-based uplink Power and Rate Allocation (JUPRA) non Cooperative game) που επιτελεί την βέλτιστη κατανομή των μεγεθών στην άνω ζεύξη του προς εξέταση δικτύου. Στο ανωτέρω παίγνιο, κάθε χρήστης επιζητεί με εγωιστική συμπεριφορά προς τους υπόλοιπους χρήστες, την μεγιστοποίηση της απόδοσής του μέσω της συνάρτησης ευχαρίστησης, λαμβάνοντας υπόψη πάντοτε τους επιβαλλόμενους φυσικούς περιορισμούς ως προς την ισχύ εκπομπής και το ρυθμό μετάδοσης. Αποτέλεσμα είναι το παίγνιο να συγκλίνει σε ένα μοναδικό σημείο ισορροπίας κατά Nash, το οποίο προσδιορίζεται και ως προς τις δύο παραμέτρους των οποίων ζητείται η κατανομή, δηλαδή την ισχύ εκπομπής και το ρυθμό μετάδοσης του κάθε χρήστη. Επιπλέον, στην πορεία ανάλυσης και επίλυσης του προβλήματος, παρουσιάζεται η απόδειξη της σύγκλισης του παιγνίου σε ένα κατά Nash σημείο ισορροπίας, του οποίου επιβεβαιώνεται η μοναδικότητα. Τέλος, το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την εισαγωγή ενός κατανεμημένου, επαναληπτικού και χαμηλής πολυπλοκότητας αλγορίθμου (JUPRA algorithm), ο οποίος σταδιακά καταλήγει στην κατάσταση ισορροπίας για το σύστημά μας.

Χαρακτηριστικές Παράμετροι Δικτύου

Σε αυτό το σημείο πλέον παρουσιάζουμε τα βασικά χαρακτηριστικά του προβλήματος συνδυαστικής κατανομής ισχύος και ρυθμού μετάδοσης που θα μας απασχολήσει στην παρούσα διπλωματική εργασία. Υποθέτουμε την άνω ζεύξη ενός ασύρματου CDMA δικτύου το οποίο αποτελείται από μία κυψέλη, εντός της οποίας τοποθετείται κεντρικά ένας σταθμός βάσης (base station) και γύρω της ένα πλήθος χρηστών (backlogged users) σε τυχαίες θέσεις (κινητά τερματικά) σύμφωνα και με το ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 5: Δομή ενός κυψελωτού ασυρμάτου δικτύου με έναν κεντρικό σταθμό βάσης και ένα σύνολο κινητών τερματικών.

Στο εν λόγω σύστημα, θεωρούμε ανά πάσα στιγμή αριθμό $N(t)$ συνδεδεμένων χρηστών, οι οποίοι διαθέτουν διαρκώς κάποιον όγκο δεδομένων να μεταδώσουν προς το σταθμό βάσης σε οποιαδήποτε χρονοσχισμή t του συστήματος και αν υποθεθεί.

Επεξήγηση 3.α:

Ως χρονοσχισμή t , ορίζεται ένα σταθερό χρονικό διάστημα διάρκειας $1,67 \text{ ms}$ εντός του οποίου είναι δυνατή η αποστολή ενός ή περισσότερων πακέτων πληροφορίας από πολλούς χρήστες ταυτόχρονα.

Το σύνολο των χρηστών που κινούνται και μεταφέρουν πληροφορίες στο μονοκυψελωτό ασύρματο δίκτυο που μελετούμε συμβολίζεται με $S(t)$, ενώ το κέρδος

του καναλιού του κάθε χρήστη $i, i \in S$ συμβολίζεται με $G_i(t)$. Θεωρείται ότι η ποιότητα του καναλιού του κάθε χρήστη δε μεταβάλλεται στο πολύ μικρό διάστημα της μίας χρονοσχισμής, ωστόσο μπορεί να μεταβάλλεται σε διαφορετικές χρονοσχισμές λόγω φαινομένων σκίασης (shadow and fast fading) και μακροπρόθεσμων μεταβολών του συστήματος (long time scale variations), και για το λόγο αυτόν μπορεί να μοντελοποιηθεί ως μία μεταβλητή, η οποία ακολουθεί λογαριθμική κατανομή ως προς τον χρόνο. Επιπλέον, οι παράμετροι του συστήματος στην κατανομή των οποίων στοχεύει το σύστημα, δηλαδή η ισχύς εκπομπής και ο ρυθμός μετάδοσης του κάθε χρήστη, συμβολίζονται με $p_i(t)$ και $r_i(t)$ αντίστοιχα και η τιμή τους παραμένει σταθερή στη διάρκεια κάθε χρονοσχισμής, ανάλογα με την απόφαση που λαμβάνεται από τον κατανεμημένο αλγόριθμο υλοποίησης. Επίσης, είναι πολύ σημαντικό να επισημανθεί ότι εξαιτίας των φυσικών περιορισμών στους οποίους υπόκεινται οι χρήστες, τα πεδία τιμών εντός των οποίων κυμαίνονται τόσο η ισχύς εκπομπής όσο και ο ρυθμός μετάδοσης είναι άνω φραγμένα, δηλαδή δεν είναι εφικτό να ξεπεραστεί μία ανώτατη τιμή:

$$\begin{aligned} p_i(t) &\leq p_i^{Max} \\ r_i(t) &\leq r_i^{Max} \end{aligned} \tag{3.1}$$

Για το υπόλοιπο της παρούσας εργασίας, για λόγους απλότητας και διευκόλυνσης της μελέτης, θα παραλείψουμε την αναφορά σε χρονοσχισμές κατά την καταγραφή των παραμέτρων. Παράλληλα, οι παρεμβολές εντός της κυψέλης, οι συντελεστές θερμικού θορύβου, αλλά και τα σήματα που μεταδίδονται από τους χρήστες μπορούν να θεωρηθούν όλα μαζί ως «λευκός προσθετικός θόρυβος» που ακολουθεί την κατανομή Gauss (white additive Gaussian noise – AWGN) με σταθερή πυκνότητα φάσματος ισχύος I_0 . Συνεπώς, το σύνολο των παρεμβολών που αντιλαμβάνεται ο κάθε χρήστης $i \in S$, συνίσταται από τις παρεμβολές εντός του δικτύου και από τον λευκό προσθετικό θόρυβο κατά Gauss και δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$I_{-i}(\mathbf{p}_{-i}) = \sum_{j=1}^N G_j p_j - G_i p_i + I_0 \tag{3.2}$$

Επιπρόσθετα, όπως έχει παρουσιαστεί και σε προηγούμενα κεφάλαια, ο λόγος ενέργειας ενός bit δεδομένων E_b , προς την αντίστοιχη πυκνότητα παρεμβολών I_0 για κάθε χρήστη (bit energy to interference density ratio) συμβολίζεται με γ_i και ορίζεται:

$$\gamma_i \triangleq \frac{E_b}{I_0} \tag{3.3}$$

Ως εκ τούτου, θεωρούμε ότι ο λαμβανόμενος λόγος κάθε χρήστη γ_i στον σταθμό βάσης του δικτύου δίνεται από την σχέση:

$$\gamma_i(r_i, p_i, \mathbf{p}_{-i}) = \frac{W G_i p_i}{r_i I_{-i}} \quad (3.4)$$

όπου W [Hz] είναι το διαθέσιμο διαδιδόμενο εύρος ζώνης του συστήματος.

Επεξήγηση 3.β:

Η χρήση του όρου \mathbf{p}_{-i} συμβολίζει το διάνυσμα που περιέχει τις τιμές ισχύος των υπολοίπων χρηστών του συστήματος πλην του χρήστη i . Ομοίως, με I_{-i} συμβολίζεται το σύνολο των παρεμβολών στον χρήστη i από τους υπόλοιπους χρήστες.

3.3

Συνάρτηση Ευχαρίστησης

Στοχεύοντας στην ομαδοποίηση και ένταξη των ποικίλων χαρακτηριστικών των διαφορετικών υπηρεσιών που παρέχονται στους χρήστες σε ένα κοινό πλαίσιο, χωρίς όμως την ίδια στιγμή να παραλείπονται οι απαιτήσεις των χρηστών σε προκαθορισμένες προδιαγραφές ποιότητας (Quality of Service – QoS), κάθε χρήστης – κινητό τερματικό αντιστοιχίζεται με μία συνάρτηση ευχαρίστησης U_i . Η εισαγωγή της συνάρτησης αυτής διαδραματίζει ουσιαστικό ρόλο στην δόμηση του παιγνίου που θα ακολουθήσει, καθώς οι τιμές που λαμβάνει εκφράζουν το βαθμό ικανοποίησης που αντιλαμβάνονται οι χρήστες από την ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών σε σχέση με την καταναλισκόμενη ισχύ, προϋπόθεση για να μεταδώσουν τα δεδομένα, αλλά και από τον ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων αυτών.

Πιο αναλυτικά, ο κάθε χρήστης επιδιώκει όσο το δυνατόν υψηλότερο λόγο γ_i ενέργειας ενός bit προς πυκνότητα παρεμβολών, εκπέμποντας στις χαμηλότερες εφικτές τιμές ισχύος p_i , ενώ την ίδια στιγμή θα μεταδίδει τα πακέτα πληροφοριών με το μέγιστο πραγματοποιήσιμο ρυθμό μετάδοσης r_i . Με βάση όλα τα ανωτέρω απαιτούμενα χαρακτηριστικά για τη συνάρτηση ευχαρίστησης των χρηστών, υιοθετούμε τη χρήση μίας συνεχούς και $C^{(n)}$ φορές παραγωγίσιμης συνάρτησης U_i , η οποία προσδιορίζεται από δύο μεταβλητές, δηλαδή την ισχύ εκπομπής p_i και το ρυθμό μετάδοσης r_i του χρήστη στην άνω ζεύξη του δικτύου. Η εν λόγω λοιπόν συνάρτηση ευχαρίστησης δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$U_i(p_i, r_i) = \frac{Q_i(\hat{r}_i, p_i)}{p_i} = \frac{Q_i(r_i \cdot f_i(\gamma_i), p_i)}{p_i} \quad (3.5)$$

Σε αυτό το σημείο, απαραίτητο είναι να ορισθούν τα μεγέθη τα οποία εμφανίζονται για πρώτη φορά στην παραπάνω σχέση για την συνάρτηση ευχαρίστησης.

•

- $\hat{r}_i = r_i \cdot f_i(\gamma_i)$

Αντιπροσωπεύει το πλήθος των επιτυχώς αποστελλόμενων bits (δηλαδή χωρίς σφάλματα) από το χρήστη προς το σταθμό βάσης, με άλλα λόγια τον πραγματικό ρυθμό μετάδοσης που επιτυγχάνεται.

- Q_i

Πρόκειται για τη συνάρτηση πραγματικής ρυθμαπόδοσης (actual throughput utility function), η οποία προσδιορίζει την ικανοποίηση του χρήστη ως προς τις λαμβανόμενες υπηρεσίες, ανάλογα με την πραγματική απόδοση από τη μετάδοση των δεδομένων και την εκπλήρωση των ποιοτικών προδιαγραφών σε κάθε χρονοσχισμό.

Η συνάρτηση πραγματικής ρυθμαπόδοσης Q_i για να εξυπηρετήσει κατάλληλα την επίλυση του προβλήματος κατανομής που εξετάζουμε, ανεξάρτητα από το είδος της υπηρεσίας πρέπει να διαθέτει τις παρακάτω ιδιότητες:

1. Η Q_i είναι γνησίως αύξουσα συνάρτηση του πραγματικού ρυθμού μετάδοσης \hat{r}_i .
2. Η Q_i είναι συνεχής και δύο φορές παραγωγίσιμη.
3. $Q_i(0) = 0$ ώστε να εξασφαλιστεί ότι $U_i = 0$ όταν $\hat{r}_i = 0$.
4. Η Q_i είναι άνω φραγμένη.
5. i) Για υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου είναι μία αυστηρώς κοίλη (concave) ή κυρτή (convex) συνάρτηση του πραγματικού ρυθμού μετάδοσης \hat{r}_i .
ii) Για υπηρεσίες πραγματικού χρόνου είναι μία σιγμοειδής (sigmoidal) συνάρτηση του πραγματικού ρυθμού μετάδοσης \hat{r}_i .

Η μαθηματική περιγραφή για την συνάρτηση Q_i ανάλογα με το είδος της υπηρεσίας που παρέχεται στον χρήστη είναι η παρακάτω:

- i. Η $Q_i(\hat{r}_i)$ είναι αυστηρώς κοίλη:

Σε αυτήν την περίπτωση, παραγωγίζοντας δύο φορές την Q_i έχουμε:

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_i}{\partial \hat{r}_i} &> 0 \\ \frac{\partial^2 Q_i}{\partial \hat{r}_i^2} &< 0 \end{aligned} \tag{3.6}$$

Η $Q_i(\hat{r}_i)$ είναι αυστηρώς κυρτή:

Παραγωγίζοντας όπως και πριν καταλήγουμε:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \hat{r}_i} > 0$$

$$\frac{\partial^2 Q_i}{\partial \hat{r}_i^2} > 0 \quad (3.7)$$

ii. Η $Q_i(\hat{r}_i)$ είναι σιγμοειδής συνάρτηση.
Ακολουθούμε την ίδια διαδικασία με πριν και έχουμε:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \hat{r}_i} > 0 \quad (3.8)$$

Ενώ πλέον έχουμε την ακόλουθη διαφοροποίηση:

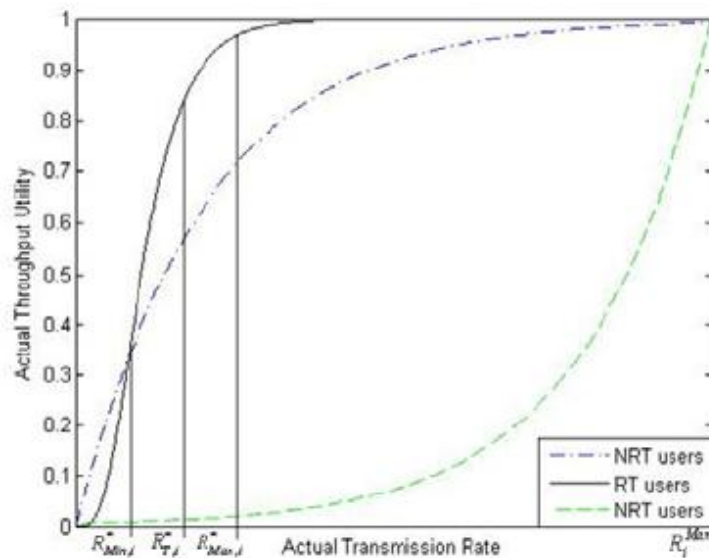
$$\frac{\partial^2 Q_i}{\partial \hat{r}_i^2} \Big|_{\hat{r}_i < \hat{r}_{InfL,i}} > 0$$

ή

$$\frac{\partial^2 Q_i}{\partial \hat{r}_i^2} \Big|_{\hat{r}_i > \hat{r}_{InfL,i}} < 0 \quad (3.9)$$

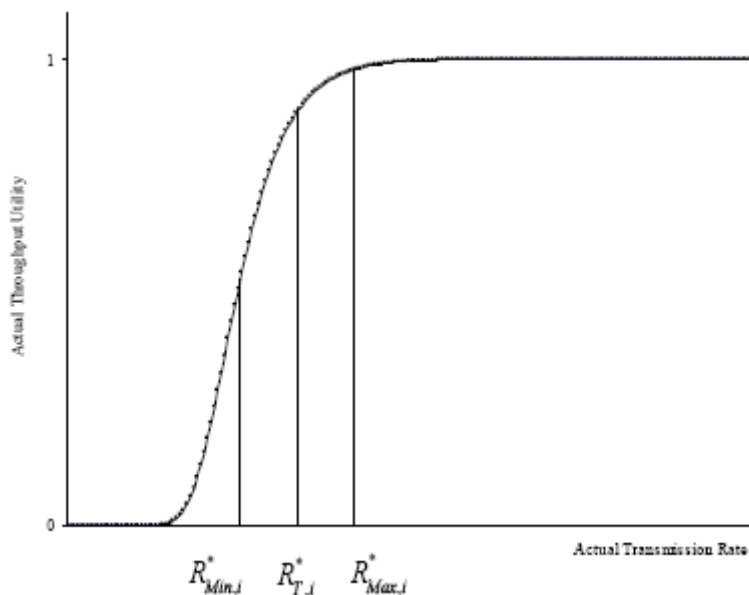
όπου $\hat{r}_{InfL,i}$ είναι το σημείο καμπής (inflection point) της σιγμοειδούς συνάρτησης Q_i .

Συγκεντρωτικά, η συνάρτηση πραγματικής ρυθμαπόδοσης Q_i , ανάλογα με το είδος της υπηρεσίας που εξετάζουμε και λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω διαφοροποιήσεις και ιδιότητες που περιγράψαμε, έχει τις ακόλουθες μορφές:



Σχήμα 6: Μορφές της συνάρτησης πραγματικής ρυθμαπόδοσης Q_i ανάλογα με το είδος της υπηρεσίας που εξυπηρετείται.

Πιο συγκεκριμένα, για χρήστες πραγματικού χρόνου που θα μας απασχολήσουν κατά κόρον στην παρούσα μελέτη, η συνάρτηση πραγματικής ρυθμαπόδοσης Q_i ως προς το ρυθμό μετάδοσης λαμβάνει την ακόλουθη (σιγμοειδή) μορφή:

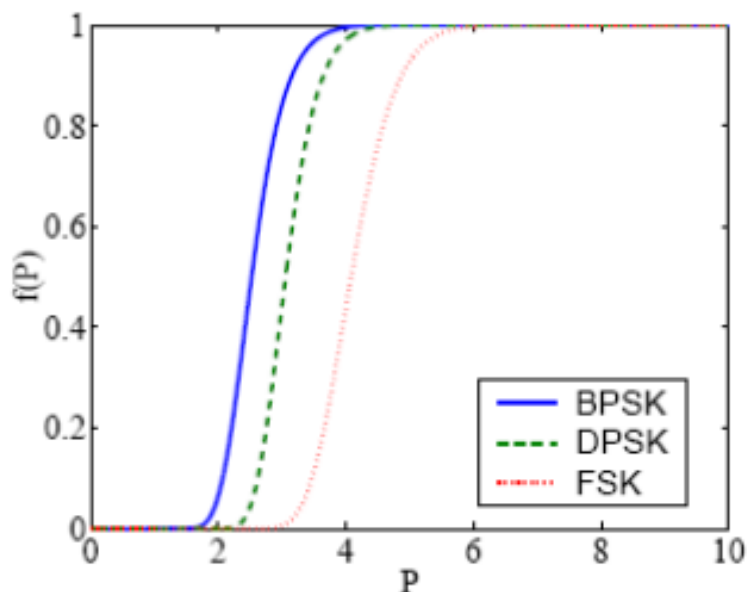


Σχήμα 7: Η συνάρτηση πραγματικής ρυθμαπόδοσης Q_i συναρτῆσει του ρυθμού μετάδοσης $R_{T,i}^*$ για υπηρεσίες πραγματικού χρόνου.

όπου $R_{T,i}^*$ ο απαιτούμενος από το χρήστη ρυθμός μετάδοσης προκειμένου να εξασφαλιστεί η ποιότητα υπηρεσιών που χρειάζεται.

- $f_i(\gamma_i)$

Η συνάρτηση $f_i(\gamma_i)$ είναι γνωστή ως συνάρτηση απόδοσης (efficiency function) και αντιπροσωπεύει την πιθανότητα επιτυχούς μεταφοράς ενός πακέτου δεδομένων από τον χρήστη i προς τον σταθμό βάσης κατά τη διάρκεια μίας χρονοσχισμής. Η συνάρτηση απόδοσης που χρησιμοποιείται, είναι και αυτή με τη σειρά της μία σιγμοειδής συνάρτηση του λόγου της ενέργειας ενός bit προς την πυκνότητα παρεμβολών γ_i σε κάθε χρονοσχισμή. Επιπλέον, η συνάρτηση απόδοσης εξαρτάται και από άλλους παράγοντες όπως η μορφή της εκπομπής (διαμόρφωση και κωδικοποίηση) κλπ. Από τη σχέση του λόγου ενέργειας ενός bit προς την πυκνότητα παρεμβολών, μπορούμε να εκφράσουμε αντίστοιχα τη συνάρτηση f_i ως προς την ισχύ εκπομπής p_i αν αυτό φυσικά κριθεί αναγκαίο. Για τα διάφορα είδη διαμόρφωσης και κωδικοποίησης, η συνάρτηση απόδοσης λαμβάνει μία εκ των παρακάτω μορφών:



Σχήμα 8: Συνάρτηση απόδοσης για διαφορετικά συστήματα διαμόρφωσης.

Η συνάρτηση απόδοσης την οποία εξετάζουμε, πρέπει να ικανοποιεί με τη σειρά της τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

1. Η f_i είναι μία γνησίως αύξουσα συνάρτηση του γ_i .
2. Η f_i είναι μία συνεχής και δύο φορές παραγωγίσιμη σιγμοειδής συνάρτηση ως προς το γ_i .
3. Πρέπει να ισχύει $f_i(0) = 0$ για να εξασφαλιστεί ότι $Q_i = 0$ όταν $P_i = 0$ και $\lim_{P_i \rightarrow 0^+} u_i = 0^+$.
4. $f_i(\infty) = 1$.

Καταλήγοντας, στην έως τώρα βιβλιογραφία η κοινή συνάρτηση ευχαρίστησης που έχει χρησιμοποιηθεί, εκφράζει απλώς τη σχέση μεταξύ των ορθώς αποστελλόμενων bits από τους χρήστες στο σταθμό βάσης και της καταναλισκόμενης ισχύος εκπομπής, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και οι απαιτήσεις του κάθε χρήστη σχετικά με την ποιότητα της εκάστοτε παρεχόμενης υπηρεσίας. Αντίθετα, η συνάρτηση ευχαρίστησης που υιοθετείται στην παρούσα μελέτη, αντανακλά κατάλληλα τις ιδιαιτερότητες και τις προτιμήσεις του κάθε χρήστη ανάλογα με το είδος της υπηρεσίας που σχετίζεται (δηλαδή υπηρεσίες πραγματικού ή μη χρόνου).

Μη Συνεργατικό Παίγνιο Συνδυαστικής Κατανομής Ισχύος και Ρυθμού Μετάδοσης στην Άνω Ζεύξη Ασύρματου CDMA Δικτύου (JUPRA)

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιάσουμε διεξοδικά το μη συνεργατικό παίγνιο που υλοποιεί τη συνδυαστική κατανομή ισχύος και ρυθμού μετάδοσης στην άνω ζεύξη ενός ασύρματου περιβάλλοντος που χρησιμοποιεί την τεχνική πρόσβασης CDMA (Joint Uplink Power and Rate allocation – JUPRA – Non-Cooperative Game). Το εν λόγω παίγνιο σχηματίζεται ως ένα πρόβλημα μεγιστοποίησης της τιμής της συνάρτησης ευχαρίστησης, στο οποίο κάθε χρήστης ανανεώνει τις τιμές που έχει καταναίμει για την ισχύ και το ρυθμό μετάδοσής του με μία εγωιστική προσέγγιση ως προς τους υπόλοιπους χρήστες, στοχεύοντας στην κατά το δυνατό μεγαλύτερη ικανοποίησή του. Έχουμε την ακόλουθη βασική συνθήκη βελτιστοποίησης:

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

Το ανωτέρω παίγνιο κατανομής δηλώνεται ως

$$G = [S, \{P_i, R_i\}, \{U_i(p_i, r_i)\}], \quad (3.10)$$

όπου:

- $S = \{1, 2, \dots, N\}$ είναι το σύνολο των χρηστών που είναι συνδεδεμένοι στην κυψέλη.
- $P_i = [0, p_i^{Max}]$ είναι το σύνολο της στρατηγικής των χρηστών ως προς την ισχύ εκπομπής.
- $R_i = [0, r_i^{Max}]$ είναι το σύνολο της στρατηγικής των χρηστών ως προς το ρυθμό μετάδοσης.
- $U_i(p_i, r_i)$ είναι η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος βελτιστοποίησης όπως ορίζεται στην ενότητα 3.3.

Στο πλαίσιο εργασίας που θα ακολουθηθεί, το μη συνεργατικό παίγνιο (JUPRA) που θα εξετάσουμε αποτελείται από δύο ξεχωριστές μεταβλητές, την ισχύ εκπομπής p_i και το ρυθμό μετάδοσης r_i στην άνω ζεύξη του δικτύου, οι οποίες πρέπει να καταναμεθούν κατάλληλα έτσι ώστε να επιτευχθεί η μεγιστοποίηση της ευχαρίστησης του κάθε χρήστη. Βασικό χαρακτηριστικό του παιγνίου αυτού το οποίο χρήζει της προσοχής μας είναι η συνδυαστική βελτιστοποίηση της ευχαρίστησης κάθε ενός χρήστη του συστήματος, όχι μόνο ως προς την κατανάλωση ενέργειας της μπαταρίας του τερματικού (μέσω της ισχύος εκπομπής) αλλά και σχετικά με το ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων στην άνω ζεύξη. Το JUPRA παίγνιο που εξετάζουμε τελικά θα επιλυθεί και για τις δύο μεταβλητές ταυτόχρονα που έχουν ορισθεί και το τελικό αποτέλεσμα θα είναι ένα βέλτιστο ζεύγος δύο διανυσμάτων, δηλαδή $(\mathbf{p}^*, \mathbf{r}^*)$.

