



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Βέλτιστη Κατανομή Ισχύος στη Ζεύξη Ανόδου Ασυρμάτων Κυψελωτών Δικτύων Δύο Επιπέδων(Femtocell Networks)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΖΟΜΠΟΛΑ ΙΩΑΝΝΗ

Επιβλέπων : Συμεών Παπαβασιλείου
Αναπληρωτής Καθηγητής

Αθήνα, Μάιος 2013



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Βέλτιστη Κατανομή Ισχύος στη Ζεύξη Ανόδου Ασυρμάτων Κυψελωτών δικτύων Δύο Επιπέδων (Femtocell Networks)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΖΟΜΠΟΛΑ ΙΩΑΝΝΗ

Επιβλέπων : Συμεών Παπαβασιλείου

Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

.....
Συμεών Παπαβασιλείου

Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ευστάθιος Συκάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Μιχαήλ Θεολόγου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάιος 2013

.....
ΖΟΜΠΟΛΑΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

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

© 2013 – Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved

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

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της αποδοτικής κατανομής ισχύος, στην άνω ζεύξη ασύρματων κυψελωτών δικτύων δύο επιπέδων (Femtocell Networks).

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας έγινε χρήση της συνάρτησης χρησιμότητας, η οποία έχει εφαρμοστεί εκτενώς στον τομέα των οικονομικών επιστημών. Σκοπός της χρήσης της έννοιας αυτής είναι η έκφραση του βαθμού χρησιμότητας ενός χρήστη με κανονικοποιημένο τρόπο, λαμβάνοντας υπόψιν τις απαιτήσεις του σε πραγματική ρυθμοαπόδοση και κατανάλωση ισχύος. Έμφαση δόθηκε στη θεώρηση των παρεμβολών που προέρχονται από τους χρήστες που εδρεύουν στην φεμτοκυψέλη και στην μακροκυψέλη, με απώτερο στόχο την ενεργειακά αποδοτική βελτιστοποίηση της λειτουργίας του συστήματος σε ένα αυτόνομο πλαίσιο λειτουργίας των χρηστών. Συνεπώς, το πρόβλημα της κατανομής ισχύος διαμορφώνεται με στόχο την ενεργειακή αποδοτικότητα και με τέτοιο τρόπο ώστε τα αποτελέσματα να προκύπτουν χωρίς την ανάγκη συνεργασίας μεταξύ των χρηστών.

Κάθε χρήστης προσπαθεί ανεξάρτητα να μεγιστοποιήσει την απόδοσή του με βάση τους επιβληθέντες περιορισμούς, η οποία εκφράζεται μέσω της συνάρτησης χρησιμότητας. Αυτό το παίγνιο ελέγχου ισχύος μεταξύ των χρηστών καταλήγει σε σημείο ισορροπίας κατά Nash και με τη βοήθεια της θεωρίας του Nash αποδεικνύουμε την ύπαρξη και την μοναδικότητα του. Επιπλέον, παρουσιάζεται ένας καταναμημένος επαναληπτικός αλγόριθμος, ο οποίος καταλήγει στην εύρεση αυτού του σημείου ισορροπίας κατά Nash.

Εν κατακλείδι, μέσω της μοντελοποίησης της θεωρητικής γνώσης που συλλέχθηκε και στη συνέχεια των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν, παρουσιάζεται και ταυτόχρονα αξιολογείται ο προτεινόμενος αλγόριθμος για τον έλεγχο της ισχύος στην άνω ζεύξη ασύρματων κυψελωτών δικτύων δύο επιπέδων.

Λέξεις Κλειδιά: << ασύρματα δίκτυα δύο επιπέδων, φεμτοκυψέλες, συνάρτηση χρησιμότητας, ποιότητα υπηρεσιών, θεωρία παιγνίων >>

Abstract

In this thesis the problem of efficient power allocation in the uplink of two-tier closed-access femtocell networks is addressed. Specifically, a single CDMA macrocell is assumed, where N femtocells reside within the macrocell. Within the proposed framework, which supports multiple services, appropriate utility functions are adopted to reflect users' degree of satisfaction with respect to their actual throughput requirements and the corresponding power consumption. The overall problem is formulated as a non-cooperative game where users aim selfishly at maximizing their utility-based performance while taking into account the interference caused by both the CDMA macrocell and the neighboring femtocells.

The existence and uniqueness of a Nash equilibrium point of the proposed Multi Service Two-Tier Power Control Game with Pricing (MTTPG) is proven, at which all users have achieved a targeted SINR threshold value or transmit with their maximum power, leading essentially to an SINR-balanced system. Moreover, a distributed iterative algorithm for reaching MTTPG game's equilibrium is provided. Finally, the operational effectiveness of the proposed approach is evaluated through modeling and simulation, while its superiority is illustrated via presenting various scenarios of the proposed framework.

Keywords: << Two-tier femtocell networks, Power allocation, utility function, real-time and non-real time services, Nash equilibrium >>

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα καταρχάς να ευχαριστήσω τον υπεύθυνο καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας, κύριο Συμεών Παπαβασιλείου, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε δίνοντας μου το εν λόγω θέμα. Στην συνέχεια ευχαριστώ τους υποψήφιους διδάκτορες κ. Τσιροπούλου Ειρήνη Ελένη και κ. Κατσίνη Γιώργο για το χρόνο που μου αφιέρωσαν (κλέβοντας χρόνο από τις δικές τους επιστημονικές ενασχολήσεις) καθώς και για τις συζητήσεις που είχαμε πάνω στο θέμα της διπλωματικής. Εν τέλει, ευχαριστώ όλους τους φίλους μου από το Αιγάλεω οι οποίοι αποτελούσαν την καλύτερη εναλλακτική διέξοδο από την εργασία είτε όταν αυτή γινόταν κουραστική ή είτε επειδή απλώς τελείωνε η “δουλειά” της ημέρας και είχε έρθει η στιγμή για να κάνω κάτι διαφορετικό (συζήτηση, βόλτα, μπιλιάρδο, μπάλλα, τρέξιμο, ποδήλατο, πινγκ πονγκ, ταινία, κτλ).

Αφιερώνεται σε όλους όσους αυτοσχεδιάζουν...

Πίνακας περιεχομένων

1	Εισαγωγή.....	20
1.1	Γενικά για τις φεμτοκυψέλες	20
1.2	Πολιτικές ανάθεσης φάσματος στις φεμτοκυψέλες και παρεμβολές.....	24
1.3	Πολιτικές πρόσβασης στις φεμτοκυψέλες	26
1.4	Σύγχρονη έρευνα πάνω στον έλεγχο ισχύος για κυψελωτά δίκτυα δύο επιπέδων.....	30
1.5	Αντικείμενο και Δομή της διπλωματικής εργασίας	36
2	Μοντέλο Συστήματος (System Model).....	38
2.1	Εισαγωγή.....	38
2.2	Είδη παρεμβολών και πίνακας G	41
2.3	Λόγος σήματος προς θόρυβο και παρεμβολή (SINR)	44
2.4	Συνάρτηση Χρησιμότητας U και ρυθμαπόδοσης T	45
2.5	Ικανοποίηση ποιότητας υπηρεσιών (QoS).....	48
2.5.1	RT χρήστες	48
2.5.2	NRT χρήστες.....	51
2.6	Κοστολόγηση φεμτο-χρηστών και Ολική Συνάρτηση Χρησιμότητας	53
3	Θεωρία Παιγνίων και Επίλυση Προβλήματος	57
3.1	Διατύπωση προβλήματος - μη συνεργατικό Παίγνιο Ελέγχου Ισχύος Άνω Ζεύξης Δικτύων Δύο Επιπέδων (MTTPG)	57
3.2	Μεθοδολογία επίλυσης προβλήματος.....	59
3.2.1	Nash Equilibrium προσέγγιση	59
3.2.2	Ιδιότητες συναρτήσεων ρυθμαπόδοσης T_i και χρησιμότητας U_i	60
3.2.3	Μορφή συνάρτησης ολικής χρησιμότητας U_i^{net}	67
3.3	Ύπαρξη και μοναδικότητα σημείου ισορροπίας Nash Equilibrium	68
3.4	Παρατηρήσεις σχετικά με τα τοπικά μέγιστα της U_i^{net}	72
3.5	Αλγόριθμος MTTPG και σύγκλιση αυτού στο σημείο ισορροπίας κατά Nash	76
4	Αριθμητικά αποτελέσματα και Σενάρια Χρήσης.....	81
4.1	Περιβάλλον προσομοίωσης και επιλογή παραμέτρων.....	81
4.2	Αποτελέσματα – Σενάρια Χρήσης.....	83

4.2.1	Επιλογή παράγοντα κοστολόγησης για φεμτο-χρήστες.....	84
4.2.2	Σενάριο 1	91
4.2.3	Σενάριο 2	97
4.2.4	Σενάριο 3	109
4.2.5	Σενάριο 4	114
4.2.6	Σενάριο 5	122
5	Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	129
5.1	Συμπεράσματα	129
5.2	Κατευθύνσεις για περαιτέρω έρευνα	132
6	Βιβλιογραφία.....	134

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1: Περιοχή κάλυψης μακροκυψέλης όπου έχουν εγκατασταθεί φεμτοκυψέλες με στόχο την βελτίωση της κάλυψης του δικτύου.....	22
Σχήμα 2: Σύνδεση οικιακής φεμτοκυψέλης με πάροχο δικτύου (ISP) μέσω DSL ή καλωδιακών ευρυζωνικών συνδέσεων	23
Σχήμα 3: Οι 3 πολιτικές ανάθεσης φάσματος: η 1 ^η στήλη αντιστοιχεί σε περίπτωση αφιερωμένου φάσματος, η 2 ^η στήλη σε περίπτωση μερικώς μοιρασμένου φάσματος και η 3 ^η στήλη σε περίπτωση κοινού φάσματος.....	26
Σχήμα 4: Νεκρές ζώνες (dead zones) για ζεύξη ανόδου και καθόδου αντίστοιχα σε κυψελωτά δίκτυα δύο επιπέδων.....	28
Σχήμα 5: Μοντέλο Συστήματος.....	41
Σχήμα 6: Οι τρεις περιπτώσεις διαφορετικού επιπέδου παρεμβολής (cross-tier interference)	42
Σχήμα 7: Συνάρτηση απόδοσης για διαφορετικά σχήματα διαμόρφωσης (BPSK, DPSK, FSK).....	46
Σχήμα 8: Συνάρτηση ρυθμαπόδοσης T_i για RT χρήστες.	49
Σχήμα 9: Συνάρτηση ρυθμαπόδοσης T_i για NRT και RT χρήστες.....	52
Σχήμα 10: Κυρτή συνάρτηση κοστολόγησης $C_i(p_i)$	55
Σχήμα 11: Συνάρτηση $F(c, p)$ για διαφορετικές τιμές του παράγοντα κοστολόγησης c	73
Σχήμα 12: Συναρτήσεις $G(p)$ και $F(c, p)$ - η δεύτερη για 3 διαφορετικές τιμές της μεταβλητής c	75
Σχήμα 13: Τοπολογία δικτύου σεναρίου με 9 FAPs και 10 μακρο-χρήστες.....	85
Σχήμα 14: Μέση ισχύς ανά χρήστη για δίκτυο με 3 FAPs.....	86
Σχήμα 15: Συνολική χρησιμότητα χρηστών για δίκτυο με 3 FAPs.....	86
Σχήμα 16: Μέση ισχύς ανά χρήστη για δίκτυο με 5 FAPs.....	87
Σχήμα 17: Συνολική χρησιμότητα χρηστών για δίκτυο με 5 FAPs.....	87
Σχήμα 18: Μέση ισχύς ανά χρήστη για δίκτυο με 7 FAPs.....	88
Σχήμα 19: Συνολική χρησιμότητα χρηστών για δίκτυο με 7 FAPs.....	88
Σχήμα 20: Μέση ισχύς ανά χρήστη για δίκτυο με 9 FAPs.....	90
Σχήμα 21: Συνολική χρησιμότητα χρηστών για δίκτυο με 9 FAPs.....	90
Σχήμα 22: Τοπολογία δικτύου 1 ^{ου} Σεναρίου με 3 FAPs και 1 μακρο-χρήστη δεδομένων.	91
Σχήμα 23: Ισχύς μακρο-χρήστη σε σχέση με την απόσταση του από το σταθμό βάσης της μακροκυψέλης	92
Σχήμα 24: Μέση ισχύς ανά χρήστη του 1 ^{ου} FAP σε σχέση με την απόσταση του μακρο-χρήστη από το σταθμό βάσης της μακροκυψέλης	92
Σχήμα 25: Μέση χρησιμότητα ανά χρήστη του 1 ^{ου} FAP σε σχέση με την απόσταση του μακρο-χρήστη από το σταθμό βάσης της μακροκυψέλης.....	93
Σχήμα 26: Ρυθμός μετάδοσης μακρο-χρήστη σε σχέση με την απόσταση του από το σταθμό βάσης της μακροκυψέλης	94
Σχήμα 27: Χρησιμότητα μακρο-χρήστη σε σχέση με την απόσταση του από το σταθμό βάσης της μακροκυψέλης	95

Σχήμα 28: Μέση ισχύς ανά χρήστη 3 ^{ου} και 2 ^{ου} FAP σε σχέση με την απόσταση του μακρο-χρήστη από τον σταθμό βάσης της μακροκυψέλης	95
Σχήμα 29: Μέση χρησιμότητα ανά χρήστη 3 ^{ου} και 2 ^{ου} FAP σε σχέση με την απόσταση του μακρο-χρήστη από τον σταθμό βάσης της μακροκυψέλης	96
Σχήμα 30: Τοπολογία δικτύου 2 ^{ου} Σεναρίου με 10 FAPs και 8 μακρο-χρήστες σε ζώνες	98
Σχήμα 31: Τοπολογία δικτύου 2 ^{ου} Σεναρίου με 100 FAPs και 8 μακρο-χρήστες σε ζώνες	99
Σχήμα 32: Μέση ισχύς ανά κατηγορία χρήστη σε σχέση με τον αριθμό των FAP του δικτύου	99
Σχήμα 33: Μέσος λόγος σήματος προς θόρυβο και παρεμβολή (SINR) ανά κατηγορία χρήστη σε σχέση με τον αριθμό των FAP του δικτύου	101
Σχήμα 34: Μέσος ρυθμός μετάδοσης ανά κατηγορία χρήστη σε σχέση με τον αριθμό των FAP του δικτύου	101
Σχήμα 35: Μέση χρησιμότητα ανά κατηγορία χρήστη σε σχέση με τον αριθμό των FAP του δικτύου	102
Σχήμα 36: Μέση ισχύς μακρο-χρηστών ανά ζώνη σε σχέση με τον αριθμό των FAPs	103
Σχήμα 37: Μέσος ρυθμός μετάδοσης μακρο-χρηστών δεδομένων ανά ζώνη σε σχέση με τον αριθμό των FAPs	104
Σχήμα 38: Μέσος ρυθμός μετάδοσης μακρο-χρηστών φωνής ανά ζώνη σε σχέση με τον αριθμό των FAPs	104
Σχήμα 39: Μέση ισχύς ανά κατηγορία χρήστη σε σχέση με τον αριθμό των FAPs του δικτύου χωρίς κοστολόγηση των φεμτο-χρηστών	106
Σχήμα 40: Μέσος λόγος σήματος προς θόρυβο και παρεμβολή (SINR) ανά κατηγορία χρήστη σε σχέση με τον αριθμό των FAPs του δικτύου χωρίς κοστολόγηση των φεμτο-χρηστών	107
Σχήμα 41: Μέσος ρυθμός μετάδοσης ανά κατηγορία χρήστη σε σχέση με τον αριθμό των FAPs του δικτύου χωρίς κοστολόγηση των φεμτο-χρηστών	107
Σχήμα 42: Μέση χρησιμότητα ανά κατηγορία χρήστη σε σχέση με τον αριθμό των FAPs του δικτύου χωρίς κοστολόγηση των φεμτο-χρηστών	108
Σχήμα 43: Μέση ισχύς μακρο-χρηστών ανά ζώνη σε σχέση με τον αριθμό των FAPs χωρίς κοστολόγηση των φεμτο-χρηστών	109
Σχήμα 44: Τοπολογία δικτύου 3 ^{ου} Σεναρίου με 4 FAPs και 30 μακρο-χρήστες τυχαία τοποθετημένους μέσα στην μακροκυψέλη	110
Σχήμα 45: Μέση ισχύς ανά κατηγορία χρήστη σε σχέση με τον αριθμό των μακρο-χρηστών του δικτύου	111
Σχήμα 46: Μέσος λόγος σήματος προς θόρυβο και παρεμβολή (SINR) ανά κατηγορία χρήστη σε σχέση με τον αριθμό των μακρο-χρηστών του δικτύου	112
Σχήμα 47: Μέσος ρυθμός μετάδοσης ανά κατηγορία χρήστη σε σχέση με τον αριθμό των μακρο-χρηστών του δικτύου	113
Σχήμα 48: Μέση χρησιμότητα ανά κατηγορία χρήστη σε σχέση με τον αριθμό των μακρο-χρηστών του δικτύου	113
Σχήμα 49: Τοπολογία δικτύου 4 ^{ου} Σεναρίου πριν την προσθήκη των 4 FAPs – 10 μακρο-χρήστες	115
Σχήμα 50: Τοπολογία δικτύου 4 ^{ου} Σεναρίου μετά την προσθήκη των 4 FAPs – 2 μακρο-χρήστες και 8 φεμτο-χρήστες	115
Σχήμα 51: Μέση ισχύς ανά χρήστη πριν και μετά την προσθήκη των 4 FAPs	116
Σχήμα 52: Μέσος ρυθμός μετάδοσης ανά χρήστη πριν και μετά την προσθήκη των 4 FAPs	117

Σχήμα 53: Συνολική χρησιμότητα των χρηστών του δικτύου με και χωρίς κάλυψη από τις φεμτοκουψέλες	117
Σχήμα 54: Μέση ισχύς ανά μακρο-χρήστη πριν και μετά την προσθήκη των 4 FAPs	118
Σχήμα 55: Μέση χρησιμότητα ανά μακρο-χρήστη πριν και μετά την προσθήκη των 4 FAPs.....	118
Σχήμα 56: Ρυθμοί μετάδοσης των δύο μακρο-χρηστών πριν και μετά την προσθήκη των 4 FAPs.....	119
Σχήμα 57: Μέση ισχύς ανά χρήστη και ανά είδος υπηρεσίας για τους υπόλοιπους 8 χρήστες του δικτύου.....	120
Σχήμα 58: Μέσος ρυθμός μετάδοσης ανά χρήστη και ανά είδος υπηρεσίας για τους υπόλοιπους 8 χρήστες του δικτύου	120
Σχήμα 59: Μέση χρησιμότητα ανά χρήστη και ανά είδος υπηρεσίας για τους υπόλοιπους 8 χρήστες του δικτύου	121
Σχήμα 60: Τοπολογία δικτύου 5 ^{ου} Σεναρίου (1 ^η προσομοίωση) – 30 FAPs και 10 μακρο-χρήστες τοποθετημένοι σε σειρά.....	122
Σχήμα 61: Τοπολογία δικτύου 5 ^{ου} Σεναρίου (2 ^η προσομοίωση)– 31 FAPs και 8 μακρο-χρήστες τοποθετημένοι σε σειρά.....	123
Σχήμα 62: Σύγκλιση ισχύων μακρο-χρηστών για την 1 ^η προσομοίωση	123
Σχήμα 63: Σύγκλιση ισχύων μακρο-χρηστών για την 2 ^η προσομοίωση	124
Σχήμα 64: Σύγκλιση ισχύων φεμτο-χρηστών για την 1 ^η προσομοίωση	125
Σχήμα 65: Σύγκλιση ισχύων φεμτο-χρηστών για την 2 ^η προσομοίωση	125
Σχήμα 66: Ισχύς μακρο-χρηστών πριν και μετά την προσθήκη του FAP (975,500) σε σχέση με την απόσταση από τον MBS	126
Σχήμα 67: Χρησιμότητα μακρο-χρηστών πριν και μετά την προσθήκη του FAP (975,500) σε σχέση με την απόσταση από τον MBS.....	127
Σχήμα 68: Ρυθμαπόδοση μακρο-χρηστών πριν και μετά την προσθήκη του FAP (975,500) σε σχέση με την απόσταση από τον MBS.....	128

1

Εισαγωγή

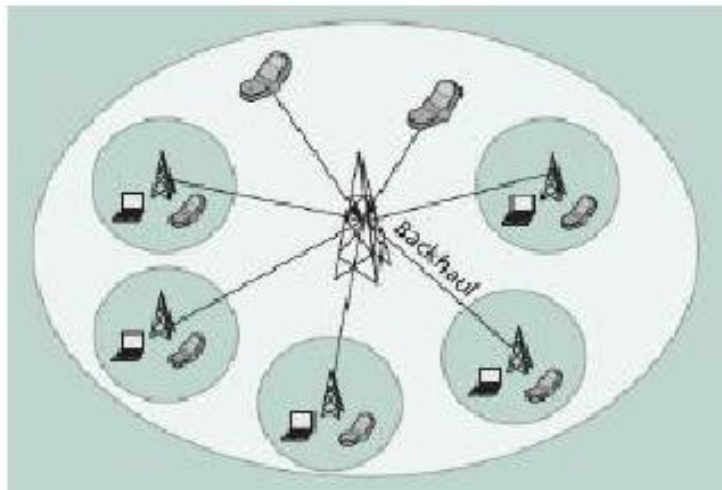
1.1 Γενικά για τις φεμτοκυψέλες

Ένας από τους πιο αποτελεσματικούς τρόπους για να βελτιωθεί η χωρητικότητα ενός ασυρμάτου συστήματος είναι να έρθει ο πομπός πιο κοντά στον δέκτη, ενέργεια η οποία έχει διπλό όφελος: αφενός πετυχαίνεται καλύτερης ποιότητας ασύρματη σύνδεση και αφετέρου μεγαλύτερη χωρική επαναχρησιμοποίηση (περισσότεροι χρήστες σε ένα μέρος). Σε ένα δίκτυο με αυτόνομους και τυχαία κινούμενους χρήστες, το παραπάνω αυτόματα υπονοεί τη χρησιμοποίηση περισσότερης (υλικής) υποδομής στο εν λόγω σύστημα, τυπικά με την μορφή μικροκυψελών αλλά και με τη χρήση hot spots (σημείων με μεγάλη πυκνότητα χρηστών), καταναμημένων κεραιών ή ακόμα και αναμεταδοτών (relays). Μια λιγότερο δαπανηρή λύση είναι η ιδέα της χρησιμοποίησης φεμτοκυψελών – ονομάζονται και οικιακοί σταθμοί βάσης (HNB – Home Node Stations) ή FAPs (Femto Access Points) – οι οποίες είναι σημεία πρόσβασης δεδομένων (data access points) που έχουν εγκατασταθεί από τους χρήστες προκειμένου να έχουν καλύτερη κάλυψη από το δίκτυο σε εσωτερικούς χώρους κτιρίων (οικίες, γραφεία, αεροδρόμια κ.α.) όσον αφορά την ασύρματη τηλεφωνία και την ανάγκη για παροχή υπηρεσιών υψηλών ρυθμών μετάδοσης δεδομένων[1].

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια στροφή των καταναλωτών προς τις υπηρεσίες υψηλών ρυθμών μετάδοσης και γι' αυτό πολλά από τα νέα πρότυπα κυψελωτών επικοινωνιών της αγοράς είναι δεδομένο-κεντρικά (π.χ. WiMAX (802.16e), HSPA (High Speed Packet Access), 3GPP LTE, LTE Advanced standards). Αντίστοιχα τα Wi-Fi δίκτυα έχουν “εδραιωθεί” όσον αφορά την ικανοποίηση των υψηλών ρυθμών μετάδοσης που ζητούν οι καταναλωτές σε εσωτερικούς χώρους κτιρίων αλλά για υπηρεσίες μέσω διαδικτύου μόνο. Παρότι λοιπόν στο μέλλον τα Wi-Fi δίκτυα δεν πρόκειται να υποστηρίξουν το ίδιο επίπεδο κινητικότητας και κάλυψης όπως τα κυψελωτά δίκτυα επικοινωνιών[1], θα πρέπει τα δεύτερα προκειμένου να είναι ανταγωνιστικά με τα πρώτα - όσον αφορά την χρήση τους σε εσωτερικούς χώρους - να παρέχουν υπηρεσίες περίπου ίδιες (ή και καλύτερες) με αυτά, στον τομέα κυρίως των υψηλών ρυθμών μετάδοσης. Επίσης, από έρευνες που έχουν διεξαχθεί πάνω στη χρήση ασυρμάτων τηλεφώνων έχειδειχθεί ότι περισσότερο από 50% των τηλεφωνημάτων γίνονται εντός κτιρίων ενώ πάνω από το 70% των υπηρεσιών δεδομένων πραγματοποιούνται στο εσωτερικό τους. Οπότε είτε γίνεται αναφορά για υπηρεσίες φωνής είτε για υπηρεσίες δεδομένων, τα κυψελωτά δίκτυα οφείλουν να εξελιχθούν κατάλληλα προς την ικανοποίηση και των δύο [1].

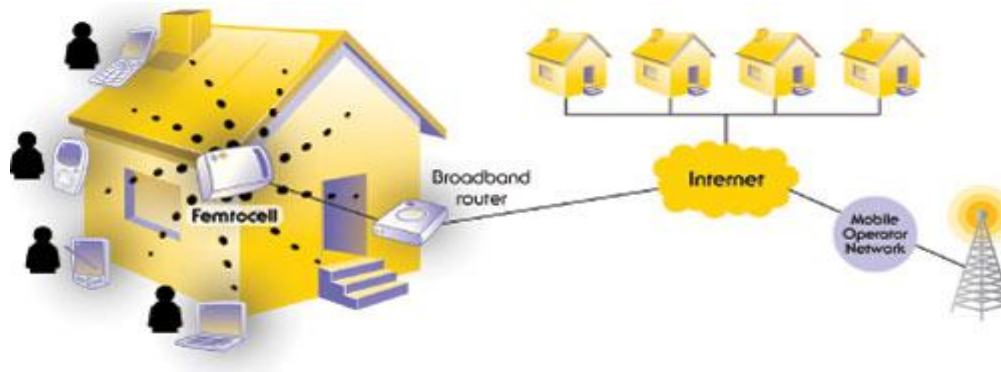
Το ότι η χρήση των φεμτοκυψελών βοηθά στη βελτίωση της χωρητικότητας ενός ασύρματου δικτύου επικοινωνιών φαίνεται ξεκάθαρα από το γεγονός ότι η “χωρητικότητα διπλασιάζεται κάθε 30 μήνες για τα τελευταία 104 χρόνια” όπως χαρακτηριστικά αναφέρει ο Martin Cooper της Araycomm. Αυτό σημαίνει κατά ένα περίπου εκατομμύριο αύξηση της χωρητικότητας από το 1954. Εάν διαχωριστούν τα επιμέρους κέρδη, παρατηρείται ότι η παραπάνω αύξηση οφείλεται σε $x25$ καλύτερευση λόγω χρησιμοποίησης μεγαλύτερου φάσματος, $x5$ καλύτερευση λόγω διαχωρισμού του φάσματος σε μικρότερα τμήματα, $x5$ καλύτερευση λόγω σχεδιασμού καλύτερων τεχνικών διαμόρφωσης και τέλος μια τεράστια κλίμακας καλύτερευση - της τάξης του $x1600$ - λόγω σμίκρυνσης των μεγεθών των κυψελών και συνεπώς της απόστασης πομπού-δέκτη. Αυτή η σμίκρυνση των ορίων των κυψελών έγινε σταδιακά, ξεκινώντας κυρίως από τις μικροκυψέλες (με ακτίνα μερικών εκατοντάδων μέτρων), μετά τους επαναλήπτες (relays) που λειτουργούσαν ως μικροί σταθμοί εξυπηρετώντας σημεία στα οποία δεν μπορούσε η κεντρική μακροκυψέλη να έχει ικανοποιητική κάλυψη και φτάνοντας στις φεμτοκυψέλες σήμερα [2].

Εκτός του γεγονότος ότι οι φεμτοκυψέλες εγκαθίστανται από τους ίδιους τους χρήστες με εύκολο τρόπο, εκπέμπουν χαμηλή ισχύ και έχουν μικρής ακτίνας κάλυψη, επιτρέπουν στον πάροχο του δικτύου να βελτιώσει σημαντικά την κάλυψη του σε εσωτερικούς χώρους, ειδικά όπου η πρόσβαση είναι περιορισμένη ή ανύπαρκτη (κατοικίες, μετρό, εταιρείες, κτλ). Επιπλέον, με το να εξυπηρετούνται οι χρήστες εντός των κτιρίων από τις φεμτοκυψέλες, μειώνεται ο αριθμός των χρηστών της μακροκυψέλης με αποτέλεσμα η μακροκυψέλη να διαμοιράζει τους πόρους της σε λιγότερους χρήστες, βελτιώνοντας έτσι σημαντικά την ποιότητα εξυπηρέτησής τους. Άρα όχι μόνο οι φεμτοκυψέλες συντελούν στην βελτίωση της κάλυψης του δικτύου σε εσωτερικούς χώρους αλλά και στην αύξηση της συνολικής απόδοσής του (Βλ. Σχήμα 1).



Σχήμα 1: Περιοχή κάλυψης μακροκυψέλης όπου έχουν εγκατασταθεί φεμτοκυψέλες με στόχο την βελτίωση της κάλυψης του δικτύου

Όσον αφορά την σύνδεση των φεμτοκυψελών με το υπόλοιπο δίκτυο, αυτή γίνεται μέσω των ήδη υπάρχουσών ευρυζωνικών συνδέσεων όπως είναι η ψηφιακή γραμμή συνδρομητή (DSL – Βλ. Σχήμα 2), μέσω καλωδίου και modem (IP backhaul) ή μέσω ενός ξεχωριστού καναλιού ραδιοσυχνοτήτων (RF) του δικτύου.



Σχήμα 2: Σύνδεση οικιακής φεμτοκυψέλης με πάροχο δικτύου (ISP) μέσω DSL ή καλωδιακών ευρυζωνικών συνδέσεων

Οι φεμτοκυψέλες είναι συμβατές με τα κινητά τηλέφωνα, τους προσωπικούς υπολογιστές και γενικά με κάθε 3G συσκευή. Εξαιτίας της μικρής απόστασης μεταξύ πομπού και δέκτη, οι φεμτοκυψέλες εκπέμπουν σε χαμηλή ισχύ πράγμα που οδηγεί σε μικρές παρεμβολές στους χρήστες, παράταση του χρόνου ζωής της μπαταρίας των ασυρμάτων χρηστών/συσκευών, μεγαλύτερο λόγο σήματος προς θόρυβο και παρεμβολή (SINR) και συνεπώς καλύτερη λήψη (five-bar coverage) για τους χρήστες της φεμτοκυψέλης. Έτσι, λόγω της μειωμένης παρεμβολής μπορεί να υπάρχουν περισσότεροι χρήστες σε μία δεδομένη έκταση που χρησιμοποιούν την ίδια περιοχή φάσματος, δηλαδή να αυξάνεται η χωρική φασματική απόδοση ή αλλιώς ο αριθμός των ενεργών χρηστών ανά Hertz και ανά μονάδα επιφάνειας [1].

Τέλος, ένα επιπλέον πλεονέκτημα της χρήσης φεμτοκυψελών είναι ότι μειώνουν τις κεφαλαιουχικές δαπάνες – τις δαπάνες δηλαδή για τις τεχνικές υποδομές των σταθμών βάσης – και συνεπώς τα λειτουργικά έξοδα των παρόχων. Μια τυπική αστική μακροκυψέλη κοστίζει $1000\$/μήνα$ για τη μίσθωση του χώρου καθώς και επιπλέον κόστη για το ρεύμα και τη σύνδεση με το υπόλοιπο δίκτυο (backhaul). Στο μέλλον τα έξοδα για τη λειτουργία και συντήρηση του μακροκυψελικού δικτύου θα είναι τεράστια πόσο μάλλον όταν η αύξηση του αριθμού των συνδρομητών δε θα βρίσκεται σε αντιστοιχία με την όλο και αυξανόμενη απαίτηση των χρηστών για υπηρεσίες δεδομένων. Συνεπώς, η ανάπτυξη φεμτοκυψελών θα ελαττώσει την ανάγκη για προσθήκη περισσότερων μακροσταθμών – πύργων. Πρόσφατες μελέτες δείχνουν ότι τα έξοδα κλιμακώνονται από $60.000\$/χρόνο/μακροκυψέλη$ σε μόλις $200\$/χρόνο/φεμτοκυψέλη$ [1].