3.5

Εύρεση Σημείου Ισορροπίας κατά Nash για το Μη Συνεργατικό (JUPRA) Παίγνιο

Η επίλυση του μη συνεργατικού παιγνίου που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα υλοποιείται με χρήση της Θεωρίας Παιγνίων του John Nash. Πιο αναλυτικά, στο πρόβλημα βελτιστοποίησης που εξετάζουμε, η μεγιστοποίηση της συνάρτησης ευχαρίστησης των χρηστών συνδυάζεται με την εύρεση του σημείου ισορροπίας κατά Nash (Nash Equilibrium) για την ισχύ και το ρυθμό μετάδοσης. Η σύγκλιση του παιγνίου στο ανωτέρω σημείο, μας εξασφαλίζει μία σταθερή και σαφώς προσδιορισμένη λύση, στην οποία κάθε χρήστης επιδιώκει να αυξήσει όσο το δυνατόν το ποσοστό συμμετοχής του στην κατανομή πόρων του συστήματος, ενώ ταυτόχρονα να ελαχιστοποιήσει την κατανάλωση της ενέργειας από την μπαταρία του κινητού τερματικού.

Ορισμός 3.α:

Ένα ζεύγος διανυσμάτων $(\mathbf{p}^*, \mathbf{r}^*) = (p_1^*, p_2^*, \dots, p_N^*, r_1^*, r_2^*, \dots, r_N^*)$ από τα σύνολα στρατηγικών $p_i^* \in P_i$ και $r_i^* \in R_i$ του χρήστη $i \in S$, είναι το ζητούμενο σημείο ισορροπίας κατά Nash για το JUPRA παίγνιο G , τέτοιο ώστε κανένας χρήστης δεν μπορεί να βελτιώσει μονομερώς την ευχαρίστησή του, εάν για κάθε $i \in S$ ισχύει η ακόλουθη συνθήκη:

$$U_i(p_i^*, r_i^*, \mathbf{p}_{-i}, \mathbf{r}_{-i}) \geq U_i(p_i, r_i, \mathbf{p}_{-i}, \mathbf{r}_{-i}), \text{ για όλα } p_i \in P_i, r_i \in R_i. \quad (3.11)$$

Ωστόσο, εξαιτίας της εγωιστικής συμπεριφοράς των χρηστών του συστήματος, η κατάληξη του μη συνεργατικού μας παιγνίου σε ένα σημείο ισορροπίας κατά Nash δεν είναι εξασφαλισμένη, καθώς ενδέχεται οι χρήστες να μη συμβιβαστούν σε ένα

σταθερό αποτέλεσμα. Για το λόγο αυτό, πρώτα μελετάται η ύπαρξη και η μοναδικότητα του σημείου ισοροπίας κατά Nash για το JUPRA παίγνιο.

Θεώρημα 3.α:

Ένα σημείο ισοροπίας κατά Nash και για τις δύο παραμέτρους που πρέπει να καταναμηθούν, δηλαδή για την ισχύ εκπομπής και το ρυθμό μετάδοσης, υπάρχει και είναι μοναδικό για το JUPRA παίγνιο $G = [S, \{P_i, R_i\}, \{U_i(p_i, r_i)\}]$.

$$(\mathbf{p}^*, \mathbf{r}^*) = (p_1^*, p_2^*, \dots, p_N^*, r_1^*, r_2^*, \dots, r_N^*), p_i \in P_i, r_i \in R_i \forall i \in S \quad (3.12)$$

Απόδειξη 3.α:

Προκειμένου να μελετήσουμε την ύπαρξη του σημείου ισοροπίας κατά Nash για το παίγνιο, οι ακόλουθες συνθήκες θεωρούνται αληθείς:

1. P_i και R_i είναι μη κενά, κυρτά και συμπαγή υποσύνολα κάποιου Ευκλείδειου χώρου P^N και R^N αντίστοιχα.
2. Η συνάρτηση ευχαρίστησης $U_i(\mathbf{p}, \mathbf{r})$ είναι συνεχής και $C^{(n)}$ φορές παραγωγίσιμη τόσο ως προς την ισχύ εκπομπής στην άνω ζεύξη $\mathbf{p} \in P = [P_1 \times P_2 \times \dots \times P_N]$ όσο και ως προς το ρυθμό μετάδοσης $\mathbf{r} \in R = [R_1 \times R_2 \times \dots \times R_N]$.

Επομένως, δεδομένων των ανωτέρω ιδιοτήτων και βασιζόμενοι στο Θεώρημα Μέγιστης και Ελάχιστης Τιμής (Weierstrass Extreme Value Theorem – E.V.T.) [16], καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως η συνάρτηση ευχαρίστησης όπως αυτή ορίστηκε στην ενότητα 3.3, έχει ένα ολικό μέγιστο, το σημείο:

$$(\mathbf{p}^*, \mathbf{r}^*) = (p_1^*, p_2^*, \dots, p_N^*, r_1^*, r_2^*, \dots, r_N^*) \quad (3.13)$$

το οποίο είναι και το μοναδικό σημείο ισοροπίας κατά Nash για το μη συνεργατικό παίγνιο της συνδυαστικής κατανομής ισχύος και ρυθμού μετάδοσης στην άνω ζεύξη ασύρματων CDMA δικτύων (Nash Equilibrium of the JUPRA game).

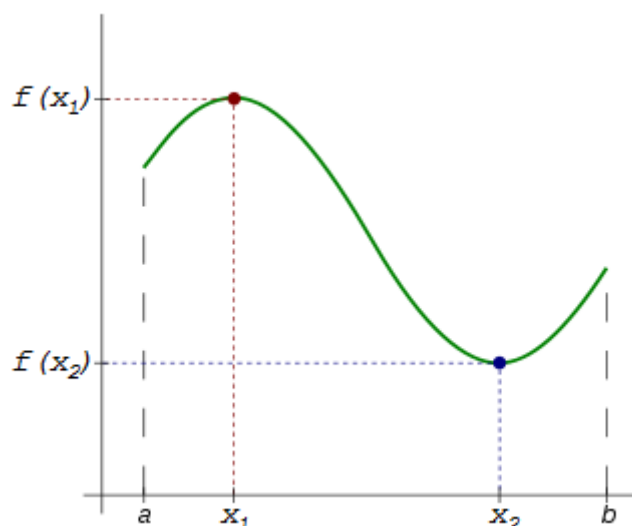
Επεξήγηση 3.γ:

Θεώρημα Μέγιστης και Ελάχιστης Τιμής

Έστω f μία συνεχής συνάρτηση σε ένα διάστημα $[a, \beta]$. Σε αυτήν την περίπτωση η f παίρνει στο εν λόγω διάστημα $[a, \beta]$ μία μέγιστη τιμή M και μία ελάχιστη τιμή m . Με άλλα λόγια, υπάρχουν $x_1, x_2 \in [a, \beta]$, τέτοια ώστε, αν $m = f(x_2)$ και $M = f(x_1)$ να ισχύει:

$$m \leq f(x) \leq M, \forall x \in [a, \beta]$$

Το ανωτέρω θεώρημα εύκολα συνοψίζεται και στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 9: Συνεχής συνάρτηση $f(x)$ στο διάστημα $[a, b]$, που λαμβάνει μία μέγιστη και μία ελάχιστη τιμή εντός του διαστήματος αυτού.

Επομένως, μελετώντας πιο διεξοδικά τα παραπάνω, η συνάρτηση ευχαρίστησης U_i όντας συνεχής στα διαστήματα $[0, P_i^{Max}]$ και $[0, R_i^{Max}]$, από το Θεώρημα Μέγιστης και Ελάχιστης Τιμής εμφανίζει τόσο ένα μέγιστο όσο και ένα ελάχιστο ακρότατο στα διαστήματα αυτά. Ωστόσο, στα εν λόγω κλειστά διαστήματα που αναφέραμε, η συνάρτηση ευχαρίστησης ενδεχομένως να μην εμφανίζει μόνο ένα, αλλά ένα σύνολο από τοπικά μέγιστα, από το οποία επιθυμούμε και για τις δύο μεταβλητές να εντοπίσουμε το ολικό μέγιστο που αποτελεί και το σημείο ισορροπίας κατά Nash για το πρόβλημα βελτιστοποίησης που εξετάζουμε, δηλαδή το σημείο $(\mathbf{p}^*, \mathbf{r}^*)$.

Στο Θεώρημα 3.α δηλώνεται και ακόλουθα αποδεικνύεται η ύπαρξη και η μοναδικότητα του σημείου ισορροπίας κατά Nash για το (JUPRA) παίγνιο που έχει διαμορφωθεί. Παρ' όλα αυτά, οι ακριβείς τιμές του βέλτιστου ζεύγους των μεταβλητών της ισχύος και του ρυθμού μετάδοσης $(\mathbf{p}^*, \mathbf{r}^*)$ δεν μπορούν να προσδιορισθούν. Για το λόγο αυτό, το ακόλουθο θεώρημα επιχειρεί να εντοπίσει τις ακριβείς αυτές τιμές για το ζεύγος $(\mathbf{p}^*, \mathbf{r}^*)$ (δηλαδή το σημείο ισορροπίας κατά Nash).

Θεώρημα 3.β:

Το σημείο ισορροπίας κατά Nash για το “JUPRA” μη συνεργατικό παίγνιο G που χρησιμοποιείται για την επίλυση του προβλήματος κατανομής, είναι το $(\mathbf{p}_i^*, \mathbf{r}_i^*)$, $p_i \in P_i$ και $r_i \in R_i$:

$$(\mathbf{p}_i^*, \mathbf{r}_i^*) = \min_{p_i \in P_i} \left\{ \arg \max_{\substack{p_i \in P_i \\ r_i \in R_i}} U_i(p_i, r_i), p_i^{Max} \right\} \quad (3.14)$$

$$s. t. \left. \frac{\partial U_i(p_i, r_i)}{\partial p_i} \right|_{p_i=p_i^*} = 0 \quad \text{και} \quad \left. \frac{\partial U_i(p_i, r_i)}{\partial r_i} \right|_{r_i=r_i^*} = 0 \quad (3.15)$$

$$\text{και } (p_i, r_i)^T H(p_i, r_i) < 0, \forall p_i \in P_i, \forall r_i \in R_i \quad (3.16)$$

όπου:

$$H(p_i, r_i) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 U_i(p_i, r_i)}{\partial p_i^2} & \frac{\partial^2 U_i(p_i, r_i)}{\partial p_i \partial r_i} \\ \frac{\partial^2 U_i(p_i, r_i)}{\partial p_i \partial r_i} & \frac{\partial^2 U_i(p_i, r_i)}{\partial r_i^2} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

είναι ο Εσσιανός Πίνακας (Hessian Matrix) στο σημείο (p_i, r_i) .

Πιο συγκεκριμένα, οι συνθήκες για τις πρώτες μερικές παραγώγους όπως φαίνονται από τη σχέση 3.15, προσδιορίζουν τα στάσιμα σημεία της συνάρτησης ευχαρίστησης του κάθε χρήστη $U_i(p_i, r_i)$, τα οποία ενδέχεται να είναι ένα μέγιστο, ένα ελάχιστο ή ένα σημείο σέλας. Επιδιώκοντας τον προσδιορισμό του ολικού μεγίστου για τη συνάρτηση ευχαρίστησης των χρηστών, η συνθήκη 3.16 είναι αναγκαία και επαρκής ώστε ο Εσσιανός Πίνακας να είναι αρνητικά ορισμένος. Η εγκυρότητα της τελευταίας αυτής συνθήκης είναι εξασφαλισμένη για το μοναδικό ζεύγος (p_i, r_i) , $p_i \in P_i$ και $r_i \in R_i$, λόγω της συνέχειας και της $C^{(n)}$ παραγωγισιμότητας της συνάρτησης ευχαρίστησης U_i . Τέλος, η επιλογή για την ελάχιστη ισχύ εκπομπής στην άνω ζεύξη 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} είναι απαραίτητη, ώστε να υπάρχει εναρμονισμός με τους φυσικούς περιορισμούς για την ισχύ εκπομπής του χρήστη, $p_i \leq p_i^{Max}$.

3.6

Σύγκλιση του Μη Συνεργατικού Παιγνίου

Στην ενότητα αυτή θα ασχοληθούμε με τη διαδικασία σύγκλισης του μη συνεργατικού παιγνίου που επεξεργαζόμαστε στο σημείο ισορροπίας κατά Nash. Βάσει του θεωρήματος 3.β, για κάθε χρήστη του συστήματος $i \in S$, η «βέλτιστη απόκρισή του» (best response) BR_i δηλώνεται ως εξής:

Επεξήγηση 3.δ:

Best Response Policy

Με τον όρο *best response policy* εννοούμε τη σχέση αντιστοίχισης για ένα τερματικό $i \in S$ της τιμής της ισχύος και του ρυθμού μετάδοσης, δεδομένων των τιμών των υπολοίπων χρηστών ως εξής:

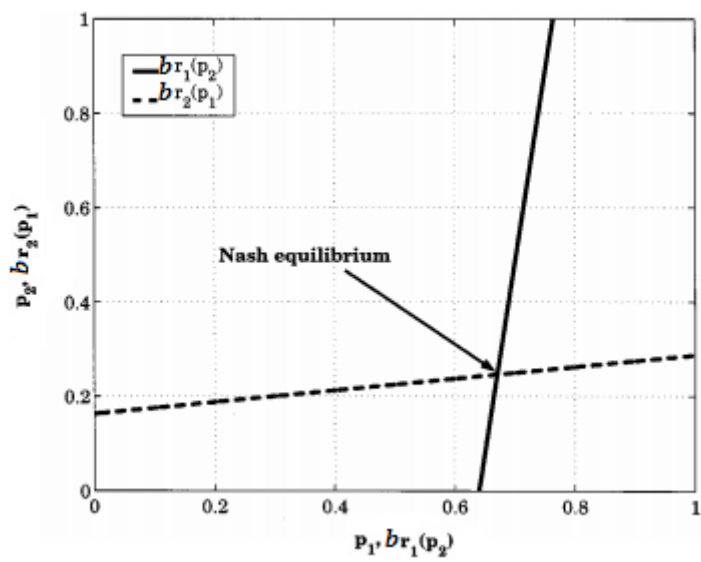
$$\begin{aligned} BR_i: P_{-i} &\rightarrow P_i \\ BR_i: R_{-i} &\rightarrow R_i \end{aligned} \tag{3.18}$$

Έχουμε λοιπόν την ακόλουθη ερμηνεία για την συνάρτηση BR_i :

$$\begin{aligned} BR_i(p_{-i}, r_{-i}) = \{p_i \in P_i \text{ και } r_i \in R_i: u_i(p_i, p_{-i}, r_i, r_{-i}) \\ \geq u_i(p'_i, p_{-i}, r'_i, r_{-i}) \text{ για όλα τα } p'_i \in P_i \text{ και } r'_i \in R_i\} \end{aligned} \tag{3.19}$$

Με αυτόν τον τρόπο, το σημείο ισορροπίας κατά Nash μπορεί να διατυπωθεί εκ νέου, δηλαδή το ζεύγος διανυσμάτων $(\mathbf{p}, \mathbf{r}) = (p_1, \dots, p_N, r_1, \dots, r_N)$ είναι σημείο ισορροπίας κατά Nash για το παίγνιο $G = [S, \{P_i, R_i\}, \{U_i(p_i, r_i)\}]$ αν και μόνο αν $p_i, r_i \in BR_i(p_{-i}, r_{-i})$ για όλα τα $i \in S$. [2]

Η ανωτέρω λογική μπορεί εύκολα να συνοψισθεί στο ακόλουθο σχήμα (μόνο για κατανομή ισχύος όμως) για ένα σύστημα δύο παικτών, οι οποίοι καθορίζουν την ισχύ εκπομπής τους ο καθένας ανάλογα με την ισχύ εκπομπής του άλλου. Δηλαδή:



Σχήμα 10: Αντιστοιχία βέλτιστων αποκρίσεων ως προς την ισχύ εκπομπής για ένα παίγνιο με δύο παίκτες. Το σημείο τομής είναι το σημείο ισορροπίας κατά Nash.

Πλέον, πιο συγκεκριμένα, για το πρόβλημα που εξετάζουμε στην παρούσα διπλωματική έχουμε τα παρακάτω:

$$\mathbf{BR}_i(\mathbf{p}_i^*, \mathbf{r}_i^*) = \min_{p_i \in P_i} \left\{ \arg \max_{\substack{p_i \in P_i \\ r_i \in R_i}} U_i(p_i, r_i), p_i^{Max} \right\} \quad (3.20)$$

$$s. t. \left. \frac{\partial U_i(p_i, r_i)}{\partial p_i} \right|_{p_i=p_i^*} = 0 \quad \text{και} \quad \left. \frac{\partial U_i(p_i, r_i)}{\partial r_i} \right|_{r_i=r_i^*} = 0 \quad (3.21)$$

$$\text{και } (\mathbf{p}_i, \mathbf{r}_i)^T H(\mathbf{p}_i, \mathbf{r}_i) < 0, \forall p_i \in P_i, \forall r_i \in R_i \quad (3.22)$$

Θεώρημα 3.γ:

Το μη συνεργατικό παίγνιο συνδυαστικής κατανομής ισχύος και ρυθμού μετάδοσης στην άνω ζεύξη ασύρματων CDMA δικτύων (JUPRA game) συγκλίνει στο μοναδικό σημείο ισορροπίας κατά Nash που του αντιστοιχεί, ξεκινώντας από ένα οποιοδήποτε αρχικό σημείο.

Απόδειξη 3.γ:

Εξ ορισμού, το σημείο ισορροπίας κατά Nash για το μη συνεργατικό παίγνιο που μελετούμε, πρέπει να ικανοποιεί την σχέση $(\mathbf{p}^*, \mathbf{r}^*) = \mathbf{BR}(\mathbf{p}, \mathbf{r})$. Θεμελιώδης αρχή η χρήση της οποίας εξυπηρετεί την αποδεικτική διαδικασία της σύγκλισης του παιγνίου στο μοναδικό σημείο ισορροπίας κατά Nash, είναι να δειχθεί ότι η συνάρτηση ευχαρίστησης των χρηστών U_i είναι “standard”.

Επεξήγηση 3.ε:

Μία συνάρτηση f χαρακτηρίζεται ως *standard* αν ικανοποιεί τις ακόλουθες ιδιότητες:

1. Να είναι θετική (positivity): $f(x) > 0$
2. Να είναι μονότονη (monotonicity), δηλαδή εάν $x \geq x'$, τότε $f(x) \geq f(x')$
3. Scalability, δηλαδή για όλα $a > 1$, $af(x) \geq f(ax)$ για όλα τα $x \geq 0$ όπου x είναι το κατά Nash σημείο ισορροπίας και $f(x)$ είναι η συνάρτηση βέλτιστης απόκρισης (best response function).

Οι ιδιότητες αυτές μπορούν εύκολα να εξακριβωθούν και για τη στρατηγική *best response* $\mathbf{BR}(\mathbf{p}, \mathbf{r})$ στο τρέχον παίγνιο G . Τηρώντας τις αναλογίες με προηγουμένως, έχουμε τα παρακάτω:

1. Εάν $(\mathbf{p}, \mathbf{r}) > 0$ τότε $\mathbf{BR}(\mathbf{p}, \mathbf{r}) > 0$.
2. Εάν $(\mathbf{p}, \mathbf{r}) > (\mathbf{p}^*, \mathbf{r}^*)$ μέσα από τις σχέσεις 3.20 έως 3.22 καταλήγουμε ότι $\mathbf{BR}(\mathbf{p}, \mathbf{r}) > \mathbf{BR}(\mathbf{p}^*, \mathbf{r}^*)$.

3. Για όλα τα $\alpha > 1$, από την στιγμή που η $BR(\mathbf{p}, \mathbf{r})$ είναι μία αυστηρώς αύξουσα συνάρτηση ως προς το ζεύγος μεταβλητών (\mathbf{p}, \mathbf{r}) , καταλήγουμε ότι τελικώς ισχύει $\alpha BR(\mathbf{p}, \mathbf{r}) > BR(\alpha \mathbf{p}^*, \alpha \mathbf{r}^*)$.

Από όλα τα ανωτέρω, εξασφαλίζεται η σύγκλιση του “JUPRA” παιγνίου στο μοναδικό σημείο ισορροπίας κατά Nash, ανεξάρτητα από ποιο αρχικό σημείο θα ξεκινήσει.

3.7

Αλγόριθμος Συνδυαστικής Κατανομής Ισχύος και Ρυθμού Μετάδοσης στην Άνω Ζεύξη

Στην ενότητα αυτή, λαμβάνοντας υπόψη όλα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, θα παρουσιαστεί ένας επαναληπτικός, κατανεμημένος και χαμηλής πολυπλοκότητας αλγόριθμος για την συνδυαστική κατανομή της ισχύος εκπομπής και του ρυθμού μετάδοσης στην ζεύξη ανόδου (JUPRA algorithm). Η εκτέλεση του συγκεκριμένου αλγορίθμου οδηγεί το μη συνεργατικό παίγνιο που έχει έως τώρα αναλυθεί στο μοναδικό σημείο ισορροπίας κατά Nash. Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της προσέγγισης αυτής είναι ότι οι χρήστες ανανεώνουν την τιμή για την ισχύ εκπομπής τους και το ρυθμό μετάδοσής τους στην άνω ζεύξη εντός του ίδιου βήματος επανάληψης κατά την υλοποίηση του αλγορίθμου σε μία χρονοσχισμή t . Αποτέλεσμα είναι η μοναδική βέλτιστη λύση να προκύπτει ταυτόχρονα και για τις δύο παραμέτρους που μας ενδιαφέρουν.

Ακόλουθα υποβάλλεται ο εν λόγω αλγόριθμος:

JUPRA Algorithm

Βήμα 1: Τη στιγμή έναρξης κάθε χρονοσχισμής t , κάθε χρήστης $i \in \mathcal{S}$, επιλέγει μία τυχαία επιτρεπτή τιμή για την ισχύ εκπομπής $p_i^{(0)}$ (i.e. $0 < p_i^{(0)} < p_i^{Max}$) και για το ρυθμό μετάδοσης $r_i^{(0)}$ (i.e. $0 < r_i^{(0)} < r_i^{Max}$). Όρισε $k = 0$, όπου k είναι ο αριθμός των επαναλήψεων του αλγορίθμου.

Βήμα 2: Ο τερματικός σταθμός ανακοινώνει τη συνολική παρεμβολή $I^{(k)}(\mathbf{p}^{(k)})$ από τους χρήστες του συστήματος, δοσμένης της ισχύος εκπομπής για

κάθε χρήστη. Ακόλουθα, ο εκάστοτε χρήστης υπολογίζει την παρεμβολή που δέχεται ατομικά από τους γείτονές του $I_{-i}^{(k)}(p_{-i}^{(k)})$ και επαναπροσδιορίζει την ισχύ εκπομπής του $p_i^{(k+1)}$ και το ρυθμό μετάδοσής του $r_i^{(k+1)}$ για την άνω ζεύξη σύμφωνα με τις σχέσεις στην ενότητα 3.5.

Βήμα 3: Εάν οι ισχείς εκπομπής και οι ρυθμοί μετάδοσης για τον κάθε χρήστη μεταξύ των διαδοχικών επαναλήψεων συγκλίνουν σε μία τιμή δηλαδή $(|p_i^{(k+1)} - p_i^{(k)}| \leq \varepsilon \text{ και } |r_i^{(k+1)} - r_i^{(k)}| \leq \varepsilon, \varepsilon = 10^{-5})$ τότε σταμάτα.

Βήμα 4: Σε διαφορετική περίπτωση, όρισε $k = k + 1$ και επέστρεψε στο Βήμα 2.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΡΥΘΜΟΥ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΣΕ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΚΥΨΕΛΩΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΚΟΣΤΟΛΟΓΗΣΗΣ

- 4.1. Εισαγωγικά**
- 4.2. Αναποτελεσματικότητα του Σημείου
Ισορροπίας κατά Nash**
- 4.3. Χαρακτηριστικές Παράμετροι Δικτύου**
- 4.4. Συνάρτηση Καθαρής Ευχαρίστησης**
- 4.5. Μη Συνεργατικό Παίγνιο Συνδυαστικής
Κατανομής Ισχύος και Ρυθμού Μετάδοσης στην
Άνω Ζεύξη Ασύρματου CDMA Δικτύου με Χρήση
Κοστολόγησης**
- 4.6. Εύρεση Σημείου Ισορροπίας κατά Nash για το
Μη Συνεργατικό Παίγνιο με Κοστολόγηση**
- 4.7. Εισαγωγή Γραμμικής Κοστολόγησης**
- 4.8. Ανάγκη Εισαγωγής Μη Γραμμικών Μορφών
Κοστολόγησης**
- 4.9. Εισαγωγή Κυρτής Κοστολόγησης**
- 4.10. Σύγκλιση του Μη Συνεργατικού Παιγνίου**
- 4.11. Αλγόριθμος Συνδυαστικής Κατανομής Ισχύος
και Ρυθμού Μετάδοσης στην Άνω Ζεύξη με Χρήση
Κοστολόγησης**
- 4.12. Συμπεράσματα από την Εισαγωγή Σχημάτων
Κοστολόγησης**

Εισαγωγικά

Στο 4^ο κεφάλαιο το πρόβλημά μας συμπληρώνεται κατάλληλα ώστε να εισαχθούν πολιτικές κοστολόγησης ως προς την ισχύ εκπομπής των χρηστών. Το μη συνεργατικό παίγνιο όπως παρουσιάστηκε παραπάνω, οδηγεί σε ένα σημείο ισορροπίας κατά Nash, το οποίο αποτελεί τη βέλτιστη κατάσταση για όλους τους χρήστες ως προς τις ζητούμενες παραμέτρους, καθώς κανένας τους αυτόνομα δεν μπορεί να πετύχει περαιτέρω βελτίωση της ευχαρίστησής του. Ωστόσο, το σημείο αυτό δεν προέκυψε ως αποτέλεσμα αρμονικής συνεργασίας των χρηστών, αλλά ως συνέπεια της εγωιστικής τους προσέγγισης με στόχο την μεγιστοποίηση της ικανοποίησης από την παροχή της εκάστοτε υπηρεσίας εντός του ασύρματου δικτύου.

Για τους ανωτέρω λόγους, στο κεφάλαιο αυτό διατυπώνεται η αναποτελεσματικότητα του σημείου ισορροπίας κατά Nash (Inefficiency of Nash Equilibrium), εξαιτίας της έλλειψης συντονισμού των χρηστών και της μη ύπαρξης στοιχείων κοινωνικής δικαιοσύνης ανάμεσα στους «παίκτες» οι οποίοι επιδιώκουν ο καθένας ξεχωριστά την επίτευξη της ιδανικής κατανομής της ισχύος εκπομπής και του ρυθμού μετάδοσης τους. Για να παρακαμφθεί κατάλληλα το εμπόδιο αυτό, στη βιβλιογραφία έως τώρα έχουν προταθεί διάφορες τεχνικές τιμολόγησης της ισχύος των χρηστών. Μέσω μίας επιβολής ποινής στη χωρίς μέτρο κατανάλωση των πόρων του δικτύου οι χρήστες υποχρεώνονται σε μία περισσότερο συνεργατική συμπεριφορά η οποία ευνοεί το σύστημα στο σύνολό του αλλά και εν τέλει τους ίδιους τους χρήστες ατομικά.

Και σε αυτήν την προσέγγιση επίλυσης, η ικανοποίηση κάθε χρήστη από την ποιότητα της λαμβανόμενης υπηρεσίας αντιπροσωπεύεται από μία συνάρτηση ευχαρίστησης, η οποία όμως στην προκειμένη περίπτωση έχει συμπληρωθεί κατάλληλα ώστε να περικλείει μία συνάρτηση κόστους για την ισχύ εκπομπής. Η νέα αυτή συνάρτηση ορίζεται ως συνάρτηση καθαρής ευχαρίστησης και προκύπτει ως η αλγεβρική διαφορά ανάμεσα στη γνωστή έως τώρα συνάρτηση ευχαρίστησης και της συνάρτησης κόστους που θα παρουσιαστεί στην πορεία του κεφαλαίου. Η συνάρτηση καθαρής ευχαρίστησης εκφράζει με τον καλύτερο δυνατό τρόπο την πραγματική ευχαρίστηση που αισθάνεται ο κάθε χρήστης από την ποιότητα των υπηρεσιών που του παρέχονται με την αντίστοιχη αξιοποίηση των πόρων του συστήματος εντός πάντοτε όχι μόνο των φυσικών περιορισμών αλλά και των στοιχείων δικαιοσύνης που εισάγονται λόγω της κοστολόγησης για το πρόβλημα της συνδυαστικής κατανομής ισχύος και του ρυθμού μετάδοσης στην άνω ζεύξη των ασυρμάτων CDMA δικτύων (Joint Uplink Power and Rate Allocation with Pricing Schemes).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, σε αντίθεση με την πλειοψηφία των υπαρχόντων ερευνών της βιβλιογραφίας, δε θα περιοριστούμε μόνο σε σχήματα γραμμικής κοστολόγησης της ισχύος, αλλά θα εισαχθεί και μη γραμμική κοστολόγηση και συγκεκριμένα κυρτή κοστολόγηση της ισχύος εκπομπής. Αιτία της

διαφοροποίησης αυτής αποτελεί το γεγονός ότι η γραμμική κοστολόγηση δεν μπορεί να ανταποκριθεί ρεαλιστικά στην απορρόφηση πόρων του δικτύου, καθώς η ποινή που επιβάλλεται στους χρήστες με μικρή ή ακόμα και ελάχιστη ζήτηση πόρων είναι ανάλογη με την υπέρμετρη κατασπατάληση πόρων που εντοπίζεται σε άλλους χρήστες.

Με βάση λοιπόν όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά που παρουσιάσαμε, στο 4^ο κεφάλαιο και για τα δύο σχήματα κοστολόγησης που θα χρησιμοποιηθούν, θα διατυπωθεί το μη συνεργατικό παίγνιο βέλτιστης συνδυαστικής κατανομής της ισχύος εκπομπής και του ρυθμού μετάδοσης στην άνω ζεύξη των δικτύων (Joint Uplink Power and Rate Allocation non Cooperative game with (Linear or Convex) Pricing – JUPRA – (L or C) P game). Για το κάθε παίγνιο θα ευρεθεί το σημείο ισορροπίας κατά Nash και για τις δύο παραμέτρους, ενώ ταυτόχρονα θα εξηγηθεί η βελτιστοποίηση κατά Pareto που αναδεικνύεται από την επίλυση του νέου παιγνίου σε σχέση με το παίγνιο χωρίς κοστολόγηση. Στη συνέχεια, αποδεικνύεται η μοναδικότητα του εν λόγω σημείου και η σύγκλιση του παιγνίου σε αυτό. Εν κατακλείδι, όπως και στο προηγούμενο κεφάλαιο, έτσι και τώρα θα παρουσιάσουμε τον επαναληπτικό και μη κατανεμημένο αλγόριθμο χαμηλής πολυπλοκότητας (JUPRA –L or C– P Algorithm) ο οποίος υλοποιεί τη σύγκλιση του παιγνίου στο σημείο ισορροπίας κατά Nash, ενώ στο τέλος θα εξαχθούν τα ανάλογα συμπεράσματα από τις διαφορετικές υλοποιήσεις.

4.2

Αναποτελεσματικότητα του Σημείου Ισορροπίας κατά Nash

Στην ενότητα 3.5 του προηγούμενου κεφαλαίου, παρουσιάστηκε και αναλύθηκε εκτενώς η πορεία εύρεσης του σημείου ισορροπίας κατά Nash για τη συνδυαστική κατανομή ισχύος και ρυθμού μετάδοσης στην άνω ζεύξη ενός ασύρματου δικτύου. Στο σημείο ισορροπίας που αναφερόμαστε, όπως δηλώνεται και στον ορισμό που έχουμε ήδη δώσει, κανένας από τους χρήστες εντός του δικτύου δεν μπορεί να αυξήσει περισσότερο την ευχαρίστησή του ενεργώντας ατομικά, δεδομένων πάντοτε των στρατηγικών κατανομής των παραμέτρων που ακολουθούνται από τους υπόλοιπους χρήστες. Για το λόγο αυτό, το εξαγόμενο αποτέλεσμα του μη συνεργατικού παιγνίου, δηλαδή το σημείο ισορροπίας στο οποίο συγκλίνει μέσω μίας σειράς αποφάσεων του κάθε χρήστη συνδυαστικά για την εκπεμπόμενη ισχύ και το ρυθμό μετάδοσης, εγωκεντρικά και αδιαφορώντας για τους «γείτονές» του στο σύστημα, με βασική επιδίωξη την μεγιστοποίηση της συνάρτησης ευχαρίστησης του, κρίνεται ανεπαρκές κατά την Pareto έννοια σε σχέση με ένα σημείο ισορροπίας το οποίο θα προέκυπτε ως έκβαση μιας συνεργατικής προσπάθειας των χρηστών ή μέσω

ενός κεντρικοποιημένου παιγνίου. Σε μία τέτοια περίπτωση θα ήταν εφικτή η βελτίωση της ικανοποίησης ορισμένων χρηστών χωρίς να ζημιωθούν οι υπόλοιποι.

Στη βιβλιογραφία έως τώρα, έχει επισημανθεί ότι σε γενικές γραμμές τα σημεία ισορροπίας κατά Nash που προκύπτουν από μη συνεργατικά παίγνια χαρακτηρίζονται από αναποτελεσματικότητα [2], [24]. Στο παίγνιο χωρίς κοστολόγηση που εξετάσαμε, ο κάθε χρήστης έχει ως βασικό του στόχο τη βελτίωση της ευχαρίστησής του, χωρίς να λαμβάνει υπόψη του την επιβάρυνση που προκαλεί στους υπόλοιπους χρήστες του δικτύου μέσω των παρεμβολών που επιφέρει η εκπομπή των μεταδιδόμενων του σημάτων, ή από την πιθανή κατασπατάληση των περιορισμένων πόρων του συστήματος σε βάρος των υπολοίπων. Συνέπεια αυτής της εγωιστικής συμπεριφοράς όλων των χρηστών του συστήματος είναι η υποβάθμιση της ποιότητας των υπηρεσιών, κατασπατάληση αλλά και αναποτελεσματική κατανομή των πόρων του συστήματος, ενώ υπεισέρχονται και άλλοι παράγοντες όπως η αύξηση του θορύβου στο δίκτυο και η εντονότερη καταπόνηση της μπαταρίας των κινητών τερματικών και του σταθμού βάσης. Για την καταπολέμηση της αναποτελεσματικότητας του σημείου ισορροπίας κατά Nash, όπως και πρακτικά εκφράζεται από το σύνολο των δυσκολιών που τη συνοδεύουν που μόλις περιγράφηκαν, βασικό μέτρο που έχει αναδειχθεί με κριτήριο και πάλι την μεγιστοποίηση της συνάρτησης ευχαρίστησης και την εύρεση μίας Pareto βέλτιστης λύσης, είναι η εισαγωγή πολιτικών κοστολόγησης.

Η εισαγωγή της κοστολόγησης ως προς κάποια παράμετρο (εν προκειμένω την ισχύ εκπομπής) λειτουργεί ευεργετικά στο σύστημα στο σύνολο του, καθώς η ορθότερη κατανομή των πόρων του δικτύου συνοδεύεται με σημαντική εξοικονόμησή τους και ταυτόχρονα οι χρήστες αποκτούν κίνητρα να εγκαταλείψουν την προηγούμενη αυτόνομη προσέγγιση στη λήψη των αποφάσεων τους και συνεργατικά πλέον να επιχειρήσουν τη βελτίωση της απόδοσής τους. Σε αυτό το σημείο, είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η κοστολόγηση όπως τη χρησιμοποιούμε στη διπλωματική αυτή εργασία, παρά το γεγονός ότι εισάγεται ως έννοια από τις Οικονομικές Επιστήμες, δεν αντιπροσωπεύει κάποιας χρηματικής ή υλικής φύσης κόστος, αλλά αποτελεί μία θεωρητική ποινή η οποία επιβάλλεται στους χρήστες και τους παρακινεί να υιοθετήσουν μία περισσότερο κοινωνικά αποδεκτή συμπεριφορά στη διαδικασία απόδοσης τιμών στις παραμέτρους τους λαμβάνοντας υπόψη τότε ζημιώνουν άνω του αποδεκτού ορίου τόσο το σύστημα όσο και τους υπόλοιπους χρήστες. Φυσικά, αυτό δε σημαίνει ότι σε μία πρακτική εφαρμογή τέτοιων πολιτικών το κέρδος από την ποινή στους χρήστες θα ήταν μόνο σε θεωρητικό επίπεδο, αλλά θα μπορούσε να έχει και έμπρακτο όφελος και για τους διαχειριστές του συστήματος. Η επιλογή ενός ιδανικού σχήματος κοστολόγησης για το εκάστοτε σύστημα είναι δυνατό να οδηγήσει σε εντυπωσιακή βελτίωση της συνολικής απόδοσης του συστήματος και στο «κοινωνικό καλό» (“System’s overall social welfare”), καθώς οι χρήστες δεν ανταγωνίζονται μεταξύ τους στην κατανομή των πόρων, αλλά όλοι μαζί ευνοούνται από τη σωστή ανάθεση τιμών των απαιτούμενων μεγεθών (στην περίπτωσή μας το ζεύγος των διανυσμάτων της ισχύος και του ρυθμού μετάδοσης).

Ανατρέχοντας στη βιβλιογραφία, παρατηρούμε ότι η θεωρητική υπόσταση του προβλήματος έχει επιτρέψει την υιοθέτηση πολλών διαφορετικών ειδών

κοστολόγησης. Χαρακτηριστικά παραδείγματα μορφών κοστολόγησης αποτελούν η επιβολή ποινών ή η παροχή προτεραιοτήτων στους χρήστες ενός συστήματος γενικά, ανάλογα με την πρόσβαση στο δίκτυο, τη χρήση του ασύρματου περιβάλλοντος, την τοποθέτηση των χρηστών στο σύστημα κτλ. Ο σχεδιαστής του συστήματος ή ο πάροχος των υπηρεσιών εντός του δικτύου, είναι εκείνος στον οποίο αφήνεται η απόφαση για το είδος και τα ιδιαίτερα στοιχεία της πολιτικής κοστολόγησης που θα επιβληθούν στους χρήστες. Μία καθολικά αποδεκτή επιλογή κοστολόγησης σε ένα σύστημα, θα έπρεπε να προσαρμόζεται κατάλληλα στο είδος των υπηρεσιών – εφαρμογών που είναι διαθέσιμες, τις απαιτήσεις και τις ανάγκες των χρηστών αλλά και τον τρόπο κατανομής των πόρων.

Η πλέον δημοφιλής μορφή κοστολόγησης στη βιβλιογραφία είναι αυτή με βάση τη χρήση των πόρων του συστήματος. Σύμφωνα με αυτήν την προσέγγιση, κάθε χρήστης ανάλογα με το βαθμό που απορροφά πόρους από το δίκτυο του επιβάλλεται ένα αντίστοιχο κόστος. Στο πρόβλημα που εξετάζουμε, η παράμετρος για την οποία σχεδόν αποκλειστικά εισάγεται η κοστολόγηση είναι η ισχύς εκπομπής του κάθε χρήστη. Η επιλογή της ποινής ως προς το μέγεθος αυτό μόνο τυχαία δεν μπορεί να χαρακτηριστεί, αφού η ισχύς εκπομπής είναι ο πρωταρχικός παράγοντας λειτουργίας ενός δικτύου, καθώς απαιτείται μία ελάχιστη τιμή της για την ικανότητα ανταλλαγής πληροφοριών μεταξύ του σταθμού βάσης και των χρηστών. Ταυτόχρονα, η ισχύς εκπομπής επηρεάζει το σύστημα ως αιτία παρεμβολών και θορύβου, ενώ μέσω της διάρκειας ζωής της μπαταρίας των τερματικών και του κεντρικού σταθμού προσδιορίζεται το διάστημα που το δίκτυο θα λειτουργεί ομαλά.

Στο σύνολο των ερευνών που έχουν έως τώρα κυκλοφορήσει, η μορφή κοστολόγησης ήταν κατά συντριπτική πλειοψηφία γραμμική (ενότητα 2.4.2). Ωστόσο, στα [5], [13] όπως περιγράφηκε στην ενότητα 2.4.3 μη γραμμικές (κυρτές) μορφές κοστολόγησης εισήχθησαν ως μία πιο ρεαλιστική μέθοδος αντιμετώπισης του προβλήματος. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, για τη συνδυαστική κατανομή ισχύος και ρυθμού μετάδοσης στην άνω ζεύξη ενός ασύρματου δικτύου, όπως έχει αναφερθεί, θα υιοθετήσουμε και τις δύο μορφές κοστολόγησης με στόχο την βελτίωση της αποτελεσματικότητας του σημείου ισορροπίας κατά την έννοια Pareto και του ολικού οφέλους τόσο του συστήματος στο σύνολό του, όσο και του κάθε χρήστη ξεχωριστά από την επιτελούμενη κατανομή πόρων.

4.3

Χαρακτηριστικές Παράμετροι Δικτύου

Όπως και στο πρόβλημα χωρίς επιβολή κάποιας μορφής κοστολόγησης ως προς την ισχύ εκπομπής, έτσι και τώρα θεωρούμε την άνω ζεύξη ενός ασύρματου μονοκυψελωτού CDMA δικτύου, αποτελούμενο από έναν σταθμό βάσης και $N(t)$ στον αριθμό χρήστες σε τυχαίες θέσεις. Περιγράφηκε και στην ενότητα 3.2, ότι το

σύνολο των χρηστών που κινούνται και μεταφέρουν πληροφορίες στο ασύρματο δίκτυο που μελετούμε, συμβολίζεται με $S(t)$, ενώ το κέρδος του καναλιού εντός του κάθε χρήστη $i, i \in S$ συμβολίζεται με $G_i(t)$. Για την ισχύ εκπομπής $p_i(t)$ και τον ρυθμό μετάδοσης $r_i(t)$ ισχύουν κανονικά οι γνωστοί φυσικοί περιορισμοί:

$$\begin{aligned} p_i(t) &\leq p_i^{Max} \\ r_i(t) &\leq r_i^{Max} \end{aligned} \quad (4.1)$$

Το σύνολο των παρεμβολών στον κάθε χρήστη $i, i \in S$ δίνεται και πάλι από την γνωστή σχέση:

$$I_{-i}(\mathbf{p}_{-i}) = \sum_{j=1}^N G_j p_j - G_i p_i + I_0 \quad (4.2)$$

ενώ ο λόγος ενέργειας γ_i ενός bit δεδομένων προς την αντίστοιχη πυκνότητα παρεμβολών για κάθε χρήστη παραμένει όπως έχει ορισθεί νωρίτερα, δηλαδή:

$$\gamma_i(r_i, p_i, \mathbf{p}_{-i}) = \frac{W}{r_i} \frac{G_i p_i}{I_{-i}} \quad (4.3)$$

4.4

Συνάρτηση Καθαρής Ευχαρίστησης

Από την πρότερη ανάλυση τόσο των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του ασύρματου περιβάλλοντος, όσο και της ανάγκης εισαγωγής της κοστολόγησης, εισάγουμε πλέον την μορφή της συνάρτησης καθαρής ευχαρίστησης (Net Utility Function) για το μη συνεργατικό παίγνιο κατανομής πόρων που εξετάζουμε. Όπως έχει αναφερθεί, η συνάρτηση καθαρής ευχαρίστησης προκύπτει ως η αλγεβρική διαφορά της συνάρτησης ευχαρίστησης U_i για τον κάθε χρήστη και της συνάρτησης κόστους c_i ως προς την ισχύ εκπομπής, η οποία για πρώτη φορά χρησιμοποιείται στο πρόβλημά μας. Η συνάρτηση καθαρής ευχαρίστησης συνιστά την ουσιώδη μεταβολή που πραγματοποιήθηκε σε σχέση με την περίπτωση μη ύπαρξης κάποιας στρατηγικής κοστολόγησης των πόρων των χρηστών του δικτύου.

Πιο συγκεκριμένα, η γενική μορφή που λαμβάνουν οι συναρτήσεις καθαρής ευχαρίστησης για κάθε χρήστη που συνδέεται στο ασύρματο δίκτυο η οποία θα χρησιμοποιηθεί στο τρέχον κεφάλαιο για τον σχηματισμό του παιγνίου που μας ενδιαφέρει είναι:

$$U_i^P(p_i, r_i) = U_i(p_i, r_i) - c_i(p_i), \quad i \in S \quad (4.4)$$

όπου $U_i^P(p_i, r_i)$ είναι η εν λόγω συνάρτηση καθαρής ευχαρίστησης για κάθε χρήστη i ως προς την ισχύ εκπομπής και ως προς τον ρυθμό μετάδοσης για το παίγνιο συνδυαστικής κατανομής πόρων στην άνω ζεύξη ασυρμάτων CDMA δικτύων με κοστολόγηση (JUPRA-P Game), η $U_i(p_i, r_i)$ είναι η γνωστή από το προηγούμενο κεφάλαιο συνάρτηση ευχαρίστησης και $c_i(p_i)$ είναι η νεοεισαχθείσα συνάρτηση κόστους για την οποία θα αναφερθούμε εκτενώς σε επόμενη ενότητα.

4.5

Μη Συνεργατικό Παίγνιο Συνδυαστικής Κατανομής Ισχύος και Ρυθμού Μετάδοσης στην Άνω Ζεύξη Ασύρματου CDMA Δικτύου με Χρήση Κοστολόγησης (JUPRA-P)

Στο σημείο αυτό, μπορούμε πλέον να διατυπώσουμε το μη συνεργατικό παίγνιο με την βοήθεια του οποίου υλοποιείται η συνδυαστική κατανομή ισχύος και ρυθμού μετάδοσης στην άνω ζεύξη ασυρμάτων CDMA δικτύων με χρήση κοστολόγησης (Joint Uplink Power and Rate Allocation Game with Pricing – JUPRA-P Game). Έχουμε τον ακόλουθο συμβολισμό:

$$G_P = [S, \{P_i, R_i\}, \{U_i^P(p_i, r_i)\}] \quad (4.5)$$

Γίνεται σαφές ότι τα βασικά γνωρίσματα του παιγνίου με στρατηγική κοστολόγησης της ισχύος G_P διατηρούνται από το αρχικό παίγνιο, με μόνη προσθήκη αυτήν της συνάρτησης καθαρής ευχαρίστησης U_i^P .

Η συνθήκη βελτιστοποίησης του νέου παιγνίου που επεξεργαζόμαστε είναι η παρακάτω:

JUPRA - P Game

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

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

Ουσιαστικές μεταβολές σε σχέση με νωρίτερα δεν υπάρχουν, καθώς και πάλι βασική επιδίωξη των χρηστών – παικτών του συστήματος είναι η μεγιστοποίηση και πάλι της αντικειμενικής τους συνάρτησης, η οποία στην προκειμένη περίπτωση είναι η συνάρτηση καθαρής ευχαρίστησης. Κάθε χρήστης επιδιώκει την μεγιστοποίηση της ευχαρίστησής του ταυτόχρονα με την προσπάθεια ελαχιστοποίησης της συνάρτησης κόστους του. Οι χρήστες πλέον κατανέμουν τους πόρους σε κλίμα μεγαλύτερης συνεργασίας εξαιτίας των ποινών που τους επιβάλλονται, εγκαταλείποντας τον έντονο ανταγωνισμό του παιγνίου χωρίς κάποια κοστολόγηση.

Τα μεγέθη \hat{r}_i (πραγματικός ρυθμός μετάδοσης), $f_i(\gamma_i)$ (συνάρτηση απόδοσης) και Q_i (συνάρτηση πραγματική ρυθμαπόδοσης) έχουν ακριβώς τα ίδια βασικά χαρακτηριστικά με το παίγνιο χωρίς κοστολόγηση όπως αναλύθηκαν διεξοδικά στην ενότητα 3.3 και για τον λόγο αυτό δεν χρειάζεται κάποια εκ νέου αναφορά τους.

Η επίλυση του παραπάνω παιγνίου θα οδηγήσει στο βέλτιστο ζεύγος διανυσμάτων ισχύος και ρυθμού μετάδοσης $(\mathbf{p}^*, \mathbf{r}^*)$, γνωστό ως σημείο ισορροπίας κατά Nash, το οποίου η διαδικασία εντοπισμού έπεται.