1.2 Πολιτικές ανάθεσης φάσματος στις φεμτοκυψέλες και παρεμβολές

Ένα πολύ σημαντικό θέμα που προκύπτει σε ένα ασύρματο δίκτυο επικοινωνιών με την προσθήκη φεμτοκυψελών είναι το μέρος του φάσματος το οποίο θα πάρουν οι χρήστες τους σε σχέση με τους χρήστες της μακροκυψέλης. Εδώ τίθεται το θέμα της κατανομής του φάσματος του δικτύου (spectrum allocation) που παίζει μεγάλο ρόλο στην απόδοση του δικτύου αφού μη προσεκτικός μοιρασμός του φάσματος μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλες παρεμβολές στις φεμτοκυψέλες [3]. Σε ένα δίκτυο δύο επιπέδων υπάρχουν δύο γενικών ειδών παρεμβολές:

- **Διαφορετικών επιπέδων παρεμβολή (Cross-Tier interference):** προκαλείται από ένα φεμτο-χρήστη που παρεμβάλλει σε ένα μακρο-χρήστη (διαφορετικού επιπέδου χρήστη δηλαδή) καθώς και το αντίστροφο.
- **Ιδίου επιπέδου παρεμβολή (Co-Tier interference):** λαμβάνει χώρα μεταξύ χρηστών του ίδιου επιπέδου, πχ μεταξύ γειτονικών φεμτοκυψελών.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, έχουν προταθεί τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις (πολιτικές ανάθεσης φάσματος) σχετικά με το θέμα της κατανομής φάσματος σε μακροκυψέλη και φεμτοκυψέλες [4]:

- 1) **Αφιερωμένο φάσμα (Dedicated Spectrum)** : Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιείται μία ζώνη φάσματος από το επίπεδο της μακροκυψέλης και μία άλλη διαφορετική από το επίπεδο των φεμτοκυψελών. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται εντελώς η παρεμβολή διαφορετικών επιπέδων (Cross-Tier interference), αφού τα δύο επίπεδα λειτουργούν σε διαφορετικές συχνότητες. Ωστόσο, συντελεί στη χαμηλή

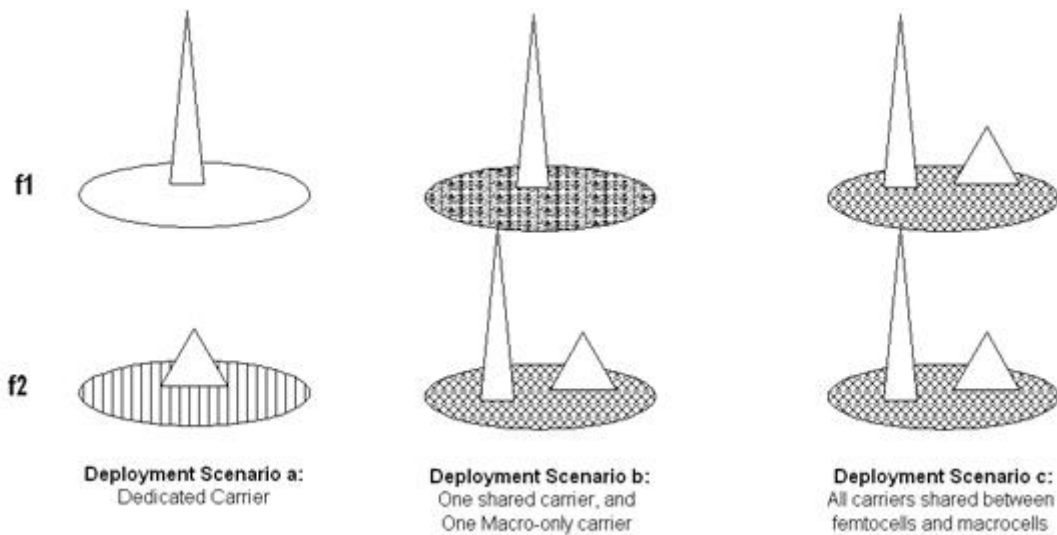
χρησιμοποίηση φάσματος (spectral efficiency), αφού οι κυψέλες ενός επιπέδου μπορούν να έχουν πρόσβαση μόνο σε ένα υποσύνολο των συνολικών διαθέσιμων συχνοτήτων

2) **Μοιρασμένο (κοινό) φάσμα (Shared Spectrum)**: Σε αυτή τη περίπτωση επιτυγχάνεται η μέγιστη αξιοποίηση φάσματος αφού όλες οι κυψέλες διαμοιράζονται το ίδιο εύρος ζώνης συχνοτήτων, δηλαδή οι φεμτοκυψέλες εκπέμπουν στο ίδιο φάσμα συχνοτήτων που εκπέμπει και η μακροκυψέλη και έτσι και τα δύο επίπεδα έχουν πρόσβαση επί του συνόλου των διαθέσιμων πόρων του δικτύου. Ωστόσο σε μια τέτοια υλοποίηση, η παρεμβολή διαφορετικών επιπέδων που λαμβάνει χώρα θα μπορούσε να υποβαθμίσει τη συνολική απόδοση του συστήματος αν δεν αντιμετωπιστεί αποτελεσματικά. Τέλος, υπάρχουν δύο υπό-πολιτικές ανάθεσης των καναλιών όταν οι φεμτοκυψέλες χρησιμοποιούν κοινό φάσμα με την μακροκυψέλη και είναι:

- **Ορθογώνια ανάθεση (Orthogonal assignment)** : Το κανάλι που χρησιμοποιεί ένας μακρο-χρήστης είναι ορθογώνιο με ένα που χρησιμοποιεί ένας φεμτο-χρήστης (OFDMA) και συνεπώς παρότι μοιράζονται το ίδιο φάσμα δεν παρεμβάλλει καθόλου ο ένας στον άλλο.
- **Κοινή ανάθεση όλων των καναλιών (Co-channel assignmnet)** : Οποιοσδήποτε χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει οποιοδήποτε κανάλι συχνοτήτων και ο διαχωρισμός των σημάτων των χρηστών που καταλαμβάνουν κοινό κανάλι γίνεται με διαίρεση κώδικα (απλό CDMA).

3) **Μερικώς μοιρασμένο φάσμα (Partially Shared Spectrum)**: Σε αυτή τη περίπτωση, που αποτελεί μια μέση λύση, το επίπεδο της μακροκυψέλης έχει πρόσβαση σε όλες τις ζώνες φάσματος, ενώ οι φεμτοκυψέλες λειτουργούν μόνο σε ένα υποσύνολο αυτών. Θεωρείται η καλύτερη πολιτική ανάθεσης φάσματος και αυτό διότι:

- Επιτυγχάνεται καλύτερη χρησιμοποίηση φάσματος (spectral efficiency) από τη περίπτωση του κοινού φάσματος (2).
- Είναι εφικτή η μείωση της παρεμβολής διαφορετικών επιπέδων σε σύγκριση με τη προσέγγιση του μοιρασμένου φάσματος, αφού οι χρήστες της μακροκυψέλης που παράγουν ή υποφέρουν από υψηλή παρεμβολή διαφορετικών επιπέδων (cross-tier interference), μπορούν να χρησιμοποιήσουν το αποκλειστικά αφιερωμένο στη μακροκυψέλη φάσμα.



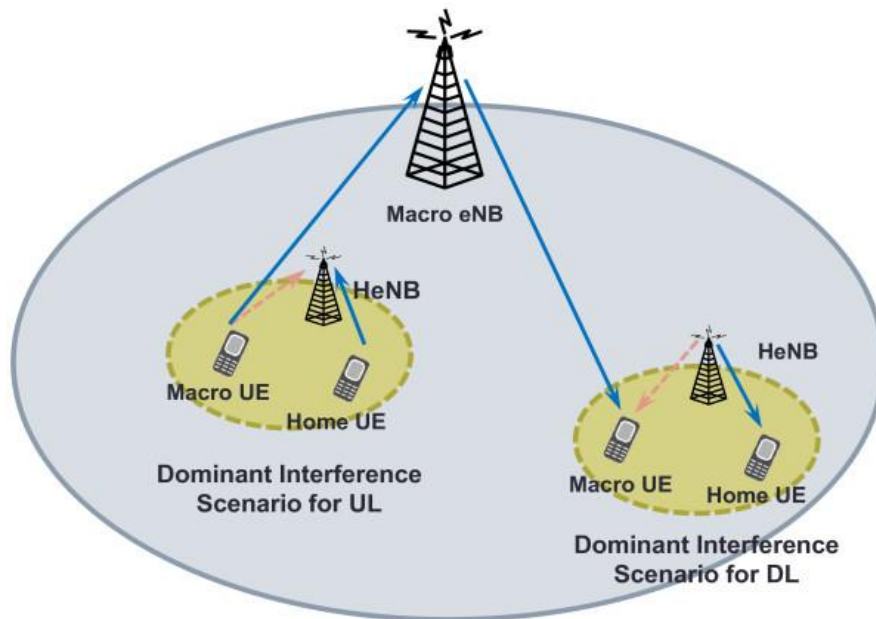
Σχήμα 3: Οι 3 πολιτικές ανάθεσης φάσματος: η 1^η στήλη αντιστοιχεί σε περίπτωση αφιερωμένου φάσματος, η 2^η στήλη σε περίπτωση μερικώς μοιρασμένου φάσματος και η 3^η στήλη σε περίπτωση κοινού φάσματος

1.3 Πολιτικές πρόσβασης στις φεμτοκυψέλες

Ένα άλλο ζήτημα που δημιουργείται είναι το ποιά πολιτική πρόσβασης θα ακολουθηθεί από τους χρήστες των φεμτοκυψελών, γεγονός που επηρεάζει και τη συμπεριφορά των μακρο-χρηστών και συνεπώς και του υπολοίπου δικτύου. Συγκεκριμένα έχουμε τρεις περιπτώσεις πολιτικών πρόσβασης:

1) Κλειστού τύπου (closed access ή Closed Subscriber Group – CSG):

Σε αυτή την κατηγορία υπάρχει μια ομάδα χρηστών (2-5 συνήθως) που αποτελούν τους συνδρομητές μιας φεμτοκυψέλης (subscribers) και αποτελούν τους αποκλειστικούς χρήστες της. Κανένας άλλος χρήστης (μάκρο ή φέμτο) δεν μπορεί να χρησιμοποιήσει τους πόρους μιας φεμτοκυψέλης εκτός από τους συνδρομητές της. Προφανώς η λίστα των συνδρομητών μιας φεμτοκυψέλης καθορίζεται από τον κάτοχό της και μόνο, πράγμα που συμβάλει στην ασφάλεια και την ιδιωτικότητα των χρηστών της. Το πρόβλημα που δημιουργείται σε αυτή τη πολιτική πρόσβασης είναι οι μη-εγγεγραμμένοι χρήστες οι οποίοι πλησιάζουν ή ακόμα και εισέρχονται στην ακτίνα μιας φεμτοκυψέλης. Εφόσον δεν ανήκουν στο CSG της, συνεχίζουν να εκπέμπουν στον αρχικό σταθμό τους, δημιουργώντας πολλές φορές υπερβολικά υψηλή παρεμβολή στους χρήστες της φεμτοκυψέλης (στη ζεύξη ανόδου). Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 4 απεικονίζονται δύο περιπτώσεις χρηστών (ζεύξη ανόδου και ζεύξη καθόδου αντίστοιχα) στους οποίους οι παρεμβολές είναι αρκετά ισχυρές με αποτέλεσμα να καθιστούν αδύνατη την κάλυψη τους από το δίκτυο (οι περιοχές αυτές στις οποίες δεν έχουμε κάλυψη ονομάζονται νεκρές ζώνες – dead zones). Και στις δύο περιπτώσεις ένας μη-εγγεγραμμένος χρήστης (χρήστης της μακροκυψέλης) βρίσκεται στην περιοχή εμβέλειας μιας φεμτοκυψέλης. Στο σενάριο για την ζεύξη ανόδου (Up Link- UL) έχουμε έναν μακρο-χρήστη ο οποίος εκπέμπει με πολύ υψηλή ισχύ προς τον σταθμό της μακροκυψέλης με αποτέλεσμα να δημιουργεί μεγάλες παρεμβολές σε γειτονικούς εγγεγραμμένους χρήστες της φεμτοκυψέλης και κατ' επέκταση να μην είναι δυνατή η κάλυψη τους από το δίκτυο, ενώ στο αντίστοιχο σενάριο για την ζεύξη καθόδου (Down Link-DL) ο σταθμός της φεμτοκυψέλης εκπέμπει με μεγαλύτερη ισχύ απ' όση αυτή που φτάνει στον μακρο-χρήστη από τον σταθμό βάσης του με αποτέλεσμα να του δημιουργεί αρκετά μεγάλες παρεμβολές.



Σχήμα 4: Νεκρές ζώνες (dead zones) για ζεύξη ανόδου και καθόδου αντίστοιχα σε κυψελωτά δίκτυα δύο επιπέδων

2) Ανοικτού τύπου (open access) : Σε αυτή την περίπτωση πρόσβαση στους πόρους της φεμτοκυψέλης έχουν όλοι οι χρήστες, ανεξάρτητα από το επίπεδο (Tier) στο οποίο ανήκουν ή από το εάν είναι συνδρομητές ή όχι. Συγκεκριμένα, οι χρήστες συνδέονται πάντα στη κυψέλη με το ισχυρότερο σήμα, με αποτέλεσμα να αποφεύγεται η παρεμβολή διαφορετικών επιπέδων (cross-tier interference), να μην υφίστανται οι νεκρές ζώνες που δημιουργούνται με την πολιτική πρόσβασης κλειστού τύπου και εν τέλει να επιτυγχάνεται σημαντική αποσυμφόρηση του φορτίου της μακροκυψέλης και κατ' επέκταση αύξηση της συνολικής ρυθμαπόδοσης του δικτύου με καλύτερο διαμοιρασμό των πόρων του στους χρήστες. Έτσι, το πρόβλημα που δημιουργείται καθώς ένας μη-εγγεγραμμένος χρήστης πλησιάζει ή εισέρχεται σε μια φεμτοκυψέλη δεν υφίσταται σε αυτή τη περίπτωση. Ωστόσο η πρόσβαση ανοικτού τύπου έχει τα εξής βασικά μειονεκτήματα [4]:

- Οι συνδρομητές πληρώνουν για τις φεμτοκυψέλες με αποτέλεσμα να μην είναι πρόθυμοι να δεχτούν τους μη-εγγεγραμμένους χρήστες ως χρήστες της φεμτοκυψέλης τους. Σε αυτή την περίπτωση, για να παραμείνει το συγκεκριμένο προϊόν ελκυστικό για τους συνδρομητές, είναι επιτακτική η ανάγκη μείωσης του

ποσού που πληρώνουν οι συνδρομητές στους παρόχους ή η παροχή άλλων πλεονεκτημάτων.

- Αφού όλοι οι χρήστες μπορούν να χρησιμοποιήσουν τις φεμτοκυψέλες, ο αριθμός των διαπομπών (handovers) αυξάνεται εξαιτίας της κινητικότητας των εξωτερικών χρηστών (outdoor users). Επίσης, αυξάνεται και η πιθανότητα μία διαπομπή να αποτύχει, αν η λίστα των γειτονικών χρηστών (neighbor list) δε δημιουργείται ή ενημερώνεται σωστά [5].
- Η πολιτική πρόσβασης ανοικτού τύπου δημιουργεί ένα πρόσθετο *overhead* στο δίκτυο, δηλαδή μεγαλύτερη απαίτηση για υπολογιστική ισχύ κυρίως από τα κινητά τερματικά προκειμένου να γίνει έλεγχος για είσοδο ή μη σε μια κοντινή φεμτοκυψέλη.
- Η εντελώς ανοικτού τύπου πρόσβαση μπορεί επίσης να είναι προβληματική λόγω της απώλειας στη ρυθμαπόδοση δεδομένων, που πηγάζει από τον καταμερισμό του περιορισμένου εύρου ζώνης της φεμτοκυψέλης σε δυνητικά μεγάλο αριθμό χρηστών [6].

Στον παρακάτω πίνακα συγκρίνουμε τα κύρια σημεία των πολιτικών πρόσβασης που έχουμε εξετάσει μέχρι στιγμής [5]:

Closed Access	Open Access
Υψηλότερες παρεμβολές	Περισσότερες διαπομπές
Χαμηλότερη ρυθμαπόδοση συστήματος	Υψηλότερη ρυθμαπόδοση συστήματος
Εξυπηρέτηση μόνο των εσωτερικών χρηστών (indoor users)	Αύξηση χωρητικότητας εξωτερικών χρηστών (increased outdoor capacity)
Home Market	SMEs (Small to Medium – sized Enterprises /offices), hotspots
Ευκολότερη τιμολόγηση	Τίθενται θέματα ασφαλείας

3) Υβριδικού τύπου (Hybrid access): Αποτελεί μια μίξη των δύο προηγούμενων πολιτικών πρόσβασης και έγκειται στο ότι μια φεμτοκυψέλη εκτός από την εξυπηρέτηση του CSG της μπορεί να επιτρέψει την χρησιμοποίηση των πόρων της σε I έως N μη-εγγεγραμμένους χρήστες. Περισσότεροι όμως χρήστες δεν θα μπορούν έπειτα να συνδεθούν στην φεμτοκυψέλη. Με άλλα λόγια, προσφέρεται πλήρης πρόσβαση στους συνδρομητές και περιορισμένη σε όλους τους άλλους χρήστες. Αποτελεί την καλύτερη επιλογή των παρόχων διότι:

- Εξασφαλίζεται κάθε στιγμή η εξυπηρέτηση των εγγεγραμμένων χρηστών
- Μειώνεται ο αριθμός των χρηστών που υποφέρουν από απώλεια σύνδεσης (outage)
- Συντελείται αποσυμφόρηση του φορτίου της μακροκυψέλης αφού οι χρήστες που προκαλούν ισχυρή παρεμβολή κάνουν διαπομπή στον σταθμό της φεμτοκυψέλης
- Μειώνεται το φορτίο στην φεμτοκυψέλη (και στο backhaul της) καθώς δεν επιτρέπει απεριόριστο αριθμό ατόμων να συνδεθούν στο σταθμό της (αντίθετα με την πολιτική ανοικτού τύπου).

1.4 Σύγχρονη έρευνα πάνω στον έλεγχο ισχύος για κυψελωτά

δίκτυα δύο επιπέδων

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται μερικές από τις κυριότερες ερευνητικές προσπάθειες της διεθνούς βιβλιογραφίας πάνω στο θέμα του ελέγχου ισχύος σε κυψελωτά δίκτυα δύο επιπέδων, περιγράφοντας τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των εργασιών αυτών. Πολλές από αυτές αναφέρονται κυρίως στην διαχείριση των παρεμβολών σε δίκτυα δύο επιπέδων πράγμα το οποίο είναι λογικό, αφού ένας

τρόπος για να μειωθεί η παρεμβολή διαφορετικών επιπέδων είναι ο έλεγχος ισχύος των χρηστών.

- **Interference Mitigation Using Uplink Power Control for Two-Tier Femtocell Networks [7]:** Αυτή η εργασία παρουσιάζει δύο στρατηγικές μείωσης της παρεμβολής, που προσαρμόζουν τη μέγιστη ισχύ εκπομπής των φεμτο-χρηστών προκειμένου να επιτευχθεί η καταστολή της παρεμβολής διαφορετικών επιπέδων (cross-tier interference) στο σταθμό βάσης μιας μακροκυψέλης. Ο έλεγχος ισχύος ανοικτού και κλειστού βρόγχου (open-loop and closed-loop control) που εξετάζεται, μειώνει την παρεμβολή διαφορετικών επιπέδων σε επίπεδα μικρότερα από ένα σταθερό και ένα προσαρμοζόμενο κατώφλι αντίστοιχα, σε σχέση με τον θόρυβο και το επίπεδο παρεμβολής στο σταθμό βάσης της μακροκυψέλης. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι και οι δύο στρατηγικές αντισταθμίζουν αποτελεσματικά την υποβάθμιση της ρυθμισμένης ρυθμισμένης που συντελείται στο σταθμό της μακροκυψέλης λόγω της παρεμβολής διαφορετικών επιπέδων και ότι ο έλεγχος κλειστού βρόγχου επιφέρει καλύτερη ρυθμισμένη των φεμτοκυψελών (σε σχέση με τον έλεγχο ανοικτού βρόγχου) επηρεάζοντας ελάχιστα την απόδοση της μακροκυψέλης.
- **Uplink Capacity and Interference Avoidance for Two-Tier Femtocell Networks [8]:** Σε αυτό το άρθρο παρουσιάζεται μια ανάλυση της χωρητικότητας της ζεύξης ανόδου και μια στρατηγική αποφυγής παρεμβολών σε ένα δίκτυο CDMA δύο επιπέδων. Γίνεται εκτίμηση ενός μέτρου φασματικής απόδοσης σε όλο το δίκτυο (network-wide area spectral efficiency metric), που ονομάζεται OC (operating contour) και ορίζονται έτσι οι δυνατοί συνδυασμοί του μέσου αριθμού των ενεργών χρηστών των μακροκυψελών και των FAPs (σταθμών βάσης των φεμτοκυψελών) ανά περιοχή κυψέλης που ικανοποιούν μια συγκεκριμένη τιμή-στόχο της πιθανότητας διακοπής σύνδεσης (outage probability). Η ανάλυση χωρητικότητας παρέχει ένα ακριβή χαρακτηρισμό της πιθανότητας απώλειας σύνδεσης στη ζεύξη ανόδου,

λαμβάνοντας υπόψιν τον έλεγχο ισχύος, τις απώλειες διάδοσης και τα φαινόμενα σκίασης. Θεωρώντας την χειρότερη περίπτωση παρεμβολής σε φεμτοκυψέλη που βρίσκεται στα άκρα της μακροκυψέλης, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η αποφυγή παρεμβολής μέσω ενός φυσικού στρώματος που χρησιμοποιεί CDMA με μεταπήδηση χρόνου και η χρήση κατευθυντικών κεραιών (χωρισμός της κυψέλης σε τομείς) επιτρέπουν $\times 7$ φορές αύξηση της πυκνότητας των FAP σε σχέση με ένα διαιρεμένου φάσματος δίκτυο δύο επιπέδων με ομοιοκατευθυντικές κεραιές. Τέλος, μια περιοχή αποκλεισμού των φεμτοκυψελών καθώς και μια πολιτική διαπομπών ανάλογα με το επίπεδο (Tier) που ανήκουν οι χρήστες, προσφέρουν μικρή βελτίωση του παράγοντα OC.

- **Power Control in Two-Tier Femtocell Networks [9]:** Σε αυτή την εργασία, για την ποσοτικοποίηση του φαινομένου ανισοκατανομής των πόρων του συστήματος στους χρήστες αυτού λόγω της σχετικής θέσης αυτών σε σχέση με τον σταθμό βάσης της εκάστοτε κυψέλης (near-far effects) όταν συμβαίνει καθολική επαναχρησιμοποίηση συχνότητας (universal frequency reuse), προκύπτει μία θεμελιώδης σχέση που προσδίδει το μεγαλύτερο δυνατό λόγο σήματος προς θόρυβο και παρεμβολή (SINR), δεδομένου οποιουδήποτε συνόλου εφικτών σηματοθορυβικών λόγων (SINRs) των φεμτοκυψελών. Έτσι, οι συγγραφείς παρέχουν μια ανάλυση προϋπολογισμού του καναλιού (link budget analysis) που επιτρέπει την απλή και ακριβή ποσοτικοποίηση του παραπάνω φαινομένου σε ένα δίκτυο δύο επιπέδων. Επίσης, προτείνεται μία κατανεμημένη προσαρμογή του SINR βάσει συναρτήσεων χρησιμότητας σε φεμτοκυψέλες, με σκοπό την ανακούφιση της μακροκυψέλης από τη παρεμβολή διαφορετικών επιπέδων από τις φεμτοκυψέλες που χρησιμοποιούν ίδιες συχνότητες με αυτή (co-channel femtocells). Με αυτόν τον τρόπο κάθε χρήστης που ανήκει σε μια φεμτοκυψέλη μεγιστοποιεί την χρησιμότητα του, η οποία αποτελείται από δύο όρους: ο πρώτος είναι ουσιαστικά μια συνάρτηση ανταμοιβής για τον χρήστη σε σχέση με το πόσο ικανοποιητικό SINR έχει επιτύχει ενώ η δεύτερη αφορά την κοστολόγηση των χρηστών ανάλογα με το ποσοστό της παρεμβολής που προκαλούν στην

μακροκυψέλη. Εν τέλει, ο αλγόριθμος που σχεδιάζεται και υλοποιεί τα παραπάνω, επιτυγχάνει να ελαττώσει τις ισχύς των πιο ισχυρών φεμτο-παρεμβολέων, προκειμένου να μειωθεί η παρεμβολή διαφορετικών επιπέδων και να μπορούν οι μακρο-χρήστες να εξασφαλίσουν την επιθυμητή SINR τιμή-στόχο (SINR target).

➤ **Distributed interference management in femtocell networks [10]:** Σε αυτό το άρθρο προτείνονται δύο κατανεμημένοι αλγόριθμοι για τη διαχείριση της παρεμβολής σε κυψελωτά δίκτυα δύο επιπέδων κάνοντας χρήση ελέγχου ισχύος (power control) μαζί με έλεγχο πρόσβασης (admission control) στους φεμτο-χρήστες, οι οποίοι μοιράζονται το ίδιο φάσμα με τους μακρο-χρήστες. Οι μακρο-χρήστες, ως ιδιοκτήτες του φάσματος, έχουν μεγαλύτερη προτεραιότητα (prioritized users) από τους φεμτο-χρήστες και συνεπώς η ποιότητα υπηρεσίας τους (QoS) εκφρασμένη στα πλαίσια του ελάχιστου-στόχου SINR, θα πρέπει πάντοτε να ικανοποιείται. Σε αντίθεση οι φεμτο-χρήστες ακολουθούν δύο διαφορετικές στρατηγικές στον κάθε αλγόριθμο, με τη μία να είναι η ισορρόπηση μεταξύ ρυθμαπόδοσης και κατανάλωσης ισχύος και την άλλη η ήπια επίτευξη της ποιότητας υπηρεσίας τους (soft QoS provisioning). Οι προτεινόμενοι αλγόριθμοι μαζί με μια αποτελεσματική πολιτική κοστολόγησης συνδυασμένη με έλεγχο πρόσβασης, καταφέρνουν να επιτυγχάνουν εγγυημένη ποιότητα υπηρεσίας στους μακρο-χρήστες ενώ οι φεμτο-χρήστες αξιοποιούν βέλτιστα τους υπόλοιπους πόρους του δικτύου.

➤ **Distributed Power Control for Spectrum-Sharing Femtocell Networks Using Stackelberg Game [11]:** Αυτό το άρθρο αναπτύσσει στρατηγικές κατανομής της ενέργειας – ισχύος (power allocation strategies) σε ένα κυψελωτό δίκτυο δύο επιπέδων, χρησιμοποιώντας στοιχεία από την θεωρία παιγνίων. Συγκεκριμένα, υλοποιείται ένα Stackelberg παίγνιο στο οποίο ο σταθμός της μακροκυψέλης έχει τον ρόλο του “αρχηγού” (leader) ενώ οι φεμτοκυψέλες είναι οι “ακόλουθοι” (followers) και μέσω μιας πολιτικής κοστολόγησης των φεμτο-χρηστών καθώς και έναν περιορισμό στην ολική παρεμβολή που μπορεί να δεχτεί ο σταθμός της μακροκυψέλης, όχι μόνο προστατεύεται η μακροκυψέλη

από την παρεμβολή δύο επιπέδων, αλλά και ο αλγόριθμος που υλοποιεί το παίγνιο Stackelberg οδηγείται σε ισορροπία μεγιστοποιώντας παράλληλα την χρησιμότητα των χρηστών της μακροκυψέλης καθώς και των φεμτοκυψελών.

- **Distributed Pareto-Optimal Power Control for Utility Maximization in Femtocell Networks [12]:** Σε αυτό το άρθρο προτείνονται δύο Pareto-βέλτιστοι κατανεμημένοι αλγόριθμοι ελέγχου ισχύος για ένα κυψελωτό δίκτυο δύο επιπέδων, όπου και εδώ θεωρείται πρώτη προτεραιότητα η απαίτηση για προστασία της ποιότητας υπηρεσίας (QoS) των μακρο-χρηστών, πράγμα που αποτελεί μια πρόκληση η οποία παρεμποδίζει την εφαρμογή των διαφόρων τεχνικών διαχείρισης παρεμβολής διαφορετικών επιπέδων σε ένα τέτοιο δίκτυο. Ο πρώτος αλγόριθμος μεγιστοποιεί το άθροισμα της χρησιμότητας όλων των χρηστών και των δύο επιπέδων, επιδιώκοντας την επίτευξη ενός ελάχιστου SINR για όλους τους χρήστες, που έχει επιβληθεί από την μακροκυψέλη, πετυχαίνοντας μάλιστα ελάχιστη σπατάλη πόρων στο δίκτυο. Αφ' ετέρου ο δεύτερος αλγόριθμος μεγιστοποιεί το άθροισμα της χρησιμότητας των φεμτο-χρηστών (και μόνο αυτών) ενώ παράλληλα στοχεύει στην επίτευξη των ελάχιστων SINR-στόχων για τους μακρο-χρήστες (θεωρώντας ότι θέλουν μόνο υπηρεσίες φωνής), καθιστώντας τον έτσι πιο σταθερό, πιο επεκτάσιμο, πιο γρήγορο και πιο αποτελεσματικό από τον πρώτο αλγόριθμο. Τέλος, υλοποιούνται μηχανισμοί οι οποίοι ευέλικτα ορίζουν την προτεραιότητα πρόσβασης των μακρο και φεμτο-χρηστών στους εκάστοτε σταθμούς καθώς και τον δίκαιο διαμοιρασμό των πόρων του δικτύου μεταξύ των χρηστών του.

- **A Distributed Cluster-Based Self-Organizing Approach to Resource Allocation in Femtocell Networks [13]:** Σε αυτό το άρθρο μελετώνται δίκτυα δύο επιπέδων με μεγάλη πυκνότητα χρηστών όπου δημιουργούνται συστάδες (clusters) φεμτοκυψελών ενώ παράλληλα υπάρχει μεγάλη επαναχρησιμοποίηση του φάσματος σε κοντινές περιοχές. Προτείνεται κατανεμημένος αλγόριθμος ο οποίος ακολουθεί

μια προσέγγιση αυτόνομη και συσταδική (cluster-based approach) προκειμένου να γίνει κατάλληλος διαμοιρασμός των φασματικών και των ενεργειακών πόρων (ισχύς) του συστήματος στις φεμτοκυψέλες. Ο εν λόγω αλγόριθμος χωρίζεται σε τρεις φάσεις (φάση ανίχνευσης, φάση ενημέρωσης και εκτίμησης - ονομάζεται έτσι επειδή χρησιμοποιεί ευρετική μέθοδο (heuristic) - και τέλος φάση ελέγχου ισχύος) και στόχος του είναι να επιτύχει την βέλτιστη ρυθμαπόδοση άνω ζεύξης του *cluster-based* δικτύου με τρόπο αποκεντρωμένο - πράγμα το οποίο πετυχαίνει, ενώ παράλληλα επιτυγχάνει και να ελαττώσει αποτελεσματικά τις διακυψελικές παρεμβολές που προκαλούν οι φεμτοκυψέλες στο συμβατικό μακροκυψελικό δίκτυο.

- **Per Cluster Based Opportunistic Power Control for Heterogeneous Networks [14]:** Σε αυτή την εργασία υλοποιείται ένας αλγόριθμος ελέγχου ισχύος άνω ζεύξης που χρησιμοποιείται για να περιορίσει τη συνολική παρεμβολή που προκαλείται από πολλές φεμτοκυψέλες συνωστισμένες σε ένα κτήριο (1 μεγάλο *cluster* δηλαδή), σε ένα κυψελωτό δίκτυο δύο επιπέδων. Ο σταθμός της μακροκυψέλης αποφασίζει για την τιμή της παρεμβολής που μπορεί να υποστεί από κάθε φεμτοκυψέλη και έτσι οι φεμτο-χρήστες περιορίζουν τις ισχύς τους προκειμένου να ικανοποιήσουν αυτόν τον περιορισμό και να ελαττώσουν με αυτόν τον τρόπο την παρεμβολή διαφορετικών επιπέδων που δημιουργείται στο εν λόγω δίκτυο. Σε σύγκριση με άλλες εργασίες, αυτή εδώ θεωρεί ότι δεν είναι όλοι οι χρήστες των φεμτοκυψελών ενεργοί (active) οπότε προτείνονται δύο αλγόριθμοι ανίχνευσης των ενεργών χρηστών, ένας κεντροποιημένος (centralized) και ένας καταναμημένος (distributed). Οι δύο αυτοί αλγόριθμοι εκμεταλλεύονται μεγάλης κλίμακας πληροφορία για το κανάλι επικοινωνίας των χρηστών καθώς και το φαινόμενο της σκίασης (shadowing) προκειμένου να επιτύχουν ικανοποιητική ποιότητα στο κανάλι άνω ζεύξης της μακροκυψέλης και κατά συνέπεια να αυξηθεί η συνολική ρυθμαπόδοση του συστήματος.

1.5 Αντικείμενο και Δομή της διπλωματικής εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής είναι η μελέτη της κατανομής της ισχύος των χρηστών ενός κυψελωτού δικτύου δύο επιπέδων (1 μακροκυψέλη και πολλές φεμτοκυψέλες ή FAPs). Θεωρούμε ότι στο σύστημα υπάρχουν 4 συνολικά είδη χρηστών που χωρίζονται ανάλογα με το επίπεδο που ανήκουν (φεμτο-χρήστες ή μακρο-χρήστες) και ανάλογα με το είδος της υπηρεσίας που θέλουν να ικανοποιήσουν (πραγματικού χρόνου χρήστες που ζητούν υπηρεσίες φωνής ή μη-πραγματικού χρόνου χρήστες που ζητούν υπηρεσίες που απαιτούν υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης όπως είναι π.χ. η μεταφορά δεδομένων). Στην συνέχεια θεωρούμε όλους αυτούς τους χρήστες ως παίκτες ενός μη συνεργατικού παίγνιου όπου κάθε παίκτης-χρήστης προσπαθεί να πραγματώσει την βέλτιστη γι' αυτόν στρατηγική εκπέμποντας όσο το δυνατόν λιγότερη ισχύ και πετυχαίνοντας την μεγαλύτερη δυνατή ρυθμιάδοση (throughput). Η λύση του παίγνιου αυτού αποτελεί μια κατάσταση ισορροπίας (Nash Equilibrium) όπου όλοι οι παίκτες έχουν μεγιστοποιήσει την ικανοποίησή τους από την χρήση των πόρων του δικτύου και αποτελεί και τη βέλτιστη κατανομή ισχύος των χρηστών του. Η εύρεση του σημείου ισορροπίας υλοποιείται από έναν αλγόριθμο ελέγχου ισχύος σε Δίκτυα Δύο Επιπέδων με Ικανοποίηση Ποικίλων Υπηρεσιών και Χρήση Κοστολόγησης (αλγόριθμος MTTPG) ο οποίος στην συνέχεια μελετάται διεξοδικά σε διάφορα σενάρια (use cases) όπου προκύπτουν διάφορα συμπεράσματα που αφορούν την κάλυψη των απαιτήσεων υπηρεσίας των διαφόρων ειδών χρηστών, τη χρησιμότητα των φεμτοκυψελών, το μέγιστο πλήθος των χρηστών του δικτύου που λαμβάνει ικανοποιητική ποιότητα υπηρεσιών καθώς και την ταχύτητα σύγκλισης του αλγορίθμου MTTPG.

Η δομή της διπλωματικής έχει ως εξής: στο 1^ο κεφάλαιο δίνονται διάφορες εισαγωγικές πληροφορίες για τις φεμτοκυψέλες καθώς και για τις σύγχρονες τάσεις έρευνας πάνω στο αντικείμενο της διπλωματικής (έλεγχος ισχύος σε δίκτυα δύο επιπέδων). Στο 2^ο κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά το μοντέλο του συστήματος το οποίο περιλαμβάνει τα είδη των χρηστών, τις απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας των χρηστών, τις συναρτήσεις χρησιμότητας που θα χρησιμοποιηθούν σε κάθε περίπτωση καθώς και το θέμα της κοστολόγησης των φεμτο-χρηστών. Στην συνέχεια, στο 3^ο

κεφάλαιο διατυπώνεται ο τρόπος επίλυσης του προβλήματος της κατανομής της ισχύος των χρηστών με στοιχεία από την θεωρία παιγνίων, παρουσιάζεται ο αλγόριθμος που δίνει τη λύση αυτή και αποδεικνύεται η ύπαρξη και η μοναδικότητά της. Στο 4^ο κεφάλαιο γίνεται μελέτη του παραπάνω αλγορίθμου μέσω διαφόρων προσομοιώσεων όπου εξάγονται διάφορα συμπεράσματα για το εν λόγω σύστημα ενώ το 5^ο κεφάλαιο περιλαμβάνει γενικά συμπεράσματα και κατευθύνσεις για περαιτέρω έρευνα. Το κεφάλαιο 6 αποτελείται από τη βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

2

Μοντέλο Συστήματος (System Model)

2.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα απαραίτητα στοιχεία, μεγέθη και λεπτομέρειες που χρειάζονται για την κατανόηση του συστήματος του δικτύου στο οποίο μοντελοποιείται το πρόβλημα της κατανομής ισχύος καθώς και για την περαιτέρω διατύπωση και επίλυση του.

- Το μοντέλο του συστήματος που χρησιμοποιείται αποτελείται από μία CDMA (Code Division Multiple Access) μακροκυψέλη και N φεμτοκυψέλες ή FAPs (Femto Access Points). Η ακτίνα εξυπηρέτησης του κεντρικού σταθμού της μακροκυψέλης είναι $R_c = 500m$ ενώ του κάθε FAP είναι $R_f = 50m$.