4.6

Εύρεση Σημείου Ισορροπίας κατά Nash για το Μη Συνεργατικό Παίγνιο με Χρήση Κοστολόγησης (JUPRA-P)

Κάνοντας χρήση της θεωρίας παιγνίων του Nash για το μη συνεργατικό παίγνιο με χρήση κοστολόγησης, καταλήγουμε στην ζητούμενη κατάσταση ισορροπίας στην οποία η συνάρτηση καθαρής ευχαρίστησης όλων των χρηστών έχει λάβει την μέγιστη τιμή της. Η κατάσταση αυτή διατυπώνεται από το σημείο ισορροπίας κατά Nash, το οποίο σύμφωνα με τον ορισμό που παρατέθηκε στην ενότητα 3.5, είναι ένα ζεύγος διανυσμάτων για την ισχύ εκπομπής και τον ρυθμό μετάδοσης των χρηστών $(\mathbf{p}^*, \mathbf{r}^*) = (p_1^*, p_2^*, \dots, p_N^*, r_1^*, r_2^*, \dots, r_N^*)$ από τα σύνολα στρατηγικών $p_i^* \in P_i$ και $r_i^* \in R_i$ του χρήστη $i \in S$ ενός μη συνεργατικού παιγνίου, στο οποίο κανένας χρήστης δεν μπορεί ανεξάρτητα από τους υπόλοιπους χρήστες να βελτιώσει την καθαρή ευχαρίστησή του. Με άλλα λόγια και για το παίγνιο με κοστολόγηση ισχύει η συνθήκη:

$$U_i^P(p_i^*, r_i^*, \mathbf{p}_{-i}, \mathbf{r}_{-i}) \geq U_i^P(p_i, r_i, \mathbf{p}_{-i}, \mathbf{r}_{-i}), \text{ για όλα } p_i \in P_i, r_i \in R_i \quad (4.6)$$

Ακολουθώντας ερευνούμε την ύπαρξη και μοναδικότητα του σημείου ισορροπίας κατά Nash για το μη συνεργατικό παίγνιο με πολιτική κοστολόγησης.

Θεώρημα 4.α:

Ένα σημείο ισορροπίας κατά Nash:

$$(\mathbf{p}^*, \mathbf{r}^*) = (p_1^*, p_2^*, \dots, p_N^*, r_1^*, r_2^*, \dots, r_N^*) \quad (4.7)$$

για το μη συνεργατικό παίγνιο G_P συνδυαστικής κατανομής ισχύος και ρυθμού μετάδοσης στην άνω ζεύξη ασύρματων δικτύων με πολιτική κοστολόγησης (JUPRA-P Game) υπάρχει και είναι μοναδικό και δίνεται από τις παρακάτω συνθήκες:

$$(\mathbf{p}_i^*, \mathbf{r}_i^*) = \min_{p_i \in P_i} \left\{ \arg \max_{\substack{p_i \in P_i \\ r_i \in R_i}} U_i^P(p_i, r_i), p_i^{Max} \right\} \quad (4.8)$$

$$s. t. \left. \frac{\partial U_i^P(p_i, r_i)}{\partial p_i} \right|_{p_i=p_i^*} = 0 \quad \text{και} \quad \left. \frac{\partial U_i^P(p_i, r_i)}{\partial r_i} \right|_{r_i=r_i^*} = 0 \quad (4.9)$$

$$\text{και } (p_i, r_i)^T H(p_i, r_i) < 0, \forall p_i \in P_i, \forall r_i \in R_i \quad (4.10)$$

όπου:

$$H^P(p_i, r_i) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 U_i^P(p_i, r_i)}{\partial p_i^2} & \frac{\partial^2 U_i^P(p_i, r_i)}{\partial p_i \partial r_i} \\ \frac{\partial^2 U_i^P(p_i, r_i)}{\partial p_i \partial r_i} & \frac{\partial^2 U_i^P(p_i, r_i)}{\partial r_i^2} \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

είναι ο Εσσιανός Πίνακας (Hessian Matrix) στο σημείο (p_i, r_i) .

Απόδειξη 4.α:

Οι αναγκαίες και ικανές συνθήκες για την απόδειξη της ύπαρξης του σημείου ισορροπίας κατά Nash για το JUPRA-P παίγνιο είναι οι ακόλουθες:

1. P_i και R_i είναι μη κενά, κυρτά και συμπαγή υποσύνολα κάποιου Ευκλείδειου χώρου P^N και R^N αντίστοιχα.
2. Η συνάρτηση καθαρής ευχαρίστησης $U_i^P(\mathbf{p}, \mathbf{r})$ είναι συνεχής και $C^{(n)}$ φορές παραγωγίσιμη τόσο ως προς την ισχύ εκπομπής στην άνω ζεύξη $\mathbf{p} \in P = [P_1 \times P_2 \times \dots \times P_N]$ όσο και ως προς τον ρυθμό μετάδοσης $\mathbf{r} \in R = [R_1 \times R_2 \times \dots \times R_N]$.

Με βάση τις παραπάνω ιδιότητες εξασφαλίζεται μαθηματικά η ύπαρξη του σημείου ισορροπίας κατά Nash για το JUPRA-P παίγνιο. Εν συνεχεία εκμεταλλευόμενοι τα πλεονεκτήματα του (κατά Weierstrass) Θεωρήματος Μέγιστης και Ελάχιστης Τιμής (E.V.T.) όπως αποδείχθηκε και στην ενότητα 3.5 του προηγούμενου κεφαλαίου,

καταλήγουμε στην ύπαρξη ενός μοναδικού ολικού μεγίστου για την συνάρτηση καθαρής ευχαρίστησης U_i^P του κάθε χρήστη εντός των δοσμένων πεδίων ορισμού της συνάρτησης αυτής, το οποίο αποτελεί και το μοναδικό σημείο ισορροπίας κατά Nash για το παίγνιο JUPRA-P [16].

Επιπλέον, οι συνθήκες για τις πρώτες μερικές παραγώγους καθορίζουν τα στάσιμα σημεία της συνάρτησης καθαρής ευχαρίστησης $U_i^P(\mathbf{p}, \mathbf{r})$ των χρηστών, τα οποία μπορεί να είναι μέγιστα, ελάχιστα ή σημεία σέλας. Ως εκ τούτου, προκειμένου να προσδιορίσουμε το ολικό μέγιστο για την ευχαρίστηση του κάθε χρήστη, αρκεί να αποδείξουμε ότι ο Εσσιανός Πίνακας $H^P(p_i, r_i)$ είναι αρνητικά ορισμένος, βάσει της συνέχειας και $C^{(n)}$ φορές παραγωγισιμότητας της συνάρτησης καθαρής ευχαρίστησης $U_i^P(\mathbf{p}, \mathbf{r})$ των χρηστών.

4.7

Εισαγωγή Γραμμικής Κοστολόγησης

Έως τώρα έχει γίνει περισσότερη από σαφής η σημασία που έχει η κατάλληλη επιλογή της συνάρτησης κόστους στην ορθή διαμόρφωση και επίλυση του παιγνίου για την επιτυχή συνδυαστική κατανομή των παραμέτρων του προβλήματος που εξετάζουμε. Η μορφή της συνάρτησης $c_i(p_i)$ επιδρά στο σύνολο των αποφάσεων που θα λάβει ο χρήστης προκειμένου καταναείμει την ισχύ εκπομπής του και τον ρυθμό μετάδοσής του με τέτοιο τρόπο ώστε να βελτιστοποιήσει την αποδοτικότητα του.

Η συντριπτική πλειοψηφία των μελετών έως τώρα έχει υιοθετήσει γραμμικά σχήματα κοστολόγησης της ισχύος εκπομπής των χρηστών. Τα βασικά χαρακτηριστικά μίας γραμμικής συνάρτησης κοστολόγησης (linear pricing function) παρουσιάζονται στην παρακάτω υποενότητα:

4.7.1

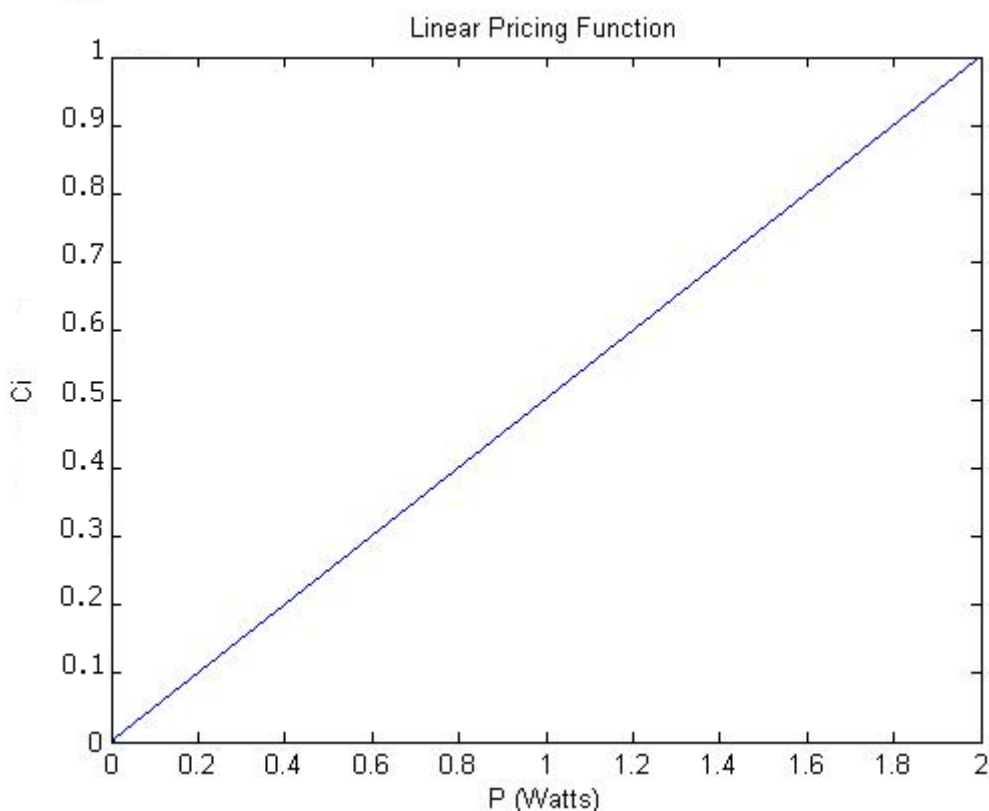
Συνάρτηση Κόστους

Η συνάρτηση κόστους (Pricing function) $c_i(p_i): P \rightarrow \mathfrak{R}_+^1$, η χρήση της οποίας είναι αναγκαία για την επιβολή ποινών στους χρήστες που κάνουν κατασπατάληση των πόρων του δικτύου, ώστε να αναδειχθεί μία πιο κοινωνική και συνεργατική προσέγγιση στο πρόβλημα κατανομής, ορίζεται ως μία γραμμική συνάρτηση της ισχύος εκπομπής των χρηστών ως εξής:

$$c_i(p_i) = c_i \cdot p_i \quad (4.12)$$

όπου $c_i \in \mathbb{R}_+^1$ είναι ο συντελεστής κοστολόγησης η τιμή του οποίου καθορίζεται και ανακοινώνεται στους χρήστες από τον σταθμό βάσης. Η παράμετρος αυτή επιτρέπει στον διαχειριστή του συστήματος να ορίζει την επιβάρυνση (σε κάποια υποθετική μονάδα) στους χρήστες για την παροχή της υπηρεσίας και για την πρόκληση ανεπιθύμητων παρεμβολών στους υπόλοιπους κινητούς χρήστες. Οι χρήστες καλούνται να αποφασίσουν αν το τίμημα της εκπομπής τους στα προηγούμενα επίπεδα ισχύος σε σχέση με το επιβαλλόμενο κόστος είναι τέτοιο, ώστε να αναθεωρήσουν και να μεταδώσουν τα δεδομένα τους σε χαμηλότερες τιμές ισχύος.

Χαρακτηριστική μορφή μίας γραμμικής συνάρτησης κόστους είναι:



Σχήμα 11: Γραμμική κοστολόγηση της εκπεμπόμενης ισχύος.

Από το παραπάνω σχήμα, εάν περιοριστούμε στην μαθηματική περιγραφή της συνάρτησης κόστους, παρατηρούμε ότι πρόκειται για μία αύξουσα γραμμική συνάρτηση, συνεχής και $C^{(n)}$ φορές παραγωγίσιμη ως προς την ισχύ εκπομπής του κάθε χρήστη. Συνεπώς, αύξηση της ισχύος στην οποία οι χρήστες αποφασίζουν να εκπέμψουν τα δεδομένα τους συνοδεύεται από μία απλή γραμμική αύξηση του κόστους τους.

4.7.2

Pareto Βελτιστοποίηση του Νέου Σημείου Ισορροπίας κατά Nash ως προς την Ισορροπία Χωρίς Κοστολόγηση

Ένα από τα ζητούμενα θέματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν εύρεση μίας βέλτιστης λύσης κατά Pareto για το πρόβλημα της συνδυαστικής κατανομής ισχύος και ρυθμού μετάδοσης που εξετάζουμε, ύστερα από την εισαγωγή της κοστολόγησης. Έχοντας ήδη εισάγει στο πρόβλημά μας την γραμμική κοστολόγηση της ισχύος, μπορούμε να ισχυριστούμε πως το νέο σημείο ισορροπίας κατά Nash στο οποίο καταλήξαμε, αποτελεί σύμφωνα με τον ορισμό που έχει δοθεί στην ενότητα 2.4 βέλτιστη λύση κατά Pareto συγκριτικά με το πρόβλημα μας χωρίς κοστολόγηση.

Η επιβολή ποινών στους χρήστες που δε συμμορφώνονται με τα αποδεκτά κοινωνικά κριτήρια, οδηγεί σε βελτίωση της ευχαρίστησης των χρηστών και της απόδοσης του συστήματος στο σύνολό του, όπως προκύπτει από την αύξηση των τιμών της συνάρτησης ευχαρίστησης του κάθε παίκτη ξεχωριστά. Από τη στιγμή που το πρόβλημα κατανομής που μελετούμε είναι διπαραμετρικό, η βελτίωση της συνάρτησης ευχαρίστησης εξαρτάται τόσο από την ισχύ εκπομπής όσο και από τον ρυθμό μετάδοσης. Λόγω της έντονα ανταγωνιστικής φύσης του προβλήματος που εξετάζουμε, ακόμα και μετά την εισαγωγή στρατηγικών κοστολόγησης, αφού ένας αριθμός χρηστών διεκδικεί περιορισμένο σύνολο πόρων, δεν είναι δυνατό όλοι οι παίκτες να εντοπίζουν βελτίωση της ευχαρίστησης τους μέσα από την βελτιστοποίηση και των δύο παραμέτρων.

Πιο αναλυτικά, εξετάζοντας την μορφή της συνάρτησης ευχαρίστησης έχουμε τα εξής:

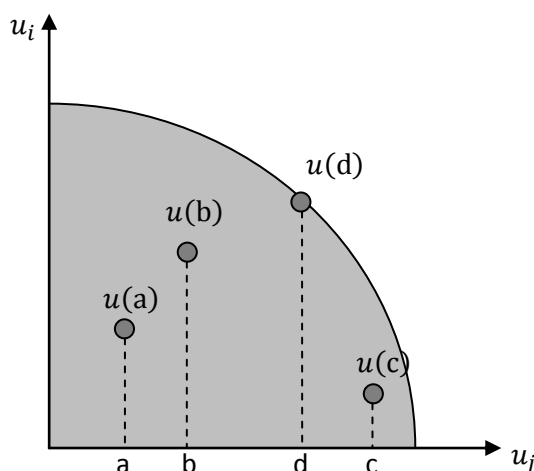
$$U_i(p_i, r_i) = \frac{Q_i(r_i \cdot f_i(\gamma_i), p_i)}{p_i} \quad (4.13)$$

Από την παραπάνω σχέση αλλά και πρακτικά, βλέπουμε ότι ο κάθε χρήστης επωφελείται από μία μείωση της ισχύος εκπομπής του, καθώς με μικρότερη κατανάλωση ενέργειας κατορθώνει να μεταδώσει τα δεδομένα που επιθυμεί. Με αυτόν τον τρόπο η διάρκεια ζωής της μπαταρίας του επεκτείνεται. Συνακόλουθα, μείωση της ισχύος εκπομπής για έναν χρήστη, συνεπάγεται μείωση των παρεμβολών και του θορύβου στους υπόλοιπους χρήστες οι οποίοι ακόλουθα μπορούν να αποστείλουν τα δεδομένα τους με χαμηλότερη τιμή ισχύος. Παράλληλα, η ευχαρίστηση των χρηστών μεγεθύνεται μέσω της αύξησης της τιμής του ρυθμού μετάδοσης των πληροφοριών, γεγονός όμως πιο δύσκολο σε σχέση με πριν, καθώς το συνολικό εύρος ζώνης που είναι διαθέσιμο είναι ιδιαίτερα περιορισμένο απλώς μπορεί να γίνει μία πιο δίκαιη κατανομή του στους χρήστες. Συνεπώς, κατανοούμε

την λογική με βάση την οποία ισχυριζόμαστε ότι η κοστολόγηση οδηγεί σε μία βέλτιστη κατά Pareto λύση ως προς το σημείο ισορροπίας κατά Nash (και όχι σε μια κυρίαρχη λύση κατά Pareto), καθώς η συνάρτηση ευχαρίστηση μπορεί να αυξάνεται αλλά μόνο λόγω μίας εκ των δύο παραμέτρων της.

Για παράδειγμα, μπορούμε να θεωρήσουμε δύο χρήστες σε ένα ασύρματο CDMA δίκτυο, εκ των οποίων ο ένας βρίσκεται κοντά στον σταθμό βάσης, ενώ ο δεύτερος βρίσκεται σε αρκετά μεγαλύτερη απόσταση.

Έστω οι χρήστες i και j με αντίστοιχες συναρτήσεις ευχαρίστησης u_i και u_j . Θεωρώντας τις συναρτήσεις αυτές πριν και μετά την επιβολή της κοστολόγησης, έχουμε τα ακόλουθα αναμενόμενα αποτελέσματα.



Σχήμα 12: Σύνολο συναρτήσεων ευχαρίστησης στην κατάσταση ισορροπίας πριν και μετά την επιβολή κοστολόγησης.

Έστω a, b ζεύγη τιμών της ισχύος εκπομπής και του ρυθμού μετάδοσης των χρηστών σε ασύρματο δίκτυο χωρίς κάποια κοστολόγηση και c, d τα αντίστοιχα ζεύγη της κατάστασης ισορροπίας μετά την επιβολή κοστολόγησης. Και στις δύο περιπτώσεις οι συναρτήσεις ευχαρίστησης παρουσιάζουν αύξηση των τιμών τους δηλαδή:

$$\begin{aligned} u_i(d) &> u_i(b) \\ u_j(c) &> u_j(a) \end{aligned} \tag{4.14}$$

Ωστόσο, ενδεχομένως για τον χρήστη σε μεγάλη απόσταση από τον σταθμό βάσης η τιμή του ρυθμού μετάδοσής του να εμφανίζεται μειωμένη, γεγονός που δεν είναι αρκετό ώστε να σταματήσει την αύξηση της ευχαρίστησης λόγω της μείωσης της ισχύος εκπομπής όλων των χρηστών. Επομένως το νέο σημείο ισορροπίας κατά Nash (για το παράδειγμά μας (p_c, p_a, r_c, r_d)) είναι βέλτιστη λύση κατά Pareto ως προς το ζεύγος διανυσμάτων p και r (και όχι κυρίαρχη) καθώς:

$$\begin{aligned} u_i(b) &> u_i(c) \\ u_j(c) &> u_j(d) \end{aligned} \tag{4.15}$$

4.8

Ανάγκη Εισαγωγής Μη Γραμμικών Μορφών Κοστολόγησης

Η εισαγωγή της γραμμικής κοστολόγησης, παρά την απλότητά της ως μηχανισμός και τη συνολική βελτίωση που επιφέρει στην απόδοση και λειτουργία του συστήματος, αλλά και στην ικανοποίηση του κάθε χρήστη ξεχωριστά από τις παρεχόμενες υπηρεσίες, δεν μπορεί να θεωρηθεί ως η πλέον κατάλληλη για τα ασύρματα περιβάλλοντα που εξετάζουμε. Ο λόγος για την αμφισβήτηση αυτή είναι το γεγονός ότι η γραμμική κοστολόγηση δεν αναπαριστά ρεαλιστικά την πραγματική συμπεριφορά του συστήματος και των χρηστών, λόγω του γεγονότος ότι η βλάβη που προκαλεί ένας χρήστης στους τριγύρω του εντός της κυψέλης δεν είναι αναλογική της ισχύος εκπομπής του p_i . Πιο συγκεκριμένα, όσο η ισχύς εκπομπής των χρηστών στην άνω ζεύξη αυξάνει, οι αντίστοιχες παρεμβολές που προκαλεί αυξάνονται αλματωδώς, με συνέπεια η επιβάρυνση που οι υπόλοιποι χρήστες υφίστανται, να μην είναι ισοδύναμες εντός ολόκληρου του εύρους τιμών της ισχύος εκπομπής. Αποτέλεσμα είναι η ισχύς της μπαταρίας των κινητών τερματικών των χρηστών να καταναλώνεται πολύ πιο γρήγορα, με συνέπεια η ενεργειακή τους αυτονομία να συρρικνώνεται, ενώ οι κακές συνθήκες που επικρατούν εντός της κυψέλης λόγω του θορύβου και των παρεμβολών να υποβαθμίζουν την ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών. Με αυτόν τον τρόπο η ικανοποίηση των χρηστών δεν λαμβάνει τις τιμές που οι χρήστες θα μπορούσαν να απολαμβάνουν.

Για το λόγο αυτό, αναδείχθηκε η ανάγκη μίας πιο ρεαλιστικής προσέγγισης για την κοστολόγηση των πόρων των χρηστών του δικτύου, η οποία βασίζεται σε μορφή μη γραμμικής συνάρτησης κόστους ως προς την ισχύ εκπομπής των χρηστών p_i ώστε οι χρήστες να μην μένουν ανικανοποίητοι ως προς το σύνολο των παρεχόμενων υπηρεσιών, αλλά και να υποχρεώνονται στον ορθολογισμό της κατανάλωσης της ισχύος εκπομπής τους, όπως προτάθηκε από τους συγγραφείς στα [5] και [13].

4.9

Εισαγωγή Κυρτής Κοστολόγησης

Κατανοώντας τους προβληματισμούς που παρατέθηκαν παραπάνω, μπορούμε να θεωρήσουμε ως πλέον ιδανική μορφή την κυρτή κοστολόγηση για την ισχύ εκπομπής των χρηστών, καθώς αντιπροσωπεύει κατάλληλα το πραγματικό κόστος το οποίο πρέπει ένας χρήστης να χρεωθεί ως προς την κατανάλωση ενός συγκεκριμένου

ποσοστού της μπαταρίας του τερματικού του. Για τον λόγο αυτό, και με βάση το νέο μη γραμμικό μοντέλο κοστολόγησης που προτείνεται, στην περίπτωση όπου η ισχύς ενός χρήστη υπερβεί ένα προκαθορισμένο άνω όριο από το σύστημα, οι κυρώσεις προς τους χρήστες μέσω του επιβαλλόμενου κόστους, θα έπρεπε με την σειρά τους να αυξάνουν πιο γοργά καθώς οι παρεμβολές εντός του δικτύου εντείνονται.

4.9.1

Συνάρτηση Κόστους

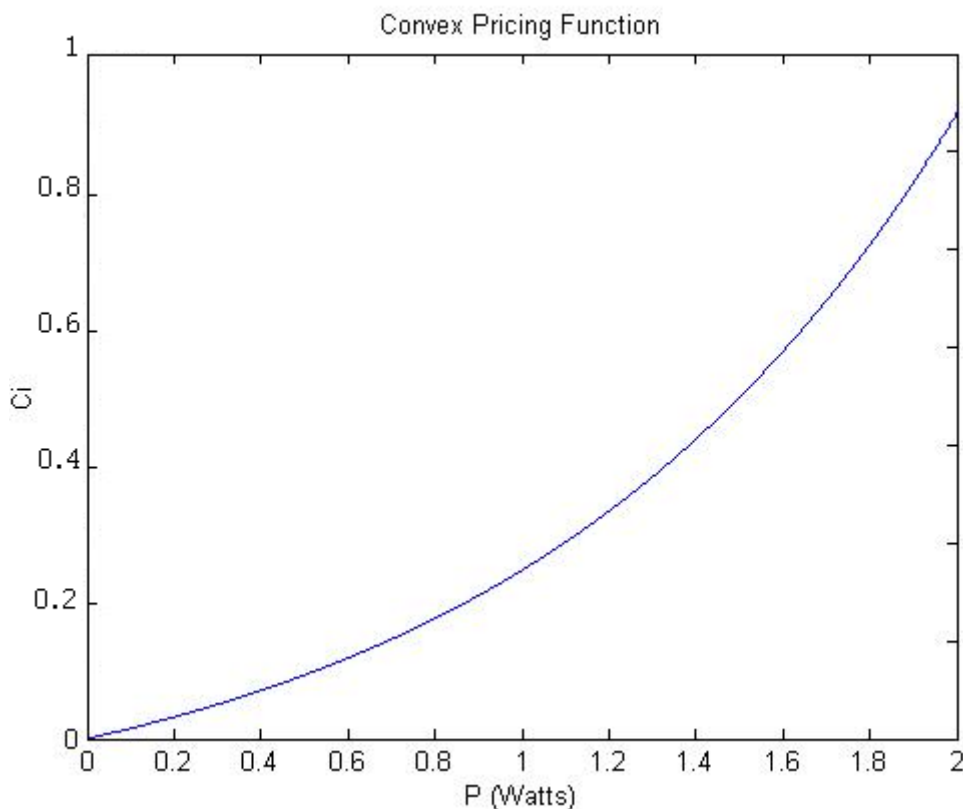
Η νέα συνάρτηση κόστους την οποία θα χρησιμοποιήσουμε και σε αυτήν την περίπτωση είναι της μορφής $c_i(p_i): P \rightarrow \mathbb{R}_+^1$. Για να δηλώσουμε καλύτερα την νέα αντίληψη ως προς τον τρόπο κοστολόγησης των χρηστών για την μη συμμόρφωσή τους στους «κοινωνικά αποδεκτούς» κανόνες εκπομπής εντός του δικτύου, χωρίς βλάβη της γενικότητας, μπορούμε να μοντελοποιήσουμε την μη γραμμική χρέωση των χρηστών με μία συνάρτηση κόστους εκθετικής μορφής ως προς την ισχύ εκπομπής. Η ανωτέρω συνάρτηση κόστους είναι ενδεικτική και επιλέχθηκε ως η καταλληλότερη για την εξυπηρέτηση των ζητούμενων της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Ωστόσο, και άλλες μορφές μη γραμμικής κοστολόγησης των χρηστών μπορούν να υιοθετηθούν με ανάλογα αποτελέσματα, χωρίς να αλλοιώνονται τα χαρακτηριστικά της νέας προσέγγισης που επιχειρείται.