- Θεωρούμε ότι το CDMA σύστημα έχει χρονοσχισμές (time-slotted) και ότι όλοι οι χρήστες μπορούν να στείλουν ή να μεταδώσουν πληροφορία σε κάθε τέτοια χρονοσχισμή (slot). Αυτό γίνεται για τη διευκόλυνση της παρουσίασης και της ανάλυσης του προβλήματος της κατανομής ισχύος στους χρήστες. Ουσιαστικά κάθε

χρονοσχισμή είναι ένα μικρό σταθερό διάστημα χρόνου μέσα στο οποίο διενεργείται η μεταφορά (μερικών) πακέτων στο δίκτυο. Στην παρούσα εργασία μελετάται η συμπεριφορά των χρηστών κατά την διάρκεια μιας χρονοσχισμής όπου τα διάφορα μεγέθη όπως κέρδος μονοπατιού (path gain), ισχύς και ρυθμός μετάδοσης κάθε χρήστη παραμένουν σταθερά.

- Η μελέτη αφορά την άνω ζεύξη του δικτύου (uplink ή reverse link), δηλαδή την μεταφορά δεδομένων από τα τερματικά (Moving Stations) των χρηστών προς τους σταθμούς βάσης ($MS^{\text{πομπός}} \rightarrow BS^{\text{δέκτης}}$), είτε αυτοί είναι ο σταθμός της μακροκυψέλης (Macro Base Station ή MBS) είτε είναι κάποιο FAP.

- Κάθε FAP εξυπηρετεί 2 φεμτο-χρήστες που αποτελούν το CSG (Closed Subscribed Group) του και η πολιτική πρόσβασης στις φεμτοκυψέλες είναι κλειστού τύπου, δηλαδή επιλέγουμε την *closed access policy* (Βλ. Κεφάλαιο 1), κυρίως για να εξασφαλίσουμε την ιδιωτικότητα (privacy) και την ασφάλεια (security) των χρηστών των φεμτοκυψελών.

- Οι φεμτοκυψέλες εκπέμπουν στο ίδιο φάσμα συχνοτήτων που εκπέμπει και η μακροκυψέλη δηλαδή έχουμε πολιτική κοινού φάσματος (*Shared Spectrum policy* - Βλ. Κεφάλαιο 1). Έτσι αφού σε κάθε χρονοσχισμή εκπέμπουν και μεταδίδουν δεδομένα όλοι οι χρήστες, οι παρεμβολές που δέχεται ένας μεμονωμένος χρήστης στο δίκτυο προέρχονται από όλους τους υπόλοιπους χρήστες, φέμτο και μάκρο αντίστοιχα.

- Το σύνολο όλων των χρηστών του δικτύου το συμβολίζουμε με $L = L_m \cup L_f$, όπου L_m το σύνολο των μακρο-χρηστών του δικτύου με $|L_m| = m$, ενώ L_f το σύνολο των φεμτο-χρηστών, με $|L_f| = 2N$ (N FAPs με 2 χρήστες/FAP). Συνεπώς $|L| = m + 2N$.

- Το σύνολο όλων των σταθμών του δικτύου συμβολίζεται με $S = \{1, 2, \dots, N+1\}$, όπου το 1^ο στοιχείο αντιστοιχεί στον MBS ενώ τα υπόλοιπα αντιπροσωπεύουν τα N FAP.

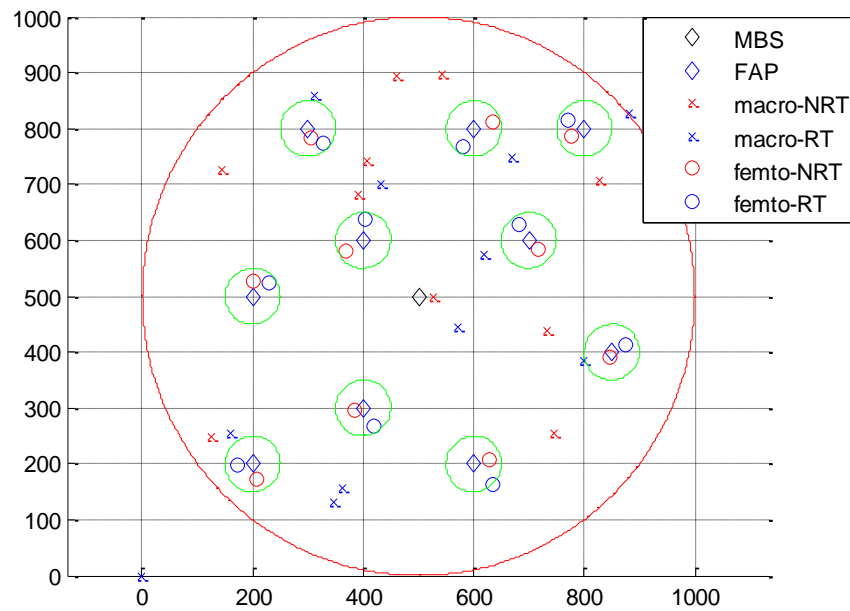
- Η ταξινόμηση των χρηστών γίνεται όχι μόνο λόγω επιπέδου (Tier) που ανήκουν (φέμτο ή μάκρο) αλλά και λόγω είδους υπηρεσίας την οποία επιθυμούν. Συγκεκριμένα υπάρχουν δύο ειδών χρήστες (ανάλογα με το είδος της υπηρεσίας που αιτούνται και είναι οι χρήστες πραγματικού χρόνου (real-time users, RT) και οι

χρήστες μη-πραγματικού χρόνου (non-real-time users, NRT). Οι μεν ζητούν την ικανοποίηση υπηρεσιών πραγματικού χρόνου όπως είναι π.χ. η μετάδοση φωνής (voice), οι δε την ικανοποίηση υπηρεσιών μη-πραγματικού χρόνου που συνήθως απαιτούν υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης όπως είναι π.χ. η μετάδοση δεδομένων (data). Έτσι, λαμβάνοντας υπόψη και τους δύο παραπάνω παράγοντες (είδος υπηρεσίας προς ικανοποίηση και είδος χρήστη όσον αφορά το επίπεδο που αυτός ανήκει) καταλήγουμε σε συνολικά 4 κατηγορίες χρηστών: $L = L_{m,NRT} \cup L_{m,RT} \cup L_{f,NRT} \cup L_{f,RT}$ (δηλαδή μη-πραγματικού χρόνου μακρο-χρήστες, πραγματικού χρόνου μακρο-χρήστες, μη-πραγματικού χρόνου φεμτο-χρήστες και πραγματικού χρόνου φεμτο-χρήστες). Αυτός ο διαχωρισμός έχει σημασία διότι σε κάθε κατηγορία χρήστη θα αντιστοιχεί και διαφορετική συνάρτηση χρησιμότητας (Βλ. ενότητα 2.6). Σε κάθε φεμτοκυψέλη θεωρούμε ότι υπάρχει ένας μη-πραγματικού χρόνου φεμτο-χρήστης και ένας πραγματικού χρόνου αντίστοιχα (δύο συνολικά χρήστες ανά FAP).

- Θεωρούμε ότι κάθε χρήστης $i \in L$ μπορεί να εκπέμψει ισχύ (power) p_i , με $p_i \in [0, P_i^{Max}]$, όπου P_i^{Max} η μέγιστη ισχύ με την οποία μπορούν να μεταδώσουν οι χρήστες και λαμβάνεται ίση με $2Watt$. Η τιμή αυτή της ισχύος προκύπτει λόγω τεχνικών και φυσικών περιορισμών που έχουν να κάνουν κυρίως με το βάρος της συσκευής – οι χρήστες ζητούν όλο και περισσότερο μικρότερες συσκευές, άρα και μικρότερες μπαταρίες οι οποίες θα έχουν παράλληλα όσο το δυνατόν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής – καθώς και με το ποσοστό της ακτινοβολίας που εκπέμπει μια ασύρματη συσκευή και απορροφάται από τον ανθρώπινο οργανισμό. Ο αντίστοιχος ρυθμός μετάδοσης (Rate) για το χρήστη $i \in L$ συμβολίζεται με R_i και ισχύει ότι: $R_i \in [0, R_i^{Max}]$ με $R_i^{Max} = 2.4Mbps$ να είναι ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης που μπορεί να πετύχει ένας χρήστης στο εν λόγω κυψελωτό δίκτυο.

- Σε κάθε χρονοσχισμή, το κέρδος μονοπατιού ή καναλιού (path or channel gain) που ορίζεται ως ο παράγοντας ελάττωσης της ισχύος ενός σήματος όταν αυτό μεταδίδεται στο χώρο, θεωρείται σταθερό και για τη μελέτη του εν λόγω συστήματος αγνοήθηκαν φαινόμενα διαλείψεων και σκίασης (Rayleigh fading and log-normal shadowing), χρησιμοποιώντας ένα απλοποιημένο μοντέλο απωλειών διαδρομής (path loss model) που βασίζεται στο IMT-2000 specification και το οποίο χρησιμοποίησαν οι συγγραφείς του άρθρου [9].

Τυπικά, μια εικόνα του κυψελωτού δικτύου που εξετάζεται έχει τη μορφή του Σχήματος 5:



Σχήμα 5: Μοντέλο Συστήματος

2.2 Είδη παρεμβολών και πίνακας G

Σε ένα δίκτυο δύο επιπέδων όπως αυτό που εξετάζεται, εμφανίζονται πέντε συνολικά είδη παρεμβολών. Γενικά η παρεμβολή που υφίσταται ένας χρήστης $i \in L$ σαν μέγεθος υπολογίζεται στον εκάστοτε σταθμό (MBS ή FAP) που εξυπηρετεί το συγκεκριμένο χρήστη. Όπως αναφέρθηκε λοιπόν και στην ενότητα 1.2, υπάρχουν τα εξής είδη παρεμβολής:

- **Ιδίου επιπέδου παρεμβολή (co-tier interference) :**

- 1) Μακρο-χρήστης που παρεμβάλλει σε άλλο μακρο-χρήστη ο οποίος εκπέμπει στον MBS.

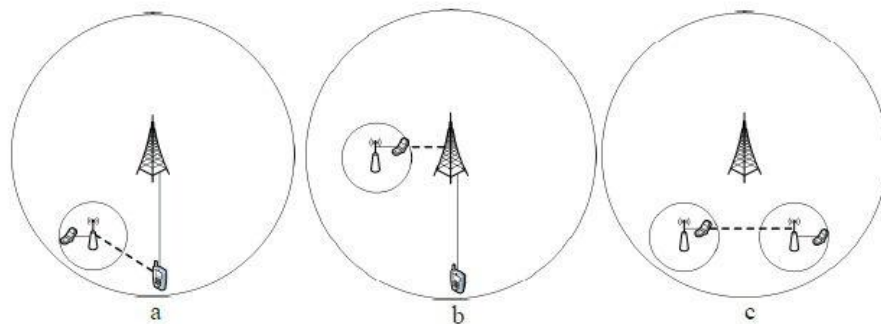
2) Φεμτο-χρήστης που παρεμβάλλει σε άλλο φεμτο-χρήστη, ο οποίος ανήκει στην ίδια φεμτοκυψέλη με τον πρώτο, ενώ αυτός εκπέμπει στο FAP της φεμτοκυψέλης του.

- **Διαφορετικών επιπέδων παρεμβολή (cross-tier interference) :**

3) Μακρο-χρήστης που παρεμβάλλει σε φεμτο-χρήστη αφού το σήμα του φτάνει στο FAP που εξυπηρετεί το δεύτερο (περίπτωση a, Βλ. Σχήμα 6).

4) Φεμτο-χρήστης που παρεμβάλλει σε μακρο-χρήστη αφού το σήμα του φτάνει στον MBS στον οποίο εκπέμπει ο δεύτερος (περίπτωση b, Βλ. Σχήμα 6).

5) Φεμτο-χρήστης που παρεμβάλλει σε άλλον φεμτο-χρήστη με τον δεύτερο να ανήκει σε διαφορετική φεμτοκυψέλη από τον πρώτο (περίπτωση c, Βλ. Σχήμα 6).



a. MU to FAP interference, b. FU to MBS interference c. FU to FAP interference.

Σχήμα 6: Οι τρεις περιπτώσεις διαφορετικού επιπέδου παρεμβολής (cross-tier interference)

Σκοπός είναι τώρα να βρεθεί το κέρδος μονοπατιού (*path gain*) $g_{i,j}$ από τον χρήστη $j \in L$ μέχρι τον σταθμό $i \in S$ για $\forall i, j$. Ανάλογα λοιπόν με το είδος της παρεμβολής που δημιουργείται υπάρχει και διαφορετικός τύπος που δίνει το κέρδος μονοπατιού σύμφωνα με το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε (περιπτώσεις 1-5) και γενικά είναι της μορφής: $g_{i,j} = f(d_{i,j})$, δηλαδή είναι συνάρτηση της απόστασης του

χρήστη j από τον σταθμό i (σε m). Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε το παρακάτω μοντέλο [9]:

$$g_{i,j} = \begin{cases} K_c d_{i,j}^{-a_c}, m \rightarrow MBS & (1) \\ K_{f_i} d_{i,j}^{-b}, f \rightarrow FAP, f \in FAP & (2) \\ K_c W d_{i,j}^{-a_c}, m \rightarrow FAP & (3) \\ K_{f_0} W d_{i,j}^{-a_{f_0}}, f \rightarrow MBS & (4) \\ K_{f_0} W^2 d_{i,j}^{-a_{f_0}}, f \rightarrow FAP, f \notin FAP & (5) \end{cases} \quad (1)$$

Στην εξίσωση (1) έχουμε: m είναι μακρο-χρήστης, f φεμτο-χρήστης, a_c, b, a_{f_0} είναι οι εξωτερικού χώρου, εσωτερικού χώρου και *indoor-to-outdoor* αντίστοιχα δείκτες απωλειών διαδρομής (*path loss exponents* – θεωρούμε ότι $a_c = a_{f_0} = a$), $K_{c,dB} = 30 \log_{10}(f_{c,MHz}) - 71$ είναι η σταθερή απώλεια διάδοσης ελευθέρου χώρου σε dB , f_c είναι η φέρουσα συχνότητα σε MHz ($1900 MHz$ για CDMA σύστημα), K_{f_i} είναι η σταθερή απώλεια διάδοσης μεταξύ του φεμτο-χρήστη i και του FAP στο οποίο εκπέμπει, K_{f_0} είναι η σταθερή απώλεια διάδοσης μεταξύ ενός φεμτο-χρήστη και ενός σταθμού διαφορετικού από αυτόν στον οποίο εκπέμπει (θεωρούμε ότι $K_{f_0} = K_c$) και τέλος ο όρος W αναφέρεται ως απώλειες τοίχου-χωρίσματος (*partition loss*) και ουσιαστικά χρησιμοποιείται στον υπολογισμό του $g_{i,j}$ οποτεδήποτε το σήμα ενός χρήστη περνάει από τοίχο κατά την διάδοση του. Στην περίπτωση (5) το σήμα διαπερνά δύο τοίχους (όταν φεύγει από την μία φεμτοκυψέλη και εισέρχεται σε άλλη) οπότε χρησιμοποιείται ο όρος W^2 .

Έτσι ορίζεται ο πίνακας κερδών μονοπατιών (*path gain table*) $G = \{g_{i,j}\}_{(N+1) \times (m+2N)}$, όπου $j \in L = \{1, 2, \dots, m, m+1, m+2, \dots, m+(2N-1), m+2N\}$, δηλαδή οι στήλες του G είναι οι χρήστες, ξεκινώντας από τους μακρο-χρήστες και μετά βάζοντας ανά 2 τους χρήστες των FAP σε μερική αντιστοιχία με το σύνολο $i \in S = \{1, 2, \dots, N+1\}$, το οποίο αποτελεί τις γραμμές του G (εν ολίγοις γραμμές-σταθμοί, στήλες-χρήστες). Αυτό που εννοείται λέγοντας μερική αντιστοιχία μεταξύ

των συνόλων L και S είναι ότι στο 1^ο στοιχείο του S (το 1 - η πρώτη γραμμή του G) που είναι ο MBS αντιστοιχούν τα εξής στοιχεία του $L: \{1, \dots, m\}$, που αποτελούν τους μακρο-χρήστες, ενώ στο 2^ο στοιχείο του S , (το 2 - η δεύτερη γραμμή του G) που αντιπροσωπεύει το πρώτο FAP, αντιστοιχούν τα στοιχεία $\{m+1, m+2\}$ του L (οι χρήστες δηλαδή του συγκεκριμένου FAP) και ούτω καθεξής μέχρι το $N+1$ στοιχείο του S που είναι το N - οστό FAP και στο οποίο αντιστοιχούν οι φεμτο-χρήστες $\{m+(2N-1), m+2N\}$ του L συνόλου.

Οπότε γενικά ο G έχει την παρακάτω μορφή:

$$G = \begin{pmatrix} \begin{bmatrix} g_{1,1} & g_{1,2} & \cdots & g_{1,m} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} g_{1,m+1} & g_{1,m+2} & \cdots & g_{1,m+(2N-1)} & g_{1,m+2N} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} g_{2,1} & g_{2,2} & \cdots & g_{2,m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{N+1,1} & g_{N+1,2} & \cdots & g_{N+1,m} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} g_{2,m+1} & g_{2,m+2} & \cdots & g_{2,m+(2N-1)} & g_{2,m+2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ g_{N+1,m+1} & g_{N+1,m+2} & \cdots & g_{N+1,m+(2N-1)} & g_{N+1,m+2N} \end{bmatrix} \end{pmatrix}$$

,όπου ο πάνω αριστερά πίνακας έχει τα κέρδη μονοπατιών από όλους τους μακρο-χρήστες προς τον MBS (co-tier), ο πάνω δεξιά τα αντίστοιχα κέρδη από τους φεμτο-χρήστες όλων των FAP προς τον MBS (cross-tier), ο κάτω αριστερά τα κέρδη των όλων των μακρο-χρηστών προς όλα τα FAPs (ένα για κάθε γραμμή, cross-tier) και τέλος ο κάτω δεξιά πίνακας περιέχει τα κέρδη μονοπατιών από οποιονδήποτε φεμτο-χρήστη σε οποιοδήποτε FAP, συμπεριλαμβανομένου και αυτού στο οποίο εκπέμπει ο εκάστοτε φεμτο-χρήστης (co και cross-tier).

2.3 Λόγος σήματος προς θόρυβο και παρεμβολή (SINR)

Έχοντας ορίσει τα κέρδη μονοπατιών από οποιονδήποτε χρήστη του δικτύου σε οποιοδήποτε σταθμό, μπορεί να οριστεί με σαφήνεια ο λόγος σήματος προς θόρυβο και παρεμβολή (SINR) για κάθε $i \in L$ χρήστη ως:

$$\gamma_i = \frac{W}{R_i} \frac{g_{s_i,i} P_i}{\sum_{\forall j \neq i} g_{s_i,j} P_j + \sigma_i} = G \frac{g_{s_i,i} P_i}{I_{s_i,-i}(\bar{p}_{-i})} \quad (2)$$

, όπου $G = W/R_i$ είναι το κέρδος επεξεργασίας του συστήματος, W το εύρος ζώνης, σ_i η ισχύς θορύβου (AWGN), R_i ο ρυθμός μετάδοσης του χρήστη i , $g_{i,j}$ το κέρδος μονοπατιού από τον χρήστη j προς τον σταθμό i όπως ορίστηκε στην προηγούμενη ενότητα, s_i ο σταθμός που εξυπηρετεί τον χρήστη i , \bar{p}_{-i} είναι ένα διάνυσμα που περιέχει όλες τις ισχύς των χρηστών του δικτύου εκτός από την ισχύ του i χρήστη, ενώ ο παράγοντας $I_{s_i,-i}(\bar{p}_{-i})$ υποδηλώνει το σύνολο των παρεμβολών (μαζί με τον θόρυβο) στον σταθμό $s_i \in S$, όταν αυτός λαμβάνει δεδομένα από τον χρήστη του, i . Συνεπώς, στον υπολογισμό του SINR λαμβάνονται υπόψη οι παρεμβολές ιδίου και διαφορετικού επιπέδου από όλους τους χρήστες στο δίκτυο (όλοι παρεμβάλλουν στον i χρήστη εκτός βέβαια από τον ίδιο).

2.4 Συνάρτηση Χρησιμότητας U και ρυθμαπόδοσης T

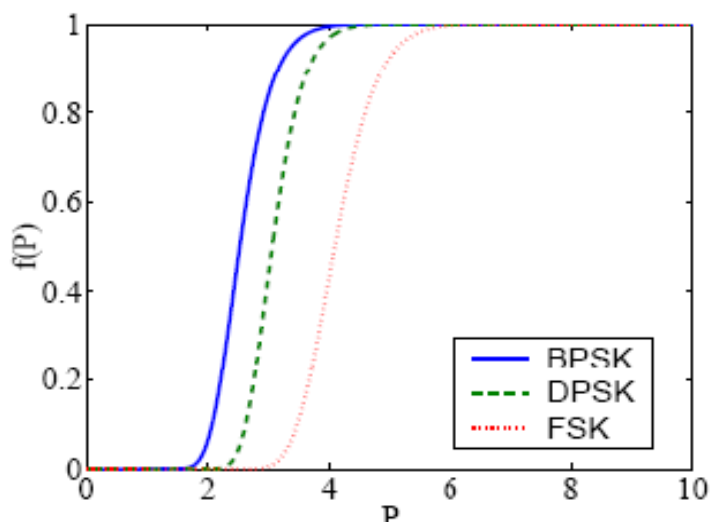
Λόγω των ποικίλων υπηρεσιών που ζητούν οι χρήστες (Βλ. παρακάτω ενότητα 2.5) και λόγω των δύο διαφορετικών επιπέδων χρηστών που υπάρχουν στο σύστημα που εξετάζεται, εισάγεται η έννοια της *συνάρτησης χρησιμότητας (utility function)* για κάθε χρήστη $i \in L$, η οποία αντιπροσωπεύει τον βαθμό ικανοποίησης ενός χρήστη σε σχέση με το αναμενόμενο ισοζύγιο (tradeoff) μεταξύ της πραγματικής ρυθμαπόδοσής του T_i και της αντίστοιχης κατανάλωσης ενέργειας ανά χρονοσχιμή (p_i). Ο γενικός τύπος της συνάρτησης αυτής είναι [15]:

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

, όπου $R_i^* \equiv R_i^F f_i(\gamma_i)$ είναι ο πραγματικός ρυθμός μετάδοσης άνω ζεύξης του χρήστη i στην υπό μελέτη χρονοσχιμή, R_i^F είναι μια κατάλληλα επιλεγμένη σταθερή τιμή ρυθμαπόδοσης, \bar{p}_{-i} είναι ένα διάνυσμα που περιέχει όλες τις ισχύς των χρηστών του

δικτύου εκτός από την ισχύ του i χρήστη, ενώ $f_i(\gamma_i)$ είναι η συνάρτηση απόδοσης (*efficiency function*).

Η συνάρτηση απόδοσης εκφράζει την πιθανότητα επιτυχούς μεταφοράς ενός πακέτου το οποίο μεταδίδει ο χρήστης i και είναι αύξουσα συνάρτηση του λόγου σήματος προς θόρυβο και παρεμβολής γ_i σε κάθε χρονοσχισμή. Η συνάρτηση απόδοσης, εξαρτάται από το σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης (*modulation and coding scheme*) που χρησιμοποιείται για τη μετάδοση των δεδομένων (Βλ. Σχήμα 7), όταν ο ρυθμός με τον οποίο μεταφέρει δεδομένα ο χρήστης διατηρείται σταθερός κατά τη διάρκεια μίας χρονοσχισμής.



Σχήμα 7: Συνάρτηση απόδοσης για διαφορετικά σχήματα διαμόρφωσης (BPSK, DPSK, FSK)

Οι ιδιότητες τις οποίες θα πρέπει να ικανοποιεί μια συνάρτηση απόδοσης είναι οι εξής [15]:

- 1) f_i αύξουσα συνάρτηση ως προς γ_i

- 2) f_i συνεχής, δύο φορές παραγωγίσιμη ως προς γ_i και σιγμοειδής ως προς γ_i ¹
- 3) $f_i(0) = 0$ προκειμένου να ισχύει ότι $T_i|_{p_i=0} = 0$ και συνεπώς $\lim_{p_i \rightarrow 0^+} U_i = 0^+$
- 4) $f_i(\infty) = 1$.

Στην συνέχεια θα θεωρείται ότι η συνάρτηση απόδοσης είναι η ίδια για όλους τους χρήστες και θα συμβολίζεται με $f(\gamma_i)$.

Η συνάρτηση πραγματικής ρυθμαπόδοσης (ή απλά ρυθμαπόδοσης) $T_i(R_i^*, p_i, \bar{p}_{-i}) \equiv T_i(R_i^*)$ αντικατοπτρίζει το επίπεδο ευχαρίστησης του χρήστη $i \in L$ σε σχέση με τον πραγματικό ρυθμό μετάδοσης που αυτός επιτυγχάνει, R_i^* καθώς και αν ο ρυθμός αυτός ικανοποιεί τελικά την ποιότητα υπηρεσιών (QoS) που ο χρήστης είχε ζητήσει. Οι γενικές ιδιότητες που μια τέτοια συνάρτηση είναι επιθυμητό να έχει είναι [15]:

- 1) T_i γνησίως αύξουσα ως προς R_i^*
- 2) T_i συνεχής, δύο φορές παραγωγίσιμη ως προς R_i^*
- 3) $T_i(0) = 0$, ώστε $\lim_{R_i \rightarrow 0^+} U_i = 0^+$
- 4) Η T_i άνω φραγμένη ($T_i(R_i^*) \leq 1$)
- 5) T_i σιγμοειδής ή αυστηρά κοίλη (αντίστοιχα κυρτή) συνάρτηση ως προς R_i^* , με πεδίο ορισμού το: $[0, R_i^{Max}]$ όπου $R_i^{Max} = 2.4Mbps$ είναι ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης που μπορεί να πετύχει ένας χρήστης στο δίκτυο.

¹ Η συνάρτηση $f(x)$ ονομάζεται σιγμοειδής (sigmoidal) εάν έχει μοναδικό σημείο

καμπής, x_{Infl} και ισχύουν οι εξής σχέσεις: $\left. \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \right|_{x < x_{Infl}} > 0$ και $\left. \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \right|_{x > x_{Infl}} < 0$.

Η χρησιμότητα της ιδιότητας 5 διευκρινίζεται στην επόμενη ενότητα όπου αναφερόμαστε στην ικανοποίηση των απαιτήσεων ποιότητας των χρηστών και στο πώς αυτές αντικατοπτρίζονται μέσω της συνάρτησης ρυθμαπόδοσης T_i και κατά συνέπεια και της συνάρτησης χρησιμότητας U_i .

2.5 Ικανοποίηση ποιότητας υπηρεσιών (QoS)

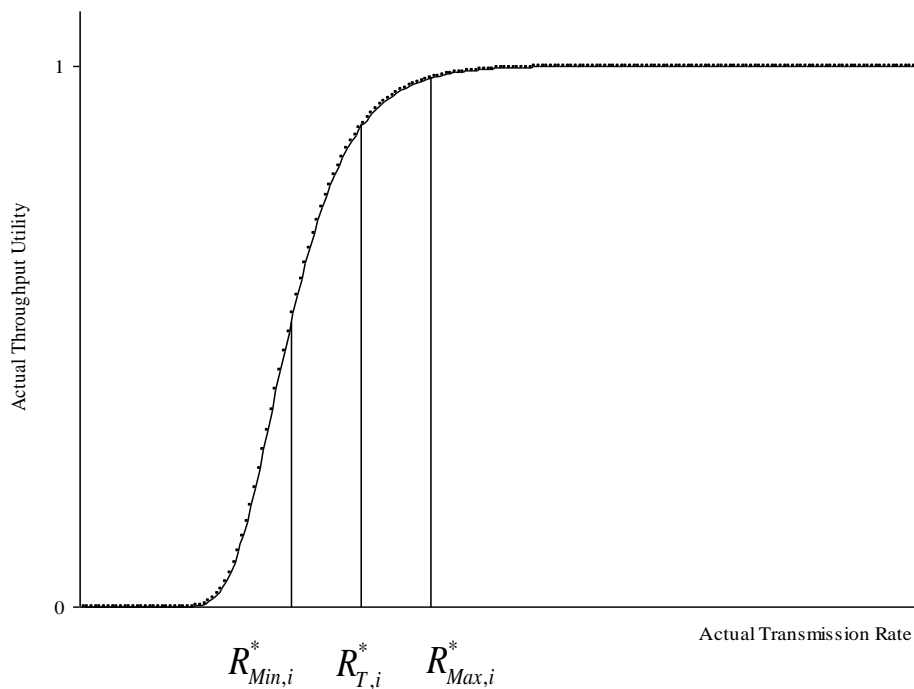
Όπως έχει αναφερθεί χαρακτηριστικά στην ενότητα 2.1, στο σύστημα υπάρχουν συνολικά 4 κατηγορίες χρηστών: $L = L_{m,NRT} \cup L_{m,RT} \cup L_{f,NRT} \cup L_{f,RT}$. Αν λάβουμε υπόψιν μόνο τις απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσιών των χρηστών, ανεξάρτητα του επιπέδου που ανήκουν (φεμτο ή μακρο δηλαδή), είναι δυνατή η κατάταξη των χρηστών του δικτύου σε δύο μεγάλες κατηγορίες [15]:

- **Χρήστες πραγματικού χρόνου (real time users-RT)**, οι οποίοι ζητούν την ικανοποίηση βραχυπρόθεσμων και αυστηρών απαιτήσεων όσον αφορά την ποιότητα υπηρεσίας (QoS). Το σύνολό τους συμβολίζεται ως: $L_{RT} = L_{m,RT} \cup L_{f,RT}$ (δηλαδή θεωρούμε ότι κάποιος από τους μακρο-χρήστες είναι RT χρήστες και ένας φεμτο-χρήστης από κάθε FAP επίσης). Ονομάζονται και χρήστες φωνής (voice) ή πολυμέσων (multimedia).
- **Χρήστες μη-πραγματικού χρόνου (non-real time users-NRT)**, οι οποίοι έχουν ως στόχο την επίτευξη όσο το δυνατόν μεγαλύτερης ρυθμαπόδοσης, ενώ ταυτόχρονα έχουν και μεγάλη ανοχή στην καθυστέρηση των πακέτων (delay). Το σύνολό τους συμβολίζεται ως: $L_{NRT} = L_{m,NRT} \cup L_{f,NRT}$. Ονομάζονται και χρήστες δεδομένων (data users).

2.5.1 RT χρήστες

Όσον αφορά τις RT υπηρεσίες, επειδή οι χρήστες που ζητούν τέτοιου είδους υπηρεσία έχουν μικρές ανοχές στις καθυστερήσεις των πακέτων καθώς και

απαιτήσεις για βραχυπρόθεσμη ρυθμαπόδοση, θεωρούμε ότι η συνάρτηση ρυθμαπόδοσης T_i θα πρέπει να είναι σιγμοειδούς μορφής συναρτήσει του πραγματικού ρυθμού μετάδοσης R_i^* (Βλ. Σχήμα 8) για να ικανοποιούνται αυτές οι απαιτήσεις. Εδώ εισάγουμε την έννοια του ρυθμού-στόχου $R_{T,i}^*$, η οποία υποδηλώνει την ιδανική τιμή του πραγματικού ρυθμού μετάδοσης ενός χρήστη $i \in L_{RT}$, για την οποία οι απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας του χρήστη, οι περιορισμοί για την ανοχή στην καθυστέρηση των πακέτων καθώς και η απαίτηση για βραχυπρόθεσμη ρυθμαπόδοση ικανοποιούνται. Τα επιτρεπτά όρια-αποκλίσεις από αυτή την τιμή-στόχο εκφράζονται μέσω του παράγοντα ελαστικότητας (Margin Factor- MF_i) και είναι: $R_{Min,i}^* = R_{T,i}^* - MF_i$ (ελάχιστο όριο) και $R_{Max,i}^* = R_{T,i}^* + MF_i$ (ανώτερο όριο). Δηλαδή ένας χρήστης θεωρείται ικανοποιημένος όταν ο πραγματικός ρυθμός μετάδοσής του κυμαίνεται στο εύρος $[R_{Min,i}^*, R_{Max,i}^*]$.



Σχήμα 8: Συνάρτηση ρυθμαπόδοσης T_i για RT χρήστες.

Πιο αναλυτικά, αναφέρεται ότι για μία υπηρεσία πραγματικού χρόνου ο παράγοντας ελαστικότητας προσδιορίζει την ελάχιστη τιμή αποδεκτής

ρυθμαπόδοσης, δηλαδή $R_{Min,i}^* = R_{T,i}^* - MF_i$. Επιπλέον, όταν ο πραγματικός ρυθμός μετάδοσης του χρήστη κυμαίνεται στο εύρος $[R_{Min,i}^*, R_{T,i}^*]$, τότε η συνάρτηση ρυθμαπόδοσής του μειώνεται αργά σε σχέση με το ρυθμό μετάδοσης. Αντίθετα, όταν ο πραγματικός ρυθμός μετάδοσης του χρήστη είναι μικρότερος από το κατώτατο όριο, δηλαδή $R_i^* < R_{Min,i}^*$, τότε η συνάρτηση ρυθμαπόδοσής του μειώνεται κατακόρυφα σε σχέση με το ρυθμό μετάδοσης, δηλώνοντας έτσι στο σύστημα ότι ο χρήστης χρειάζεται περισσότερους προσφερόμενους πόρους από αυτό. Συνεπώς, η τιμή $R_{Min,i}^*$ θα πρέπει να αποτελεί το μοναδικό σημείο καμπής της σιγμοειδούς συνάρτησης $T_i, i \in L_{RT}$. Η προηγούμενη σχεδιαστική επιλογή δίνει την δυνατότητα στον RT χρήστη να ελαττώσει την πραγματική ρυθμαπόδοση άνω ζεύξης του μέχρι του κατώτατου ορίου ($R_{Min,i}^*$) προκειμένου να αντισταθμίσει τις κακές συνθήκες καναλιού (bad channel conditions) που επικρατούν σε περιβάλλοντα γρήγορων διαλείψεων (fast fading channels environment), επιτρέποντάς του ταυτόχρονα να μεταδίδει δεδομένα χωρίς να τον απορρίπτει το δίκτυο. Το τελευταίο θα συνέβαινε εάν η συνάρτηση ρυθμαπόδοσης του χρήστη ήταν βηματικής μορφής.

Επιπρόσθετα, αναφέρεται ότι η περαιτέρω αύξηση του πραγματικού ρυθμού μετάδοσης πέραν της ιδανικής τιμής, $R_{T,i}^*$, δεν έχει ως αποτέλεσμα την αναλογική αύξηση της ρυθμαπόδοσης που λαμβάνει ο χρήστης. Ο χρήστης λαμβάνει σχεδόν τη μέγιστη χρησιμότητα για ρυθμό μετάδοσης $R_{T,i}^*$ και έπειτα όσο ο ρυθμός μετάδοσης αυξάνει, δηλαδή $R_i \rightarrow \infty$, η ρυθμαπόδοση τείνει ασυμπτωτικά στη μέγιστη τιμή της. Η προηγούμενη παρατήρηση βασίζεται στις ιδιότητες των υπηρεσιών πραγματικού χρόνου, όπου όταν οι απαιτήσεις των χρηστών έχουν ικανοποιηθεί, παρέχοντας στους χρήστες τον επιθυμητό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, η επιπρόσθετη παροχή μεγαλύτερου ρυθμού μετάδοσης προκαλεί πολύ μικρή βελτίωση στην ικανοποίηση των χρηστών, αφού αυτοί μπορούν ήδη να μεταφέρουν τα δεδομένα τους με τον επιθυμητό για αυτούς ρυθμό μετάδοσης.