Η νέα συνάρτηση κόστους ορίζεται ως εξής:

$$c_i(p_i) = c_i \cdot (e^{p_i} - 1) \quad (4.16)$$

όπου και πάλι $c_i \in \mathbb{R}_+^1$ είναι ο παράγοντας κοστολόγησης, ο οποίος ανάλογα με τα συνολικά επίπεδα κατανάλωσης της ισχύος και των παρεμβολών εντός του κυβελωτού δικτύου, ορίζεται κεντρικά από τον διαχειριστή του συστήματος.

Η συνάρτηση κόστους έχει την ακόλουθη χαρακτηριστική μορφή:



Σχήμα 13: Κυρτή κοστολόγηση της εκπεμπόμενης ισχύος.

Συνοψίζοντας τα βασικά χαρακτηριστικά της νέας αυτής συνάρτησης που εισάγαμε, παρατηρούμε ότι είναι και αυτή όπως και η αντίστοιχη γραμμική, συνεχής, $C^{(n)}$ φορές παραγωγίσιμη και αύξουσα ως προς την ισχύ εκπομπής των χρηστών. Βέβαια, λόγω της εκθετικής μορφής που επιλέχθηκε, αύξηση της ισχύος εκπομπής των χρηστών οδηγεί σε κατακόρυφη αύξηση του κόστους που προκύπτει από την συνάρτηση, σε εξάρτηση πάντα και με την τιμή του παράγοντα κοστολόγησης c_i .

Υποθέτοντας όλα όσα έχουν αναφερθεί στην έως τώρα ανάλυση του προβλήματος και για τους δύο διαφορετικούς μηχανισμούς κοστολόγησης ως προς την ισχύ εκπομπής των χρηστών p_i που έχουν περιγραφεί, διαμορφώνονται δύο διαφορετικές εκδοχές για το μη συνεργατικό παίγνιο με κοστολόγηση. Η πρώτη εξ αυτών υλοποιείται για γραμμική κοστολόγηση των χρηστών στο «Μη Συνεργατικό Παίγνιο Συνδυαστικής Κατανομής Ισχύος και Ρυθμού Μετάδοσης στην Άνω Ζεύξη Ασυρμάτων Δικτύων με Γραμμική Κοστολόγηση» (“Joint Uplink Power and Rate Allocation with Linear Pricing – JUPRA LP- Non Cooperative Game”), και η δεύτερη αφορά μη γραμμική (κυρτή) κοστολόγηση στο «Μη Συνεργατικό Παίγνιο Συνδυαστικής Κατανομής Ισχύος και Ρυθμού Μετάδοσης στην Άνω Ζεύξη Ασυρμάτων Δικτύων με Κυρτή Κοστολόγηση» (“Joint Uplink Power and Rate Allocation with Convex Pricing – JUPRA CP- Non Cooperative Game”).

Η απόδειξη της ύπαρξης και της μοναδικότητας του σημείου ισορροπίας κατά Nash για το μη συνεργατικό παίγνιο και για τις δύο μορφές κοστολόγησης, συνοψίζεται κανονικά στις ενότητες 4.5 και 4.6 του τρέχοντος κεφαλαίου. Ακόλουθα, παρουσιάζεται η σύγκλιση του παιγνίου στο σημείο ισορροπίας του συγκεντρωτικά για το παίγνιο με κοστολόγηση (είτε γραμμική είτε κυρτή).

4.10

Σύγκλιση του Μη Συνεργατικού Παιγνίου με Πολιτική Κοστολόγησης

Στο σημείο αυτό θα μας απασχολήσει η σύγκλιση του μη συνεργατικού παιγνίου με κοστολόγηση και για τους δύο προαναφερθέντες μηχανισμούς γραμμικής και κυρτής μορφής. Ουσιαστικά, η αποδεικτική διαδικασία που και τώρα θα ακολουθηθεί είναι όμοια με την ενότητα 3.6 για το μη συνεργατικό παίγνιο χωρίς κάποια πολιτική κοστολόγησης. Για τον λόγο αυτό, θα αναφερθούμε συνοπτικά στην σύγκλιση του παιγνίου για τις νέες συνθήκες που έχουν προκύψει μετά την εισαγωγή της συνάρτησης κόστους.

Κάνοντας χρήση του θεωρήματος 4.α που παρουσιάστηκε νωρίτερα, ορίζουμε την συνάρτηση «βέλτιστης απόκρισης» για τον κάθε χρήστη του συστήματος $i \in S$ – “Best Response Function” BR_i ως ακόλουθα:

$$BR_i(\mathbf{p}_i^*, \mathbf{r}_i^*) = \min_{p_i \in P_i} \left\{ \arg \max_{\substack{p_i \in P_i \\ r_i \in R_i}} U_i^P(p_i, r_i), p_i^{Max} \right\} \quad (4.17)$$

$$s. t. \quad \left. \frac{\partial U_i^P(p_i, r_i)}{\partial p_i} \right|_{p_i=p_i^*} = 0 \quad \text{και} \quad \left. \frac{\partial U_i^P(p_i, r_i)}{\partial r_i} \right|_{r_i=r_i^*} = 0 \quad (4.18)$$

$$\text{και} \quad (p_i, r_i)^T H(p_i, r_i) < 0, \forall p_i \in P_i, \forall r_i \in R_i \quad (4.19)$$

Στην προσπάθειά μας να αποδείξουμε την σύγκλιση του (JUPRA-P) παιγνίου με κοστολόγηση στο μοναδικό σημείο ισορροπίας κατά Nash, όπως προσδιορίστηκε στο θεώρημα 4.α, αρκεί να αποδείξουμε ότι η συνάρτηση καθαρής ευχαρίστησης $U_i^P(p_i, r_i)$ των χρηστών του δικτύου είναι “standard” οι ιδιότητες της οποίας έχουν παρουσιαστεί αναλυτικά στην επεξήγηση 3.ε της ενότητας 3.6.

Θεώρημα 4.β:

Το μη συνεργατικό παίγνιο με κοστολόγηση (JUPRA-P Game) $G_P = [S, \{P_i, R_i\}, \{U_i^P(p_i, r_i)\}]$, συγκλίνει στο μοναδικό σημείο ισορροπίας κατά Nash του συστήματος, ξεκινώντας από ένα οποιοδήποτε αρχικό σημείο.

Απόδειξη 4.β:

Εξ ορισμού, το μοναδικό σημείο ισορροπίας κατά Nash που εξετάζουμε πρέπει να ικανοποιεί την παρακάτω σχέση:

$$(\mathbf{p}^*, \mathbf{r}^*) = \mathbf{BR}(\mathbf{p}, \mathbf{r}) \tag{4.20}$$

όπου $\mathbf{BR}(\mathbf{p}, \mathbf{r}) = (BR_1(p_1, r_1), BR_2(p_2, r_2), \dots, BR_N(p_N, r_N))$ είναι η στρατηγική βέλτιστης απόκρισης των χρηστών του συστήματος. Βάσει του [15] μπορούμε να επιβεβαιώσουμε τις ιδιότητες μίας standard συνάρτησης στην συνάρτηση BR_i για το υπό μελέτη παίγνιο με κοστολόγηση για όλα τα $\mathbf{p} > \mathbf{0}$ και $\mathbf{r} > \mathbf{0}$, καθώς:

1. Εάν $(\mathbf{p}, \mathbf{r}) > \mathbf{0}$ τότε $\mathbf{BR}(\mathbf{p}, \mathbf{r}) > \mathbf{0}$.
2. Εάν $(\mathbf{p}, \mathbf{r}) > (\mathbf{p}^*, \mathbf{r}^*)$ μέσα από τις σχέσεις 3.iii καταλήγουμε ότι $\mathbf{BR}(\mathbf{p}, \mathbf{r}) > \mathbf{BR}(\mathbf{p}^*, \mathbf{r}^*)$.
3. Για όλα τα $\alpha > 1$, από την στιγμή που η $\mathbf{BR}(\mathbf{p}, \mathbf{r})$ είναι μία αυστηρώς αύξουσα συνάρτηση ως προς το ζεύγος μεταβλητών (\mathbf{p}, \mathbf{r}) , καταλήγουμε ότι τελικώς ισχύει $\alpha \mathbf{BR}(\mathbf{p}, \mathbf{r}) > \mathbf{BR}(\alpha \mathbf{p}^*, \alpha \mathbf{r}^*)$.

Επομένως, από την εξασφάλιση των ανωτέρω ιδιοτήτων, μπορούμε να ισχυριστούμε ότι πράγματι και το μη συνεργατικό παίγνιο με οποιαδήποτε μορφή κοστολόγησης (JUPRA-P) συγκλίνει σε ένα μοναδικό σημείο ισορροπίας κατά Nash, ανεξάρτητα από την τιμή του τυχαίως επιλεγμένου αρχικού σημείου, όπως και το παίγνιο χωρίς κάποια πολιτική κοστολόγησης.

4.11

Αλγόριθμος Συνδυαστικής Κατανομής Ισχύος και Ρυθμού Μετάδοσης στην Άνω Ζεύξη με Πολιτική Κοστολόγησης

Κομβικό ρόλο στην κατάληξη του παιγνίου μας με κοστολόγηση στο μοναδικό σημείο ισορροπίας κατά Nash $(\mathbf{p}^*, \mathbf{r}^*)$, διαδραματίζει ο κατανεμημένος,

επαναληπτικός και χαμηλής πολυπλοκότητας αλγόριθμος ο οποίος εκφράζει την συνολική συλλογιστική πορεία που ακολουθήθηκε (JUPRA-P Algorithm).

Πιο αναλυτικά, ο αλγόριθμος που θα παρουσιαστεί, αποτελείται από δύο βασικά τμήματα. Το πρώτο τμήμα (JUPRA-P Algorithm Part I) υλοποιείται στον σταθμό βάσης και είναι υπεύθυνο για την ανακοίνωση της στρατηγικής κοστολόγησης στους χρήστες του δικτύου (δηλαδή με πιο απλά λόγια την τιμή που θα λαμβάνει ο συντελεστής κοστολόγησης c_i σε κάθε επανάληψη). Το δεύτερο τμήμα του αλγορίθμου (JUPRA-P Algorithm Part II) υλοποιείται στον κάθε χρήστη εντός της κυψέλης, ο οποίος δεδομένης της κοστολόγησης που του επιβάλλεται κεντρικά από τον σταθμό βάσης, λαμβάνει ένα σύνολο αποφάσεων προκειμένου να κατανεμίσει βέλτιστα την ισχύ και τον ρυθμό μετάδοσής στην άνω ζεύξη του δικτύου ώστε να μεγιστοποιήσει την ευχαρίστησή του. Η ανωτέρω κατανομή γίνεται συνδυαστικά για τα δύο μεγέθη εντός του ίδιου βήματος επανάληψης για όλους τους χρήστες, και για τον λόγο αυτό η τελική βέλτιστη λύση προκύπτει ταυτόχρονα και για την ισχύ και για τον ρυθμό μετάδοσης.

Ο αλγόριθμος υλοποίησης του παιχνιδιού με κοστολόγηση είναι ο ακόλουθος:

JUPRA – P Algorithm

Algorithm Part I (Network's Part)

- Βήμα 1:** Ανακοίνωσε την αρχική τιμή του συντελεστή κοστολόγησης $c = 0$ σε όλους τους χρήστες $i, i \in \mathcal{S}$.
- Βήμα 2:** Κάθε χρήστης προσδιορίζει το διάνυσμα της ισχύος και του ρυθμού μετάδοσής του $(\mathbf{p}^*, \mathbf{r}^*)$ για την τρέχουσα κατάσταση ισορροπίας (σύμφωνα με το δεύτερο τμήμα του αλγορίθμου που ακολουθεί) και υπολογίζει την συνάρτηση ευχαρίστησής του U_i^P .
- Βήμα 3:** Αύξησε την τιμή του συντελεστή κοστολόγησης c κατά Δc , δηλαδή $c := c + \Delta c$ και ανακοίνωσε το σε όλους τους χρήστες
- Βήμα 4:** Αν οι συναρτήσεις χρησιμότητας των χρηστών δεν βελτιώνονται, δηλαδή $U_i^P(c) > U_i^P(c + \Delta c)$ για όλους τους χρήστες, τότε σταμάτα και όρισε $c_{best} = c$. Αλλιώς, επέστρεψε στο βήμα 2.

Το δεύτερο τμήμα του αλγορίθμου είναι ακριβώς το ίδιο με τον αλγόριθμο υλοποίησης του παιχνιδιού χωρίς πολιτική κοστολόγησης όπως διατυπώθηκε στην ενότητα 3.7.

Algorithm Part II (User's Part)

- Βήμα 1:** Την στιγμή έναρξης κάθε χρονοσχισής t , κάθε χρήστης $i \in S$, επιλέγει μία τυχαία επιτρεπτή τιμή για την ισχύ εκπομπής $p_i^{(0)}$ (i.e. $0 < p_i^{(0)} < p_i^{Max}$) και για τον ρυθμό μετάδοσης $r_i^{(0)}$ (i.e. $0 < r_i^{(0)} < r_i^{Max}$). Όρισε $k = 0$, όπου k είναι ο αριθμός των επαναλήψεων του αλγορίθμου.
- Βήμα 2:** Ο τερματικός σταθμός ανακοινώνει την συνολική παρεμβολή $I^{(k)}(\mathbf{p}^{(k)})$ από τους χρήστες του συστήματος, δοσμένης της ισχύος εκπομπής για κάθε χρήστη. Ακόλουθα, ο εκάστοτε χρήστης υπολογίζει την παρεμβολή που δέχεται ατομικά από τους γείτονές του $I_{-i}^{(k)}(\mathbf{p}_{-i}^{(k)})$ και επαναπροσδιορίζει την ισχύ εκπομπής του $p_i^{(k+1)}$ και τον ρυθμό μετάδοσής του $r_i^{(k+1)}$ για την άνω ζεύξη σύμφωνα με τις σχέσεις στην ενότητα 4.6.
- Βήμα 3:** Εάν οι ισχείς εκπομπής και οι ρυθμοί μετάδοσης για τον κάθε χρήστη μεταξύ των διαδοχικών επαναλήψεων συγκλίνουν σε μία τιμή δηλαδή $(|p_i^{(k+1)} - p_i^{(k)}| \leq \varepsilon \text{ και } |r_i^{(k+1)} - r_i^{(k)}| \leq \varepsilon, \varepsilon = 10^{-5})$ τότε σταματά.
- Βήμα 4:** Σε διαφορετική περίπτωση, όρισε $k = k + 1$ και επέστρεψε στο Βήμα 2.

Περιγράφοντας την λειτουργία του ανωτέρω αλγορίθμου, παρατηρούμε ότι για ένα σύνολο επαναλήψεων, ο παράγοντας κοστολόγησης c αυξάνεται κατά μία μικρή ποσότητα Δc . Συγκεκριμένα σε κάθε επανάληψη προσδιορίζεται ένα βέλτιστο ζεύγος διανυσμάτων ισχύος και ρυθμού μετάδοσης, από το οποίο κάθε φορά υπολογίζεται για τους χρήστες η συνάρτηση καθαρής ευχαρίστησής τους. Η αύξηση του παράγοντα κοστολόγησης σταματά όταν οι ποινές που επιβάλλονται στους χρήστες είναι τόσο έντονες που τους υποχρεώνουν σε εκπομπή σε τόσο χαμηλά επίπεδα ισχύος ώστε η ευχαρίστησή τους από την λήψη της υπηρεσίας να συρρικνώνεται σε σχέση με πριν. Με αυτόν τον τρόπο ορίζεται η τελική τιμή του παράγοντα κόστους c_{best} στην οποία τόσο το σύστημα όσο και οι χρήστες μεμονωμένα, έχουν το μεγαλύτερο εφικτό κέρδος. Εν τέλει, για την εν λόγω τιμή υπολογίζεται το τελικό ζεύγος διανυσμάτων $(\mathbf{p}^*, \mathbf{r}^*)$, το οποίο και αποτελεί το ζητούμενο σημείο ισορροπίας κατά Nash.

Συμπεράσματα από την Εισαγωγή Σχημάτων Κοστολόγησης

Ανακεφαλαιώνοντας, στο κεφάλαιο αυτό το πρόβλημά μας επαναδιατυπώθηκε κατάλληλα ώστε να συμπεριλάβει στρατηγικές κοστολόγησης. Όπως περιγράφηκε εκτενώς, η επιβολή κοστολόγησης στους χρήστες οδηγεί στην απόκτηση μίας λιγότερο ανταγωνιστικής συμπεριφοράς για την διαχείριση των πόρων με θετικές επιδράσεις τόσο στον κάθε ένα ξεχωριστά, αλλά και στην συνολική απόδοση και ευελιξία του συστήματος. Στην βιβλιογραφία, η γραμμική κοστολόγηση ως προς την ισχύ εκπομπής έχει αποτελέσει το βασικό μέσο για την επιβολή κυρώσεων στους «απείθαρχους» χρήστες, ωστόσο είναι δυνατόν να ισχυριστούμε ότι η θεώρηση αυτή παρότι εξυπηρετεί ικανοποιητικά το θεωρητικό μοντέλο, αποτυγχάνει να εφαρμοστεί σε ρεαλιστικά ασύρματα περιβάλλοντα (για λόγους που έχουμε προαναφέρει). Η μη γραμμική (εν γένει κυρτή) κοστολόγηση παρουσιάζεται ως ιδανικότερη προσέγγιση, καθώς μέσω αυτής οι χρήστες οι οποίοι ζημιώνουν τους τριγύρω τους δέχονται εντονότερες πιέσεις να περιορίσουν την ισχύ τους και συνακόλουθα τις παρεμβολές που προκαλούν.

Σημαντική παρατήρηση η οποία συμβάλει στην καλύτερη κατανόηση της φύσης του προβλήματος, είναι ότι η ισχύς εκπομπής στο σημείο ισορροπίας κατά Nash για το μη συνεργατικό παίγνιο κατανομής με κοστολόγηση που επεξεργαζόμαστε, αποδεικνύεται μικρότερη σε σχέση με το αντίστοιχο παίγνιο χωρίς χρήση κοστολόγησης. Μάλιστα, και μεταξύ των δύο μηχανισμών κοστολόγησης που παρουσιάστηκαν, η κυρτή κοστολόγηση είναι αυτή η οποία οδηγεί στην μεγαλύτερη εφικτή μείωση της ισχύος, εντός πάντοτε των φυσικών περιορισμών. Αυτός είναι και ο στόχος των πολιτικών κοστολόγησης, ώστε να μειωθούν οι κακές συνθήκες εκπομπής εντός της κυψέλης, αλλά και να επεκταθεί η ενεργειακή αυτάρκεια του συστήματος. Ο επιτυγχανόμενος ρυθμός μετάδοσης ο οποίος και αυτός με την σειρά του κατανέμεται ανάλογα με τις αποφάσεις που λαμβάνουν οι χρήστες, αναμενόμενο είναι να μεταβληθεί σε σχέση με το πρόβλημα χωρίς κοστολόγηση, ωστόσο εξαρτάται τόσο από την τοποθεσία των χρηστών εντός του δικτύου όσο και από την μείωση της ισχύος στην οποία ο κάθε χρήστης υποχρεώνεται να προχωρήσει.

Η εγκυρότητα των παραπάνω θεωρητικών ισχυρισμών μπορεί να επιβεβαιωθεί και πρακτικά στο επόμενο κεφάλαιο της εργασίας μας, μέσα από ένα σύνολο προσομοιώσεων που υλοποιήθηκαν και για τις τρεις διαφορετικές εκδοχές του προβλήματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ

- 5.1. Εισαγωγικά**
- 5.2. Σενάριο Προσομοίωσης**
- 5.3. Προσομοίωση Κατανομής Ισχύος και Ρυθμού
Μετάδοσης Χωρίς Κοστολόγηση**
- 5.4. Προσομοίωση Κατανομής Ισχύος και Ρυθμού
Μετάδοσης με Χρήση Κοστολόγησης**

Εισαγωγικά

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την εκτέλεση των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν με την βοήθεια του υπολογιστικού περιβάλλοντος “Matlab”. Αξιοποιώντας την μαθηματική γνώση αλλά και τους αλγορίθμους υλοποίησης που εκτέθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, η σύγκλιση των μη συνεργατικών παιγνίων για όλες τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν στο μοναδικό σημείο ισορροπίας κατά Nash, μπορεί να προκύψει και πρακτικά μέσω της κατάλληλης προσαρμογής και κωδικοποίησης του θεωρητικού μοντέλου σε συνθήκες πρακτικής λειτουργίας. Τα εξαγόμενα αναμένουμε να επιβεβαιώσουν την ορθότητα των ισχυρισμών μας από την ανάλυση που προηγήθηκε.

Αρχικά, μελετούμε τα αποτελέσματα του αλγορίθμου συνδυαστικής κατανομής ισχύος και ρυθμού μετάδοσης στην άνω ζεύξη ασύρματων δικτύων χωρίς πολιτική κοστολόγησης (JUPRA Algorithm) και αξιολογούμε την τιμή που λαμβάνουν οι σημαντικότερες παράμετροι που αφορούν τον κάθε χρήστη, όπως η ισχύς εκπομπής, ο ρυθμός μετάδοσης, η συνάρτηση ευχαρίστησης και το πλήθος των επαναλήψεων του αλγορίθμου. Στην συνέχεια παραθέτουμε συγκριτικά τα ανωτέρω αποτελέσματα με ανάλογες προσπάθειες προσομοιώσεων από την διαθέσιμη βιβλιογραφία, ώστε όχι μόνο να εξασφαλιστεί η εγκυρότητά τους, αλλά και για να διαπιστωθούν τα πλεονεκτήματα των αλγορίθμων υλοποίησης που χρησιμοποιήθηκαν για την συνολική απόδοση του συστήματος σε σχέση με άλλες μελέτες.

Ακόλουθα, παραθέτονται τα αριθμητικά αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τα αντίστοιχα μη συνεργατικά παίγνια μετά την εισαγωγή της κοστολόγησης. Και σε αυτήν την περίπτωση τα δεδομένα που προκύπτουν από την εκτέλεση των προσομοιώσεων συγκρίνονται, τόσο μεταξύ των δύο μηχανισμών κοστολόγησης (γραμμική και κυρτή) όσο και με τα αποτελέσματα που λάβαμε προηγουμένως για το πρόβλημά μας χωρίς πολιτική κοστολόγησης. Από την στιγμή που αξιολογήσουμε την απόδοση και των τριών εκδοχών του προβλήματος κατανομής που ερευνούμε, εξάγονται τα αντίστοιχα συμπεράσματα για την λειτουργία του συστήματος και την αποτελεσματικότητα των προσεγγίσεων που υιοθετήθηκαν. Όμοια με πριν, η σύγκριση με την διαθέσιμη έως τώρα βιβλιογραφία αποτελεί χρήσιμο εργαλείο για την επικύρωση των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν από τις προσομοιώσεις.

Τέλος, οφείλουμε να επισημάνουμε ότι προκειμένου να αναδειχτούν καλύτερα και πιο ρεαλιστικά τα χαρακτηριστικά του δικτύου, εξετάζουμε το σύστημά μας σε βάθος χρόνου όπου η κατάσταση των καναλιών των χρηστών εμφανίζει χρονομεταβλητή εξασθένιση Rayleigh.