Ο ορισμός άνω ορίου στο ρυθμό μετάδοσης ενός χρήστη υπηρεσίας πραγματικού χρόνου έχει μεγάλη πρακτική σημασία στην εξοικονόμηση πόρων του δικτύου. Σύμφωνα με τα παραπάνω το άνω φράγμα του ρυθμού μετάδοσης είναι $R_{Max,i}^* = R_{T,i}^* + MF_i$. Στην περίπτωση που κάποιος χρήστης λόγω ευμενών συνθηκών στο κανάλι του επιτύχει ρυθμό μετάδοσης μεγαλύτερο του άνω ορίου, τελικά

μεταδίδει με ρυθμό μετάδοσης ίσο με το άνω όριο, δηλαδή $R_{Max,i}^*$ και τον πλεοναστικό ρυθμό μετάδοσης το δίκτυο τον προσφέρει σε κάποιο χρήστη με δυσμενείς συνθήκες καναλιού. Η διαδικασία αυτή ακολουθείται όχι μόνο για να αυξηθεί η ρυθμαπόδοση (άρα και η χρησιμότητα λόγω της εξίσωσης (3)) των χρηστών με δυσμενείς συνθήκες στο κανάλι τους, αλλά και για να αυξηθεί ο αριθμός των χρηστών που μεταδίδουν ταυτόχρονα δεδομένα στο δίκτυο στη διάρκεια μίας χρονοσχισμής.

Συνοψίζοντας, ακολουθεί ο ορισμός:

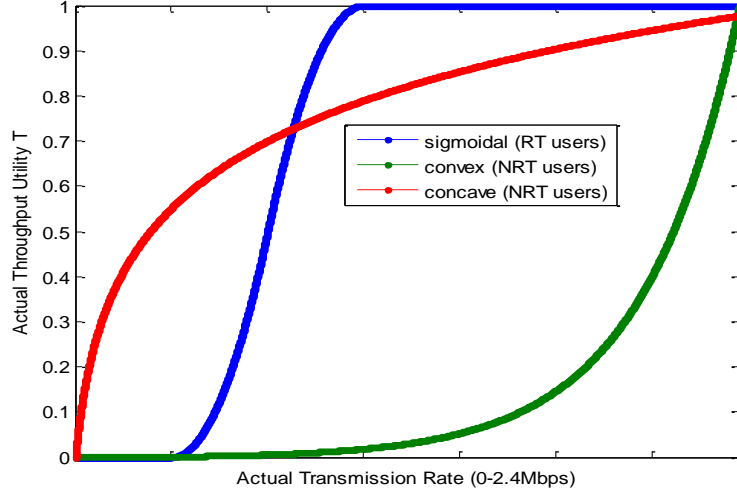
Ορισμός 1: Η συνάρτηση ρυθμαπόδοσης των RT χρηστών ορίζεται ως $T_i(R_i^*) \equiv T_i((R_{T,i}^* + MF_i)f(\gamma_i))$ (4.1), με $i \in L_{RT}$, $\gamma_i > 0$ και $R_i^* \in [0, R_{T,i}^* + MF_i]$, η οποία είναι σιγμοειδής συνάρτηση του R_i^* με μοναδικό σημείο καμπής το $R_{Infl,i}^*$

ορισμένο ως εξής: $R_{Infl,i}^* = \left\{ R_i^* : \frac{\partial^2 T_i(R_i^*)}{\partial (R_i^*)^2} \Big|_{R_i^* = R_{Min,i}^*} = 0, R_{Min,i}^* = R_{T,i}^* - MF_i \right\}$ (4.2) και

ισχύει επίσης ότι: $T_i(R_{Max,i}^*) = T_i(R_{T,i}^* + MF_i) = 1$ (4.3).

2.5.2 NRT χρήστες

Όσον αφορά τις υπηρεσίες μη-πραγματικού χρόνου, οι χρήστες που ζητούν τέτοιες υπηρεσίες έχουν ένα και μοναδικό στόχο: την επίτευξη όσο το δυνατόν μεγαλύτερης ρυθμαπόδοσης (με μεγάλη ανεκτικότητα στις καθυστερήσεις των πακέτων). Η συνάρτηση ρυθμαπόδοσης επιλέγεται λοιπόν να έχει τέτοια μορφή ώστε να ικανοποιεί τις άπληστες και μεγάλων προσδοκιών απαιτήσεις ρυθμαπόδοσης αυτών των χρηστών. Συγκεκριμένα επιλέγεται η T_i να είναι αυστηρά κοίλη (concave) ή κυρτή (convex) συνάρτηση του πραγματικού ρυθμού μετάδοσης R_i^* όπως φαίνεται και στο Σχήμα 9 (Βλ. κόκκινη και πράσινη καμπύλη αντίστοιχα):



Σχήμα 9: Συνάρτηση ρυθμαπόδοσης T_i για NRT και RT χρήστες

Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 9, υπάρχουν φυσικοί περιορισμοί στο σύστημα που εξετάζεται, που αποτρέπουν ένα χρήστη να έχει πραγματικό ρυθμό μετάδοσης μεγαλύτερο από την τιμή $R_i^{Max} = 2.4Mbps$, οπότε για τους NRT χρήστες αυτή η τιμή είναι η μέγιστη δυνατή, δηλαδή $R_{Max,i}^* = R_i^{Max}$, $\forall i \in L_{NRT}$. Επίσης σε αυτήν την τιμή αντιστοιχεί και η μεγαλύτερη δυνατή ρυθμαπόδοση ($T_i(R_{Max,i}^*) = T_i(R_i^{Max}) = 1$).

Συνοψίζοντας, ακολουθεί ο ορισμός:

Ορισμός 2: Η συνάρτηση ρυθμαπόδοσης των NRT χρηστών ορίζεται ως $T_i(R_i^*) \equiv T_i(R_i^{Max} f(\gamma_i))$ (5.1), με $i \in L_{NRT}$, $\gamma_i > 0$ και $R_i^* \in [0, R_i^{Max}]$, η οποία είναι αυστηρά κοίλη ή κυρτή συνάρτηση του R_i^* με: $T_i(R_{Max,i}^*) = T_i(R_i^{Max}) = 1$ (5.2).

Παρατηρώντας τους Ορισμούς 1 και 2 καθώς και την σχέση (3) είναι εμφανές ότι μαθηματικά η διαφορά των RT με τους NRT χρήστες (εκτός από την μορφή της συνάρτησης

T_i) έγκειται στην επιλογή της σταθερής τιμής R_i^F , με $R_i^F = \begin{cases} R_{T,i}^* + MF_i, & i \in L_{RT} \\ R_i^{Max}, & i \in L_{NRT} \end{cases}$ που

βρίσκεται μέσα στον τύπο της $T_i(R_i^*) = T_i(R_i^F f(\gamma_i))$ και η οποία είναι η τιμή του ρυθμού

μετάδοσης R_i^* η οποία μεγιστοποιεί την $T_i(R_i^*)$, εάν ισχύει ότι $f(\gamma_i) \rightarrow 1$ όπως φαίνεται εξάλλου από τις σχέσεις (4.3),(5.2) για τους RT και NRT αντίστοιχα χρήστες.

Οπότε, λαμβάνοντας υπόψιν το είδος των υπηρεσιών που ζητούν οι χρήστες και την παραπάνω παρατήρηση, η εξίσωση (3) παίρνει την μορφή [15]:

$$U_i(p_i, \bar{p}_{-i}) = \frac{T_i(R_i^*)}{p_i} = \begin{cases} \frac{T_i(R_i^{Max} f(\gamma_i))}{p_i}, & i \in L_{NRT} \\ \frac{T_i((R_{T,i}^* + MF_i) f(\gamma_i))}{p_i}, & i \in L_{RT} \end{cases} \quad (6)$$

,όπου $R_i^* \in [0, R_i^{Max}]$ για $i \in L_{NRT}$ και $R_i^* \in [0, R_{T,i}^* + MF_i]$ για $i \in L_{RT}$, αφού $f(\gamma_i) \in [0, 1], \forall \gamma_i \geq 0$. Διαισθητικά, υποθέτουμε ότι η $U_i(p_i)$ είναι μη αρνητική και φραγμένη άνω συνάρτηση του p_i (για λόγους κανονικοποίησης και μόνο) και συνεπώς ισχύει ότι $\lim_{p_i \rightarrow 0^+} U_i(p_i) = 0^+$, αφού όταν ένας χρήστης δεν εκπέμπει καθόλου ισχύ, η χρησιμότητα του πρέπει να είναι μηδενική.

2.6 Κοστολόγηση φεμτο-χρηστών και Ολική Συνάρτηση

Χρησιμότητας

Σε αυτή την ενότητα εισάγεται η έννοια της *κοστολόγησης (pricing)* για τους φεμτο-χρήστες και επεκτείνεται κατά συνέπεια η συνάρτηση χρησιμότητας U_i ώστε να συμπεριλαμβάνει και την κοστολόγηση των εκάστοτε φεμτο-χρηστών του δικτύου.

Κατ' αρχήν, οι λόγοι για τους οποίους κοστολογούνται οι φεμτο-χρήστες του δικτύου είναι οι εξής [10],[16]:

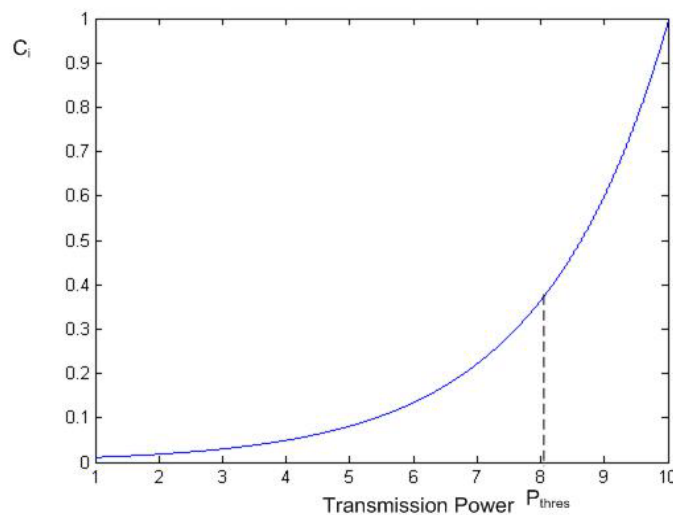
- Οι μακρο-χρήστες αποτελούν τους βασικούς ιδιοκτήτες του ράδιο-φάσματος και εφόσον έχει επιλεγεί πολιτική κοινού φάσματος μεταξύ μακρο και φεμτο-χρηστών, οι μακρο-χρήστες δικαιούνται μεγαλύτερη προτεραιότητα στη χρησιμοποίησή του απ' ότι οι φεμτο-χρήστες.

- Η κοστολόγηση επιτρέπει στους χρήστες να εμφανίζουν μεγαλύτερη κοινωνική συμπεριφορά στο δίκτυο, δηλαδή να μην αρέσκονται στην ικανοποίηση μόνο των δικών τους απαιτήσεων ποιότητας αλλά και των άλλων χρηστών οδηγώντας έτσι σε καλύτερη απόδοση όλο το σύστημα.
- Η ποιότητα υπηρεσιών (QoS) των μακρο-χρηστών θα πρέπει πάντα να ικανοποιείται (ως χρήστες με αυξημένη προτεραιότητα).
- Δυνατότητα μείωσης της παρεμβολής διαφορετικών επιπέδων (cross-tier interference) που προκαλούν οι φεμτο-χρήστες στους μακρο-χρήστες μέσω μιας συνάρτησης κοστολόγησης (cost function) η οποία αναγκάζει τους φεμτο-χρήστες να εκπέμπουν μικρότερη ισχύ, έτσι ώστε να μην εμποδίζεται η επίτευξη ικανοποιητικής ρυθμαπόδοσης των μακρο-χρηστών.
- Η ισχύς, που αποτελεί έναν περιορισμένο και κρίσιμο πόρο του δικτύου, θα πρέπει να κατανέμεται στους χρήστες αποδοτικά και η χρησιμοποίηση μιας στρατηγικής κοστολόγησης βοηθά προς αυτήν την κατεύθυνση έτσι ώστε όχι μόνο να μειώνεται η παρεμβολή προς τους άλλους χρήστες αλλά και να αυξάνεται η χρησιμότητα των χρηστών και κατά συνέπεια η απόδοση του εν λόγω δικτύου.

Η κοστολόγηση πραγματοποιείται με την αφαίρεση μιας συνάρτησης κόστους της μορφής $C_i(p_i, \bar{p}_{-i})$ (αύξουσα ως προς p_i), από την συνάρτηση χρησιμότητας $U_i(p_i, \bar{p}_{-i})$ (Βλ. εξίσωση (6)), προκειμένου όσο περισσότερο αυξάνει η ισχύς ενός φεμτο-χρήστη, τόσο πιο πολύ αυτός να κοστολογείται λόγω της μεγαλύτερης παρεμβολής που θα δημιουργεί η ισχύς εκπομπής του στους κοντινούς χρήστες. Κατά συνέπεια αφού για μεγάλες τιμές ισχύς εκπομπής p_i , η $C_i(p_i, \bar{p}_{-i})$ θα παίρνει και αυτή μεγάλες τιμές, η ολική συνάρτηση χρησιμότητας του δικτύου την οποία ορίζουμε ως [16] :

$$U_i^{net}(p_i, \bar{p}_{-i}) = U_i(p_i, \bar{p}_{-i}) - C_i(p_i, \bar{p}_{-i}) \quad (7)$$

, θα μειώνεται, με συνέπεια να μικραίνει η ολική χρησιμότητα του χρήστη i που υφίσταται την κοστολόγηση και αυτός να περιορίζει την ισχύ του σε μικρότερα επίπεδα (άρα να προκαλεί και μικρότερη παρεμβολή). Στην σύγχρονη αρθρογραφία, προτείνεται μια συνάρτηση κόστους $C_i(p_i, \bar{p}_{-i})$ γραμμικής μορφής σε σχέση με την ισχύ, όπου ο χρήστης πληρώνει κόστος ανάλογο με την ισχύ που εκπέμπει. Μολαταύτα, η εφαρμογή μιας πολιτικής κοστολόγησης γραμμικού τύπου δεν είναι ρεαλιστική αφού δεν ανταποκρίνεται σωστά στις ανάγκες και την συμπεριφορά των χρηστών και του συστήματος γενικότερα – το οποίο φαίνεται και από το γεγονός ότι η παρεμβολή που προκαλεί ένας χρήστης στους άλλους χρήστες του συστήματος δεν είναι η ίδια σε όλο το εύρος τιμών της ισχύς εκπομπής του [16]. Συνεπώς, είναι επιθυμητό η συνάρτηση $C_i(p_i, \bar{p}_{-i})$ να είναι εκτός από αύξουσα και κυρτή, δηλαδή να υπάρχει μια τιμή-κατώφλι ισχύος, έστω P_{thres} , που όταν ο χρήστης την ξεπεράσει, το κόστος που θα “πληρώνει” να αυξάνει ραγδαία (Βλ. Σχήμα 10) – πράγμα το οποίο αντικατοπτρίζει μια πιο ρεαλιστική κατάσταση σε σχέση με την γραμμική κοστολόγηση (*linear pricing policy*) καθώς και την κρισιμότητα αυτού του πόρου του δικτύου (της ισχύος δηλαδή).



Σχήμα 10: Κυρτή συνάρτηση κοστολόγησης $C_i(p_i)$

Οπότε, ορίζεται η συνάρτηση κοστολόγησης (pricing function) ως:

$$C_i(p_i, \bar{p}_{-i}) = \begin{cases} 0 & , i \in L_m \\ c(e^{p_i} - 1), i \in L_f \end{cases}, c \geq 0 \quad (8)$$

Οπότε λαμβάνοντας υπόψιν τις σχέσεις (6), (7) και (8) μπορεί να οριστεί η ολική συνάρτηση χρησιμότητας ενός χρήστη $i \in L = L_{m,NRT} \cup L_{m,RT} \cup L_{f,NRT} \cup L_{f,RT}$ η οποία αντιστοιχεί έναν τύπο συνάρτησης χρησιμότητας σε κάθε ένα από τα 4 είδη χρηστών που εμφανίζονται στο δίκτυο. Είναι:

$$U_i^{net}(p_i, \bar{p}_{-i}) \stackrel{(7,6)}{=} \frac{T_i(R_i^*)}{p_i} - C_i(p_i, \bar{p}_{-i}) \stackrel{(6,8)}{=} \begin{cases} \frac{T_i(R_i^{Max} f(\gamma_i))}{p_i} & , i \in L_{m,NRT} \\ \frac{T_i((R_{T,i}^* + MF_i) f(\gamma_i))}{p_i} & , i \in L_{m,RT} \\ \frac{T_i(R_i^{Max} f(\gamma_i))}{p_i} - c(e^{p_i} - 1) & , i \in L_{f,NRT} \\ \frac{T_i((R_{T,i}^* + MF_i) f(\gamma_i))}{p_i} - c(e^{p_i} - 1) & , i \in L_{f,RT} \end{cases} \quad (9)$$

Για συντομία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο συμβολισμός: $U^{net}(p) = U(p) - C(p)$ θεωρώντας ότι γίνεται αναφορά για τις συναρτήσεις αυτές καθαυτές, με την $U(p)$ να διατηρεί τις ιδιότητες της που είχαν τεθεί μετά την σχέση (6), ότι δηλαδή ισχύει: $U(p) \geq 0, \forall p \geq 0, \lim_{p \rightarrow 0^+} U(p) = 0^+$ και ότι είναι άνω φραγμένη (έχει δηλαδή μέγιστο).

3

Θεωρία Παιγνίων και Επίλυση Προβλήματος

3.1 Διατύπωση προβλήματος - μη συνεργατικό Παίγνιο

Ελέγχου Ισχύος Άνω Ζεύξης Δικτύων Δύο Επιπέδων

(MTTPG)

Το πρόβλημα στο οποίο καλείται να δώσει απαντήσεις η παρούσα διπλωματική είναι η πραγματοποίηση βέλτιστης κατανομής ισχύος (*power allocation*) μεταξύ των χρηστών του δικτύου δύο επιπέδων του οποίου το μοντέλο περιγράφεται στο 2^ο κεφάλαιο. Καθώς λοιπόν το σύστημα εξελίσσεται (δηλαδή αρχίζει η μεταφορά πακέτων στο δίκτυο), εκτελείται ένας αλγόριθμος ελέγχου ισχύος άνω ζεύξης (*uplink power control algorithm*) στην αρχή κάθε χρονοσχισμής, ο οποίος παίρνει αποφάσεις για την εκπεμπόμενη ισχύ των χρηστών με στόχο τη μεγιστοποίηση της ικανοποίησης των χρηστών του συστήματος, όσον αφορά την χρησιμοποίηση των πόρων του δικτύου (ισχύς, ρυθμαπόδοση) - η οποία εκφράζεται μέσω της συνάρτησης ολικής χρησιμότητας που αντιστοιχεί σε κάθε χρήστη μέσω της σχέσης (9). Έτσι, κάθε

χρήστης επιδιώκει εγωιστικά να εκπέμψει με τιμές ισχύος οι οποίες θα μεγιστοποιήσουν την συνάρτηση χρησιμότητας του, χωρίς να συνεργάζεται με τους άλλους χρήστες, οδηγώντας με αυτόν τον τρόπο στην βελτιστοποίηση της λειτουργίας του συστήματος σε ένα αυτόνομο πλαίσιο λειτουργίας των χρηστών όπου στόχος είναι η επίτευξη μιας κατανομής ισχύος που προσδίδει ενεργειακή αποδοτικότητα στο εν λόγω σύστημα.

Λαμβάνοντας λοιπόν στοιχεία από την θεωρία παιγνίων, ορίζεται το εξής μη συνεργατικό παίγνιο: $G = [L, \{P_i\}, \{U_i^{net}(\cdot)\}]$, όπου L είναι το σύνολο όλων των χρηστών-παικτών του δικτύου (φεμτο και μακρο-χρήστες), $P_i = [0, P_i^{Max}]$ είναι το σύνολο των στρατηγικών των παικτών (δηλαδή οι τιμές ισχύος με τις οποίες μπορούν να εκπέμψουν οι χρήστες) και $U_i^{net}(\cdot)$ είναι η συνάρτηση ολικής χρησιμότητας του χρήστη $i \in L$ και δίνεται από την σχέση (9). Κάθε χρήστης επιλέγει μια στρατηγική (ισχύς εκπομπής) p_i τέτοια ώστε: $p_i \in P_i$, με σκοπό να αυξήσει το επίπεδο χρησιμότητας του, να πετύχει δηλαδή όσο το δυνατόν υψηλότερη ρυθμαπόδοση και παράλληλα να καταναλώσει όσο το δυνατόν μικρότερη ισχύ, μεγαλώνοντας έτσι τη ζωή της μπαταρίας του. Το επίπεδο χρησιμότητας κάθε χρήστη δεν εξαρτάται μόνο από την ισχύ με την οποία επιλέγει αυτός να μεταδώσει, αλλά και από τις επιλογές των στρατηγικών των άλλων παικτών (μέσω του SINR - γ_i - Βλ. σχέση (2)). Έτσι, στο παίγνιο ελέγχου ισχύος (power control game) G , κάθε παίκτης προσπαθεί να μεγιστοποιήσει την συνάρτηση U_i^{net} που αντιστοιχεί σε αυτόν, θεωρώντας ότι οι ισχύς μετάδοσης των άλλων παικτών παραμένουν αμετάβλητες.

Συνεπώς, το παραπάνω μη-συνεργατικό παίγνιο G αντιστοιχεί στο εξής πρόβλημα βελτιστοποίησης:

$$\text{Παίγνιο } G \Leftrightarrow (MTPG) \max_{p_i \in P_i} U_i^{net}(p_i, \bar{p}_{-i}), \forall i \in L \quad (10)$$

,όπου η $U_i^{net}(\cdot)$ δίνεται από τον τύπο (9) και $P_i = [0, P_i^{Max}]$ είναι το σύνολο στρατηγικών του παίκτη i .

Σημείωση: Το όνομα του προβλήματος βελτιστοποίησης (MTTPG) αποτελεί μια σύμπτυξη του όρου: Παίγνιο Ελέγχου Ισχύος σε Δίκτυα Δύο Επιπέδων με Ικανοποίηση Ποικίλων Υπηρεσιών και Χρήση Κοστολόγησης (*Multi Service Two-Tier Power Control Game with Pricing*).

3.2 Μεθοδολογία επίλυσης προβλήματος

3.2.1 Nash Equilibrium προσέγγιση

Προκειμένου να βρεθεί η λύση του προβλήματος (10), χρησιμοποιείται η θεωρία παιγνίων κατά Nash, καταλήγοντας σε ένα σημείο ισορροπίας κατά Nash, το *Nash Equilibrium (NE)*. Σύμφωνα με αυτήν, υπάρχει ένα σύνολο από στρατηγικές (στο παίγνιο G αυτό αντιστοιχεί σε ένα διάνυσμα από ισχύς - έστω $\bar{p} = (p_1, \dots, p_{m+2N})$), τέτοιες ώστε κανένας χρήστης δεν επιθυμεί να μεταβάλλει την ισχύ του αφού η συνάρτηση ολικής χρησιμότητάς του δεν μπορεί να μεγιστοποιηθεί περαιτέρω με το να αλλάξει η τιμή της ισχύος που αυτός εκπέμπει, δεδομένου ότι οι ισχύς των άλλων παικτών-χρηστών δεν αλλάζουν. Ακολουθεί ο ορισμός [17]:

Ορισμός 3: Το διάνυσμα ισχύος $\bar{p} = (p_1, \dots, p_L)$ αποτελεί ένα *NE* του (MTTPG) παιγνίου εάν $\forall i \in L$ ισχύει: $U_i^{net}(p_i, \bar{p}_{-i}) \geq U_i^{net}(p'_i, \bar{p}_{-i}), \forall p'_i \in P_i$.

Ουσιαστικά, η τιμή της ισχύος που επιλέγει ένας αυτόνομος – μη συνεργάσιμος με τους άλλους παίκτες – χρήστης αποτελεί την καλύτερη απόκριση στις ισχύς-στρατηγικές που έχουν επιλέξει οι άλλοι παίκτες. Έτσι μπορεί να οριστεί η συνάρτηση βέλτιστης “απόκρισης” (*best response function*) ως [17]:

Ορισμός 4: Η συνάρτηση βέλτιστης απόκρισης $r_j : P_{-j} \rightarrow P_j$ είναι μια συνάρτηση που αναθέτει σε ένα διάνυσμα ισχύος $\bar{p}_{-j} \in P_{-j}$ το σύνολο:

$r_j(\bar{p}_{-j}) = \{p_j \in P_j : U_j^{net}(p_j, \bar{p}_{-j}) \geq U_j^{net}(p'_j, \bar{p}_{-j}), \text{ για κάθε } p'_j \in P_j\}$. Ο ορισμός αυτός είναι ίδιος με τον [15]: $r_j(\bar{p}_{-j}) = \max_{p_j \in P_j} U_j^{net}(p_j, \bar{p}_{-j}), \forall j \in L$.

Παρατήρηση: Με χρήση της έννοιας της συνάρτησης βέλτιστης απόκρισης, το NE του παιγνίου G (ή $MTTPG$) δύναται να οριστεί ως το διάνυσμα ισχύος $\bar{p}_{NE} = (p_{NE,1}, \dots, p_{NE,m+2N})$, για το οποίο ισχύει ότι $p_{NE,j} \in r_j(\bar{p}_{NE,-j}), \forall j \in L$. Επίσης, αν έχει επιτευχθεί ισορροπία στο σύστημα (οι ισχύς έχουν καταλήξει σε NE δηλαδή) και θεωρηθεί ότι το $r_i(\bar{p}_{-i})$ είναι ταυτόσημο με το $r_i(\bar{p})$, στο NE θα ισχύει η εξής σχέση: $\bar{r}(\bar{p}_{NE}) = \bar{p}_{NE}$, που σημαίνει ότι σε κατάσταση ισορροπίας, η καλύτερη απάντηση που μπορεί να δώσει κάθε χρήστης i δεδομένου των κινήσεων των άλλων παικτών (που εκπέμπουν στις βέλτιστες ισχύς τους) είναι να μεταδώσει με την βέλτιστη ισχύ $p_{NE,i}$.

3.2.2 Ιδιότητες συναρτήσεων ρυθμαπόδοσης T_i και χρησιμότητας U_i

Σε αυτήν την υπο-ενότητα θα αναφερθούν διάφορα Λήμματα που βοηθούν στην απόδειξη του θεωρήματος ύπαρξης και μοναδικότητας του NE για το παίγνιο ($MTTPG$) και άρα στην ύπαρξη μοναδικής λύσης του προβλήματος της κατανομής ισχύος στο δίκτυο δύο επιπέδων που εξετάζεται (Βλ. πρόβλημα (10)). Αυτά τα Λήμματα περιέχουν χρήσιμες ιδιότητες των συναρτήσεων ρυθμαπόδοσης T_i και χρησιμότητας U_i .

Στην ενότητα 2.5 (Βλ. Ορισμούς 1 και 2), ορίστηκε η μορφή που θα πρέπει να έχουν οι συναρτήσεις ρυθμαπόδοσης T_i ως προς R_i^* έχοντας ως κύριο στόχο την ικανοποίηση διαφορετικών ειδών υπηρεσιών για τους χρήστες πραγματικού (RT) και μη-πραγματικού χρόνου (NRT) αντίστοιχα. Οπότε συνοπτικά η μορφή της $T_i(R_i^*)$ είναι:

$$T_i(R_i^*) = \begin{cases} \text{σιγμοειδής ως προς } R_i^*, i \in L_{RT} \\ \text{αυστηρά κοίλη (κυρτή) ως προς } R_i^*, i \in L_{NRT} \end{cases}, \text{ με } R_i^* = R_i^F f(\gamma_i).$$

Είναι σημαντικό να αποδειχτεί ότι οποιαδήποτε μορφή και να έχει η $T_i(R_i^*)$, θα παραμένει σιγμοειδής ως συνάρτηση του γ_i , δηλαδή ότι η $T_i(\gamma_i)$ θα είναι σιγμοειδής $\forall i \in L$ (άρα και η $T_i(p_i)$, μιας και από την σχέση (2) το γ_i είναι ανάλογο του p_i). Μόνον έτσι αποδεικνύεται η ημι-κοιλότητα (*quasi-concaveness*) της συνάρτησης $U_i(p_i) = \frac{T_i(p_i)}{p_i}$ και άρα η ύπαρξη μοναδικού μεγίστου (*NE* για τους μακρο-χρήστες που δεν υφίστανται κοστολόγηση) της συνάρτησης αυτής.

3.2.2.1 Λήμμα 1

Για τους χρήστες πραγματικού χρόνου ($i \in L_{RT}$) και δοθέντων:

- Της συνάρτησης απόδοσης $f(\gamma_i)$, η οποία είναι σιγμοειδής ως προς γ_i με μοναδικό σημείο καμπής το $\gamma_{Infl,i}^f$ (ιδιότητα 2 των συναρτήσεων απόδοσης – Βλ. ενότητα 2.4)
- Της συνάρτησης ρυθμαπόδοσης $T_i(R_i^*)$, η οποία είναι σιγμοειδής ως προς R_i^* με μοναδικό σημείο καμπής το $R_{Infl,i}^* \equiv R_{Min,i}^* = R_{T,i}^* - MF_i$ (Βλ. Ορισμό 1), όπου $R_i^* \equiv R_{Max,i}^* f(\gamma_i) = (R_{T,i}^* + MF_i) f(\gamma_i)$ για $i \in L_{RT}$

, τότε η συνάρτηση $T_i(\gamma_i) = T_i((R_{T,i}^* + MF_i) f(\gamma_i))$ είναι επίσης σιγμοειδής ως προς γ_i ($\gamma_i \geq 0$), με μοναδικό σημείο καμπής το $\gamma_{Infl,i}^T$, τέτοιο ώστε:

$$\gamma_{Infl,i}^T : \begin{cases} \gamma_{Infl,i}^{R^*} \leq \gamma_{Infl,i}^T \leq \gamma_{Infl,i}^f, \text{ όταν } \gamma_{Infl,i}^{R^*} \leq \gamma_{Infl,i}^f \\ \gamma_{Infl,i}^f \leq \gamma_{Infl,i}^T \leq \gamma_{Infl,i}^{R^*}, \text{ όταν } \gamma_{Infl,i}^{R^*} > \gamma_{Infl,i}^f \end{cases} \quad (11)$$

,όπου $\gamma_{Infl,i}^{R^*}$ είναι η αντιστοίχιση του μοναδικού σημείου καμπής της $T_i(R_i^*)$ στον γ_i - άξονα, δηλαδή:

$$R_{Infl,i}^* = R_{Max,i}^* f(\gamma_{Infl,i}^{R^*}) \Rightarrow \frac{R_{Infl,i}^*}{R_{Max,i}^*} = f(\gamma_{Infl,i}^{R^*}) \Rightarrow \gamma_{Infl,i}^{R^*} = f^{-1}\left(\frac{R_{Infl,i}^*}{R_{Max,i}^*}\right)$$

Απόδειξη: Βλ. Appendix A του [15].

3.2.2.2 Λήμμα 2

Για τους χρήστες μη-πραγματικού χρόνου ($i \in L_{NRT}$) και δοθέντων:

- Της συνάρτησης απόδοσης $f(\gamma_i)$, η οποία είναι σιγμοειδής ως προς γ_i με μοναδικό σημείο καμπής το $\gamma_{Infl,i}^f$ (ιδιότητα 2 των συναρτήσεων απόδοσης – Βλ. ενότητα 2.4)
- Της συνάρτησης ρυθμαπόδοσης $T_i(R_i^*)$, η οποία είναι αυστηρά κοίλη (αντίστοιχα κυρτή) ως προς R_i^* , όπου $R_i^* \equiv R_{Max,i}^* f(\gamma_i) = R_i^{Max} f(\gamma_i)$ (Βλ. Ορισμό 2) για $i \in L_{NRT}$

, τότε η συνάρτηση ρυθμαπόδοσης $T_i(\gamma_i) = T_i(R_i^{Max} f(\gamma_i))$ είναι:

A. Σιγμοειδής ως προς γ_i ($\gamma_i \geq 0$), με μοναδικό σημείο καμπής το $\gamma_{Infl,i}^T$, τέτοιο

$$\text{ώστε } \gamma_{Infl,i}^T \leq \gamma_{Infl,i}^f \quad (\gamma_{Infl,i}^f \leq \gamma_{Infl,i}^T) \quad \text{αν ισχύει ότι: } \lim_{\gamma_i \rightarrow 0^+} \frac{\partial^2 T_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i^2} = 0^+$$

$$(\lim_{\gamma_i \rightarrow \infty} \frac{\partial^2 T_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i^2} = 0^-). \quad (12)$$

B. Αυστηρά κοίλη (κυρτή) ως προς γ_i ($\gamma_i \geq 0$), αν ισχύει ότι: $\lim_{\gamma_i \rightarrow 0^+} \frac{\partial^2 T_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i^2} = 0^-$

$$(\lim_{\gamma_i \rightarrow \infty} \frac{\partial^2 T_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i^2} = 0^+). \quad (13)$$

Απόδειξη: Βλ. Appendix B του [15].

Σύμφωνα λοιπόν με το Λήμμα 2, όταν η $T_i(R_i^*)$ είναι αυστηρά κοίλη (αντίστοιχα κυρτή) ως προς R_i^* για $i \in L_{NRT}$ και ισχύουν οι προϋποθέσεις B, η $T_i(\gamma_i)$ παραμένει αυστηρά κοίλη (κυρτή) ως προς γ_i (άρα και προς p_i αφού από την σχέση (2) $\gamma_i \sim p_i$). Το επόμενο Λήμμα αποδεικνύει ότι σε τέτοιες περιπτώσεις, η συνάρτηση χρησιμότητας $U_i(p_i) = \frac{T_i(p_i)}{p_i}$ έχει ιδιότητες οι οποίες έρχονται σε αντίφαση με τις βασικές υποθέσεις που έχουμε κάνει για την $U_i(p_i)$ ($U_i(p_i) \geq 0, \forall p_i \geq 0, \lim_{p_i \rightarrow 0^+} U_i(p_i) = 0^+$ και ότι είναι άνω φραγμένη) και συνεπώς αυτές οι περιπτώσεις καθίστανται μη εφικτές στο πρόβλημα που εξετάζεται.

3.2.2.3 Λήμμα 3

Όταν η συνάρτηση $T_i(R_i^*), i \in L_{NRT}$ είναι αυστηρά κοίλη (κυρτή) ως προς R_i^* και ισχύει η σχέση (13): $\lim_{\gamma_i \rightarrow 0^+} \frac{\partial^2 T_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i^2} = 0^-$ ($\lim_{\gamma_i \rightarrow \infty} \frac{\partial^2 T_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i^2} = 0^+$), δηλαδή οι προϋποθέσεις B του Λήμματος 2, τότε είτε $\lim_{p_i \rightarrow 0^+} U_i(p_i) \neq 0^+$ είτε $U_i(p_i) < 0, \forall p_i \geq 0$ (αντίστοιχα η $U_i(p_i)$ δεν είναι άνω φραγμένη).

Απόδειξη: Βλ. Appendix C του [15].

Πόρισμα: Εφόσον η σχέση (13) σύμφωνα με το Λήμμα 3, δεν αντιπροσωπεύει την μορφή της συνάρτησης χρησιμότητας που έχει επιλεγεί - αφού δεν ικανοποιεί βασικές ιδιότητες της - θα θεωρείται στην συνέχεια ότι ισχύει πάντα η σχέση (12): $\lim_{\gamma_i \rightarrow 0^+} \frac{\partial^2 T_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i^2} = 0^+$ ($\lim_{\gamma_i \rightarrow \infty} \frac{\partial^2 T_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i^2} = 0^-$) (δηλαδή προϋποθέσεις A του

Λήμματος 2) και συνεπώς μαζί με το Λήμμα 1 (σχέση (11)), έχει ουσιαστικά αποδειχθεί ότι $\forall i \in L = L_{NRT} \cup L_{RT}$, η $T_i(\gamma_i)$ είναι σιγμοειδής ως προς γ_i . Συνεπώς και η $T_i(p_i)$ είναι σιγμοειδής συνάρτηση του $p_i, \forall i \in L$ λόγω του ότι $\gamma_i \sim p_i$ από τη σχέση (2).

Λαμβάνοντας υπόψιν το παραπάνω Πόρισμα, το επόμενο Λήμμα αποδεικνύει την ύπαρξη μοναδικού μεγίστου της συνάρτησης χρησιμότητας $U_i(p_i, \bar{p}_i)$ του χρήστη i , όταν οι ισχύς των άλλων χρηστών παραμένουν σταθερές (σε αυτό το σημείο θεωρείται ότι δεν υπάρχει κοστολόγηση για τους φεμτο-χρήστες του δικτύου, οπότε η U_i δίνεται από την σχέση (6)).

3.2.2.4 Λήμμα 4

Για κάθε χρήστη $i \in L$, η $U_i(p_i, \bar{p}_i)$ είναι ημι-κοίλη (*quasi-concave*) ως προς p_i . Επίσης, θεωρώντας ότι οι ισχύς των άλλων χρηστών παραμένουν σταθερές, η $U_i(p_i, \bar{p}_i)$ για $p_i \in [0, P_i^{Max}]$ έχει μοναδικό σημείο ολικού μεγίστου p_i^* που δίνεται από τον εξής τύπο:

$$p_i^* = \begin{cases} \min \left\{ \frac{\gamma_i^* (R_{T,i}^* + MF_i) I_{s_i,-i}(\bar{p}_{-i})}{Wg_{s_i,i}}, P_i^{Max} \right\}, i \in L_{RT} \\ \min \left\{ \frac{\gamma_i^* R_i^{Max} I_{s_i,-i}(\bar{p}_{-i})}{Wg_{s_i,i}}, P_i^{Max} \right\}, i \in L_{NRT} \end{cases} \quad (14)$$

,όπου το γ_i^* είναι η μοναδική θετική λύση της εξίσωσης: $\frac{\partial T_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i} \gamma_i - T_i(\gamma_i) = 0$ (15).

Απόδειξη: (Βλ. και Appendix D του [15]).

Από το πιο πάνω Πόρισμα ισχύει ότι η $T_i(p_i)$ είναι σιγμοειδής συνάρτηση του $p_i, \forall i \in L$. Επίσης, για την $T_i(\gamma_i) = T_i(p_i, \bar{p}_i)$ ως συνάρτηση του p_i , όπου $p_i \geq 0$ ισχύουν τα εξής:

- 1) Έχει πεδίο ορισμού τον άξονα των θετικών πραγματικών αριθμών, δηλαδή το διάστημα $[0, \infty)$.
- 2) Έχει πεδίο τιμών το διάστημα $[0, 1)$ σύμφωνα με τις ιδιότητες 3 και 4 των συναρτήσεων ρυθμαπόδοσης (Βλ. ενότητα 2.4).
- 3) Είναι αύξουσα συνάρτηση του $p_i, i \in L$ (αφού κάθε σιγμοειδής συνάρτηση είναι και αύξουσα).
- 4) Είναι αυστηρά κυρτή στο διάστημα $(0, p_{Infl}^T]$ και αυστηρά κοίλη στο διάστημα $[p_{Infl}^T, P_i^{Max}]$ (από ορισμό σιγμοειδούς με p_{Infl}^T το σημείο καμπής της $T(p)$ στον p -άξονα) και από σχέση (2) και Λήμματα 1,2

$$\text{ισχύει ότι: } p_{Infl,i}^T = \begin{cases} \frac{\gamma_{Infl,i}^T (R_{T,i}^* + MF_i) I_{s_i,-i}(\bar{p}_{-i})}{Wg_{s_i,i}}, \forall i \in L_{RT} \\ \frac{\gamma_{Infl,i}^T R_i^{Max} I_{s_i,-i}(\bar{p}_{-i})}{Wg_{s_i,i}}, \forall i \in L_{NRT} \end{cases}, \text{ όπου } \gamma_{Infl,i}^T \text{ το}$$

σημείο καμπής της $T_i(\gamma_i)$. Γενικά θεωρούμε ότι $P_i^{Max} \gg p_{Infl,i}^T$.

- 5) Έχει συνεχή παράγωγο, μιας και αποτελεί σύνθεση των συναρτήσεων $T_i(R_i^*)$ και $f(\gamma_i)$, οι οποίες έχουν συνεχή παραγώγους.

Αφού ισχύουν οι παραπάνω προϋποθέσεις 1-5 για την $T_i(p_i, \bar{p}_i), \forall i \in L$, τότε ο λόγος $T_i(p_i, \bar{p}_i)/p_i, \forall i \in L$ αποτελεί μια ημι-κοίλη συνάρτηση του $p_i \in [0, P_i^{Max}]$ σύμφωνα με το [18]. Συνεπώς η συνάρτηση χρησιμότητας $U_i(p_i, \bar{p}_i)$ είναι ημι-κοίλη (quasi-concave) ως προς p_i και άρα θα έχει μέγιστο.

Παίρνοντας το κριτήριο πρώτης παραγώγου για την εύρεση του ακρότατου (μεγίστου) της $U_i(p_i, \bar{p}_i)$, έχουμε:

$$\frac{\partial U_i(p_i, \bar{p}_i)}{\partial p_i} = \frac{\partial \left(\frac{T_i(p_i)}{p_i} \right)}{\partial p_i} = \frac{\frac{\partial T_i(p_i)}{\partial p_i} p_i - T_i(p_i)}{p_i^2} = 0, \text{ όμως από την σχέση (2) έχουμε:}$$

$$\gamma_i = \mu p_i, \text{ με } \mu = \frac{\partial \gamma_i}{\partial p_i} = \frac{\gamma_i}{p_i}, \text{ οπότε: } \frac{\partial T_i(p_i)}{\partial p_i} p_i - T_i(p_i) = 0 \Rightarrow \frac{\partial T_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i} \gamma_i - T_i(\gamma_i) = 0$$

που είναι η σχέση (15). Επίσης, λόγω του ότι η $T_i(\gamma_i)$ είναι σιγμοειδής, η (15) έχει μοναδική λύση (έστω γ_i^*), όπως αποδεικνύεται στο [18]. Συνεπώς, η μοναδική τιμή \hat{p}_i που μεγιστοποιεί την $U_i(p_i, \bar{p}_i)$ για $p_i \geq 0$, δίνεται με την βοήθεια της σχέσης (2) από τον τύπο:

$$\hat{p}_i = \begin{cases} \frac{\gamma_i^* (R_{T,i}^* + MF_i) I_{s_i,-i}(\bar{p}_{-i})}{Wg_{s_i,i}}, \forall i \in L_{RT} \\ \frac{\gamma_i^* R_i^{Max} I_{s_i,-i}(\bar{p}_{-i})}{Wg_{s_i,i}}, \forall i \in L_{NRT} \end{cases}$$

Τέλος, όταν η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή ισχύος (P_i^{Max}) είναι μικρότερη από το \hat{p}_i , τότε η τιμή: $U_i(P_i^{Max}, \bar{p}_{-i}) = T_i(P_i^{Max}, \bar{p}_{-i})/P_i^{Max}$ είναι η μέγιστη δυνατή τιμή της $U_i(p_i, \bar{p}_{-i})$, αφού η συνάρτηση χρησιμότητας U_i είναι αύξουσα στο διάστημα $[0, \hat{p}_i]$ (αφού $\lim_{p_i \rightarrow 0^+} U_i(p_i) = 0^+$, \hat{p}_i σημείο ολικού μεγίστου, $P_i^{Max} < \hat{p}_i$ και U_i ημι-κοίλη). Συνεπώς, η μικρότερη τιμή εκ των $\{\hat{p}_i, P_i^{Max}\}$ είναι το σημείο ολικού μεγίστου της συνάρτησης $U_i(p_i, \bar{p}_{-i})$ με $p_i \in [0, P_i^{Max}]$, δηλαδή $p_i^* = \min\{\hat{p}_i, P_i^{Max}\}$ (σχέση (14)).

Από το παραπάνω Λήμμα 4 και θεωρώντας μηδενική κοστολόγηση, διαπιστώνεται ότι προκειμένου οι χρήστες να μεγιστοποιήσουν την χρησιμότητα τους (εκφρασμένη μέσω της ημι-κοίλης συνάρτησης U_i - σχέση (6)) σε σχέση πάντα με την ικανοποίηση της ποιότητας των υπηρεσιών τους και την κατανάλωση ενέργειας ανά χρονοσχισμή, προσπαθούν συνεχώς να προσεγγίσουν την τιμή-στόχο γ_i^* (διαφορετική για τον κάθε χρήστη), πράγμα το οποίο οδηγεί σε ένα ισορροπημένο κατά SINR δίκτυο (*SINR-balanced network*). Εάν κάποιος χρήστης i δεν μπορεί να επιτύχει αυτήν την τιμή λόγου σήματος προς θόρυβο και παρεμβολή (λόγω π.χ. κακών συνθηκών καναλιού), τότε εκπέμπει με τη μέγιστη δυνατή ισχύ (P_i^{Max}), η οποία αντιστοιχεί σε $\gamma_i' < \gamma_i^*$ και αποτελεί ταυτόχρονα και την βέλτιστη “απάντηση” $r_i(\bar{p})$ του χρήστη i .

3.2.3 Μορφή συνάρτησης ολικής χρησιμότητας U_i^{net}

Στην συνέχεια παρατίθενται δύο Λήμματα τα οποία βοηθούν στο να γίνει καλύτερα αντιληπτή η μορφή της συνάρτησης ολικής χρησιμότητας U_i^{net} (Βλ. σχέση 7) όπου υπάρχει και κοστολόγηση. Το παρακάτω Λήμμα 5 δείχνει τη σχετική θέση μεταξύ δύο χαρακτηριστικών τιμών ισχύος:

- p_{Infl}^T : το μοναδικό σημείο καμπής της σιγμοειδούς συνάρτησης $T_i(p_i)$ (Βλ. Πρόγραμμα, ενότητα 3.2.2.3)
- p_i^* : το σημείο ολικού μεγίστου της $U_i(p_i, \bar{p}_{-i})$ (Βλ. Λήμμα 4 - σχέση (14))

3.2.3.1 Λήμμα 5

Δοθέντος:

$$\begin{cases} T(p) \equiv T(R_{\max}^* f(\gamma)), \text{ που είναι σιγμοειδής ως προς } p \text{ με μοναδικό σημείο καμπής το } p_{Infl}^T \\ U(p) = \frac{T(p)}{p}, \text{ που είναι ημι-κοίλη (Λήμμα 4) ως προς } p \text{ με ολικό μέγιστο στο } p^* \end{cases},$$

μπορεί να αποδειχθεί μέσω εις άτοπου απαγωγής ότι $p_{Infl}^T < p^*$.

Απόδειξη: Βλ. Appendix A του [16].

Τέλος, το παρακάτω Λήμμα 6 αναφέρει μια χαρακτηριστική ιδιότητα της συνάρτησης ολικής χρησιμότητας $U_i^{net}(p_i) = U_i(p_i) - C_i(p_i)$, η οποία βοηθά στην απόδειξη ύπαρξης και μοναδικότητας του NE για τους φεμτο-χρήστες.

3.2.3.2 Λήμμα 6

Δοθέντος:

$$\begin{cases} T(p) \equiv T(R_{\max}^* f(\gamma)), \text{ που είναι σιγμοειδής ως προς } p \text{ με μοναδικό σημείο καμπής το } p_{Infl}^T \\ U(p) = \frac{T(p)}{p}, \text{ που είναι ημι-κοίλη (Λήμμα 4) ως προς } p \text{ με ολικό μέγιστο στο } p^* \end{cases},$$

υπάρχει μια κρίσιμη τιμή ισχύος $p_{crit} \in [p_{Infl}^T, p^*)$ ($p_{Infl}^T < p^*$ από Λήμμα 5) τέτοια ώστε η $U^{net}(p) = U(p) - C(p)$ να είναι μονότονα φθίνουσα συνάρτηση του p στο διάστημα $p \in [p_{crit}, \infty)$.

Απόδειξη: Βλ. Appendix B του [16].

Με τη βοήθεια του Λήμματος 6, παρουσιάζεται μια καλύτερη εικόνα για τη μορφή της $U^{net}(p)$ ως προς την ισχύ p (θεωρώντας βέβαια RT και NRT υπηρεσίες). Συγκεκριμένα, στο Λήμμα 6 αποδεικνύεται ότι εάν η συνάρτηση $U^{net}(p)$ έχει σημείο ολικού μεγίστου, αυτό θα βρίσκεται στο διάστημα $(0, p_{crit}]$, αφού για $p \geq p_{crit}$, η $U^{net}(p)$ είναι φθίνουσα. Έτσι εάν αυτό το σημείο ονομαστεί p_{net}^* , θα ισχύει ότι: $p_{net}^* \in (0, p_{crit}]$ με $p_{crit} \in [p_{Infl}^T, p^*)$, οπότε σίγουρα θα ισχύει ότι: $p_{net}^* < p^*$, πράγμα το οποίο δείχνει ότι οι φεμτο-χρήστες προκειμένου να μεγιστοποιήσουν την χρησιμότητα τους $U^{net}(p)$, εκπέμπουν με ισχύ μικρότερη απ' ό,τι εάν η χρησιμότητα τους μοντελοποιόταν χωρίς κοστολόγηση (απλή $U(p)$ με ισχύ μεγιστοποίησης την p^* - Βλ. σχέση (14)), πετυχαίνοντας έτσι τον περιορισμό της παρεμβολής που θα προκαλούσαν στους μακρο-χρήστες, οι οποίοι έχουν μεγαλύτερη προτεραιότητα ως προς την διασφάλιση των υπηρεσιών τους.

3.3 Ύπαρξη και μοναδικότητα σημείου ισορροπίας Nash

Equilibrium

Από τον ορισμό του (MTPG) παιγνίου (Βλ. σχέση (10)) γίνεται αντιληπτό ότι οι παίκτες-χρήστες προσπαθούν ανεξάρτητα ο ένας απ' τον άλλο να μεγιστοποιήσουν

την χρησιμότητα τους $U_i^{net}(p_i, \bar{p}_{-i})$ (Βλ. σχέση (9)) επιλέγοντας τέτοια στρατηγική p_i που όχι μόνο θα ικανοποιεί την ποιότητα υπηρεσιών τους, αλλά δεδομένου ότι όλοι οι υπόλοιποι χρήστες έχουν σταθερές ισχύς, θα αποτελεί και το σημείο ολικού μεγίστου της συνάρτησης $U_i^{net}(p_i, \bar{p}_{-i})$. Το σύνολο όλων αυτών των στρατηγικών των χρηστών θα αποτελεί το μοναδικό NE (Nash Equilibrium) του $(MTTPG)$ παιγνίου. Η ύπαρξη όμως ολικού μεγίστου της $U_i^{net}(p_i)$ σχετίζεται με τη μορφή της ως συνάρτηση του p_i , η οποία είναι διαφορετική για τους μακρο-χρήστες που δεν υπόκεινται σε κοστολόγηση, σε σύγκριση με τους φεμτο-χρήστες οι οποίοι υφίστανται τέτοιου είδους αντιμετώπιση στο υπό εξέταση δίκτυο. Συνεπώς, η ύπαρξη (μοναδικού) ολικού μεγίστου της U_i^{net} θα έχει δύο σκέλη σαν απόδειξη: ένα για τους μακρο-χρήστες όπου $U_i^{net}(p_i) = U_i(p_i)$ και ένα για τους φεμτο-χρήστες, όπου $U_i^{net}(p_i) = U_i(p_i) - C_i(p_i)$. Επίσης στην απόδειξη λαμβάνονται υπόψιν και οι 4 κατηγορίες χρηστών που υπάρχουν στο δίκτυο, όπως φαίνεται και από τον τύπο της $U_i^{net}(p_i, \bar{p}_{-i})$ (Βλ. σχέση (9)).

Θεώρημα:

Η συνάρτηση $U_i^{net}(p_i, \bar{p}_{-i})$ (9) του $(MTTPG)$ παιγνίου (10), έχει ένα (μοναδικό) ολικό μέγιστο, το $p_{net,i}^*$, τέτοιο ώστε:
$$\begin{cases} p_{net,i}^* \equiv p_i^* & , i \in L_m \\ p_{net,i}^* \in (0, p_{crit,i}] & , i \in L_f \end{cases}$$
, όπου p_i^* είναι το σημείο ολικού μεγίστου της $U_i(p_i, \bar{p}_{-i})$ από Λήμμα 4 (Βλ. σχέση (14)), ενώ $p_{crit,i}$ είναι η κρίσιμη τιμή ισχύος που αναφέρεται στο Λήμμα 6. Το διάνυσμα ισχύος $\bar{p}_{net}^* = (p_{net,1}^*, \dots, p_{net,L}^*)$ αποτελεί το μοναδικό NE του $(MTTPG)$ παιγνίου και δίνεται από τον τύπο:

$$p_{net,i}^* = \begin{cases} \min \left\{ \frac{\gamma_i^* (R_{T,i}^* + MF_i) I_{s_i,-i}(\bar{p}_{-i})}{Wg_{s_i,i}}, P_i^{Max} \right\}, i \in L_{m,RT} & (16.1) \\ \min \left\{ \frac{\gamma_i^* R_i^{Max} I_{s_i,-i}(\bar{p}_{-i})}{Wg_{s_i,i}}, P_i^{Max} \right\}, i \in L_{m,NRT} & (16.2) \\ \min \left\{ \min_{p_{k,i} \in \Lambda_{k,i}} (\Lambda_{k,i}), P_i^{Max} \right\}, i \in L_f = L_{f,RT} \cup L_{f,NRT} & (16.3) \end{cases}, (16)$$

Όπου:

- $I_{s_i,-i}(\bar{p}_{-i})$ είναι το σύνολο των παρεμβολών (μαζί με θόρυβο) στον σταθμό $s_i \in S$, όταν αυτός λαμβάνει δεδομένα από τον χρήστη του, i .
- P_i^{Max} είναι η μέγιστη δυνατή εκπεμπόμενη ισχύς.
- το γ_i^* είναι η μοναδική θετική λύση της εξίσωσης: $\frac{\partial T_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i} \gamma_i - T_i(\gamma_i) = 0$ (βλ. σχέση (15)).
- Το $\Lambda_{k,i} = \{p_{1,i}^*, p_{2,i}^*, \dots, p_{K,i}^*\}$, $k = 1, 2, \dots, K$, $i \in L_f$ είναι το σύνολο των σημείων τοπικού μεγίστου της συνάρτησης $U_i^{net}(p_i)$ με $p_{k,i}^* \in (0, p_{crit,i}]$, που στο σύνολο τους είναι K στον αριθμό και βρίσκονται από το κριτήριο δεύτερης παραγώγου: $\left. \frac{\partial U_i^{net}(p_i)}{\partial p_i} \right|_{p_i=p_{k,i}} = 0$ και $\left. \frac{\partial^2 U_i^{net}(p_i)}{\partial^2 p_i} \right|_{p_i=p_{k,i}} < 0$, με $U_i^{net}(p_i)$ να δίνεται από την εξίσωση (9) για $i \in L_{f,RT}$ και $i \in L_{f,NRT}$ αντίστοιχα.

Απόδειξη:

➤ Μάκρο-χρήστες ($i \in L_m = L_{m,NRT} \cup L_{m,RT}$):

Ισχύει ότι: $U_i^{net}(p_i, \bar{p}_{-i}) = U_i(p_i, \bar{p}_{-i}) = \frac{T(p_i)}{p_i}$, $\forall i \in L_m$ από τη σχέση (9), οπότε από

Λήμμα 4 η $U_i^{net}(p_i)$ είναι ημι-κοίλη ως προς p_i και αφού είναι ορισμένη σε ένα μη-

κενό, κυρτό και συμπαγές σύνολο $\left([0, P_i^{Max}]\right)$ στο οποίο είναι και συνεχής, από [17] έχουμε ότι υπάρχει NE για τους μακρο-χρήστες και από την σχέση (14) βρίσκεται απευθείας το σημείο (ολικού) μεγίστου της $U_i^{net}(p_i)$ που αντιστοιχεί στους μακρο-RT-χρήστες ($i \in L_{m,RT}$ - Βλ. σχέση (16.1)) και στους μακρο-NRT-χρήστες ($i \in L_{m,NRT}$ - Βλ. σχέση (16.2)). Η μοναδικότητα του μεγίστου αυτού (άρα και του αντίστοιχου NE) εξασφαλίζεται από τη μοναδική λύση της εξίσωσης (15) - γ_i^* - που οφείλεται στο ότι η $T_i(\gamma_i)$ είναι σιγμοειδής ως προς γ_i , $\forall i \in L_m$ (Βλ. Πόρισμα, ενότητα 3.2.2.3). Οπότε διαφαίνεται η σημαντικότητα που έχει η σιγμοειδής μορφή της συνάρτησης $T_i(\gamma_i)$ αφού αν δεν ίσχυαν οι προϋποθέσεις (12) αλλά οι (13) και έχανε η συνάρτηση $T_i(\gamma_i), i \in L_{m,NRT}$ την ιδιότητα της σιγμοειδούς μορφής, όχι μόνο από το Λήμμα 3 θα υπήρχαν αντιφάσεις σε σχέση με τις βασικές ιδιότητες της συνάρτησης χρησιμότητας αλλά και το $(MTTPG)$ παίγνιο δεν θα είχε μοναδικό NE για τους μακρο-χρήστες, καθιστώντας με αυτόν τον τρόπο το σύστημα ασταθές.

➤ Φέμτο-χρήστες ($i \in L_f = L_{f,NRT} \cup L_{f,RT}$):

Ισχύει ότι: $U_i^{net}(p_i, \bar{p}_{-i}) = U_i(p_i, \bar{p}_{-i}) - C_i(p_i, \bar{p}_{-i}), \forall i \in L_f$ όπως έχει οριστεί στην σχέση (9) με $L_f = L_{f,NRT} \cup L_{f,RT}$. Η συνάρτηση ολικής χρησιμότητας U_i^{net} δεν έχει τις ιδιότητες της απλής U_i (ημι-κοιλότητα ή αλλιώς *single-peakness*) οπότε δεν μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για την ύπαρξη και μοναδικότητα του NE από αυτήν την ιδιότητα. Όμως, στο Λήμμα 6 αποδείχτηκε ότι υπάρχει τιμή ισχύος $p_{crit,i}$ τέτοια ώστε η U_i^{net} να είναι φθίνουσα συνάρτηση του p_i για $p_i \in [p_{crit,i}, \infty)$ - οπότε εάν η U_i^{net} έχει σημείο ολικού μεγίστου, αυτό θα βρίσκεται στο διάστημα $(0, p_{crit,i}]$.

Επειδή τώρα η $U_i^{net}(p_i, \bar{p}_{-i}) = U_i(p_i, \bar{p}_{-i}) - C_i(p_i, \bar{p}_{-i}), \forall i \in L_f$ (Βλ. σχέση (9)) είναι συνεχής στο κλειστό διάστημα $[0, p_{crit,i}]$ ως πράξεις συνεχών ($C_i(p_i, \bar{p}_{-i})$ συνεχής ως

εκθετική και $U_i = \frac{T_i(p_i)}{p_i} \sim \frac{T_i(\gamma_i)}{\gamma_i}$ συνεχής στο $(0, p_{crit,i}]$ ως πηλίκο συνεχών και

εξετάζεται η συνέχεια στο 0: $\lim_{\gamma \rightarrow 0^+} \frac{T_i(\gamma_i)}{\gamma_i} \stackrel{D.L.}{=} \lim_{\gamma \rightarrow 0^+} \frac{\partial T_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i} \stackrel{(T \text{ σιγμοειδής})}{=} 0^+$, από Θεώρημα

Μέγιστης και Ελάχιστης Τιμής (Extreme Value Theorem) του Weierstrass [19], η $U_i^{net}(p_i)$

έχει (μοναδικό) ολικό μέγιστο σε αυτό το διάστημα στο σημείο $p_{net,i}^*$, το οποίο είναι το μοναδικό NE του ($MTTPG$) παιχνιδιού για τους φοεμο-χρήστες (εάν αυτό υπάρχει) και δίνεται από τον τύπο (16.3), που ουσιαστικά βρίσκει το ελάχιστο ολικό μέγιστο της συνάρτησης $U_i^{net}(p_i)$ στο διάστημα $(0, p_{crit,i}]$. Αν αυτό είναι μεγαλύτερο από P_i^{Max} , τότε ο φοεμο-χρήστης i επιλέγει να εκπέμψει με την μέγιστη ισχύ.

3.4 Παρατηρήσεις σχετικά με τα τοπικά μέγιστα της U_i^{net}

Στην συνέχεια γίνεται μια έρευνα σχετικά με τον αριθμό K των τοπικών μεγίστων $p_{k,i} \in \Lambda_{k,i}$ με $k=1,2,\dots,K$ της συνάρτησης $U_i^{net}(p_i)$ στο διάστημα $(0, p_{crit,i}]$ για $i \in L_f$ (Βλ. εξίσωση (16.3)). Αυτά τα σημεία προκύπτουν ουσιαστικά με εφαρμογή του κριτηρίου πρώτης παραγώγου, δηλαδή από την σχέση:

$$\frac{\partial U_i^{net}(p_i)}{\partial p_i} = 0 \Rightarrow \frac{\partial U_i(p_i)}{\partial p_i} - \frac{\partial C_i(p_i)}{\partial p_i} = 0 \quad (17)$$

Υπενθυμίζεται ότι για τους μακρο-χρήστες που δεν υφίστανται κοστολόγηση ($C_i(p_i, \bar{p}_{-i}) = 0$), η εξίσωση (17) απλοποιείται στην:

$$\frac{\partial U_i(p_i)}{\partial p_i} = 0 \Rightarrow \frac{\partial T_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i} \gamma_i - T_i(\gamma_i) = 0, \text{ που είναι η σχέση (15) και έχει μοναδική}$$

λύση γ_i^* όπως έχει ήδη αναφερθεί λόγω της σιγμοειδούς μορφής της $T_i(\gamma_i)$.

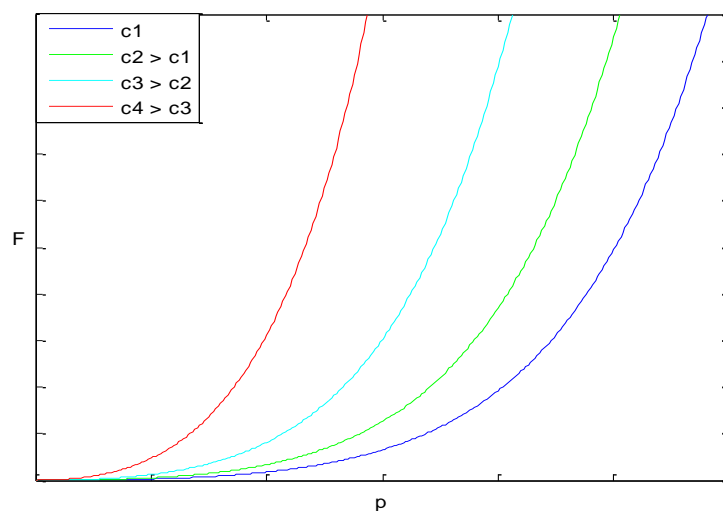
Για τους φοεμο-χρήστες όμως που υπόκεινται σε κοστολόγηση, με βάση την σχέση (8): $C(p_i, \bar{p}_{-i}) = c(e^{p_i} - 1)$, $i \in L_f$, η εξίσωση (17) παίρνει την εξής μορφή:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_i^{net}(p_i)}{\partial p_i} = 0 &\Rightarrow \frac{\partial}{\partial p_i} \left(\frac{T_i(p_i)}{p_i} \right) - \frac{\partial C_i(p_i)}{\partial p_i} = 0 \Rightarrow \frac{\frac{\partial T_i(p_i)}{\partial p_i} p_i - T_i(p_i)}{p_i^2} - ce^{p_i} = 0 \Rightarrow \\ \frac{\partial T_i(p_i)}{\partial p_i} p_i - T_i(p_i) &= cp_i^2 e^{p_i} \xrightarrow{\text{γενική μορφή}} G(p) = F(c, p) \end{aligned} \quad (18)$$

,δηλαδή τα σημεία τοπικού μεγίστου θα είναι τα σημεία τομής των συναρτήσεων $G(p)$ και $F(c, p)$ αντίστοιχα. Είναι εμφανές ότι οι λύσεις της εξίσωσης (18) εξαρτώνται από την σταθερά κοστολόγησης c , καθιστώντας αδύνατον την εύρεση τους εξ' αρχής από την εξίσωση, με συνέπεια να μην είναι δυνατόν να εξαχθούν και συμπεράσματα για τον αριθμό (K) των στοιχείων του συνόλου $\Lambda_{k,i}$. Όμως με περαιτέρω μελέτη των συναρτήσεων G, F μπορεί να γίνει γραφική απεικόνιση των σημείων τομής τους, οπότε και να δημιουργηθεί μια καλύτερη εικόνα για τον αριθμό K .

➤ $F(c, p) = cp^2e^p, c \geq 0$. Ιδιότητες:

- $F(0) = 0$
- $F'(p) = cpe^p(2+p) > 0, \forall p > 0$, άρα η F γνησίως αύξουσα
- $F''(p) > 0, \forall p > 0$, άρα η F κυρτή



Σχήμα 11: Συνάρτηση $F(c, p)$ για διαφορετικές τιμές του παράγοντα κοστολόγησης c

Παρατηρούμε ότι όσο μεγαλύτερη είναι η σταθερά c , τόσο πιο απότομη είναι η καμπύλη της συνάρτησης $F(c, p)$.

➤ $G(p) = \frac{\partial T(p)}{\partial p} p - T(p)$. Ιδιότητες:

- $G(0) = \frac{\partial T(p)}{\partial p} \Big|_{p=0} * 0 - T(0) = 0$
- $G'(p) = \frac{\partial^2 T(p)}{\partial p^2} p$, για $p \geq 0$, που δείχνει ότι το πρόσημο της $G'(p)$ εξαρτάται από το πρόσημο του όρου: $\frac{\partial^2 T(p)}{\partial p^2}$.
- Έστω p^* το σημείο ολικού μεγίστου της ημι-κοίλης συνάρτησης χρησιμότητας $U(p)$: $\frac{\partial U}{\partial p} \Big|_{p=p^*} = 0$. Από το [18] έχουμε ότι για $p < p^*$ η $U(p)$ είναι γνησίως αύξουσα ενώ για $p > p^*$ γνησίως φθίνουσα. Ισχύει ακόμη ότι: $\frac{\partial U}{\partial p} = \frac{G(p)}{p^2}$, οπότε ότι μεταβολές στο πρόσημο υφίσταται η $\frac{\partial U}{\partial p}$ θα υφίσταται και η $G(p)$, αφού η μελέτη γίνεται για $p > 0$. Έτσι ισχύει ότι:

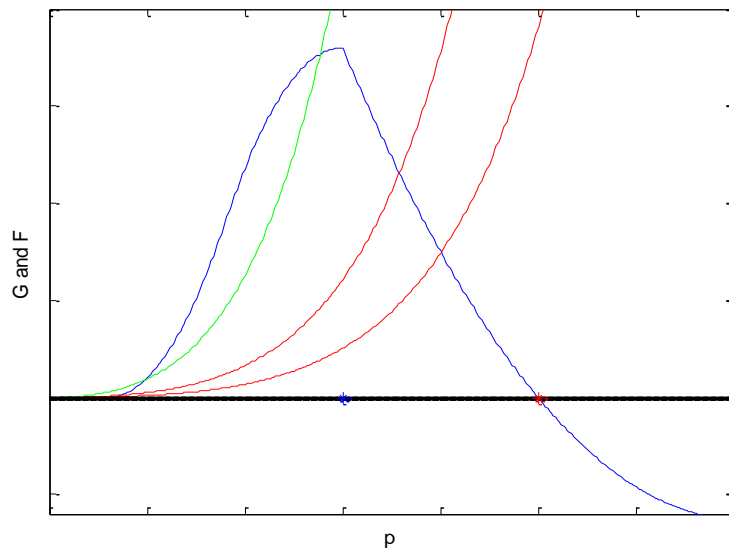
$$\begin{cases} p < p^* \Rightarrow \frac{\partial U}{\partial p} \Big|_{p < p^*} > 0 \Rightarrow G(p) > 0 \\ p = p^* \Rightarrow \frac{\partial U}{\partial p} \Big|_{p=p^*} = 0 \Rightarrow \frac{G(p)}{p^2} \Big|_{p=p^*} = 0 \Rightarrow G(p^*) = 0 \\ p > p^* \Rightarrow \frac{\partial U}{\partial p} \Big|_{p > p^*} < 0 \Rightarrow G(p) < 0 \end{cases}$$

- Επίσης επειδή η $T(p)$ είναι σιγμοειδής με μοναδικό σημείο καμπής το p_{infl}^T , ισχύουν οι σχέσεις:

$$\begin{cases} p < p_{infl}^T \Rightarrow \frac{\partial^2 T(p)}{\partial p^2} \Big|_{p < p_{infl}^T} > 0 \Rightarrow G'(p) > 0 \Rightarrow G \text{ αύξουσα} \\ p = p_{infl}^T \Rightarrow \frac{\partial^2 T(p)}{\partial p^2} \Big|_{p=p_{infl}^T} = 0 \Rightarrow G'(p) = 0 \Rightarrow \text{σημείο μεγίστου της } G \\ p > p_{infl}^T \Rightarrow \frac{\partial^2 T(p)}{\partial p^2} \Big|_{p > p_{infl}^T} < 0 \Rightarrow G(p) < 0 \Rightarrow G \text{ φθίνουσα} \end{cases}$$

- Τέλος, από Λήμμα 5 έχει αποδειχτεί ότι $p_{inf}^T < p^*$.

Με βάση όλες τις παραπάνω ιδιότητες για τις συναρτήσεις F, G μπορεί να γίνει μια ποιοτική αναπαράσταση των διαγραμμάτων τους στο ίδιο σχήμα (Βλ. Σχήμα 12). Η μπλε κουκκίδα αντιστοιχεί στην τιμή p_{inf}^T , ενώ η κόκκινη στην p^* .