Σενάριο Προσομοίωσης

Σε όλη τη διάρκεια της μελέτης μας, υποθέτουμε την άνω ζεύξη ενός ασύρματου δικτύου CDMA το οποίο αποτελείται από μία και μοναδική κυψέλη και βασίζεται στην μετάδοση δεδομένων σε χρονοσχισμές. Για λόγους διευκόλυνσης της υλοποίησης των αλγορίθμων, θεωρούμε ότι στο σύστημα μας σε κάθε στιγμή είναι συνδεδεμένοι $N = 9$ χρήστες, οι οποίοι εξυπηρετούνται από υπηρεσίες πραγματικού χρόνου (real time users) – για παράδειγμα υπηρεσίες μετάδοσης φωνής. Επιπλέον, κάθε μία από τις προσομοιώσεις έχει συνολική διάρκεια 10.000 χρονοσχισμών, ενώ για τις βασικές παραμέτρους του συστήματος η μέγιστη ισχύς εκπομπής έχει ορισθεί στα 2 Watts, ο μέγιστος εφικτός ρυθμός μετάδοσης είναι $r_i^{Max} = 64kbps$, το διαθέσιμο εύρος ζώνης φάσματος είναι $W = 10^6 Hz$ και οι παρεμβολές του θερμικού θορύβου είναι $I_0 = 5 \cdot 10^{-16}$. Συνοπτικά έχουμε τον ακόλουθο πίνακα για τα δεδομένα που θα χρησιμοποιηθούν:

Parameter $\forall i \in S$	Value
P_i^{Max}	2 Watts
r_i^{Max}	64kbps
W	$10^6 Hz$
I_0	$5 \cdot 10^{-16}$

Πίνακας: Τιμές Παραμέτρων Προσομοίωσης

Το κέρδος του καναλιού του κάθε χρήστη μοντελοποιείται ως εξής:

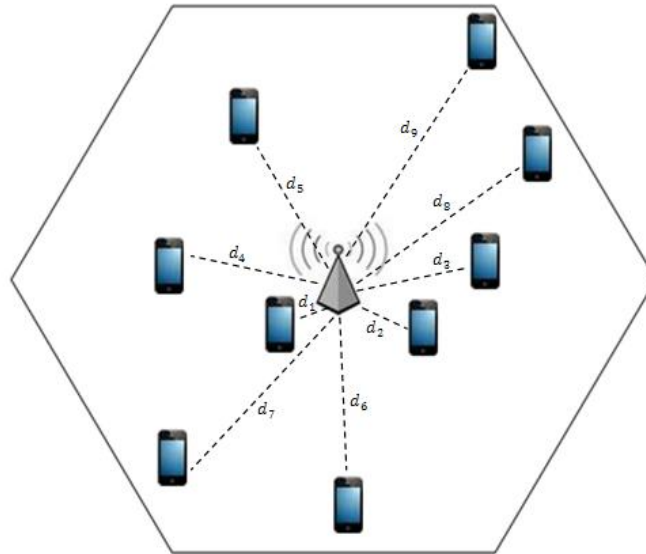
$$G_i = \frac{K_i}{d_i^\alpha} \quad (5.1)$$

όπου d_i είναι η απόσταση του χρήστη i από τον σταθμό βάσης, α ο εκθετικός παράγοντας εξασθένισης (έστω $\alpha = 4$) και K_i είναι μία κατανομημένη τυχαία μεταβλητή η οποία ακολουθεί λογαριθμική (log-normal) κατανομή, με μέση τιμή 0 και διακύμανση $\sigma^2 = 8db$, η οποία αντιπροσωπεύει το φαινόμενο σκίασης (shadow effect).

Για τους 9 χρήστες του συστήματος, υποθέτουμε ότι τοποθετούνται εντός της κυψέλης στις ακόλουθες ενδεικτικές αποστάσεις από τον σταθμό βάσης:

$$d = [310, 460, 570, 660, 740, 810, 880, 940, 1000] m$$

Το δίκτυό μας έχει μορφή σαν την παρακάτω:



Σχήμα 14: Αναπαράσταση της CDMA κυψέλης για την οποία προσομοιώθηκε το σύστημα με τις αποστάσεις d_i των κινητών χρηστών

Επιπλέον, για το σύνολο των προσομοιώσεων θεωρούμε:

- Συνάρτηση απόδοσης:

$$f_i(\gamma_i) = (1 - e^{-3.7 \cdot \gamma_i})^M \quad (5.2)$$

- Συνάρτηση πραγματικής ρυθμαπόδοσης:

$$Q_i(p_i, r_i) = 1 - \frac{1}{(1 + e^{r_i - A/B})} \quad (5.3)$$

όπου $M = 80$ και A, B είναι θετικές σταθερές οι οποίες υποδηλώνουν την κλίση της συνάρτησης.

5.3

Προσομοίωση Κατανομής Ισχύος και Ρυθμού Μετάδοσης Χωρίς Πολιτική Κοστολόγησης

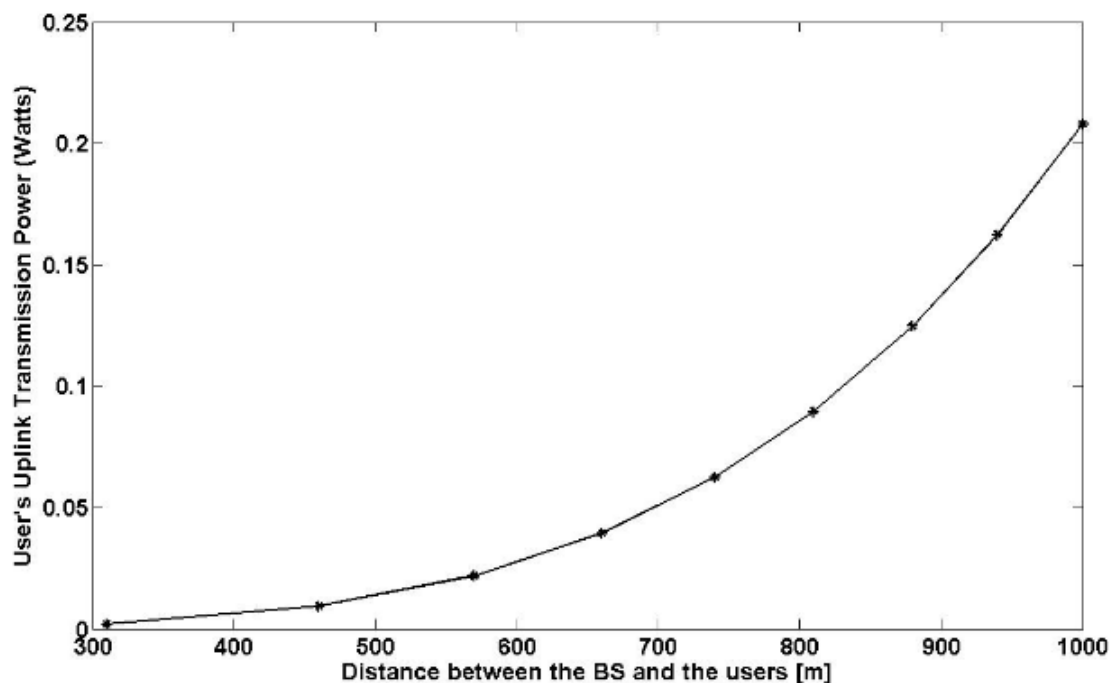
Ακόλουθα παρουσιάζουμε τα ποσοτικά αποτελέσματα από την εκτέλεση του αλγορίθμου για το μη συνεργατικό παίγνιο που θεωρητικά αναλύθηκε στο 3^ο κεφάλαιο (JUPRA Algorithm). Θα μελετήσουμε διεξοδικά τις βασικές μεταβλητές που χαρακτηρίζουν το σύστημα των χρηστών, ενώ στην συνέχεια θα συγκρίνουμε με προηγούμενες μελέτες επί του αντίστοιχου θέματος από την βιβλιογραφία.

5.3.1

Αριθμητικά Αποτελέσματα

Επιδιώκοντας την βέλτιστη σύγκλιση του αλγορίθμου υλοποίησης χωρίς πολιτική κοστολόγησης (JUPRA Algorithm) στο σημείο ισορροπίας κατά Nash, υποθέτουμε το δίκτυό μας για ένα πλήθος χρονοσχισμών, εντός των οποίων οι επικρατούσες συνθήκες των καναλιών είναι σταθερές. Με βάση την ανωτέρω σχέση για το κέρδος των καναλιών των χρηστών, διαπιστώνουμε ότι όσο διευρύνεται η απόσταση ενός χρήστη από τον σταθμό βάσης, οι συνθήκες για το αντίστοιχο κανάλι γίνονται δυσμενέστερες. Για τον λόγο αυτό, οι χρήστες προκειμένου να ανταποκριθούν όσο το δυνατόν καλύτερα στις απαιτούμενες προδιαγραφές των λαμβανόμενων υπηρεσιών, υποχρεώνονται σε αύξηση της ισχύος εκπομπής όσο η απόσταση τους μεγαλώνει, ενώ από την άλλη ο ρυθμός μετάδοσης μειώνεται ως ενδεικτικό στοιχείο της αναπόφευκτης υποβάθμισης της ποιότητας υπηρεσίας.

Από την εκτέλεση του εν λόγω αλγορίθμου για το JUPRA παίγνιο, διαπιστώνουμε ότι τελικώς επιτυγχάνεται η ζητούμενη έκβαση στο σημείο ισορροπίας κατά Nash. Για την πρώτη εκ των μεταβλητών προς κατανομή, δηλαδή το διάνυσμα της ισχύος εκπομπής στην άνω ζεύξη P^* ως προς την απόσταση των χρηστών από τον σταθμό βάσης, τα αποτελέσματα που λάβαμε συγκεντρώνονται στο παρακάτω διάγραμμα:

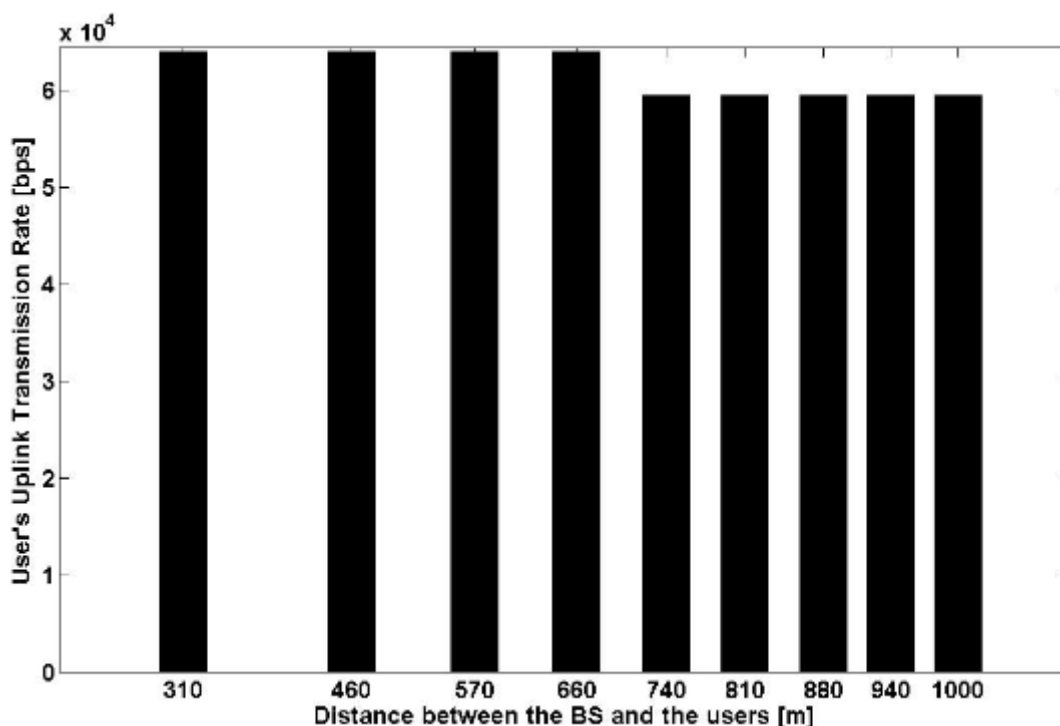


Σχήμα 15: Ισχύς εκπομπής των χρηστών στο σημείο ισορροπίας για το JUPRA παίγνιο.

Από το γράφημα αυτό επιβεβαιώνεται η αύξηση της ισχύος εκπομπής των πιο απομακρυσμένων χρηστών σε σχέση με εκείνους που απέχουν λίγο από τον σταθμό βάσης. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται εμφανές πρώτα ότι η ισχύς εκπομπής των

χρηστών στο σημείο ισορροπίας εξαρτάται από τις συνθήκες που επικρατούν στο κανάλι την δεδομένη χρονοσχισμή, και στην συνέχεια ότι οι χρήστες που τοποθετούνται κοντά στον σταθμό βάσης εντός της κυψέλης ευνοούνται σε σχέση με όσους είναι σε μεγαλύτερη απόσταση καθώς μεταδίδουν τις πληροφορίες τους με χαμηλότερες απαιτήσεις ισχύος.

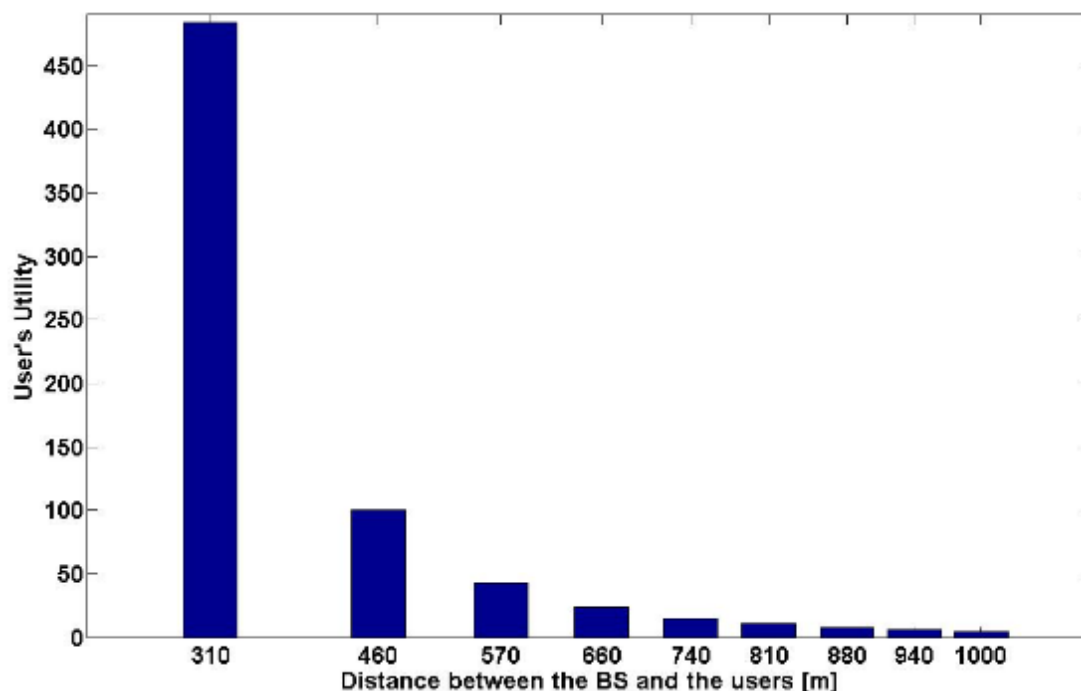
Η άλλη παράμετρος η οποία κατανέμεται για τους χρήστες, δηλαδή το διάνυσμα για τον ρυθμό μετάδοσης των χρηστών R^* στην κατάσταση ισορροπίας λαμβάνει τις ακόλουθες τιμές:



Σχήμα 16: Ρυθμός μετάδοσης των χρηστών στο σημείο ισορροπίας για το JUPRA παίγνιο.

Έχοντας επισημάνει ότι οι υπηρεσίες που θα μελετηθούν είναι υπηρεσίες φωνής, οπότε οι απαιτήσεις που έχουν οι χρήστες σε ρυθμό μετάδοσης κυμαίνονται στα 64 kbps , παρατηρούμε ότι σε γενικές γραμμές όλοι οι χρήστες εξυπηρετούνται σε ικανοποιητικό βαθμό. Πιο αναλυτικά, οι πρώτοι 4 χρήστες οι οποίοι βρίσκονται σε μικρή σχετικά απόσταση από τον σταθμό βάσης επιτυγχάνουν να μεταδώσουν τα δεδομένα τους με τον μέγιστο δυνατό ρυθμό μετάδοσης. Οι υπόλοιποι χρήστες εκπέμπουν με λίγο χαμηλότερο ρυθμό (της τάξης των 60 kbps) ωστόσο η μείωση αυτή δεν μπορεί να θεωρηθεί τόσο έντονη ώστε η λήψη της υπηρεσίας να καταστεί απαγορευτική.

Επόμενο μέγεθος το οποίο μελετούμε είναι η τιμή που λαμβάνει η συνάρτηση ευχαρίστησης του κάθε χρήστη στην τελική κατάσταση ισορροπίας.

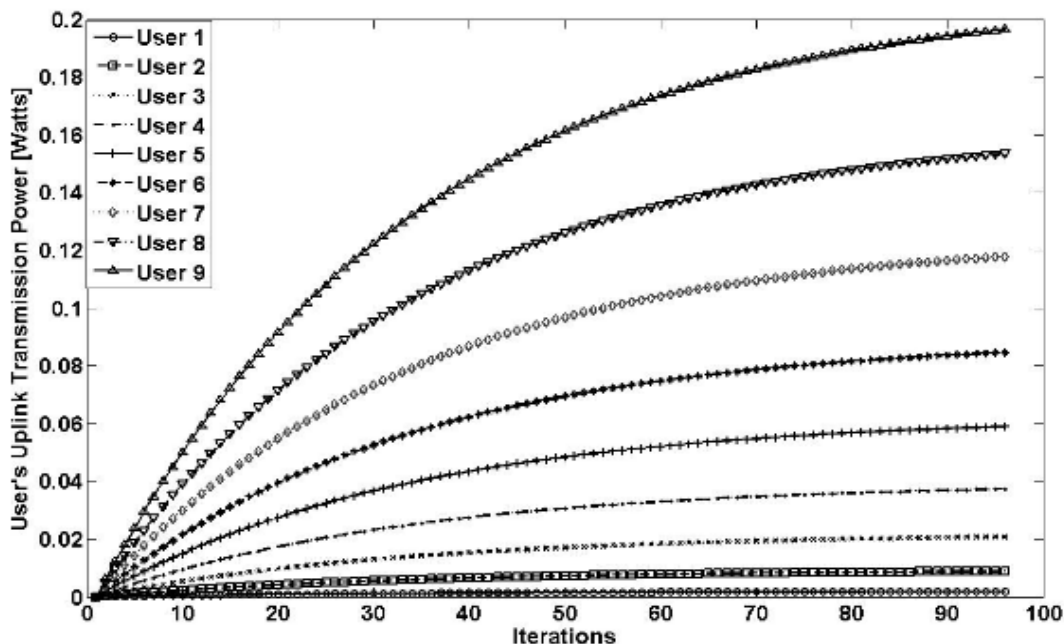


Σχήμα 17: Ευχαρίστηση των χρηστών στο σημείο ισορροπίας για το JUPRA παίγνιο.

Από το ανωτέρω σχήμα επιβεβαιώνεται η αξίωση ότι οι χρήστες εγγύτερα του σταθμού βάσης απολαμβάνουν καλύτερων συνθηκών μετάδοσης των δεδομένων και καλύτερη ποιότητα υπηρεσιών. Ενδεικτικά ο χρήστης που είναι στην μικρότερη απόσταση έχει εντυπωσιακά μεγαλύτερη τιμή ευχαρίστησης σε σχέση με τους υπόλοιπους χρήστες. Ακολουθώντας, όσο αυξάνει η απόσταση η ευχαρίστηση των χρηστών συρρικνώνεται με συνέπεια οι τελευταίοι χρήστες να έχουν πολύ μικρότερη ικανοποίηση από την υπηρεσία που τους εξυπηρετεί σε σχέση με τους 2 ή 3 πρώτους χρήστες.

Ένα ακόμα ιδιαίτερα σημαντικό στοιχείο το οποίο πρέπει να επισημανθεί καθώς αποτελεί βασικό κριτήριο για την αποτελεσματικότητα και την εγκυρότητα του αλγορίθμου που χρησιμοποιείται, είναι ο αριθμός των επαναλήψεων που απαιτούνται προκειμένου από ένα αρχικό σημείο έναρξης να καταλήξουμε στο τελικό σημείο ισορροπίας για όλους τους χρήστες του συστήματος.

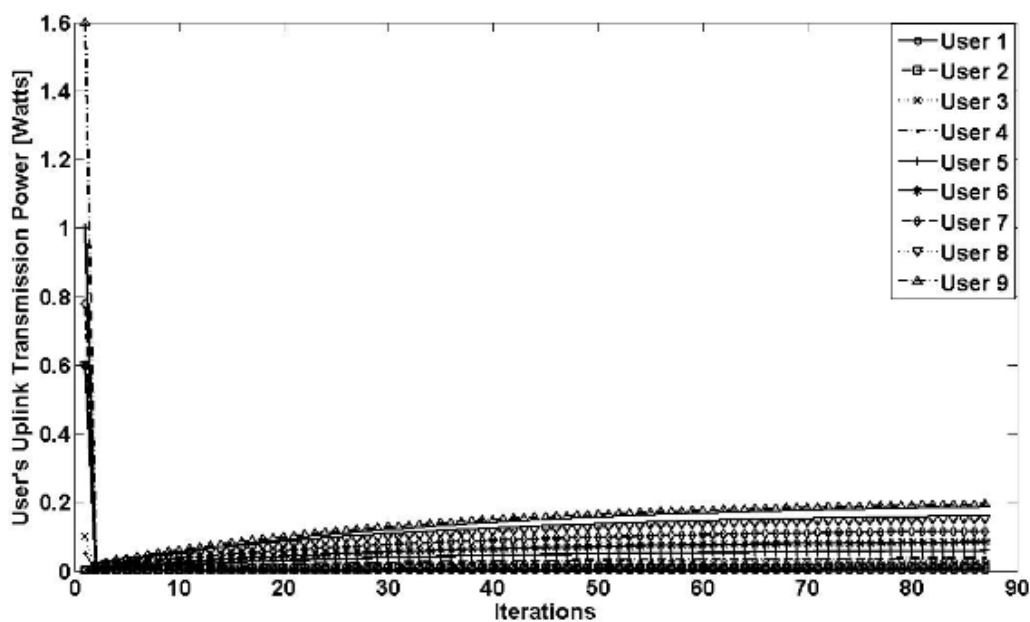
Ο αλγόριθμος ο οποίος χρησιμοποιούμε βασίζεται στην επαναληπτική δομή προκειμένου να τερματίσει την εκτέλεσή του στο ζητούμενο σημείο ισορροπίας κατά Nash, έχοντας ως κριτήριο την σύγκλιση των παραμέτρων σε μία δεδομένη τιμή. Ζητούμενο όμως είναι η προσομοίωση του δοσμένου αλγορίθμου να μην απορροφά πολλούς υπολογιστικούς πόρους κατά την εκτέλεση της. Για τον λόγο αυτό ο αλγόριθμος πρέπει είναι χαμηλής πολυπλοκότητας, όπως φαίνεται και από το ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 18: Αριθμός επαναλήψεων του JUPRA αλγορίθμου για την σύγκλιση στο τελικό διάνυσμα της ισχύος.

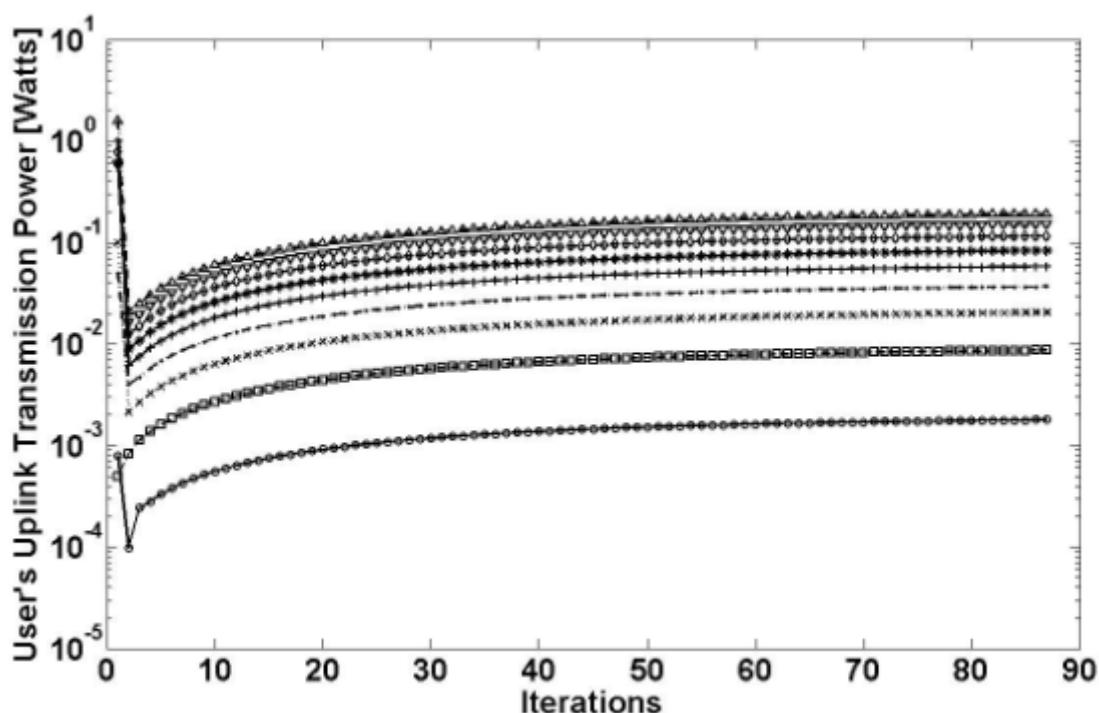
Από το παραπάνω, συμπεραίνουμε ότι πράγματι ο αλγόριθμος μας κατορθώνει ύστερα από σχετικά μικρό αριθμό επαναλήψεων (μικρότερος των 100) να συγκλίνει στο σημείο ισορροπίας από ένα κοινό σημείο εκκίνησης για όλους τους χρήστες.