Σχήμα 12: Συναρτήσεις $G(p)$ και $F(c, p)$ - η δεύτερη για 3 διαφορετικές τιμές της μεταβλητής c

Παρατηρήσεις:

- Αφού υπάρχει πάντα υπάρχει λύση της (18) – όπως αποδείχτηκε στο παραπάνω Θεώρημα ύπαρξης και μοναδικότητας του NE – τα σημεία τομής των F, G είναι είτε 1 (οι κόκκινες καμπύλες τέμνονται μία φορά η κάθε μία με την μπλε καμπύλη, Βλ. Σχήμα 12) οπότε και επιλέγεται το μοναδικό σημείο τομής τους ως βέλτιστη ισχύ p_{net}^* , είτε 2 (η πράσινη καμπύλη τέμνει την μπλε σε δύο σημεία), από τα οποία μέσω της σχέσης (16.3) επιλέγεται η μικρότερη τιμή ισχύος. Επίσης, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι το κριτήριο της πρώτης παραγώγου δεν επαρκεί για την

εύρεση μεγίστου σε όλες τις περιπτώσεις. Θα πρέπει να ελεγχθεί και η

$$\text{δεύτερη συνθήκη, δηλαδή να ισχύει ότι: } \left. \frac{\partial^2 U^{net}(p)}{\partial p^2} \right|_{p=p_{net}^*} < 0.$$

- Λαμβάνοντας υπόψιν όλα τα παραπάνω, μπορεί με ασφάλεια να διατυπωθεί ότι το σύνολο $\Lambda_{k,i}$ των σημείων τοπικού μεγίστου της $U^{net}(p)$ στο διάστημα $(0, p_{crit}]$ (Βλ. Λήμμα 6) έχει $K \leq 2$ στοιχεία (αντίστοιχα σημεία τομής των F, G).
- Οποιοδήποτε σημείο τομής των F, G και αν ληφθεί στο παραπάνω Σχήμα, θα αντιστοιχεί σε τιμή ισχύος $p_{net}^* < p^*$ (κόκκινη κουκίδα), το οποίο είναι σύμφωνο με το συμπέρασμα που εξήχθη από το Λήμμα 6, δηλαδή ότι με χρήση κοστολόγησης στους φεμτο-χρήστες, αυτοί εκπέμπουν σε χαμηλότερες ισχύς απ' ότι αν δεν κοστολογούνταν, περιορίζοντας έτσι την παρεμβολή που προκαλούν στους υπόλοιπους χρήστες.

3.5 Αλγόριθμος *MTTPG* και σύγκλιση αυτού στο σημείο

ισορροπίας κατά Nash

Σε αυτή την ενότητα, με βάση την προηγούμενη ανάλυση, παρουσιάζεται ένας επαναληπτικός, κατανεμημένος, ανά χρονοσχιμή (*slot-based*) αλγόριθμος ελέγχου ισχύος άνω ζεύξης, ο οποίος βρίσκει τη βέλτιστη κατανομή ισχύος στο κυψελωτό δίκτυο δύο επιπέδων που εξετάζεται, δηλαδή το μοναδικό *NE* του (*MTTPG*) παιχνίσιου.

Ο εν λόγω αλγόριθμος διαιρείται σε δύο μέρη:

- a) **Network part:** εκτελείται στο σταθμό της μακροκυψέλης και είναι υπεύθυνο για να κάνει ευρεία μετάδοση δεδομένων (*broadcasting*) του

παράγοντα κοστολόγησης c στους φεμτο-χρήστες (οι μακρο-χρήστες απλά αγνοούν την συγκεκριμένη τιμή αφού δεν υφίστανται κοστολόγηση) και να συλλέγει την ολική χρησιμότητα όλων των χρηστών του δικτύου (φέμτο και μάκρο), εκφρασμένη μέσω της $U_i^{net}, \forall i \in L$. Εν τέλει, βρίσκει την καλύτερη δυνατή τιμή κοστολόγησης (c_{best}) των φεμτο-χρηστών, αυτή δηλαδή που επιφέρει τη μεγαλύτερη ολική χρησιμότητα σε κάθε έναν από αυτούς και ευνοεί φυσικά τη συνολική απόδοση του δικτύου.

- b) **User part:** εκτελείται μεμονωμένα σε κάθε χρήστη-παίκτη του μη-συνεργατικού παιχνιδιού (*MTTPG*). Αφού λοιπόν ο χρήστης $i \in L$ λάβει τον παράγοντα κοστολόγησης c , αποφασίζει για την ισχύ με την οποία θα εκπέμψει σύμφωνα με τις σχέσεις (16.1) - (16.3), ανάλογα με την κατηγορία χρήστη στην οποία ανήκει. Ουσιαστικά το User Part βρίσκει την ισχύ ισορροπίας κατά Nash για κάθε χρήστη.

Αναλυτικά :

Αλγόριθμος *MTTPG - Network Part:*

1. Ανακοίνωση του αρχικού παράγοντα κοστολόγησης $c=0$ σε όλους τους φεμτο-χρήστες.
2. Κάθε χρήστης $i \in L$ αποφασίζει σύμφωνα με το **Αλγόριθμος *MTTPG - User Part*** για την ισχύ με την οποία θα εκπέμψει, $p_{net,i}^*$, και υπολογίζει την χρησιμότητα του $U_i^{net}(\cdot)$.
3. Αύξηση του παράγοντα κοστολόγησης: $c := c + \Delta c$ και ανακοίνωσή του σε όλους τους φεμτο-χρήστες.
4. Αν ισχύει: $U_i^{net,c} \leq U_i^{net,c+\Delta c}, \forall i \in L_f$ (δηλαδή οι τιμές της συνάρτησης ολικής χρησιμότητας των φεμτο-χρηστών βελτιωθούν – θεωρώντας ότι η χρησιμότητα των φεμτο-χρηστών είναι το μέγεθος που επηρεάζεται άμεσα από την αλλαγή του παράγοντα κοστολόγησης) τότε πήγαινε στο βήμα (2) ή αλλιώς σταμάτα και θέσε $c_{best} := c$ [17].

Αλγόριθμος MTTPG - User Part:

1. Στην αρχή κάθε χρονοσχισμός, ο χρήστης $i \in L$ εκπέμπει με μια τυχαία αρχική ισχύ $p_{net,i}^{*(0)}$, τέτοια ώστε (για $k = 0$): $p_{net,i}^{*(0)} \in [0, P_i^{Max}]$.
2. Κάθε σταθμός s στο δίκτυο (FAP ή ο MBS) κάνει ευρεία μετάδοση δεδομένων (*broadcast*) στους χρήστες του την τιμή της συνολικής παρεμβολής που λαμβάνει από όλους τους χρήστες του συστήματος (φέμτο και μάκρο), δηλαδή την τιμή $I_s^{(k)}(\bar{p}_{net}^{*(k)})$, $\forall s \in S$. Ο χρήστης i που εξυπηρετείται από τον σταθμό $s_i \in S$ υπολογίζει την τιμή: $I_{s_i,-i}^{(k)}(\bar{p}_{net,-i}^{*(k)}) = I_{s_i}^{(k)}(\bar{p}_{net}^{*(k)}) - g_{s_i,i} p_{net,i}^{*(k)}$ και έπειτα υπολογίζει την νέα τιμή της ισχύος του, $p_{net,i}^{*(k+1)}$ σύμφωνα με τις σχέσεις (16.1) - (16.3).
3. Αν οι ισχύς συγκλίνουν, δηλαδή αν $|p_{net,i}^{*(k+1)} - p_{net,i}^{*(k)}| \leq 10^{-5}$, $\forall i \in L$ τότε σταμάτα, αλλιώς θέσε $k := k + 1$ και πήγαινε στο βήμα (2).

Παρατηρείται ότι ο αλγόριθμος MTTPG έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να μειώνει την υπολογιστική ισχύ της συσκευής κάθε χρήστη για τον υπολογισμό της βέλτιστης ισχύος σε κάθε βήμα, όπως φαίνεται εξάλλου από το βήμα (2) του User Part, όπου δε χρειάζεται ο χρήστης να έχει την πληροφορία για όλα τα κέρδη μονοπατιών g των άλλων χρηστών προς τον σταθμό που αυτός εκπέμπει καθώς και τις τιμές της ισχύος κάθε άλλου χρήστη. Με αυτόν τον τρόπο, αφενός μειώνεται η πολυπλοκότητα του αλγορίθμου, αφετέρου ελαττώνεται η σηματοδοσία που απαιτείται για την εκτέλεση του αλγορίθμου στο ασύρματο δίκτυο. Ταυτόχρονα απαιτείται λιγότερη υπολογιστική ισχύ για τη συσκευή του χρήστη, γεγονός το οποίο συνεπάγεται και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής της μπαταρίας της.

Στη συνέχεια αποδεικνύεται ότι ο παραπάνω αλγόριθμος MTTPG (User Part) όντως συγκλίνει στο μοναδικό NE του αντίστοιχου MTTPG παιχνιδιού, όπως αυτό δίνεται από την εξίσωση (16).

Θεώρημα Σύγκλισης MTPG Αλγορίθμου

Ο αλγόριθμος MTPG συγκλίνει στο μοναδικό NE του αντίστοιχου παιγνίου, όπως αυτό έχει οριστεί στις σχέσεις (16.1) – (16.3) για κάθε παίκτη – χρήστη, ξεκινώντας από οποιαδήποτε αρχική στρατηγική $(p_{net,i}^{*(0)})$ στο βήμα 1 του αλγορίθμου).

Απόδειξη: Στο προηγούμενο Θεώρημα αποδείχτηκε η ύπαρξη και μοναδικότητα του NE του (MTPG) παιγνίου, που ορίστηκε ως το διάνυσμα ισχύος: $\bar{p}_{net}^* = (p_{net,1}^*, \dots, p_{net,m+2N}^*)$, όπου $p_{net,i}^*$ έχει βρεθεί από τις σχέσεις (16.1) – (16.3) για κάθε χρήστη. Από Ορισμό 4 (συνάρτηση καλύτερης απόκρισης) και την μετέπειτα παρατήρηση, στο NE θα ισχύει ότι: $\bar{p}_{net}^* = \bar{r}(\bar{p}_{net}^*)$, όπου $\bar{r}(\bar{p}_{net}^*) = (r_1(\bar{p}_{net}^*), r_2(\bar{p}_{net}^*), \dots, r_L(\bar{p}_{net}^*))$ το διάνυσμα των καλύτερων αποκρίσεων όλων των χρηστών στο *equilibrium*, με την σύμβαση: $r_j(\bar{p}_{net}^*) \equiv r_j(\bar{p}_{net,-j}^*)$. Για να αποδειχθεί η σύγκλιση του MTPG αλγορίθμου στο μοναδικό NE του αντίστοιχου παιγνίου, αρκεί να αποδειχθεί ότι η συνάρτηση καλύτερης απόκρισης είναι “πρότυπη” συνάρτηση (standard function) [17]. Η συνάρτηση $\bar{r}(\bar{p})$ είναι πρότυπη, αν για κάθε $\bar{p} \geq 0$, με $\bar{p} = (p_1, p_2, \dots, p_L)$ ικανοποιεί τις εξής 3 ιδιότητες:

- Θετικότητα (Positivity): $\bar{r}(\bar{p}) \geq 0$
- Μονοτονία (Monotonicity): Αν $\bar{p}' \geq \bar{p}$, τότε $\bar{r}(\bar{p}') \geq \bar{r}(\bar{p})$
- Επεκτασιμότητα (Scalability): $\forall a > 1$, ισχύει: $a \cdot \bar{r}(\bar{p}) \geq \bar{r}(a \cdot \bar{p})$

Έχοντας λοιπόν υπόψιν ότι $\bar{p}_{net}^* = \bar{r}(\bar{p}_{net}^*)$ και ότι για κάθε χρήστη j η συνάρτηση καλύτερης απόκρισης είναι: $r_j(\bar{p}_{net}^*) = p_{net,j}^*$, όπου η ισχύς $p_{net,j}^*$ ορίζεται στις σχέσεις (16.1) – (16.3) για κάθε παίκτη – χρήστη δεδομένου των ισχύων των άλλων χρηστών, εύκολα διαπιστώνεται ότι οι 3 παραπάνω ιδιότητες ισχύουν για την συνάρτηση

βέλτιστης απόκρισης του (*MTTPG*) παιγνίου, οπότε είναι πρότυπη συνάρτηση. Έτσι, σύμφωνα με το [20], το σταθερό σημείο (fixed point) $\bar{p}_{net}^* = \bar{r}(\bar{p}_{net}^*)$ είναι μοναδικό και συνεπώς η σύγκλιση του αλγορίθμου *MTTPG* κάτω από την προτεινόμενη στρατηγική απόκρισης (Βλ. σχέση (16)), είναι εξασφαλισμένη.

4

Αριθμητικά αποτελέσματα και Σενάρια Χρήσης

4.1 Περιβάλλον προσομοίωσης και επιλογή παραμέτρων

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστούν και θα σχολιαστούν αποτελέσματα σχετικά με την απόδοση του συστήματος υπό τον προτεινόμενο αλγόριθμο MTPG, για διάφορες περιπτώσεις (σενάρια χρήσης) που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον και διαφοροποιούνται μεταξύ τους σε σχέση με την τοπολογία του συστήματος (δηλαδή τη σχετική θέση των χρηστών και των σταθμών των φεμτοκυβελών ή FAP). Συγκεκριμένα, σε κάθε σενάριο απεικονίζονται σε γραφήματα, μεγέθη όπως η κατανάλωση ισχύος ανά χρήστη, ο ρυθμός μετάδοσης άνω ζεύξης ανά χρήστη που επιτεύχθηκε, ο λόγος σήματος προς θόρυβο και παρεμβολή των εν λόγω χρηστών και η ολική χρησιμότητα του κάθε χρήστη – μάλιστα παρουσιάζονται ξεχωριστά αποτελέσματα για κάθε διαφορετική κατηγορία χρήστη (πραγματικού και μη πραγματικού-χρόνου μάκρο και φέμτο-χρήστες). Τα γραφήματα καθώς και ο κώδικας που υπολογίζει τις ισχύς του διανύσματος NE του αλγορίθμου και τα υπόλοιπα μεγέθη, σχεδιάστηκαν και υλοποιήθηκαν αντίστοιχα σε περιβάλλον Matlab.

Στην συνέχεια γίνεται αναφορά στις τιμές των παραμέτρων προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση του αλγορίθμου καθώς και των

συναρτήσεων που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτόν, όπως είναι η συνάρτηση απόδοσης $f(\gamma_i)$ και η συνάρτηση ρυθμαπόδοσης $T_i(R_i^*)$, ανάλογα βέβαια με το είδος της υπηρεσίας που θέλουν να ικανοποιήσουν οι εκάστοτε χρήστες του δικτύου στα σενάρια χρήσης. Συγκεκριμένα, όσον αφορά τις σταθερές απωλειών διάδοσης και τους δείκτες απωλειών διαδρομής του μοντέλου διάδοσης (Βλ. σχέση (1) – ενότητα 2.2) χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές του παρακάτω πίνακα:

Παράμετρος διάδοσης	Τιμή
$K_{f_0} = K_c$	10 dB (0.1)
K_{f_i}	20 dB (0.01)
W	5 dB (0.32)
$a_c = a_{f_0} = a$	4
b	3

Επίσης, όπως έχει αναφερθεί στην ενότητα 2.4, θεωρείται ότι στην εν λόγω προσομοίωση η συνάρτηση απόδοσης είναι η ίδια για όλους τους χρήστες και συγκεκριμένα χρησιμοποιείται η σιγμοειδής συνάρτηση: $f(\gamma_i) = (1 - e^{-3.7\gamma_i})^{80}$ [16], η οποία ικανοποιεί τις 4 ιδιότητες των συναρτήσεων απόδοσης (Βλ. ενότητα 2.4). Όσον αφορά την ικανοποίηση των διαφορετικών ειδών υπηρεσιών των χρηστών (RT και NRT υπηρεσίες – Βλ. ενότητα 2.5) πράγμα το οποίο αντανακλάται από την επιλογή της μορφής της συνάρτησης ρυθμαπόδοσης $T_i(R_i^*)$, ισχύει ότι:

$$T_i(R_i^*) = \begin{cases} \log(b \cdot R_i^* + 1), \forall i \in L_{NRT} = L_{m,NRT} + L_{f,NRT} \\ \left(1 - e^{-(R_i^* - R_{Min,i}^*)}\right)^M, \forall i \in L_{RT} = L_{m,RT} + L_{f,RT} \end{cases}, \text{ όπου:}$$

$$R_i^* = R_i^F f(\gamma_i) \text{ (Βλ. σχέση (3)) με } R_i^F = \begin{cases} R_i^{Max}, i \in L_{NRT} \\ R_{Max,i}^*, i \in L_{RT} \end{cases}, \text{ (Βλ. Ορισμούς 1 και 2) όπου}$$

$$R_{Max,i}^* = R_{T,i}^* + MF_i \text{ και } R_{Min,i}^* = R_{T,i}^* - MF_i.$$

Οι τιμές που χρησιμοποιούνται στους παραπάνω τύπους είναι [16]:

Παράμετρος	Τιμή
b	0.001
M	2000
$R_{T,i}^*$	64 Kbps
MF_i	10 Kbps
$[R_{Min,i}^*, R_{Max,i}^*]$	$[54, 74]$ Kbps
R_i^{Max}	2.4 Mbps

Παρατηρείται ότι οι συναρτήσεις $T_i(R_i^*)$ που επιλέχθηκαν όχι μόνο ικανοποιούν τις 5 ιδιότητες των συναρτήσεων ρυθμαπόδοσης (Βλ. ενότητα 2.4), αλλά είναι και σύμφωνες με τους Ορισμούς 1 και 2, δηλαδή

$$\text{ότι: } T_i(R_i^*) = \begin{cases} \text{σιγμοειδής, } \forall i \in L_{RT} \\ \text{κοίλη, } \forall i \in L_{NRT} \end{cases}.$$

Τέλος, αναφέρεται ότι ως μέγιστη δυνατή ισχύ εκπομπής χρησιμοποιήθηκε η τιμή των $2W$ (όπως εξάλλου έχει τεθεί από την αρχή της εργασίας), ενώ η αρχική τιμή ισχύος στο $k=0$ βήμα του αλγορίθμου MTTPG τέθηκε ίση με την μέγιστη για όλους τους χρήστες, δηλαδή $p_{net,i}^{*(0)} = P_i^{Max} = 2W, \forall i \in L$ (αφού ο αλγόριθμος συγκλίνει από οποιαδήποτε αρχική τιμή ισχύος). Επίσης, το εύρος ζώνης (*bandwidth*) του CDMA συστήματος που εξετάζεται είναι 10^6 Hz , ενώ η ισχύς θορύβου σ_i (Βλ. σχέση (2)) τέθηκε ίση με $5 \cdot 10^{-16} W$.

4.2 Αποτελέσματα – Σενάρια Χρήσης

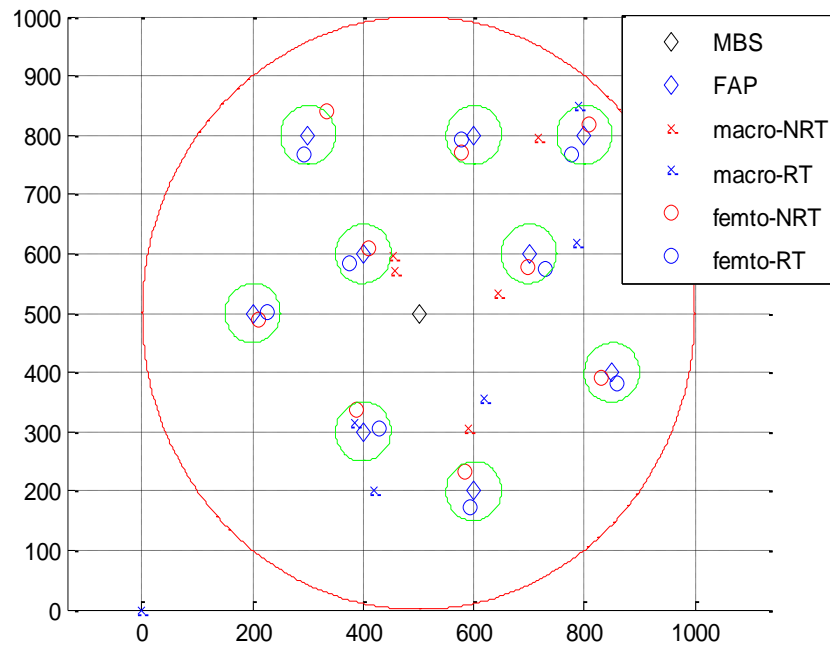
Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας υλοποιούνται και παρουσιάζονται πέντε ξεχωριστά σενάρια χρήσης όπου εξετάζονται διαφορετικές πτυχές του υπό μελέτη κυψελωτού συστήματος δύο επιπέδων. Πριν παρουσιαστεί όμως κάθε σενάριο ξεχωριστά, θα πρέπει να αποφασιστεί η καλύτερη δυνατή τιμή του παράγοντα κοστολόγησης (pricing factor c_{best}) για τους φεμτο-χρήστες, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί ως προεπιλεγμένη παράμετρος για τα μετέπειτα σενάρια.

4.2.1 Επιλογή παράγοντα κοστολόγησης για φεμτο-χρήστες

Σε αυτή την ενότητα, με τη βοήθεια του **Network Part** του MTPPG αλγορίθμου (Βλ. ενότητα (3.5)) βρίσκεται η τιμή c_{best} , που είναι η τιμή του παράγοντα κοστολόγησης των φεμτο-χρηστών η οποία οδηγεί στη μεγιστοποίηση της απόδοσης του δικτύου (το οποίο αντιστοιχεί σε μεγαλύτερη συνολική χρησιμότητα των όλων χρηστών του συστήματος). Συγκεκριμένα, υλοποιήθηκε η εξής τοπολογία δικτύου: 10 μακρο-χρήστες (5 χρήστες φωνής και 5 χρήστες δεδομένων) τοποθετημένοι τυχαία μέσα στην μακροκυψέλη ενώ παράλληλα υπήρχαν 3 FAPs (με 2 χρήστες το καθένα όπως είχε αναφερθεί στην ενότητα (2.1)). Οι μετρήσεις που έγιναν αφορούσαν την μέση ισχύ ανά χρήστη καθώς και το άθροισμα της χρησιμότητας όλων των χρηστών του δικτύου ($\sum_{\forall i \in L} U_i^{net}(\cdot)$), για διαφορετικές τιμές της σταθεράς κοστολόγησης c , με $c = 10^1, 10^{1.5}, 10^2, 10^{2.5}, \dots$

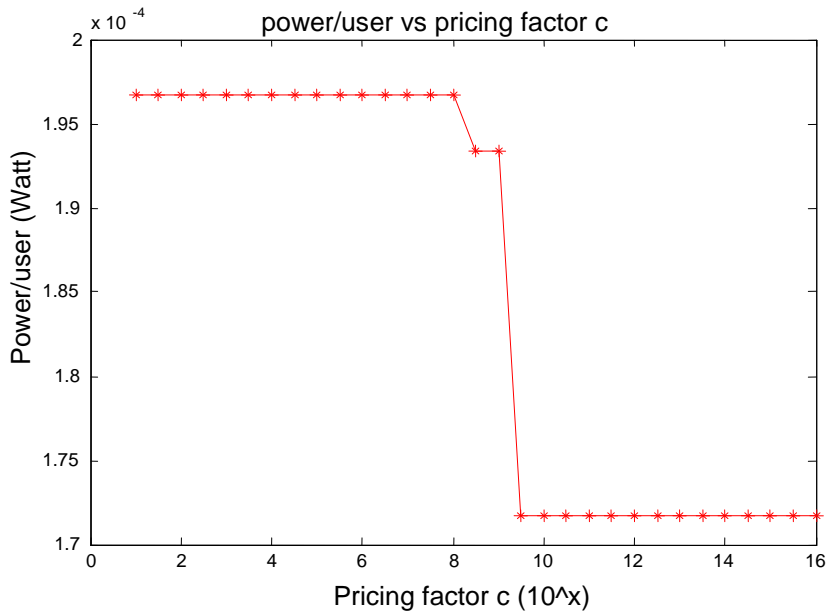
Προκειμένου να δημιουργηθεί μια καλύτερη εικόνα για το πως ανταποκρίνονται οι χρήστες συνολικά στο δίκτυο (μέσω της χρησιμότητας που λαμβάνουν από την χρησιμοποίηση των πόρων του και την ικανοποίηση των αναγκών τους όσον αφορά την ποιότητα υπηρεσίας) καθώς και τη μεταβολή της μέσης ισχύος ανά χρήστη καθώς αλλάζει η τοπολογία του δικτύου (αφού στα επόμενα σενάρια θα αντιμετωπιστούν αρκετά διαφορετικά στιγμιότυπα χρήσης), οι προηγούμενες μετρήσεις επαναλήφθηκαν άλλες 3 φορές προσθέτοντας στο ήδη υπάρχον δίκτυο 2 νέους σταθμούς φεμτοκυψέλης (FAPs) κάθε φορά (χωρίς βέβαια να

αλλάζουν οι θέσεις των μακρο-χρηστών ή των άλλων FAP). Έτσι, στην τελευταία σειρά μετρήσεων, η τοπολογία του δικτύου είναι όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 13.

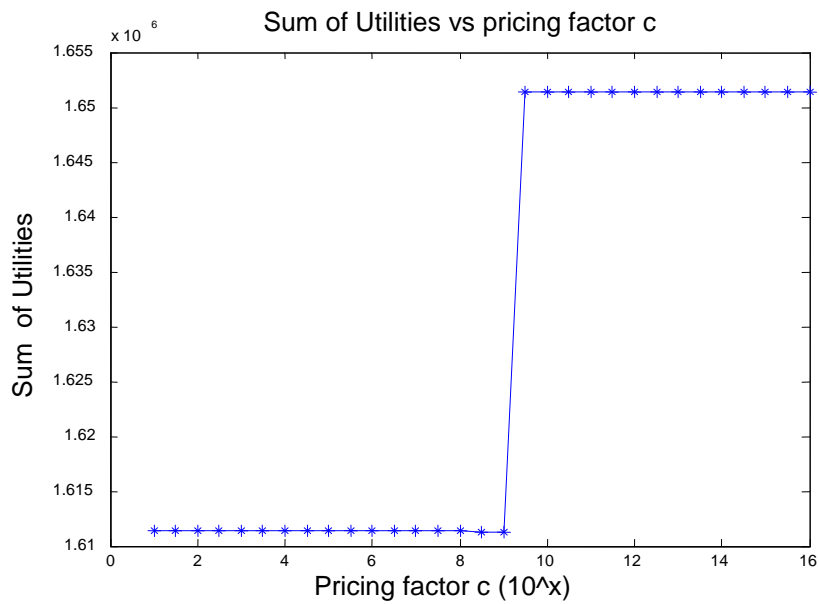


Σχήμα 13: Τοπολογία δικτύου σεναρίου με 9 FAPs και 10 μακρο-χρήστες

Σημείωση: Σε όλα τα μετέπειτα γραφήματα, εκτός αν αναφέρεται αλλιώς, με κόκκινο χρώμα θα συμβολίζονται οι χρήστες δεδομένων (NRT) ενώ με μπλε χρώμα οι χρήστες φωνής (RT). Επίσης πάντα με κύκλο ‘ο’ συμβολίζονται οι φεμτο-χρήστες, ενώ με ‘x’ οι μακρο-χρήστες. Ο σταθμός της μακροκυψέλης (MBS) βρίσκεται πάντα στις συντεταγμένες (500,500) και έχει ακτίνα $R_c = 500m$ (κόκκινος κύκλος), ενώ η ακτίνα των φεμτοκυψελών είναι $R_f = 50m$ (πράσινοι κύκλοι).

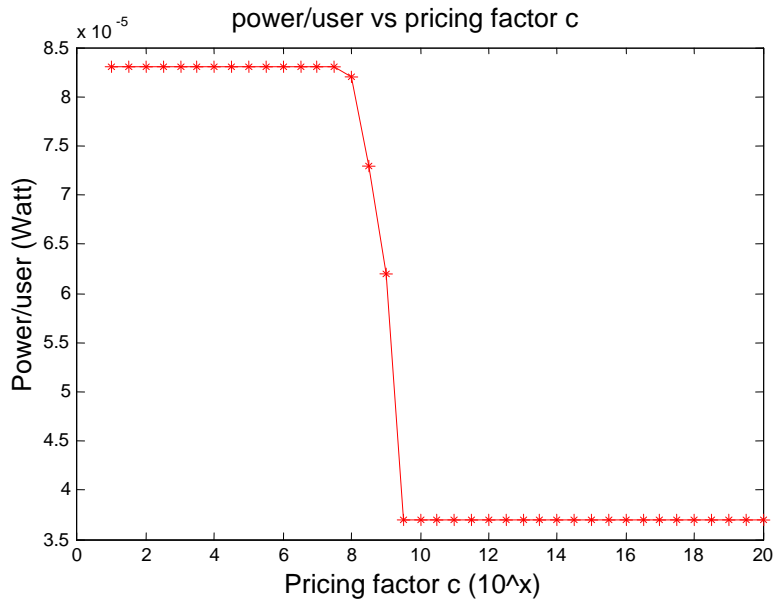


Σχήμα 14: Μέση ισχύς ανά χρήστη για δίκτυο με 3 FAPs

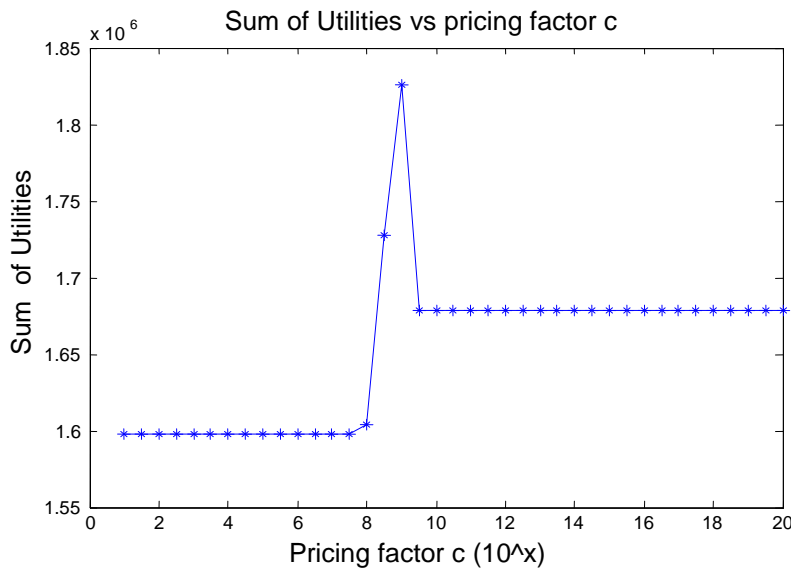


Σχήμα 15: Συνολική χρησιμότητα χρηστών για δίκτυο με 3 FAPs

Από τα Σχήματα 14 και 15 συμπεραίνεται ότι η μέση ισχύς ανά χρήστη παρουσιάζει μια μικρή πτώση για τιμές του παράγοντα κοστολόγησης από 10^8 και πάνω, που αντιστοιχεί σε μια ανάλογη αύξηση της συνολικής χρησιμότητας του συστήματος. Για τιμές του c από 10^{10} και πάνω το σύστημα σταθεροποιείται, δηλαδή δεν εμφανίζεται περαιτέρω μείωση της ισχύς ανά χρήστη με αύξηση του c , οπότε και η συνολική χρησιμότητα δεν μεταβάλλεται.

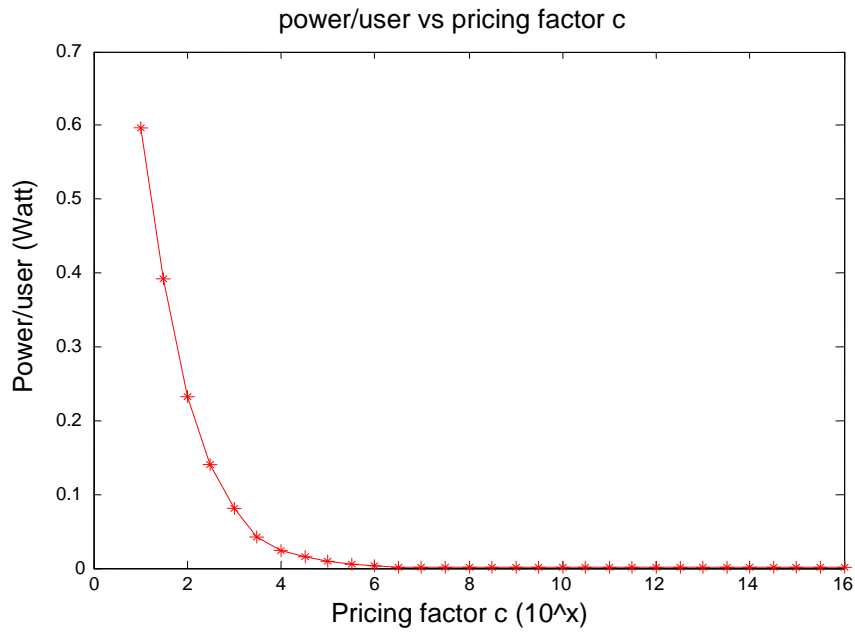


Σχήμα 16: Μέση ισχύς ανά χρήστη για δίκτυο με 5 FAPs



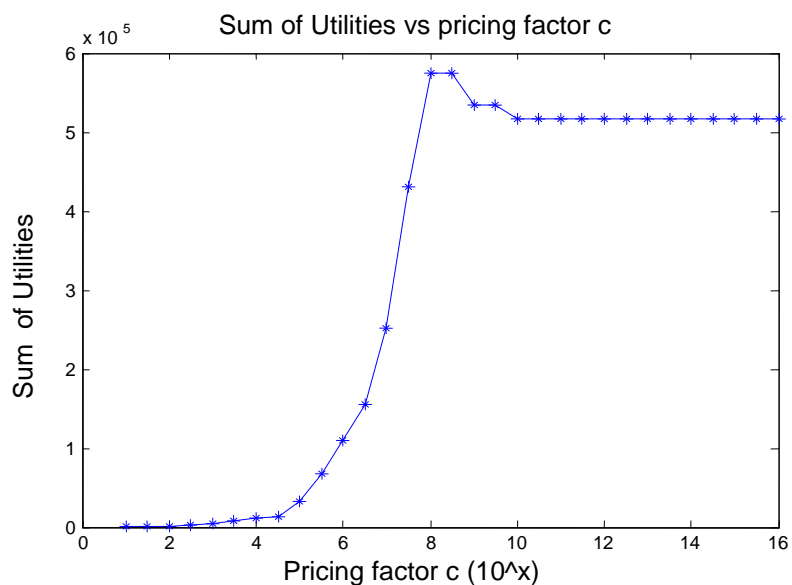
Σχήμα 17: Συνολική χρησιμότητα χρηστών για δίκτυο με 5 FAPs

Στη συνέχεια (Βλ. Σχήματα 16 και 17) παρατηρείται ότι παρόλο που άλλαξε η τοπολογία του δικτύου (προστέθηκαν 2 FAP – άρα 4 νέοι χρήστες) τα γραφήματα παρουσιάζουν ίδια μορφή με πριν, με τη διαφορά ότι τώρα η συνολική χρησιμότητα των χρηστών του δικτύου εμφανίζει μια κορύφωση και έπειτα σταθεροποιείται-ισορροπεί σε μια μικρότερη τιμή.