Διερευνώντας σε μεγαλύτερο βάθος την διαδικασία σύγκλισης του αλγορίθμου, μπορούμε να επιβεβαιώσουμε ότι ο εν λόγω αλγόριθμος για το JUPRA παίγνιο καταλήγει στο ίδιο σημείο ισορροπίας κατά Nash, για ένα οποιοδήποτε αρχικό σημείο, ακόμη και διαφορετικό για τον εκάστοτε χρήστη, όπως φαίνεται στο σχήμα:



Σχήμα 19: Σύγκλιση του JUPRA αλγορίθμου στο τελικό διάνυσμα της ισχύος με τυχαίο σημείο εκκίνησης.

Μάλιστα παρατηρούμε ότι όχι μόνο η σύγκλιση επιτυγχάνεται και αυτήν την φορά, αλλά και με μικρότερο αριθμό επαναλήψεων σε σχέση αμέσως νωρίτερα (περίπου στις 40 επαναλήψεις έχουν σε μεγάλο βαθμό προσεγγισθεί οι τελικές τιμές). Συμπληρωματικά, μπορούμε να παρουσιάσουμε το σχήμα 19 έχοντας τον άξονα γ της ισχύος εκπομπής των χρηστών σε λογαριθμικό άξονα, ώστε να δηλωθεί πιο έντονα η έκβαση της προσομοίωσης στο μοναδικό σημείο ισορροπίας από ένα οποιοδήποτε τυχαίο αρχικό σημείο εκκίνησης για τον κάθε χρήστη, αλλά και να τονιστεί η διαφορά στην τάξη μεγέθους της ισχύος που εκπέμπουν οι χρήστες εντός της κυνέλης



Σχήμα 20: Σύγκλιση της ισχύος εκπομπής των χρηστών υπό τον JUPRA αλγόριθμο.

5.3.2

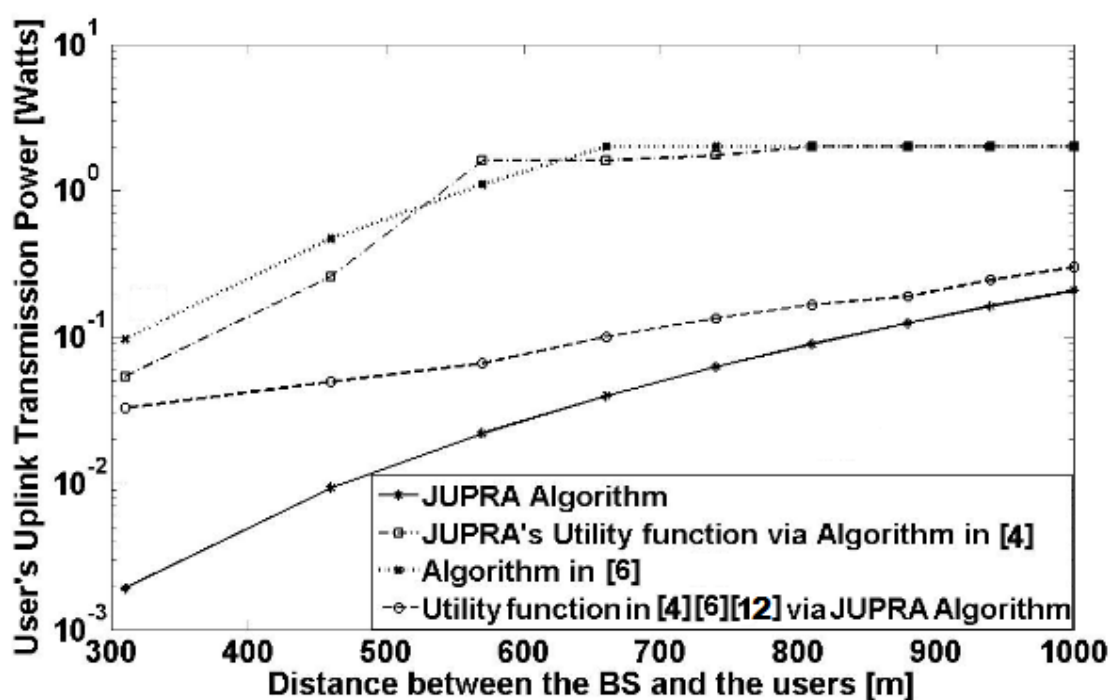
Συγκρίσεις με την Βιβλιογραφία

Όπως έχουμε αναφέρει, μία συγκριτική ανάλυση του αλγορίθμου υλοποίησης του μη συνεργατικού παιγνίου με ανάλογες θεωρήσεις επί του θέματος από την βιβλιογραφία μπορεί να μας βοηθήσει να αξιολογήσουμε καλύτερα τα μέχρι τώρα αποτελέσματά μας, αλλά και την πρόοδο που έχει συντελεστεί στην βέλτιστη αντιμετώπιση του προβλήματος κατανομής.

Τα βασικά σενάρια προσομοιώσεων που θα εξετασθούν είναι ο αλγόριθμος “JUPRA” που χρησιμοποιούμε στην παρούσα διπλωματική εργασία, ο αλγόριθμος

υλοποίησης που χρησιμοποιείται στο [4] ενσωματώνοντας σε αυτόν την συνάρτηση ευχαρίστησης από την σχέση 3.5 που χρησιμοποιούμε στην δική μας έρευνα, ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται στο [6] και τέλος ο αλγόριθμος JUPRA έχοντας αντικαταστήσει την συνάρτηση ευχαρίστησης που εμείς εισάγαμε με την συνάρτηση ευχαρίστησης που χρησιμοποιείται στα [4], [6] και [12]. Σε όλες τις περιπτώσεις οι συνθήκες του καναλιού του κάθε χρήστη επιδεινώνονται με την αύξηση της απόστασης από τον σταθμό βάσης, με συνέπεια την αύξηση των επιπέδων της ισχύος εκπομπής και την πτώση των λαμβανόμενων ρυθμών μετάδοσης για τους πιο απομακρυσμένους χρήστες.

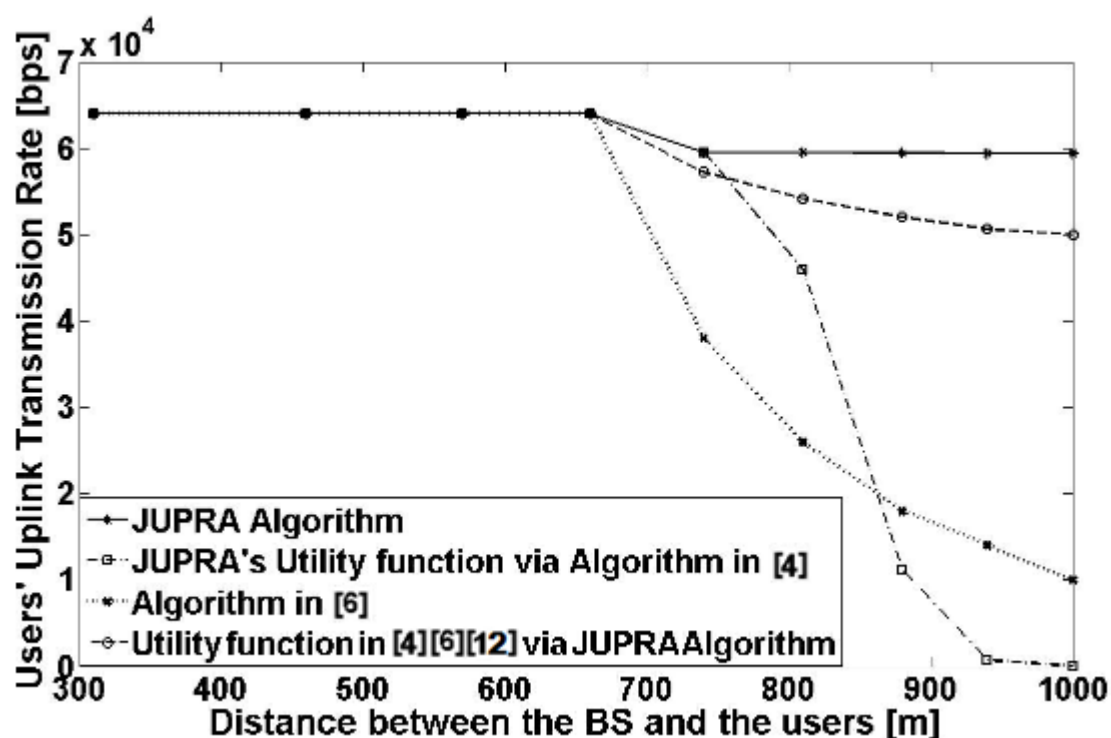
Εξετάζοντας τη βασική παράμετρο προς κατανομή, δηλαδή την ισχύ εκπομπής των χρηστών του συστήματος για όλες τις ανωτέρω περιπτώσεις έχουμε το ακόλουθο διάγραμμα:



Σχήμα 21: Ισχύς εκπομπής των χρηστών στην κατάσταση ισορροπίας υπό διαφορετικά σενάρια προσομοίωσης.

Παρατηρώντας διεξοδικά το παραπάνω σχήμα, διαπιστώνουμε ότι ο αλγόριθμος για την συνδυαστική κατανομή της ισχύος και του ρυθμού μετάδοσης στην άνω ζεύξη (JUPRA Algorithm) είναι αυτός ο οποίος επιτυγχάνει την εκπομπή των χρηστών στα χαμηλότερα δυνατά επίπεδα ισχύος, σε μερικές περιπτώσεις μάλιστα τάξη μεγέθους κατώτερα από τις άλλες προσεγγίσεις. Το όφελος που προκύπτει για τους χρήστες στην εξοικονόμηση ισχύος και στην ικανοποίηση των χρηστών ως προς την ποιότητα της λαμβανόμενης υπηρεσίας έγκειται στην ταυτόχρονη κατανομή της ισχύος και του ρυθμού μετάδοσης των χρηστών στο ίδιο βήμα επανάληψης κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου, θεωρώντας το πρόβλημα της κατανομής αυστηρά για δύο μεταβλητές.

Αντίστοιχα, για την άλλη βασική παράμετρο κατανομής, δηλαδή το ρυθμό μετάδοσης των χρηστών, συγκεντρωτικά για όλες τις περιπτώσεις έχουμε το ακόλουθο διάγραμμα:



Σχήμα 22: Ρυθμός Μετάδοσης των χρηστών στην κατάσταση ισορροπίας υπό διαφορετικά σενάρια προσομοίωσης

Και για το ρυθμό μετάδοσης των χρηστών είναι εμφανές ότι ο αλγόριθμος που μεταχειριζόμαστε στην παρούσα έρευνα είναι εκείνος ο οποίος κατορθώνει να διατηρήσει τα καλύτερα δυνατά επίπεδα για τον τελικό ρυθμό μετάδοσης. Σε όλες τις περιπτώσεις οι πρώτοι χρήστες μεταδίδουν τα δεδομένα τους με τον μέγιστο εφικτό ρυθμό μετάδοσης (64 kbps) εφόσον πρόκειται για χρήστες υπηρεσιών πραγματικού χρόνου, ωστόσο σε όλες τις άλλες προσεγγίσεις πλην του JUPRA, αλγορίθμου ο ρυθμός μετάδοσης μειώνεται και σε μερικές περιπτώσεις σχεδόν μηδενίζεται, με ανάλογες συνέπειες στον βαθμό ικανοποίησης των χρηστών.

Ιδιαίτερα σπουδαία παρατήρηση η οποία αναδεικνύει την αποτελεσματικότητα του JUPRA αλγορίθμου, είναι ότι ακόμη και αντικαθιστώντας την μορφή της συνάρτησης ευχαρίστησης που επιλέχθηκε για την τρέχουσα εργασία με την συνάρτηση ευχαρίστησης που προτείνεται στα [4], [6] και [12], τα τελικά αποτελέσματα και για την ισχύ και για τον ρυθμό μετάδοσης (δηλαδή με άλλα λόγια το σημείο ισορροπίας κατά Nash) είναι τα δεύτερα κατά σειρά καλύτερα αποτελέσματα – υποδεέστερα όμως συγκριτικά με την αρχικά χρησιμοποιούμενη συνάρτηση ευχαρίστησης. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει ότι η συνάρτηση ευχαρίστησης της σχέσης 3.5 αναπαριστά πιο αποδοτικά τις απαιτήσεις των χρηστών για την ποιότητα των υπηρεσιών (users' QoS requirements) και για τον λόγο αυτό αρκεί χαμηλότερη τιμή ισχύος για την επίτευξη υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης.

Από την άλλη, ο αλγόριθμος ο οποίος χρησιμοποιείται στο [6] και ο αντίστοιχος αλγόριθμος που προτείνεται στο [4] και για τον οποίο έχουμε αντικαταστήσει την συνάρτηση ευχαρίστησης της τρέχουσας μελέτης, είναι εμφανές ότι δεν κατορθώνουν να ανταποκριθούν εξίσου αποτελεσματικά στις προδιαγραφές του συστήματος, καθώς τα επίπεδα ισχύος εκπομπής των χρηστών είναι αισθητά υψηλότερα ενώ για τον ρυθμό μετάδοσης οι τελευταίοι χρήστες πρακτικά δεν εξυπηρετούνται καθώς η τιμή που τελικώς επιτυγχάνεται είναι κατά πολύ μικρότερη από τα όρια του αποδεκτού για την λήψη της υπηρεσίας.

5.4

Προσομοίωση Κατανομής Ισχύος και Ρυθμού Μετάδοσης με Πολιτική Κοστολόγησης

Η αναγκαιότητα εισαγωγής κάποιας μορφής κοστολόγησης στο σύστημά μας, αλλά και το πλήθος των ωφελειών που προκύπτουν για το ασύρματο δίκτυό μας συνολικά και για τον κάθε χρήστη μεμονωμένα από τους μηχανισμούς αυτούς, έχει περιγραφεί διεξοδικά σε προηγούμενες ενότητες της τρέχουσας διπλωματικής εργασίας. Σε αυτό το σημείο συγκεντρωτικά, μπορούμε να παρουσιάσουμε τα βασικά αποτελέσματα που προέκυψαν για την ισχύ εκπομπής και τον ρυθμό μετάδοσης τόσο μεταξύ των διαφορετικών προσεγγίσεων εντός της δικής μας μελέτης όσο και με αντίστοιχη έρευνα από τις διαθέσιμες δημοσιεύσεις της βιβλιογραφίας.

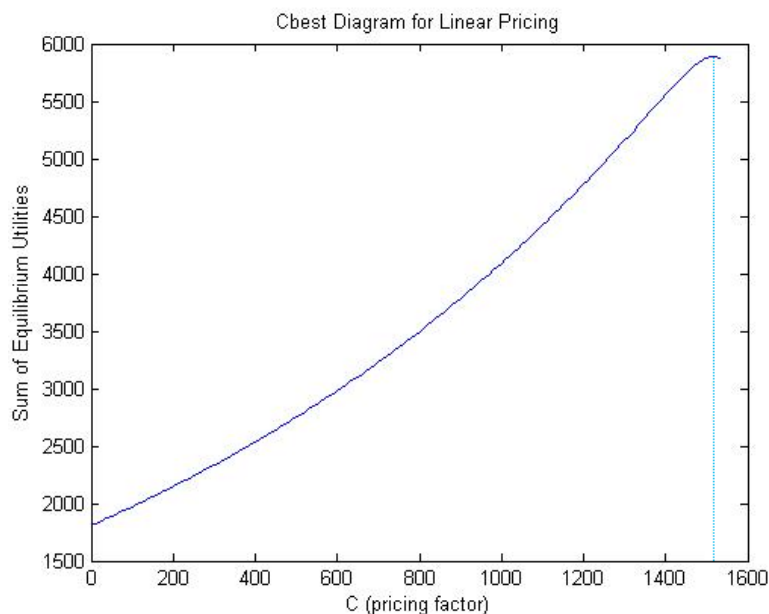
5.4.1

Αριθμητικά Αποτελέσματα – Συγκρίσεις

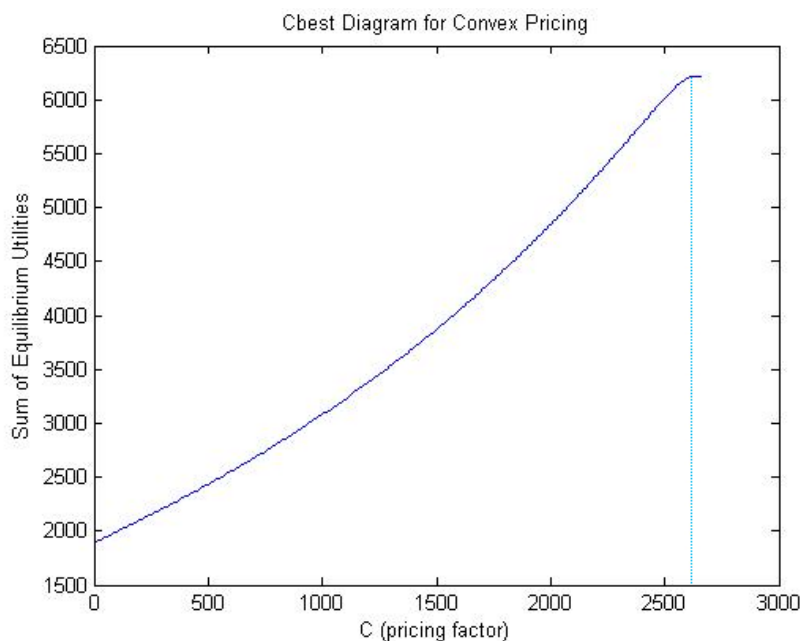
Στην τρέχουσα διπλωματική εργασία, όπως έχει γίνει γνωστό υιοθετήθηκαν δύο βασικοί μηχανισμοί κοστολόγησης, ο πρώτος με κοστολόγηση γραμμικής μορφής και

ο δεύτερος με κυρτή κοστολόγηση ως προς την ισχύ εκπομπής. Θεμελιώδης παράγοντας για την ορθή δόμηση και απόδοση των μηχανισμών αυτών αποτελεί ο συντελεστής κοστολόγησης (pricing factor) c_i ο οποίος καθορίζεται κεντρικά από τον διαχειριστή του συστήματος. Η κατάλληλη επιλογή της τιμής του συντελεστή αυτού σχετικά με το μέγεθος των κυρώσεων προς τους χρήστες έχει ως συνέπεια την δραματική μείωση της ισχύος που εκπέμπεται και συνοδεύεται από μείωση των παρεμβολών και βελτίωση των παρεχόμενων υπηρεσιών εντός του ασύρματου δικτύου. Ακόλουθα παρουσιάζουμε τα διαγράμματα που αφορούν την επιλογή της

βέλτιστης τιμής του παράγοντα κοστολόγησης για τα δύο παίγνια που υλοποιήσαμε (με γραμμικό κόστος – JUPRA LP Game – και με κυρτό κόστος – JUPRA CP Game).



Σχήμα 23: Βέλτιστος παράγοντας c_{best} για το JUPRA – LP παίγνιο.

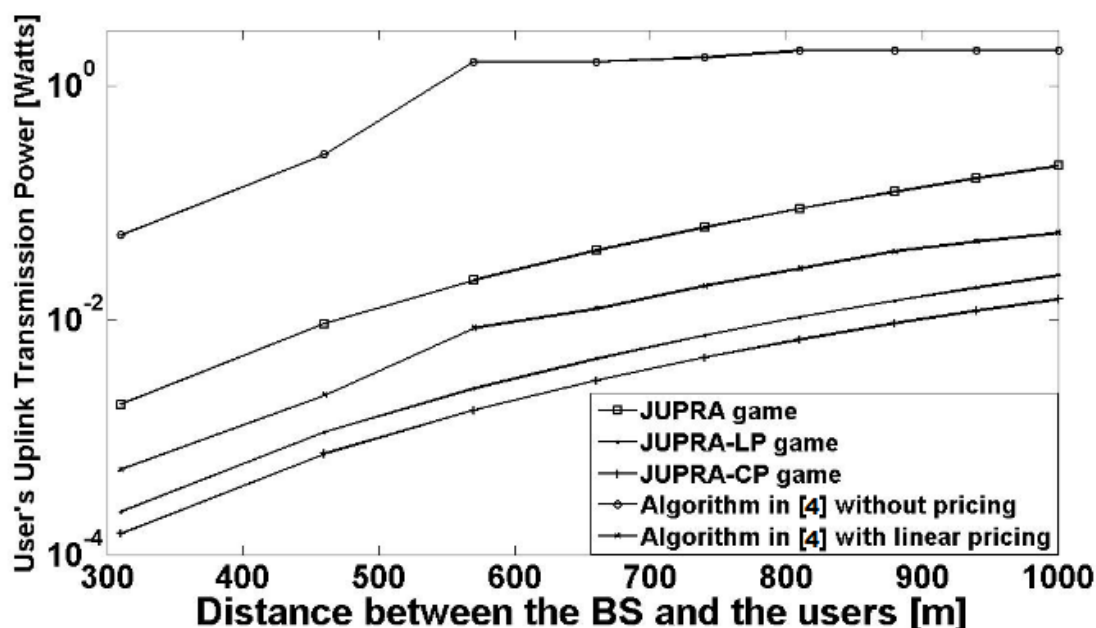


Σχήμα 24: Βέλτιστος παράγοντας c_{best} για το JUPRA – CP παίγνιο.

Τα γραφήματα αυτά παρουσιάζουν τη βασική λογική που συνοψιζόταν στον αλγόριθμο υλοποίησης του μη συνεργατικού παιγνίου με κοστολόγηση (JUPRA – P Algorithm), δηλαδή ο παράγοντας κοστολόγησης προσ αυξάνεται κατά μία τιμή Δc , μέχρι την στιγμή που η τιμή της συνάρτησης ευχαρίστησης των χρηστών σταματήσει να αυξάνεται (και κατ' επέκταση το άθροισμα των συναρτήσεων χρησιμότητας όπως χρησιμοποιείται και στα διαγράμματα).

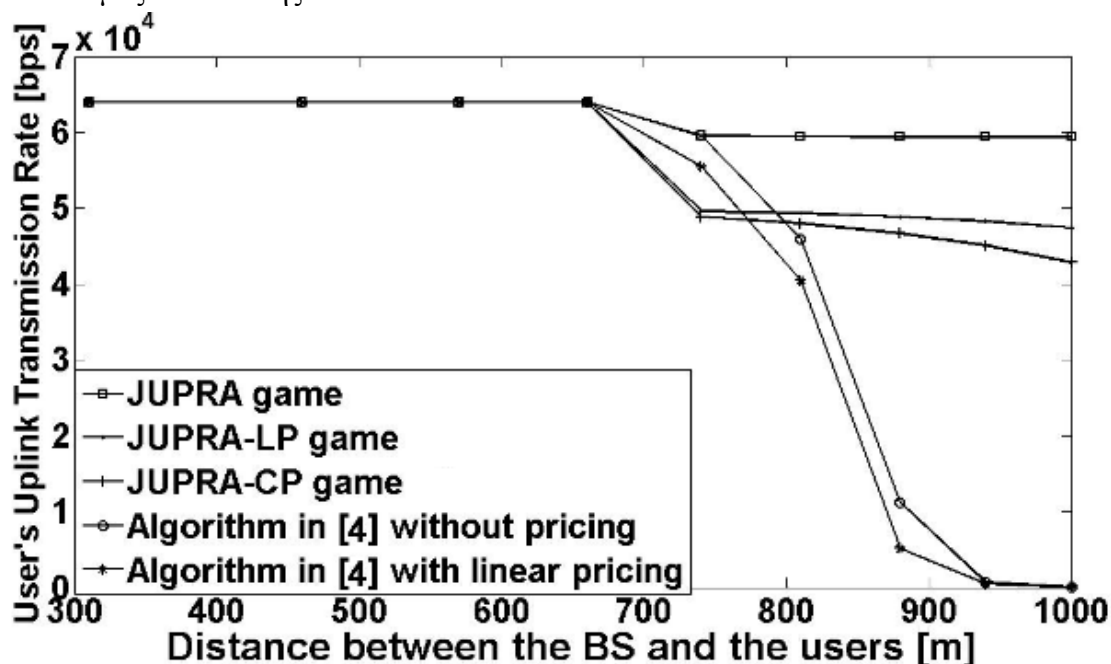
Για λόγους καλύτερης κατανόησης και παρουσίασης των εξαγομένων, εκθέτουμε τα αριθμητικά αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις και για τα δύο παίγνια με χρήση κοστολόγησης στα ίδια διαγράμματα για την ισχύ εκπομπής και για τον ρυθμό μετάδοσης. Επιπλέον εντός των ανωτέρω διαγραμμάτων περικλείουμε συγκριτικά και τα αποτελέσματα από το παίγνιο χωρίς κοστολόγηση, αλλά και τα αποτελέσματα των P. Zhou, W. Liu, W Yuan, W Cheng, από το [4] της προτεινόμενης βιβλιογραφίας.