Σχήμα 18: Μέση ισχύς ανά χρήστη για δίκτυο με 7 FAPs

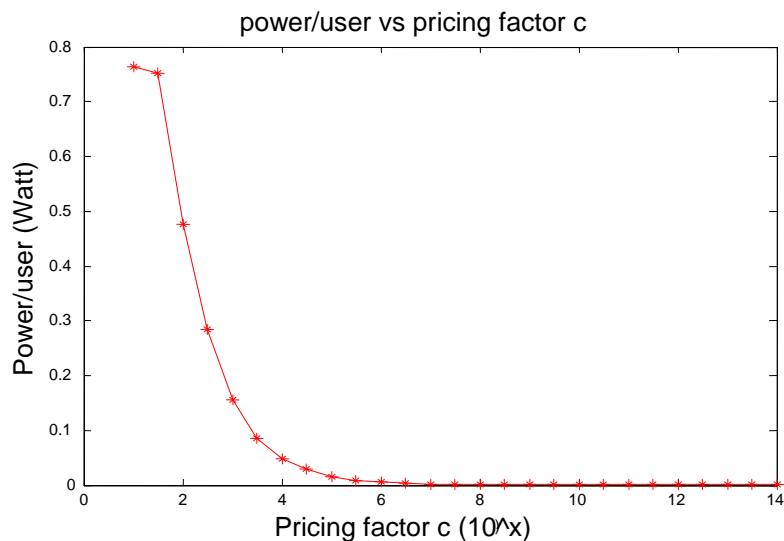
Στα επόμενα γραφήματα (Βλ. Σχήματα 18 και 19) παρατηρείται μια ομαλοποίηση των καμπυλών που εξετάστηκαν προηγουμένως καθώς και μεγαλύτερο εύρος μεταβολών των τιμών των υπό εξέταση μεγεθών (στα προηγούμενα γραφήματα οι αλλαγές ήταν αρκετά μικρές για να μπορούν να εξαχθούν αξιόλογα συμπεράσματα).



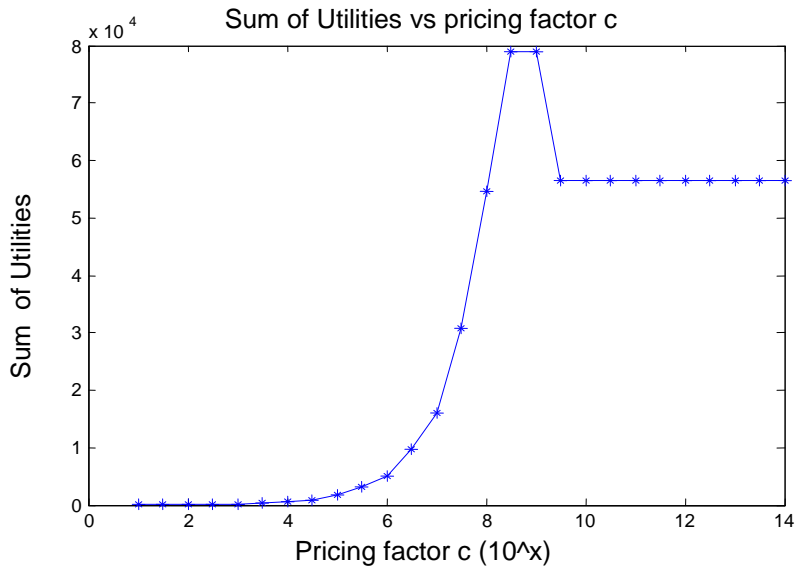
Σχήμα 19: Συνολική χρησιμότητα χρηστών για δίκτυο με 7 FAPs

Αυτό αφενός συνέβη διότι αυξήθηκε ο αριθμός των χρηστών στο εν λόγω σενάριο και αφετέρου λόγω της νέας τοπολογίας που δημιουργήθηκε με την προσθήκη των 2 FAP. Συγκεκριμένα, προκειμένου να γίνει αντιληπτή η αλληλεπίδραση φέμτο και μακρο-χρηστών σε σχέση με την κοστολόγηση των πρώτων, το νέο FAP του σεναρίου τοποθετήθηκε σε περιοχή της μακροκυψέλης που είχε μακρο-χρήστες (Βλ. Σχήμα 13), οπότε βρισκόμενοι αυτοί κοντά (ή και μέσα) στις φεμτοκυψέλες, κατέστησαν δυνατή την παρατήρηση της επίδρασης που έχει μια πολιτική μεγαλύτερης κοστολόγησης (αύξηση του c) στους φεμτο-χρήστες, οι οποίοι αναγκάζονται να μειώσουν τις ισχύς εκπομπής τους λόγω κοστολόγησης – γεγονός το οποίο περιορίζει τις παρεμβολές στους μακρο-χρήστες, οι οποίοι τελικά εκπέμπουν και αυτοί σε ακόμα μικρότερες ισχύς. Έτσι, ενώ με απουσία κοστολόγησης η μέση ισχύς ανά χρήστη είναι περίπου 0.6Watt , με αύξηση του c μειώνεται στην τάξη των mW (μάλιστα για τιμές του c από 10^6 έως 10^{10} η ισχύς μειώνεται και άλλο, αλλά δε φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα – Βλ. Σχήμα 18 – λόγω διαφοράς στην τάξη μεγέθους σε σχέση με την αρχική τιμή ισχύος).

Ανάλογη συμπεριφορά εμφανίζει και το διάγραμμα της συνολικής χρησιμότητας (Βλ. Σχήμα 19) όπου στην αρχή λόγω πολλών παρεμβολών μεταξύ φεμτο-χρηστών και των μακρο-χρηστών που βρίσκονται στα όρια των αντίστοιχων φεμτοκυψελών, η συνολική χρησιμότητα παίρνει πολύ μικρές τιμές οι οποίες στη συνέχεια ανεβαίνουν λόγω της μείωσης της μέσης ισχύος ανά χρήστη με την αύξηση του c , ενώ και πάλι η κορύφωση της καμπύλης γίνεται για $c = 10^8$ και στην συνέχεια σταθεροποιείται για $c \geq 10^{10}$. Τέλος, για 9 FAPs στο δίκτυο (Βλ. Σχήμα 13) τα γραφήματα παρουσιάζουν παρόμοια εικόνα με τα προηγούμενα:



Σχήμα 20: Μέση ισχύς ανά χρήστη για δίκτυο με 9 FAPs

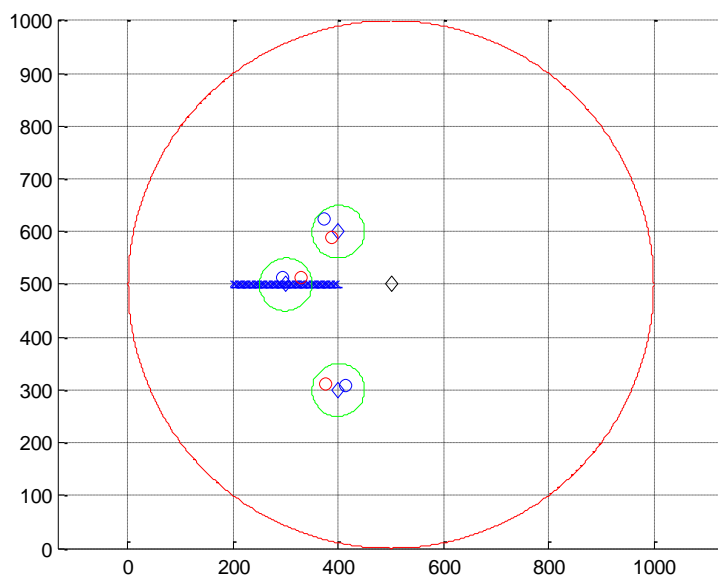


Σχήμα 21: Συνολική χρησιμότητα χρηστών για δίκτυο με 9 FAPs

Έτσι, παρατηρώντας όλα τα παραπάνω διαγράμματα, επιλέχτηκε ως βέλτιστος παράγοντας κοστολόγησης η τιμή $c_{best} = 10^{10}$ (για να χρησιμοποιηθεί απευθείας στα επόμενα σενάρια), διότι είναι η τιμή κοστολόγησης που επιφέρει την καλύτερη δυνατή απόδοση στο σύστημα, δηλαδή η τιμή για την οποία η συνολική χρησιμότητα του συστήματος ισορροπεί στην μέγιστη τιμή της ενώ η μέση ισχύς ανά χρήστη (όπου η ισχύς είναι ο πιο σημαντικός πόρος του δικτύου για την παρούσα εργασία) γίνεται ελάχιστη σε όλα τα παραπάνω σενάρια. Πρακτικά αυτό που συμβαίνει είναι ότι οι φεμτο-χρήστες με την αύξηση της κοστολόγησης περιορίζουν τις ισχύς τους, με αποτέλεσμα οι μακρο-χρήστες να ισορροπήσουν σε χαμηλότερες – βέλτιστες ισχύς αφού δέχονται λιγότερες παρεμβολές και κατά συνέπεια να αυξάνεται η χρησιμότητα όλων των χρηστών του δικτύου. Αυτό παρεμπιπτόντως δείχνει και το λόγο που η κοστολόγηση των φεμτο-χρηστών αποτελεί καλή επιλογή στρατηγικής για προστασία της ποιότητας υπηρεσίας των μακρο-χρηστών που είναι χρήστες προτεραιότητας, όπως αναφέρθηκε χαρακτηριστικά στην ενότητα (2.6).

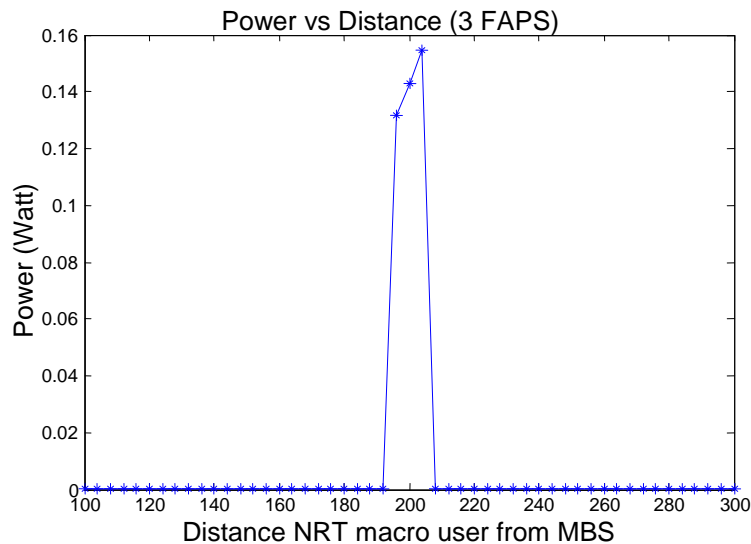
4.2.2 Σενάριο 1

Σε αυτό το σενάριο μελετάται η συμπεριφορά των χρηστών 3 φεμτοκυψελών (3 FAPs) και ενός μακρο-χρήστη (που είναι χρήστης δεδομένων) ο οποίος διασχίζει τα όρια μιας από αυτές τις φεμτοκυψέλες, καθώς απομακρύνεται ταυτόχρονα και από το σταθμό βάσης της μακροκυψέλης (MBS). Η τοπολογία του εν λόγω σεναρίου φαίνεται στο Σχήμα 22, όπου με μπλε χρώμα σχεδιάζεται η πορεία που χάραξε ο μακρο-χρήστης περνώντας μέσα από την φεμτοκυψέλη με κέντρο το (300,500), το

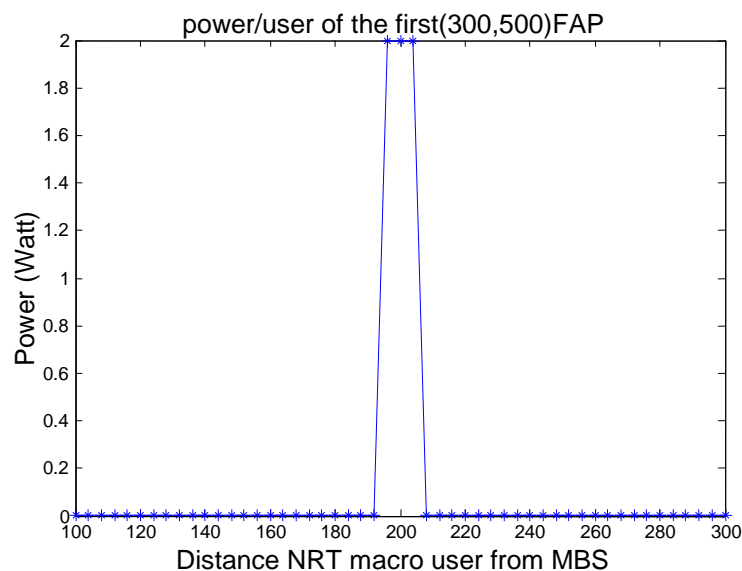


Σχήμα 22: Τοπολογία δικτύου 1^{ου} Σεναρίου με 3 FAPs και 1 μακρο-χρήστη δεδομένων.

οποίο ονομάζεται για χάρη της προσομοίωσης 1^ο FAP, ενώ οι σταθμοί των φεμτοκυψελών στις συντεταγμένες (400,300) και (400,600) αποτελούν το 2^ο και 3^ο FAP αντίστοιχα. Αρχικά εξετάζεται η ισχύς άνω ζεύξης, ο ρυθμός μετάδοσης που επιτυγχάνει καθώς και η χρησιμότητα του μακρο-χρήστη ο οποίος κινείται προς και μέσα από το 1^ο FAP, σε σχέση με την απόστασή του από τον MBS. Στη συνέχεια ερευνάται πώς αυτή η κίνηση του μακρο-χρήστη επηρεάζει τους χρήστες της φεμτοκυψέλης στην οποία αυτός εισήχθει καθώς και το πώς αντιδρούν οι φεμτο-χρήστες των άλλων FAP.



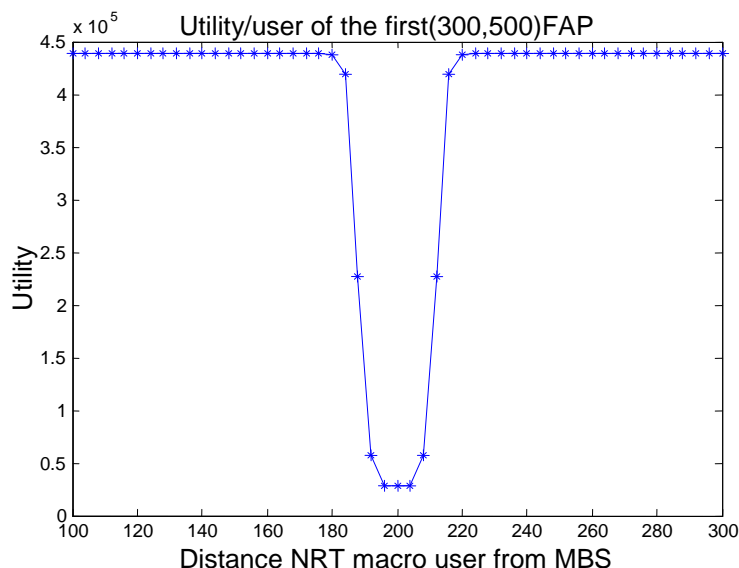
Σχήμα 23: Ισχύς μακρο-χρήστη σε σχέση με την απόσταση του από το σταθμό βάσης της μακροκυψέλης



Σχήμα 24: Μέση ισχύς ανά χρήστη του 1^{ου} FAP σε σχέση με την απόσταση του μακρο-χρήστη από το σταθμό βάσης της μακροκυψέλης

Παρατηρείται ότι (Βλ. Σχήμα 23) ο μακρο-χρήστης εκπέμπει με πολύ χαμηλή ισχύ για όσο βρίσκεται έξω από την 1^η φεμτοκυψέλη (οι παρεμβολές που φτάνουν από τους φεμτο-χρήστες του συστήματος στον MBS είναι ουσιαστικά αμελητέες), ενώ όταν φτάνει σε αρκετά μικρή απόσταση από τον σταθμό της ($d \leq 10m$) οι παρεμβολές που δημιουργεί αυτός στους φεμτο-χρήστες του 1^{ου} FAP είναι αρκετά μεγάλες ώστε αυτοί να εκπέμπουν με μέγιστη ισχύ (2W) προκειμένου να

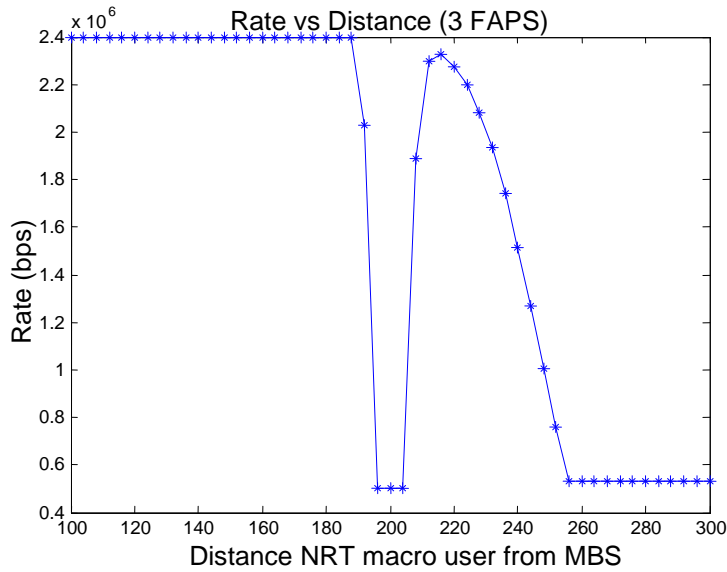
προστατεύσουν την ποιότητα υπηρεσίας τους (Βλ. Σχήμα 24). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αυξήσει και αυτός την ισχύ του (αφού αυξάνεται η παρεμβολή που προκαλούν οι φεμτο-χρήστες), παραμένοντας όμως σε χαμηλά επίπεδα ($\sim 0.15W$).



Σχήμα 25: Μέση χρησιμότητα ανά χρήστη του 1^{ου} FAP σε σχέση με την απόσταση του μακρο-χρήστη από το σταθμό βάσης της μακροκυψέλης

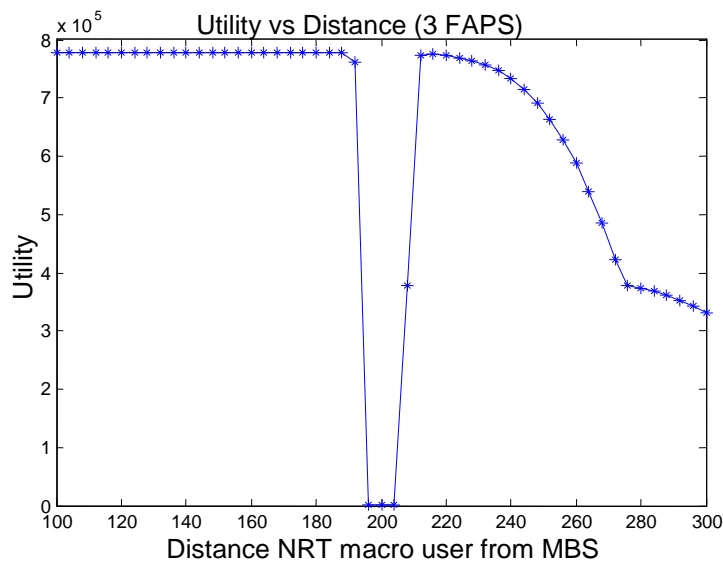
Στην συνέχεια, λόγω της “εισβολής” του μακρο-χρήστη στην φεμτοκυψέλη και κατά συνέπεια της αύξησης της μέσης ισχύος ανά φεμτο-χρήστη (Βλ. Σχήμα 24), η τιμή της μέσης χρησιμότητας των χρηστών του 1^{ου} FAP μειώνεται αρκετά (Βλ. Σχήμα 25), ενώ αντίστοιχα επανέρχεται στα αρχικά επίπεδα με την έξοδο του μακρο-χρήστη από την φεμτοκυψέλη.

Τα επόμενα δύο γραφήματα αναπαριστούν τον αντίκτυπο που έχει η παραπάνω κίνηση του μακρο-χρήστη μέσα από την 1^η φεμτοκυψέλη στο ρυθμό μετάδοσης που αυτός επιτυγχάνει καθώς και στη χρησιμότητα του.



Σχήμα 26: Ρυθμός μετάδοσης μακρο-χρήστη σε σχέση με την απόσταση του από το σταθμό βάσης της μακροκυψέλης

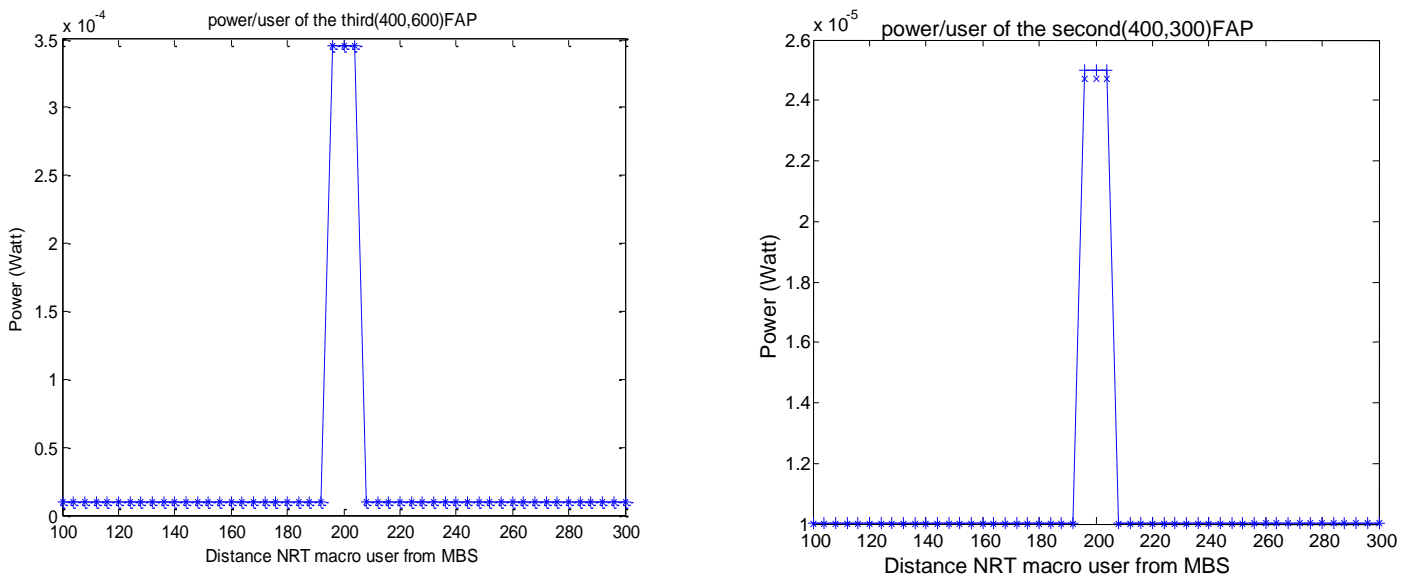
Παρατηρείται ότι ο ρυθμός μετάδοσης του μακρο-χρήστη ελαττώνεται κατακόρυφα όταν αυτός περνά κοντά στο FAP (Βλ. Σχήμα 26), ενώ ξαναυξάνει όταν απομακρύνεται από αυτό (ο μακρο-χρήστης απουσία ισχυρών παρεμβολών – έξω από την φεμτοκυψέλη δηλαδή – εκπέμπει με το μέγιστο δυνατό ρυθμό, δηλαδή $2.4Mbps$). Όμως, ταυτόχρονα απομακρύνεται και από τον MBS με αποτέλεσμα την περαιτέρω μείωση του ρυθμού μετάδοσής του που παρ' όλα αυτά διατηρείται στην ικανοποιητική τιμή των $0.5Mbps$ (για χρήστη δεδομένων).



Σχήμα 27: Χρησιμότητα μακρο-χρήστη σε σχέση με την απόσταση του από το σταθμό βάσης της μακροκυψέλης

Επίσης, το Σχήμα 27 δείχνει πως διαμορφώνεται η χρησιμότητα του μακρο-χρήστη, η οποία μειώνεται με το πέρασμα του από το FAP (αφού ελαττώνεται ο ρυθμός μετάδοσης που αυτός επιτυγχάνει ενώ παράλληλα αυξάνει η ισχύς του – Βλ. Σχήμα 23) και αυξάνεται αντίστοιχα όταν απομακρύνεται από αυτό, για να ελαττωθεί τελικά λόγω σταδιακά μειωμένου ρυθμού μετάδοσης με τον οποίο αυτός μεταδίδει δεδομένα.

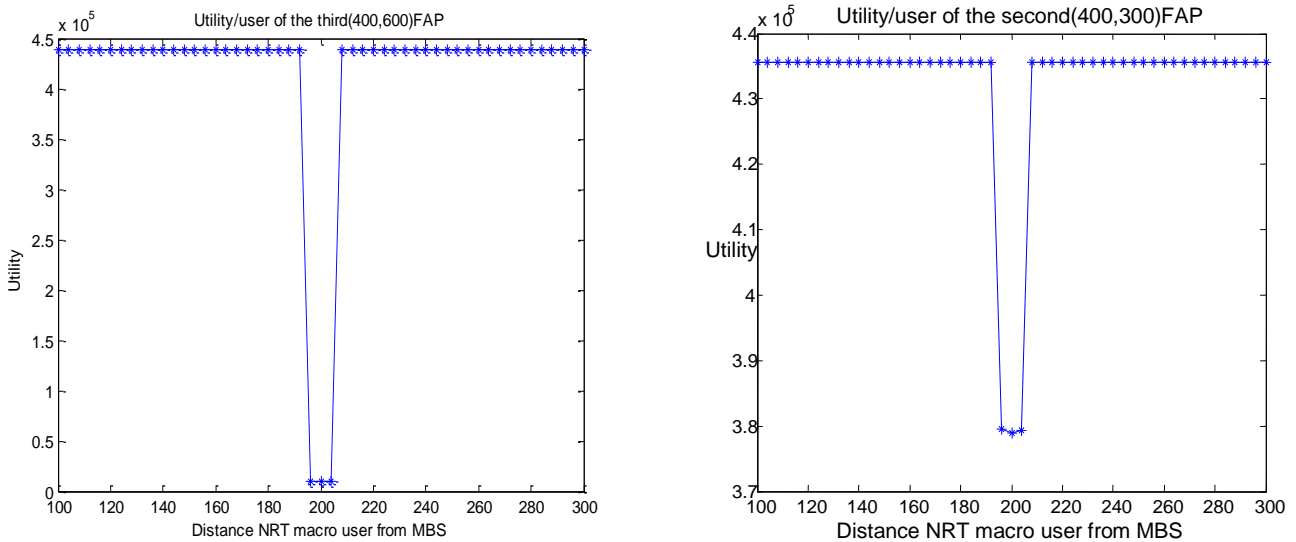
Στην συνέχεια μελετάται η επίδραση που έχει η διέλευση του μακρο-χρήστη από την 1^η φεμτοκυψέλη στους χρήστες των άλλων δύο FAP και συγκρίνονται οι αντιδράσεις αυτές μεταξύ τους καθώς και σε σχέση με την απόσταση των FAP 2,3 από το 1^ο FAP. Το πρώτο μέγεθος που συγκρίνεται είναι η μέση ισχύς ανά φεμτοχρήστη



Σχήμα 28: Μέση ισχύς ανά χρήστη 3^ο και 2^ο FAP σε σχέση με την απόσταση του μακρο-χρήστη από τον σταθμό βάσης της μακροκυψέλης

Παρατηρείται ότι όπως ακριβώς οι χρήστες του 1^ο FAP αύξησαν τις ισχύς τους για να προστατέψουν την ποιότητα υπηρεσίας τους, έτσι και εδώ συνέβει παρόμοια αντιμετώπιση (Βλ. Σχήμα 28) με τη διαφορά ότι λόγω απόστασης, οι φεμτο-χρήστες των FAP 2 και 3 δε χρειάζεται να εκπέμψουν με τόσο μεγάλη ισχύ

(αφού οι παρεμβολές είναι μικρότερες) – εν ολίγοις επηρεάζονται λιγότερο. Βέβαια, ισχύει ότι το 3^ο FAP (400,600) που είναι πιο κοντά στο 1^ο, επηρεάζεται περισσότερο από το 2^ο FAP (300,600) που βρίσκεται πιο μακριά, αφού οι χρήστες του αναγκάζονται να εκπέμψουν με μεγαλύτερη μέση ισχύ απ’ ότι οι χρήστες του δεύτερου, ενώ αντίστοιχα η μέση χρησιμότητα ανά χρήστη εμφανίζει μεγαλύτερη πτώση για το 3^ο FAP όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 29:



Σχήμα 29: Μέση χρησιμότητα ανά χρήστη 3^{ου} και 2^{ου} FAP σε σχέση με την απόσταση του μακρο-χρήστη από τον σταθμό βάσης της μακροκυψέλης

Συμπερασματικά, στο 1^ο σενάριο παρατηρήθηκε ότι όταν ένας μακρο-χρήστης εισέλθει μέσα στα όρια μιας φεμτοκυψέλης δημιουργούνται δυσάρεστες καταστάσεις τόσο για τον ίδιο όσο και για τους κοντινούς χρήστες του δικτύου, όπου κυρίως επηρεάζονται οι χρήστες της φεμτοκυψέλης στην οποία ο μακρο-χρήστης εισέρχεται. Μάλιστα, όταν ο μακρο-χρήστης πλησιάσει σε απόσταση $d \leq 10m$ από ένα FAP, οι χρήστες του FAP αναγκάζονται να εκπέμψουν με μέγιστη ισχύ λόγω της ισχυρής παρεμβολής που τους προκαλεί ο εν λόγω χρήστης, ενώ ταυτόχρονα έχουν χειρίστη ποιότητα υπηρεσίας (QoS) γεγονός που αντανακλάται από την πολύ χαμηλή μέση χρησιμότητα ανά χρήστη που έχουν (Βλ. Σχήμα 25). Ο μακρο-χρήστης απ’ την άλλη δεν επηρεάζεται και τόσο, αφού διατηρεί γενικά μικρή ισχύ ενώ ο ρυθμός μετάδοσης που επιτυγχάνει παραμένει σε ικανοποιητικά επίπεδα (παρ’ όλα αυτά όμως η χρησιμότητα του ελαττώνεται σε σχέση με πριν).

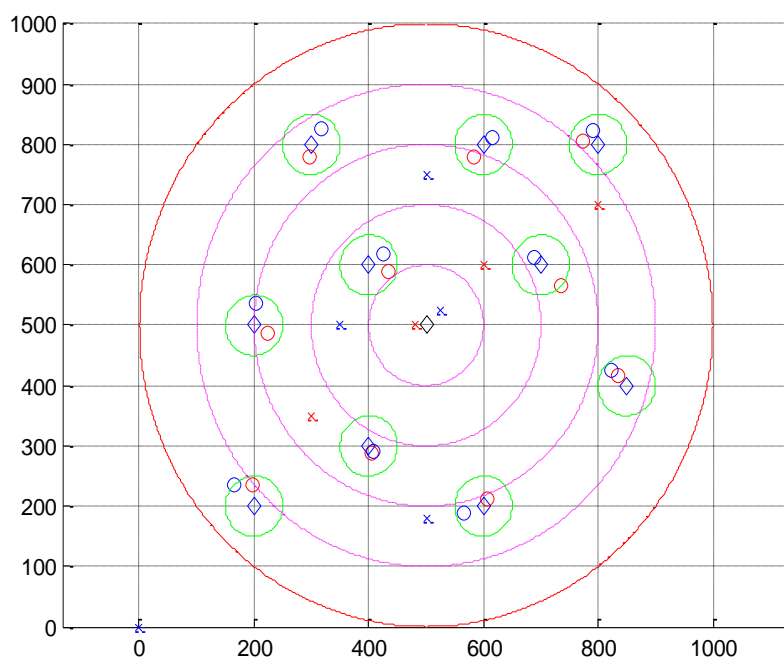
Όλη η παραπάνω μη επιθυμητή κατάσταση έχει ως πρωταρχική αιτία την πολιτική πρόσβασης που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία. Οι κύριες πολιτικές πρόσβασης στις φεμτοκυψέλες σχολιάστηκαν στην ενότητα (1.3) ενώ τελικά στο σύστημα που εξετάζεται χρησιμοποιήθηκε πολιτική πρόσβασης κλειστού τύπου, δηλαδή ότι κάθε FAP θα έχει περιορισμένο αριθμό (εδώ 2) εγγεγραμμένων χρηστών στους οποίους θα παρέχει πρόσβαση στους πόρους του, χωρίς να δέχεται κανέναν άλλο χρήστη στο CSG (*Closed Subscribed Group*) του. Έτσι, οποιοσδήποτε άλλος χρήστης τύχει να είναι κοντά στην φεμτοκυψέλη, θα προκαλεί μεγάλη παρεμβολή στους φεμτο-χρήστες της, όπως σχολιάστηκε και στο Σχήμα 4 με τη νεκρή ζώνη (*dead zone*) που δημιουργείται στην περίπτωση της άνω ζεύξης.

Προκειμένου λοιπόν να αποφευχθεί μια τέτοια κατάσταση (όπως ήταν και αυτή που μελετήθηκε αναλυτικά στις παραπάνω προσομοιώσεις) συνιστάται η επιλογή μιας πολιτικής πρόσβασης ανοικτού ή υβριδικού τύπου, όπου ο μακρο-χρήστης θα μοιραζόταν τους πόρους της φεμτοκυψέλης στην ακτίνα της οποίας θα εισχωρούσε – θα γινόταν δηλαδή φεμτο-χρήστης για όσο χρονικό διάστημα θα ήταν μέσα στην εμβέλεια του σταθμού της – και εκπέμποντας λοιπόν προς τον σταθμό της φεμτοκυψέλης που βρίσκεται πιο κοντά του και όχι προς τον MBS, θα κατάφερνε να μειώσει την παρεμβολή που προκαλεί στους άλλους φεμτο-χρήστες στο ελάχιστο, με αποτέλεσμα και αυτοί να ελαττώσουν τις ισχύς τους και να μπορέσουν να αποκομίσουν μεγαλύτερη χρησιμότητα από τη χρησιμοποίηση των πόρων της φεμτοκυψέλης σε σχέση με πριν. Έτσι, και ο μακρο-χρήστης και οι υπόλοιποι χρήστες του FAP, θα πετύχαιναν καλύτερη ποιότητα υπηρεσιών (δηλαδή μικρότερη ισχύ, μεγαλύτερο ρυθμό μετάδοσης και συνεπώς μεγαλύτερη χρησιμότητα) και γενικά το δίκτυο θα είχε καλύτερη ισορροπία όσον αφορά την κατανομή των πόρων του (εδώ συγκεκριμένα της ισχύος) στους χρήστες του υπό εξέταση συστήματος.