- Ισχύς Εκπομπής:



Σχήμα 25: Μέση ισχύς εκπομπής των χρηστών στην άνω ζεύξη στην κατάσταση ισορροπίας υπό διαφορετικά σενάρια εκτέλεσης.

- Ρυθμός Μετάδοσης



Σχήμα 26: Μέσος ρυθμός μετάδοσης των χρηστών στην άνω ζεύξη στην κατάσταση ισορροπίας υπό διαφορετικά σενάρια εκτέλεσης

Από τα παραπάνω γραφήματα μπορούμε πλέον να αποκτήσουμε μία συνολική εικόνα των μεταβολών που αφορούν την κατανομή των πόρων του δικτύου και την βελτίωση της απόδοσης του συστήματος. Τα σχήματα 25 και 26 αντίστοιχα απεικονίζουν για κάθε έναν από τους 9 χρήστες του συστήματος την μέση ισχύ και τον μέσο ρυθμό μετάδοσης στην άνω ζεύξη ως συνάρτηση της απόστασής τους από τον σταθμό βάσης. Στα διαγράμματα συνοψίζονται 5 διαφορετικά σενάρια προσομοιώσεων:

- a) Το μη συνεργατικό παίγνιο χωρίς πολιτική κοστολόγησης (JUPRA Game).
- b) Το μη συνεργατικό παίγνιο με χρήση γραμμικής κοστολόγησης (JUPRA – LP Game).
- c) Το μη συνεργατικό παίγνιο με χρήση μη γραμμικής/κυρτής κοστολόγησης (JUPRA – CP Game).
- d) Ο αλγόριθμος στο [4] χωρίς πολιτική κοστολόγησης (ENRPG algorithm).
- e) Ο αλγόριθμος στο [4] με χρήση γραμμικής κοστολόγησης (ENRPGP algorithm).

Στο [4] οι συγγραφείς προσπαθούν να αντιμετωπίσουν το πρόβλημα της κατανομής ισχύος και ρυθμού μετάδοσης στην άνω ζεύξη ενός ασυρμάτου δικτύου επιλέγοντας αρχικά να επιλύσουν το πρόβλημα κατανομής για τον ρυθμό μετάδοσης μόνο και έπειτα ξεχωριστά κατανέμεται στους χρήστες η ισχύς εκπομπής. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την έρευνα αυτή είναι σε κάποιο βαθμό όμοια με τα αντίστοιχα αποτελέσματα από το [6], όπου και εκεί οι συγγραφείς υιοθετούν γραμμική κοστολόγηση για την ισχύ εκπομπής των χρηστών.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του JUPRA παιγνίου που προσομοιώθηκε στην διπλωματική αυτή εργασία με εκείνα του αλγορίθμου από το [4] χωρίς κοστολόγηση της ισχύος, διαπιστώνουμε ότι η επίλυση που προκύπτει για το πρώτο επιφέρει σημαντική βελτίωση ως προς τον ρυθμό μετάδοσης των χρηστών, καθώς όλοι κατορθώνουν να εξυπηρετηθούν ικανοποιητικά για τις υπηρεσίες πραγματικού χρόνου που παρέχονται, σε αντίθεση με τον ρυθμό μετάδοσης στο [4], όπου συρρικνώνεται σημαντικά με την αύξηση της απόστασης και πρακτικά μηδενίζεται για τους τελευταίους χρήστες (άρα δεν επιτυγχάνεται η λήψη της υπηρεσίας φωνής). Παράλληλα σημειώνεται αισθητή μείωση και στην κατανάλωση ισχύος για όλους τους χρήστες του JUPRA παιγνίου σε σχέση με τον αλγόριθμο στο [4], με ανάλογα συμπεράσματα για τον περιορισμό των παρεμβολών και την ποιότητα των υπηρεσιών εντός της κυψέλης.

Ο λόγος της σημαντικής βελτίωσης που επιφέρει στην απόδοση του δικτύου ο JUPRA αλγόριθμος είναι διττός. Αρχικά ο σχηματισμός της κατάλληλης συνάρτησης ευχαρίστησης η οποία λαμβάνει υπόψη τις πραγματικές απαιτήσεις των χρηστών για την ποιότητα της υπηρεσίας και κατά δεύτερον η πραγματική ταυτόχρονη κατανομή της ισχύος και του ρυθμού μετάδοσης στο ίδιο βήμα της επαναληπτικής δομής του εν λόγω αλγορίθμου. Η ταυτόχρονη αυτή κατανομή επιτυγχάνεται λόγω της επίλυσής της ως ένα πρόβλημα δύο μεταβλητών αντί να θεωρηθεί ως ένα μονοπαραμετρικό πρόβλημα βελτιστοποίησης στο οποίο αντικαθιστούμε κάθε φορά την μεταβλητή της οποίας επιθυμούμε την κατανομή.

Συγκρίνοντας σε αυτό το σημείο τα αποτελέσματα για τις τρεις υλοποιήσεις που προσομοιώθηκαν, με την βοήθεια των διαγραμμάτων παρατηρούμε κατά πρώτο λόγο ότι πράγματι η εφαρμογή πολιτικών κοστολόγησης επιφέρει μείωση στην ισχύ εκπομπής των χρηστών ωθώντας τους να συμβιβαστούν σε ένα περισσότερο αποδοτικό και σταθερό σημείο ισορροπίας. Ο ρυθμός μετάδοσης υφίσταται μείωση για μεγάλη από τον σταθμό βάσης λόγω της περιορισμένης ισχύος που εκπέμπουν οι χρήστες από την επιβολή των κυρώσεων, ωστόσο διαπιστώνουμε ότι η μείωση αυτή δεν είναι τόσο έντονη ώστε η αξιοποίηση της υπηρεσίας πραγματικού χρόνου να καταστεί ανώφελη. Με βάση λοιπόν τα παραπάνω επιβεβαιώνεται και πειραματικά η θέση για την ανάγκη χρήσης πολιτικών κοστολόγησης εξαιτίας του θετικού τρόπου που επιδρά στο σύστημα και στους χρήστες.

Μελετώντας πιο αναλυτικά τις δύο μορφές κοστολόγησης, συμπεραίνουμε ότι και οι δύο αρχικώς βελτιώνουν σημαντικά την λειτουργία του ασυρμάτου δικτύου, όμως η κυρτή κοστολόγηση κατορθώνει σύμφωνα με τα αποτελέσματα που εξήχθησαν να ανταποκριθεί πιο αποδοτικά στις απαιτήσεις τόσο των χρηστών όσο και του ιδίου του συστήματος. Αρχικά παρατηρούμε ότι η ισχύς εκπομπής μειώνεται περεταίρω σε σχέση με την πολιτική γραμμικής κοστολόγησης της ισχύος για όλους τους χρήστες, αναδεικνύοντας μία κοινωνικότερη διάσταση στην αντιμετώπιση του προβλήματος κατανομής, καθώς κάθε χρήστης, είτε βρίσκεται κοντά είτε βρίσκεται μακριά από τον σταθμό βάσης μειώνει την ισχύ του ώστε να μην ζημιώνει τους γείτονες του στην προσπάθεια και αυτών να μεταδώσουν αποδοτικά τα δεδομένα τους. Επιπλέον, παρά την νέα μείωση της ισχύος ο ρυθμός μετάδοσης για τους πρώτους τοπολογικά χρήστες δεν μειώνεται, ενώ για τους πλέον απομακρυσμένους η μείωση του ρυθμού μετάδοσης σε σχέση με το γραμμικό σύστημα συρρικνώνεται ελάχιστα (το πολύ 5 με 6 *kbps*) και ως εκ τούτου η αλλοίωση της παρεχόμενης υπηρεσίας δεν κρίνεται σημαντική.

Εν κατακλείδι, συγκρίνοντας τα παίγνια με κοστολόγηση JUPRA – LP και JUPRA – CP με το αντίστοιχο παίγνιο με γραμμική κοστολόγηση (ENRPGP) από το [4], παρατηρούμε ότι και στις δύο περιπτώσεις η ισχύς εκπομπής πράγματι προκύπτει μειωμένη, ενώ ο ρυθμός μετάδοσης όπως αναφέραμε και πριν συγκρατείται άνω ενός αποδεκτού κατώτατου ορίου, σε αντίθεση με τα ENRPG και ENRPGP παίγνια που ο ρυθμός μετάδοσης καταρρέει υπό την πίεση των κυρώσεων για την μείωση της ισχύος. Οφείλουμε ωστόσο να τονίσουμε ότι για τις δύο προσεγγίσεις που διερευνήθηκαν από τους συγγραφείς στο [4], το παίγνιο με γραμμική κοστολόγηση επιτυγχάνει την ζητούμενη μείωση της ισχύος αλλά και μία ανεπαίσθητη βελτίωση στον ρυθμό μετάδοσης σε σχέση με το παίγνιο χωρίς κοστολόγηση.

Σημαντικό είναι να επισημανθεί ότι η τιμή της συνάρτησης ευχαρίστησης για το τελικό σημείο ισορροπίας κατά Nash, παρά το γεγονός ότι αποτελεί βασική παράμετρος για την αξιολόγηση της ικανοποίησης των χρηστών, και για την βελτιστοποίηση που επιφέρουν οι μηχανισμοί κοστολόγησης, αποτελεί αποκλειστικό χαρακτηριστικό του κάθε παιγνίου. Για τον λόγο αυτό η σύγκρισή της τόσο για τις τρεις εκδοχές μη συνεργατικών παιγνίων εντός της παρούσας έρευνας όσο και με την βιβλιογραφία δεν μπορεί να θεωρηθεί ως αξιόπιστο μέγεθος για την τελική εκτίμηση

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

των αποτελεσμάτων μας, σε αντίθεση με την εκπεμπόμενη ισχύ και τον ρυθμό μετάδοσης των οποίων οι τιμές είναι καθολικά έγκυρες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

ΕΠΙΛΟΓΟΣ

- 6.1. Επίλογος**
- 6.2. Μελλοντική Εργασία**

Επίλογος

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε το πρόβλημα της βέλτιστης συνδυαστικής κατανομής ισχύος και ρυθμού μετάδοσης στην άνω ζεύξη ασυρμάτων μονοκυψελωτών δικτύων υψηλών ταχυτήτων. Καταλυτικός παράγοντας για την υλοποίηση της έρευνας αυτής αποτέλεσαν η χρήση των αρχών του κλάδου της Θεωρίας Παιγνίων και η εισαγωγή από τον τομέα των Οικονομικών Επιστημών της έννοιας της Συνάρτησης Ευχαρίστησης. Οι παραδοχές αυτές επέτρεψαν την διατύπωση των διαφόρων περιπτώσεων των προβλημάτων κατανομής που μας απασχόλησαν ως μη συνεργατικά παίγνια, των οποίων η σύγκλιση σε ένα μοναδικό σημείο ισορροπίας κατά Nash επιβεβαιώθηκε τόσο μαθηματικά όσο και πρακτικά μέσω της προσομοίωσης των αλγορίθμων που διατυπώθηκαν. Σε τελικό στάδιο τα εξαγόμενα αποτελέσματα συγκρίθηκαν τόσο μεταξύ τους όσο και με την διαθέσιμη βιβλιογραφία.

Η Θεωρία Παιγνίων μοντελοποιεί στρατηγικές καταστάσεις (υπό την μορφή παιγνίων) στις οποίες το σύνολο των αποφάσεων που ένας «παίκτης» καλείται να λάβει εξαρτάται άμεσα από τις πολιτικές που ακολουθούν οι υπόλοιποι «παίκτες». Ζητούμενο είναι η κατάληξη σε μία κατάσταση ισορροπίας στην οποία κάθε χρήστης υιοθετεί μία στρατηγική με βάση την οποία δεν μπορεί να βελτιώσει περεταίρω το τελικό εξαγόμενο αποτέλεσμα ανεξάρτητα από τους υπόλοιπους. Το σύνολο αυτών των αρχών εφαρμόστηκε απόλυτα στο πρόβλημα κατανομής που μας απασχόλησε.

Η συνάρτηση ευχαρίστησης εξέφρασε τον βαθμό ικανοποίησης των χρηστών από την ποιότητα των λαμβανόμενων υπηρεσιών εντός του ασύρματου περιβάλλοντος. Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης, προτιμήθηκε οι υπηρεσίες αυτές να αφορούν εφαρμογές πραγματικού χρόνου – π.χ. μετάδοση φωνής, video κλπ – (χωρίς αυτό να σημαίνει ότι δεν θα ήταν δυνατή η χρήση υπηρεσιών μη πραγματικού χρόνου). Η συνάρτηση ευχαρίστησης εκφράστηκε με τέτοιο τρόπο ώστε όχι μόνο να δηλώνει την ικανοποίηση των χρηστών, αλλά και να προσαρμόζεται στις απαιτήσεις του καθενός για το είδος και την ποιότητα της υπηρεσίας.

Κομβικό σημείο στη διεξοδική μελέτη του προβλήματος κατανομής αποτέλεσε η εισαγωγή μηχανισμών κοστολόγησης των πόρων του δικτύου που καταναλώνουν οι χρήστες, ως μέσο για την συμμόρφωση τους σε μία πιο κοινωνική συμπεριφορά, μειώνοντας την βλάβη που προκαλούν στους υπόλοιπους χρήστες εξαιτίας του έντονου ανταγωνισμού που έως τώρα επικρατούσε εντός της κυψέλης του δικτύου. Η συνάρτηση ευχαρίστησης εκφράζεται εκ νέου ως συνάρτηση καθαρής ευχαρίστησης για να ληφθεί υπόψη το κόστος στον κάθε χρήστη και με αυτόν τον τρόπο, πέρα από το μη συνεργατικό παίγνιο χωρίς πολιτική κοστολόγησης που αρχικώς διατυπώθηκε (“JUPRA Non Cooperative Game”) ως μία πρώτη απόπειρα επίλυσης του προβλήματος κατανομής, εκτέθηκαν δύο νέα παίγνια τα οποία χρησιμοποιούν διαφορετικούς μηχανισμούς κοστολόγησης. Προέκυψε λοιπόν ένα παίγνιο με χρήση

γραμμικής κοστολόγησης της ισχύος εκπομπής (“JUPRA Non Cooperative Game with Linear Pricing”) και ένα παίγνιο με χρήση μη γραμμικής (κυρτής) κοστολόγησης της ισχύος (“JUPRA Non Cooperative Game with Convex Pricing”), ως μία πιο πραγματολογική εξέλιξη της γραμμικής κοστολόγησης. Για κάθε παίγνιο αποδεικνύεται η σύγκλιση σε ένα μοναδικό σημείο ισορροπίας κατά Nash, ενώ επιβεβαιώνεται και η Pareto βέλτιστη λύση των παιγνίων με κοστολόγηση σε σχέση με το παίγνιο χωρίς κοστολόγηση. Επίσης, για κάθε περίπτωση παρουσιάστηκαν επαναληπτικοί και μη κατανεμημένοι αλγόριθμοι (JUPRA and JUPRA-P algorithms) των οποίων η εκτέλεση προσδιορίζει το σημείο ισορροπίας που αναζητείται.

Σε τελικό στάδιο, οι αλγόριθμοι υλοποίησης που αναφέρθηκαν, προσομοιώθηκαν πειραματικά ώστε να επιβεβαιωθεί η αποδοτικότητά τους αλλά και για να συμπληρωθούν και πρακτικά τα θεωρητικά αποτελέσματα που προηγήθηκαν. Τα εξαγόμενα από κάθε περίπτωση συγκρίθηκαν μεταξύ τους και πράγματι διαπιστώθηκε τόσο αρχικά η αποδοτική συνδυαστική κατανομή της ισχύος εκπομπής και του ρυθμού μετάδοσης από το παίγνιο χωρίς κοστολόγηση όσο και η ουσιαστική βελτίωση που επιφέρει η επίλυση του προβλήματος με κοστολόγηση, με την κυρτή κοστολόγηση να υπερτερεί (και πειραματικά) της γραμμικής. Το σύνολο της έρευνάς μας συγκρίθηκε με διαθέσιμες αντίστοιχες μελέτες από την βιβλιογραφία επικυρώνοντας την ορθότητα των αποτελεσμάτων μας, αλλά και αναδεικνύοντας τα πλεονεκτήματά της προσέγγισής που ακολουθήθηκε.

Τα συμπεράσματα στα οποία μπορούμε να καταλήξουμε αφορούν την ανταλλαγή που εντοπίζεται μεταξύ του βαθμού ικανοποίησης των χρηστών, της κατανάλωσης ισχύος, του επιτυγχανόμενου ρυθμού μετάδοσης και των παρεμβολών εντός της κυψέλης για την ορθή κατανομή των πόρων του συστήματος. Παράλληλα διαπιστώθηκε η ουσιαστική αναβάθμιση της απόδοσης του δικτύου, λόγω της πραγματικής ταυτόχρονης ανάθεσης τιμών στην ισχύ και τον ρυθμό μετάδοσης που υπαγορεύεται από τους αλγορίθμους που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και της νέας πιο σύνθετης έκφρασης της συνάρτησης ευχαρίστησης που επιλέχθηκε.

6.2

Μελλοντική Εργασία

Η εργασία αυτή αποτελεί τμήμα ενός ευρύτερου πλαισίου ερευνών σχετικά με την βελτιστοποίηση της κατανομής πόρων σε ασύρματα περιβάλλοντα μετάδοσης δεδομένων. Η προσπάθεια για την καλύτερη δυνατή αντιμετώπιση του προβλήματος φυσικά και δεν σταματά εδώ, καθώς η διαρκής εξέλιξη των τεχνολογικών μέσων μεταβάλλει συνεχώς τα έως τώρα γνωστά δεδομένα και ταυτόχρονα οι ανάγκες των χρηστών δεν παραμένουν στατικές αλλά προσαρμόζονται στις νέες συνθήκες που διαμορφώνονται σε κάθε τομέα της ανθρώπινης δραστηριότητας.

Στηριζόμενοι γενικότερα στην έρευνα αυτή, θα μπορούσαμε να επεκτείνουμε την αντίστοιχη θεωρία για την ικανοποίηση των απαιτήσεων των χρηστών σχετικά με υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου, τόσο αποκλειστικά όσο και συνυπάρχοντας με χρήστες που σχετίζονται με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου. Επιπλέον, τα περιθώρια για ακόμη πιο λεπτομερή μελέτη της συνδυαστικής κατανομής των πόρων σε ασύρματα (αλλά ακόμη και ενσύρματα) δίκτυα είναι πολλά, τόσο για ετερογενή συστήματα όσο και για πληθώρα άλλων παραμέτρων που έως τώρα δεν έχουν χρησιμοποιηθεί. Τέλος, οι μηχανισμοί κοστολόγησης με την εγγυημένη βελτίωση της λειτουργίας των δικτύων που επιφέρουν, μπορούν να αναλυθούν ακόμη περισσότερο με νέες πιο σύνθετες μορφές τιμολόγησης ως προς διάφορους πόρους που διατίθενται κάθε φορά.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] D. J. Goodman and N. B. Mandayam, “**Power control for wireless data,**” *IEEE Personal Commun. Mag.*, vol. 7, pp. 48-54, Apr. 2000.
- [2] C. U. Saraydar, N. B. Mandayam and D. J. Goodman, “**Efficient power control via pricing in wireless data networks,**” *IEEE Trans. On Comm.*, vol. 50, pp. 291-303, Feb. 2002.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] E.E. Tsiropoulou, G. Katsinis, S. Papavassiliou, “**Distributed uplink power control in multi service wireless networks via a game theoretic approach with convex pricing,**” accepted to appear in *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems* (Digital Object Identifier: 10.1109/TPDS.2011.98), 2011.
- [6] 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.
- [7] M. R. Musku, A.T. Chronopoulos, D. C. Popescu, “**Joint rate and power control with pricing,**” *IEEE Global Telecommunications Conference GLOBECOM*, vol. 6, 2005.
- [8] E. Altman, Z. Altman, “**S-Modular games and power control in wireless networks,**” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 48, no. 5, pp. 839-842, May 2003.
- [9] T. Alpcan, T. Başar, R. Srikant, and E. Altman, “**CDMA uplink power control as a non cooperative game,**” *Wireless Networks*, vol. 8, no. 6, pp. 659-669, Nov 2002.
- [10] E. E. Tsiropoulou, T. Kastrinogiannis and S. Papavassiliou, “**Uplink Power Control in QoS-aware multi service CDMA wireless networks,**” *Journal of Communications (JCM)*, vol. 49, pp. 654-668, October 2009.
- [11] E. E. Tsiropoulou, T. Kastrinogiannis and S. Papavassiliou, “**Utility based uplink power control in CDMA wireless networks with real-time services,**” in *Ad-hoc, Mobile and Wireless Networks*, vol. 5198, pp. 307-320, Sept. 2008.

- [12] M. R. Musku, A.T. Chronopoulos, D. C. Popescu, “**Joint rate and power control using game theory**,” *Consumer Communications and Networking Conference (CCNC 2006)*, p. 1258-1262, Feb. 2006.
- [13] E. E. Tsiropoulou, G. Katsinis and S. Papavassiliou, “**Utility-based Power Control via Convex Pricing for the Uplink in CDMA Wireless Networks**,” in Proc. of the *European Wireless 2010 Conference, (EW 2010)*, Lucca, Italy, April 2010.
- [14] 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**,” *International Conference on Wireless Communications and Mobile Computing - IWCMC*, pp. 365-370, 2009.
- [15] R. D. Yates, “**A framework for uplink power control in cellular radio systems**,” *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 13, pp. 1341-1347, Sept. 1995.
- [16] 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.
- [17] J. F. Nash, “**Non-Cooperative Games**,” *Ann. Math.*, vol. 54, pp. 289-295, 1951.
- [18] 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.
- [19] D. Fudenberg, J. Tirole, **Game Theory**. Cambridge, *MIT Press Ltd*, 1991.
- [20] J. – W. R. Lee, R. Mazumbar, N. B. Shroff, “**Joint resource allocation and base station assignment for the downlink in CDMA networks**,” *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 14, no. 1, Feb. 2006.
- [21] W. Zhao and M. Lu, “**Distributed rate and power control for CDMA uplink**,” *In Proceedings 2004 IEEE Wireless Telecommunications Symposium*, pp. 9-144, Pomona, CA, May 2004.
- [22] J. von Neumann, O. Morgenstern, **Theory of Games and Economic Behavior**. *Princeton University Press*, 1944.
- [23] A. Mas-Colell, M. D. Whinston and J. R. Green, **Microeconomic Theory**. *Oxford, UK.: Oxford Univ. Press*, 1995.
- [24] P. Dubey, “**Inefficiency of Nash equilibria**,” *Math. Oper. Res.*, vol. 11, no. 1, pp. 1-8, Feb. 1986.
- [25] R. Wilson, **Nonlinear Pricing**. *Oxford University Press Inc*, USA, 1993.
- [26] D. Famolari, N. B. Mandayam, and D. J. Goodman, “**A new framework for power control in wireless data networks**,” in *Allerton Conf. Communication, Control, and Computing*, Sept 1998, pp. 546-555.
- [27] R. Wilson, **Supermodularity and Complementarity**. Princeton, NJ: *Princeton Univ. Press*, 1998.
- [28] R. Cocchi, S. Shenker, D. Estrin, and L. Zhang, “**Pricing in computer networks: motivation, formulation and example**,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, December 1993.

- [29] F. Meshkati, H. V. Poor, S.C. Schwartz, R. V. Balan, “**Energy efficient resource allocation in wireless networks with quality of service constraints**,” *in preprint, Princeton University*, 2005.
- [30] 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, pp. 556-569, April 2009.
- [31] E. E. Tsiropoulou, P. Vamvakas and S. Papavassiliou, “**A joint utility based power and rate allocation non cooperative game for the uplink in wireless networks**,” submitted to *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2011.
- [32] E. E. Tsiropoulou, P. Vamvakas and S. Papavassiliou, “**Energy efficient uplink joint resource allocation non cooperative game with pricing**,” submitted to *International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, 2011.