4.2.3 Σενάριο 2

Σε αυτό το σενάριο χρήσης μελετώνται διάφορα μεγέθη του δικτύου όπως ισχύς ανά χρήστη, χρησιμότητα ανά χρήστη, ρυθμός μετάδοσης ανά χρήστη καθώς και λόγος σήματος προς θόρυβο και παρεμβολή (SINR) ανά χρήστη, σε σχέση με τον αριθμό των FAPs που υπάρχουν μέσα στην μακροκυψέλη. Στην συνέχεια, σε κάθε

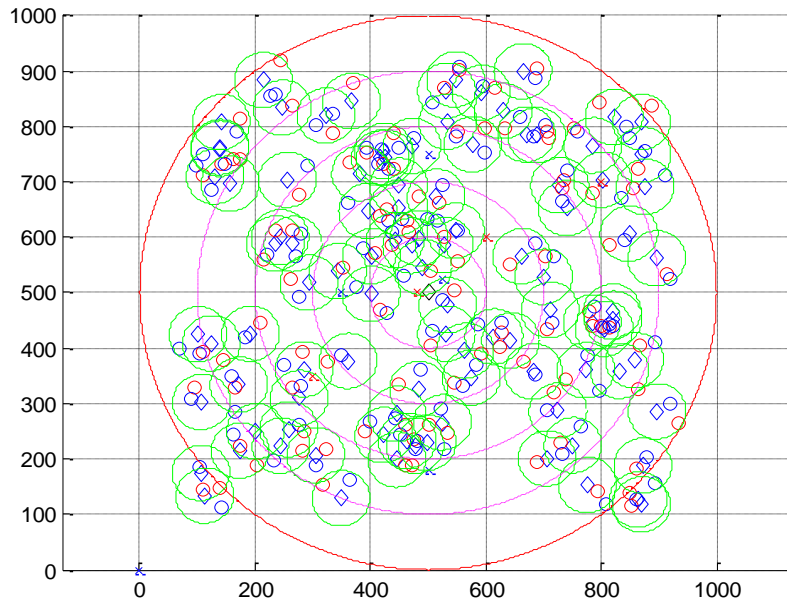
διάγραμμα απεικονίζονται 4 διαφορετικές καμπύλες: μία για κάθε διαφορετική κατηγορία χρηστών του κυψελωτού δικτύου (όπως έχει αναφερθεί υπάρχουν τέσσερις κατηγορίες χρηστών στο δίκτυο και είναι: μακρο-χρήστες φωνής, μακρο-χρήστες δεδομένων, φεμτο-χρήστες φωνής και φεμτο-χρήστες δεδομένων). Συγκεκριμένα, στο περιβάλλον προσομοίωσης τοποθετήθηκαν 8 μακρο-χρήστες σε ζώνες, δηλαδή μέσα σε δακτυλίους ακτίνας $r < R_c$ και πάχους $100m$. Η πρώτη ζώνη έχει ακτίνα $100m$, η δεύτερη $200m$, η τρίτη $300m$ και η τέταρτη $400m$, ενώ μέσα σε κάθε ζώνη υπάρχουν 2 μακρο-χρήστες (σε τυχαίες θέσεις μέσα στην ζώνη), ένας χρήστης υπηρεσιών φωνής (μπλε “x”) και ένας χρήστης δεδομένων (κόκκινο “x”). Ο αριθμός των τυχαία καταναμημένων FAP μέσα στο δίκτυο κυμαίνεται από 0 έως 100 (προστίθενται 10 FAPs σε κάθε βήμα) και στα επόμενα δύο σχήματα (Βλ. Σχήματα 30 και 31) απεικονίζονται στιγμιότυπα του δικτύου όπου έχουμε 10 και 100 FAPs αντίστοιχα, ενώ είναι σχεδιασμένες και οι ζώνες που αναφέρθηκαν καθώς και οι σταθερές θέσεις των μακρο-χρηστών.



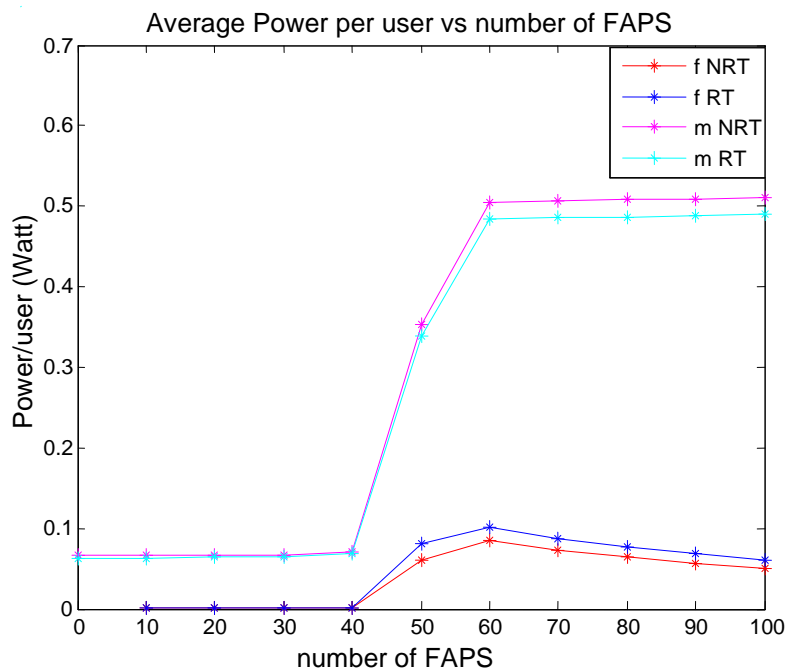
Σχήμα 30: Τοπολογία δικτύου 2^ο Σεναρίου με 10 FAPs και 8 μακρο-χρήστες σε ζώνες

Όπως φαίνεται και στο παρακάτω Σχήμα 31, το δίκτυο με τα 100 FAPs είναι αρκετά πυκνό (dense) και μπορεί κάλλιστα να αποτελεί πραγματικό σενάριο σε μια αστική περιοχή. Χαρακτηριστικό φαινόμενο τέτοιων περιπτώσεων είναι η δημιουργία

συστάδων (*clusters*) από FAPs, δηλαδή η εγκατάσταση και χρήση σταθμών φεμτοκυψελών σε γειτονικά σπίτια ή ακόμα και σε διπλανά ή άλλων ορόφων δωμάτια σε πολυκατοικίες.

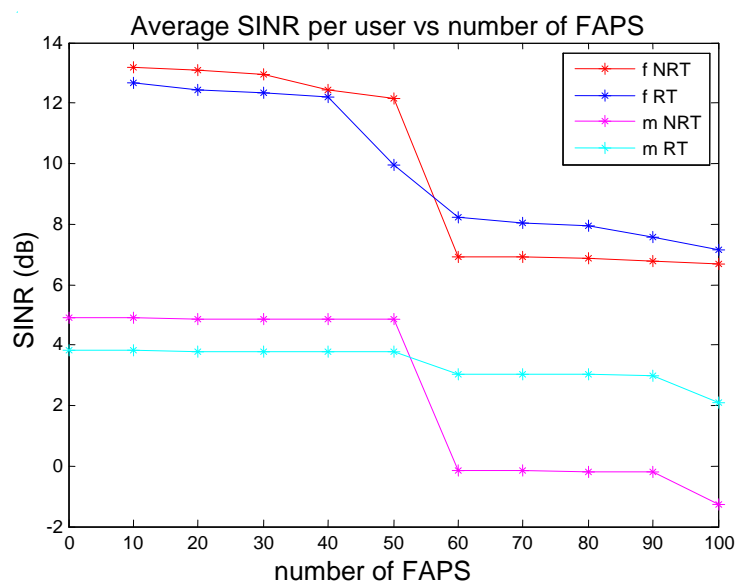


Σχήμα 31: Τοπολογία δικτύου 2^{ου} Σεναρίου με 100 FAPs και 8 μακρο-χρήστες σε ζώνες



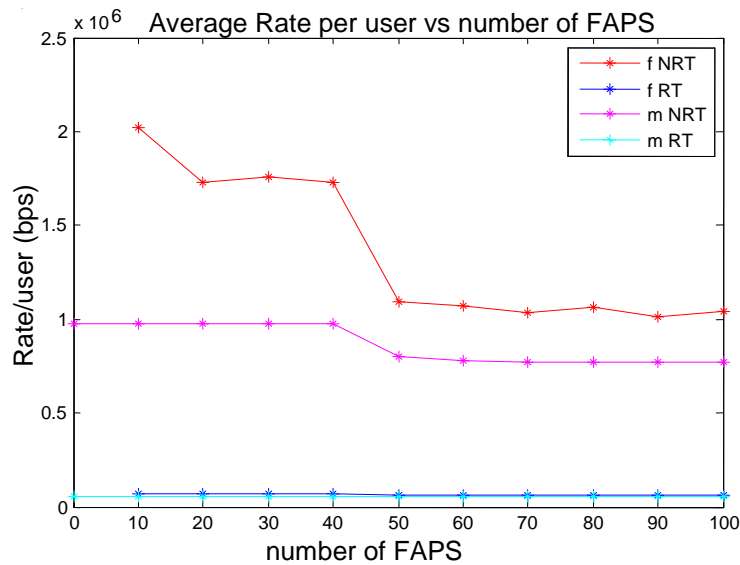
Σχήμα 32: Μέση ισχύς ανά κατηγορία χρήστη σε σχέση με τον αριθμό των FAP του δικτύου

Από το Σχήμα 32 συμπεραίνεται ότι για $\#FAP \leq 40$ (όπου το σύμβολο $\#$ συμβολίζει το πλήθος) όλοι οι χρήστες του δικτύου εκπέμπουν σε πολύ χαμηλές κατά μέσο όρο ισχύς. Για $\#FAP \geq 50$ (προστίθενται χρήστες στο δίκτυο άρα αυξάνεται η παρεμβολή που προκαλείται), παρατηρείται μια αύξηση της ισχύος των μακρο-χρηστών η οποία τελικά ισορροπεί στην τιμή των $\sim 0.5W$ ενώ οι φεμτο-χρήστες φτάνουν να εκπέμπουν μέχρι τα $100mW$ κατά μέσο όρο, χωρίς αυτό βέβαια να αποκλείει την ύπαρξη φεμτο-χρηστών που εκπέμπουν με μέγιστη ισχύ ($2W$). Συγκεκριμένα, για $\#FAP = 60$, η μέση τιμή ισχύος ανά φεμτο-χρήστη είναι γύρω στα $\sim 100mW$ ενώ αργότερα με την προσθήκη κι άλλων φεμτοκυψελών μειώνεται στα $\sim 60mW$, πράγμα το οποίο οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι 10 φεμτοκυψέλες που προστέθηκαν στην 6^η επανάληψη του αλγόριθμου έτυχε να έχουν σταθμούς πολύ κοντά στους μακρο-χρήστες, δημιουργώντας έτσι μεγάλη παρεμβολή διαφορετικών επιπέδων στους χρήστες τους από τους μακρο-χρήστες (Βλ. σενάριο 1) και κατά συνέπεια να υπάρξει αύξηση της ισχύος όλων των κοντινών χρηστών (φέμτο και μακρο). Στις επόμενες επαναλήψεις παρατηρείται ότι ο μέσος όρος της ισχύος των φεμτο-χρηστών ελαττώνεται ενώ των μακρο-χρηστών ισορροπεί στην τιμή των $0.5W$, που σημαίνει ότι οι περισσότεροι σταθμοί φεμτοκυψελών που προστέθηκαν στα μετέπειτα βήματα ήταν αρκετά μακριά από τους μακρο-χρήστες ώστε να μη δημιουργηθεί αρκετή παρεμβολή που θα επηρέαζε ιδιαίτερα το μέσο όρο ισχύος των χρηστών του δικτύου ενώ αφού προστίθενται πολλοί φεμτο-χρήστες που εκπέμπουν αρκετά χαμηλά, ο μέσος όρος ισχύος τους μειώνεται.

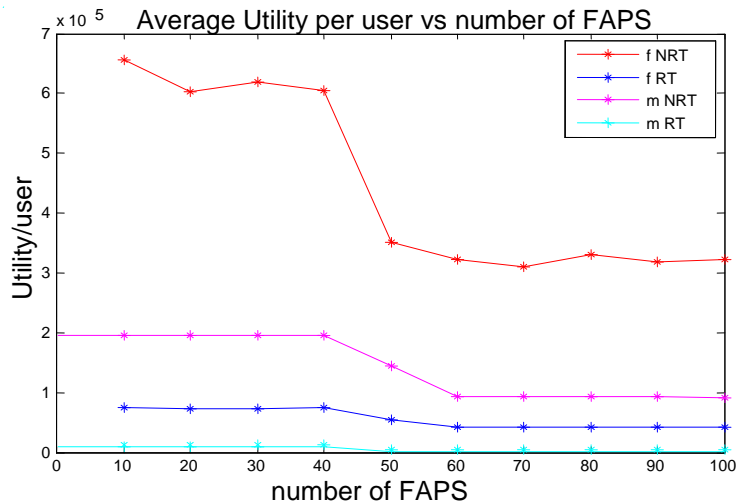


Σχήμα 33: Μέσος λόγος σήματος προς θόρυβο και παρεμβολή (SINR) ανά κατηγορία χρήστη σε σχέση με τον αριθμό των FAP του δικτύου

Από το Σχήμα 33 παρατηρείται ότι για $\#FAP \leq 50$, υπάρχει σταθερότητα στις τιμές του SINR για όλους τους χρήστες, με τους φεμτο-χρήστες να εμφανίζουν μεγαλύτερες τιμές SINR απ' τους μακρο-χρήστες λόγω του ότι έχουν το σταθμό βάσης σε πιο κοντινή απόσταση – οπότε λαμβάνουν και καλύτερο σήμα – μαζί βέβαια με το γεγονός ότι οι παρεμβολές δεν είναι αρκετά ισχυρές για να τους επηρεάσει το SINR. Στην συνέχεια όμως, για $\#FAP > 50$, παρατηρείται μείωση του SINR για όλους τους χρήστες ανεξαρτήτου είδους, που οφείλεται κυρίως στην αύξηση του αριθμού των χρηστών καθώς και στην τοποθέτηση των νέων FAP κοντά σε μακρο-χρήστες όπου δημιουργείται μεγάλη παρεμβολή διαφορετικών επιπέδων όπως αναφέρθηκε προηγουμένως.



Σχήμα 34: Μέσος ρυθμός μετάδοσης ανά κατηγορία χρήστη σε σχέση με τον αριθμό των FAP του δικτύου

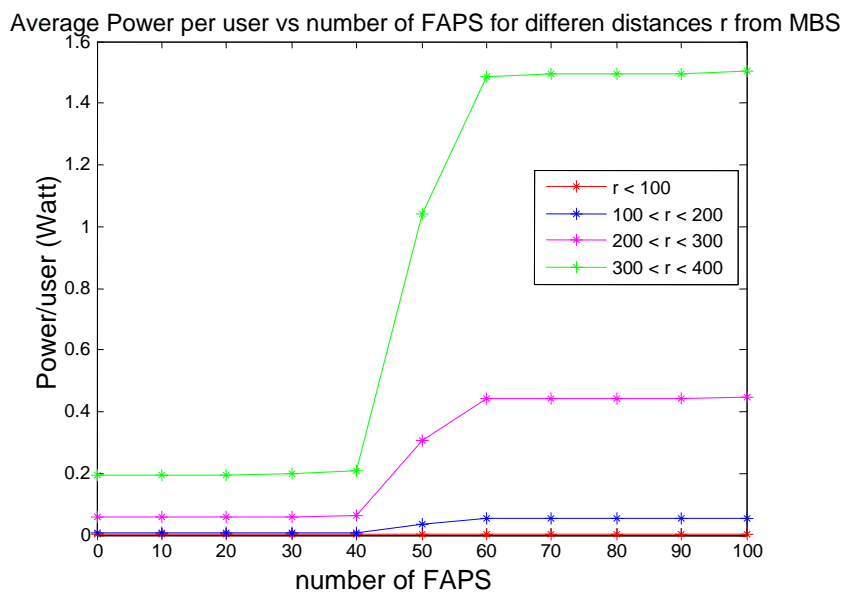


Σχήμα 35: Μέση χρησιμότητα ανά κατηγορία χρήστη σε σχέση με τον αριθμό των FAP του δικτύου

Από τα δύο προηγούμενα διαγράμματα συμπεραίνεται ότι για $\#FAP < 50$ όλοι οι χρήστες έχουν αρκετά καλή ποιότητα υπηρεσίας (Βλ. Σχήμα 34) που αντιστοιχεί σε μεγάλη και σταθερή τιμή χρησιμότητας στο Σχήμα 35. Συγκεκριμένα, οι φεμτο-χρήστες δεδομένων έχουν μέσο ρυθμό μετάδοσης $> 1.5Mbps$ ενώ οι αντίστοιχοι μακρο-χρήστες σχεδόν $1 Mbps$. Αντίστοιχα, οι φεμτο-χρήστες φωνής έχουν ρυθμό μετάδοσης $\sim 70Kbps$ – πάνω δηλαδή από την τιμή-στόχο – ενώ οι μακρο-χρήστες φωνής κοντά στην τιμή αυτή ($\sim 64Kbps$). Με την προσθήκη περισσότερων φεμτοκυψελών, μειώνεται κυρίως ο μέσος ρυθμός μετάδοσης των μακρο-χρηστών ο οποίος στην συνέχεια σταθεροποιείται σε μια αρκετά ικανοποιητική τιμή για υπηρεσίες φωνής ($\sim 54Kbps$) και υπηρεσίες δεδομένων αντίστοιχα ($\sim 0.75Mbps$) – με το γράφημα της χρησιμότητας των συγκεκριμένων χρηστών να παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά καθόδου και ομαλοποίησης στην συνέχεια. Όπως φαίνεται από τα παραπάνω διαγράμματα, οι χρήστες οι οποίοι επηρεάζονται περισσότερο από την προσθήκη FAP στο δίκτυο (παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες μεταβολές στις τιμές των υπό εξέταση μεγεθών) είναι οι χρήστες δεδομένων (ανεξαρτήτου επιπέδου) και αυτό διότι η μορφή της συνάρτησης ρυθμαπόδοσης γι’ αυτούς τους χρήστες (αυστηρά κοίλη) είναι πιο “ευέλικτη” όσον αφορά την τιμή του R^* , δηλαδή σαν μεταβλητή ο ρυθμός μετάδοσης έχει μεγαλύτερα περιθώρια τιμών: $R^* \in [0, 2.4]Mbps$ σε σχέση με τους χρήστες φωνής που το

“επιτρεπτό” εύρος τιμών είναι μικρότερο ($R^* \in [54, 74] \text{Kbps}$) και περιορίζεται κοντά στο σημείο καμψής της σιγμοειδούς $T(R^*)$ (Βλ. Ορισμό 1 και Σχήμα 8).

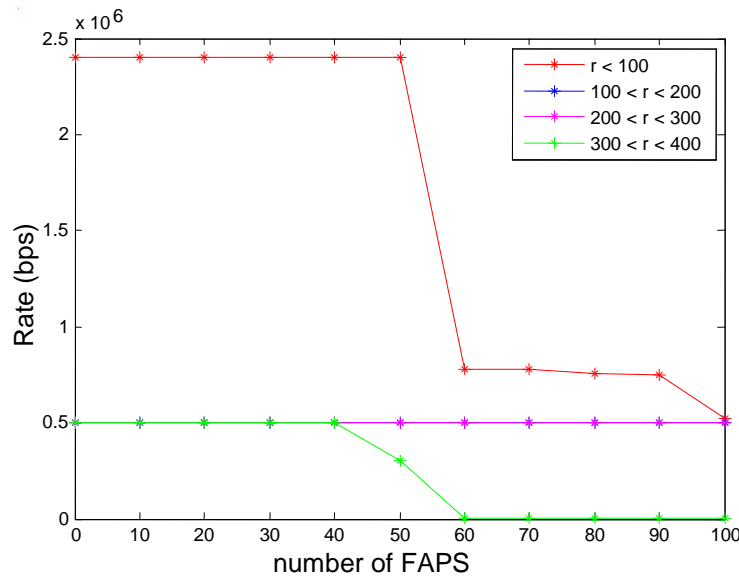
Στη συνέχεια εξετάζεται η συμπεριφορά μόνο των 8 μακρο-χρηστών του σεναρίου ανά ζώνη. Στο παρακάτω Σχήμα 36, απεικονίζεται η μέση ισχύς των μακρο-χρηστών (ανά ζώνη) όπου παρατηρείται ότι όσο πιο μεγάλη ακτίνα έχει η αντίστοιχη ζώνη (δηλαδή οι χρήστες που βρίσκονται μέσα στα όρια της είναι και πιο μακριά από τον σταθμό της μακροκυψέλης) τόσο μεγαλύτερη είναι και η μέση ισχύς των χρηστών της. Οι μακρο-χρήστες που βρίσκονται μέσα στην 4^η ζώνη (απόσταση $r > 300m$ από τον MBS) εκπέμπουν σε αρκετά υψηλή ισχύ ($\sim 1.5 \text{Watt}$), ενώ για $r < 300m$ έχουμε ικανοποιητικά μικρές τιμές ισχύος.



Σχήμα 36: Μέση ισχύς μακρο-χρηστών ανά ζώνη σε σχέση με τον αριθμό των FAPs

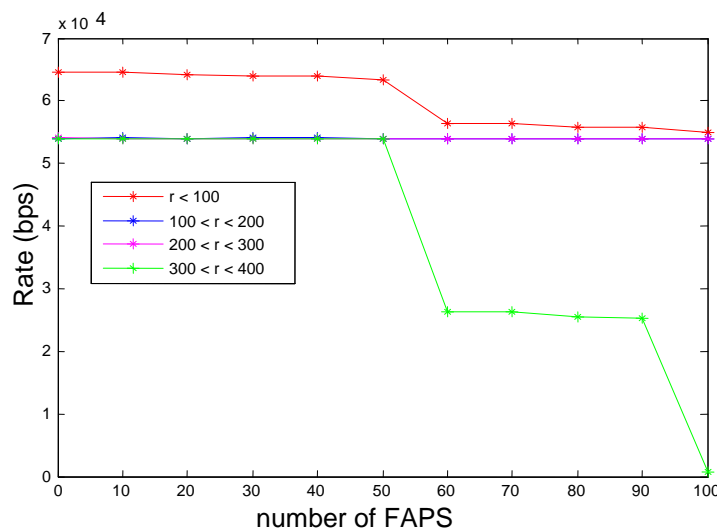
Τα επόμενα δύο γραφήματα απεικονίζουν το ρυθμό μετάδοσης των μακρο-χρηστών ανά ζώνη και ανά είδος υπηρεσίας (το Σχήμα 37 αφορά τους 4 μακρο-χρήστες δεδομένων ενώ το Σχήμα 38 τους 4 μακρο-χρήστες φωνής).

Rate (macro NRT users) vs number of FAPS for differen distances r from MBS



Σχήμα 37: Μέσος ρυθμός μετάδοσης μακρο-χρηστών δεδομένων ανά ζώνη σε σχέση με τον αριθμό των FAPs

Rate (macro RT users) vs number of FAPS for differen distances r from MBS



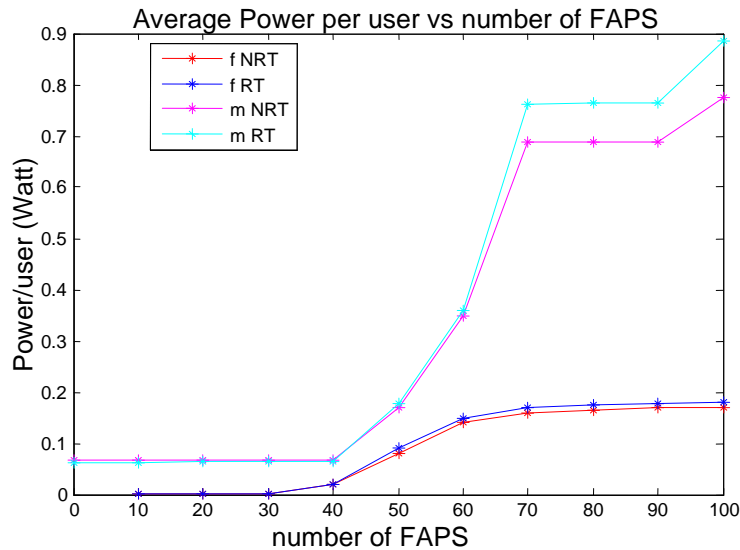
Σχήμα 38: Μέσος ρυθμός μετάδοσης μακρο-χρηστών φωνής ανά ζώνη σε σχέση με τον αριθμό των FAPs

Οι χρήστες της δευτέρης ζώνης (μπλε γραμμή – Βλ. Σχήματα 37 και 38) έχουν πανομοιότυπη συμπεριφορά με τους χρήστες της τρίτης ζώνης (ανοικτού μοβ γραμμή) και συνεπώς οι δύο καμπύλες αλληλοκαλύπτονται. Παρατηρείται και εδώ ότι για $\#FAP < 50$ όλοι οι μακρο-χρήστες (ανεξαρτήτου ζώνης και ζητούμενης

υπηρεσίας) επιτυγχάνουν ικανοποιητικό ρυθμό μετάδοσης ή έστω το ελάχιστο απαιτούμενο (για τους χρήστες φωνής τα $54Kbps$ ενώ για τους χρήστες δεδομένων τα $0.5Mbps$), ενώ για μεγαλύτερο αριθμό FAP, οι χρήστες της τελευταίας ζώνης ($r > 300m$) έχουν χειρίστη ρυθμαπόδοση (πράσινη καμπύλη στα παραπάνω διαγράμματα). Αντίθετα οι μακρο-χρήστες των υπολοίπων ζωνών (για $\#FAP \geq 50$) καταφέρνουν να διατηρήσουν την ποιότητα υπηρεσίας τους σε αποδεκτά επίπεδα όσον αφορά τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων στον MBS.

Συμπερασματικά, εάν ήταν επιθυμητή η σχεδίαση ενός κυψελωτού δικτύου δύο επιπέδων, θα έπρεπε σύμφωνα με τα παραπάνω να μην υπάρχουν πάνω από 40–50 ενεργά FAPs μέσα στην μακροκυψέλη, διότι παραπάνω FAPs θα επηρέαζαν αρκετά την ποιότητα υπηρεσίας των μακρο-χρηστών που βρίσκονται σε απόσταση $r > 300m$ από τον MBS, πράγμα που θα τους οδηγούσε στο να εκπέμπουν με μεγάλη ισχύ δημιουργώντας αρκετή παρεμβολή στους κοντινούς φεμτο-χρήστες, οι οποίοι θα αύξαναν και αυτοί τις ισχύς τους για να κερδίσουν περισσότερους πόρους του συστήματος και να προστατέψουν με αυτόν τον τρόπο την ποιότητα υπηρεσίας τους. Θεωρώντας λοιπόν ότι τοποθετούνται από τους χρήστες λιγότερα από 50 FAP μέσα στην μακροκυψέλη, τα αποτελέσματα των παραπάνω προσομοιώσεων δείχνουν ότι όλοι οι φεμτο-χρήστες θα έχουν άριστο QoS, δηλαδή χαμηλή ισχύ και υψηλό ρυθμό μετάδοσης (ανεξαρτήτου είδους υπηρεσίας προς ικανοποίηση) ενώ σίγουρα 8–12 μακρο-χρήστες θα έχουν ικανοποιητικό ρυθμό μετάδοσης, μεγάλη χρησιμότητα και μικρή ισχύ για απόσταση $r < 300m$ από τον MBS. Για πιο μακρινούς μακρο-χρήστες θα υπάρχει μεν εκπλήρωση των ελάχιστων απαιτήσεων ποιότητας για υπηρεσίες πραγματικού και μη-πραγματικού χρόνου αντίστοιχα, αλλά αυτοί θα μεταδίδουν με ισχύ $> 1.5W$ και εάν μάλιστα βρίσκονται στα όρια της μακροκυψέλης έως και $2W$.

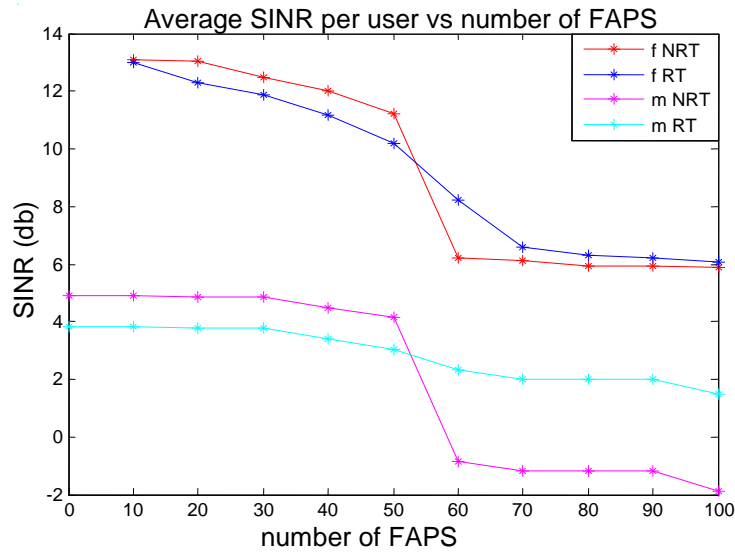
Στην συνέχεια, συγκρίνονται κάποια από τα αποτελέσματα του 2^{ου} Σεναρίου όπου υπήρχε κοστολόγηση στους φεμτο-χρήστες (είχε τεθεί στον αλγόριθμο $c = c_{best} = 10^{10}$ - Βλ. ενότητα (4.2.1)) σε σχέση με την περίπτωση όπου οι εν λόγω χρήστες δεν υφίστανται κοστολόγηση. Ουσιαστικά εκτελέστηκε ο αλγόριθμος MTPG για τις ίδιες προσομοιώσεις με τιμή παράγοντα κοστολόγησης $c = 0$, έτσι ώστε να παρουσιαστούν τα μειονεκτήματα της μη-ύπαρξης πολιτικής κοστολόγησης στους φεμτο-χρήστες στα νέα αποτελέσματα-γραφήματα.



Σχήμα 39: Μέση ισχύς ανά κατηγορία χρήστη σε σχέση με τον αριθμό των FAPs του δικτύου χωρίς κοστολόγηση των φεμτο-χρηστών

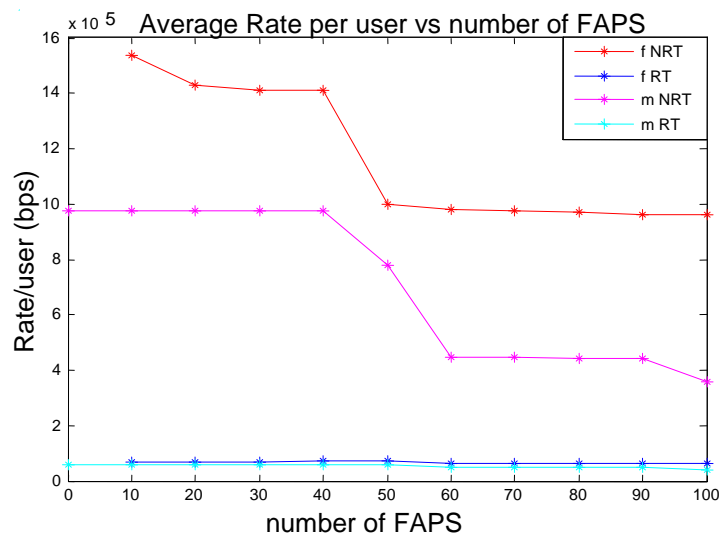
Στο Σχήμα 39 παρατηρείται μια αύξηση του γενικού μέσου όρου ισχύος τόσο για τους φεμτο-χρήστες όσο και για τους μακρο-χρήστες σε σύγκριση με το αντίστοιχο αποτέλεσμα στο Σχήμα 32. Συγκεκριμένα, οι φεμτο-χρήστες ισορροπούν σε μεγαλύτερη τιμή ισχύος ($\sim 200mW$ - αύξηση κατά 140%) αφού πια δεν υπάρχει η συνάρτηση κοστολόγησης που θα τους ανάγκαζε να ελαττώσουν τις ισχύς τους – γιατί ειδάλλως θα μειωνόταν η ολική χρησιμότητα τους (Βλ. σχέση (7)) – ενώ οι μακρο-χρήστες εκπέμπουν με ισχύ $\sim 0.8W$ (αύξηση κατά 60%) λόγω αυξημένων παρεμβολών από το υπόλοιπο δίκτυο.

Προφανώς αφού όλοι οι χρήστες του δικτύου αυξάνουν τις ισχύς τους, αυξάνεται και η παρεμβολή που αυτοί προκαλούν και κατά συνέπεια οι αλλαγές του SINR δεν είναι αρκετά μεγάλες όσον αφορά τον μέσο όρο (αυξάνει και ο αριθμητής αλλά και ο παρονομαστής της σχέσης (2)). Από το Σχήμα 40 παρατηρείται ότι μειώνεται ο σηματοθορυβικός λόγος για όλους τους χρήστες, κυρίως για $\#FAP \geq 50$ (η παρεμβολή υπερिशχεί δηλαδή του σήματος). Βέβαια όπως εξηγήθηκε, η διαφορά με κοστολόγηση και χωρίς είναι αρκετά μικρή (της τάξης των $1-2 dB$) ενώ το SINR των μακρο-χρηστών που ζητούν υπηρεσίες δεδομένων γίνεται αρνητικό για $\#FAP \geq 60$.



Σχήμα 40: Μέσος λόγος σήματος προς θόρυβο και παρεμβολή (SINR) ανά κατηγορία χρήστη σε σχέση με τον αριθμό των FAPs του δικτύου χωρίς κοστολόγηση των φεμτο-χρηστών

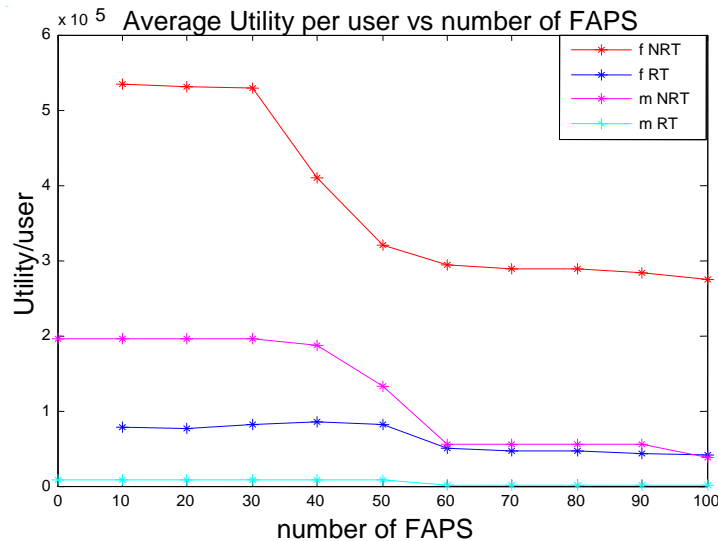
Στο επόμενο γράφημα (Βλ. Σχήμα 41), όπου φαίνεται πως επηρεάζονται οι ρυθμοί μετάδοσης κάθε κατηγορίας χρηστών με πολιτική μη-κοστολόγησης των φεμτο-χρηστών, παρατηρείται ότι επηρεάζονται αρκετά οι χρήστες δεδομένων (φεμτο



Σχήμα 41: Μέσος ρυθμός μετάδοσης ανά κατηγορία χρήστη σε σχέση με τον αριθμό των FAPs του δικτύου χωρίς κοστολόγηση των φεμτο-χρηστών

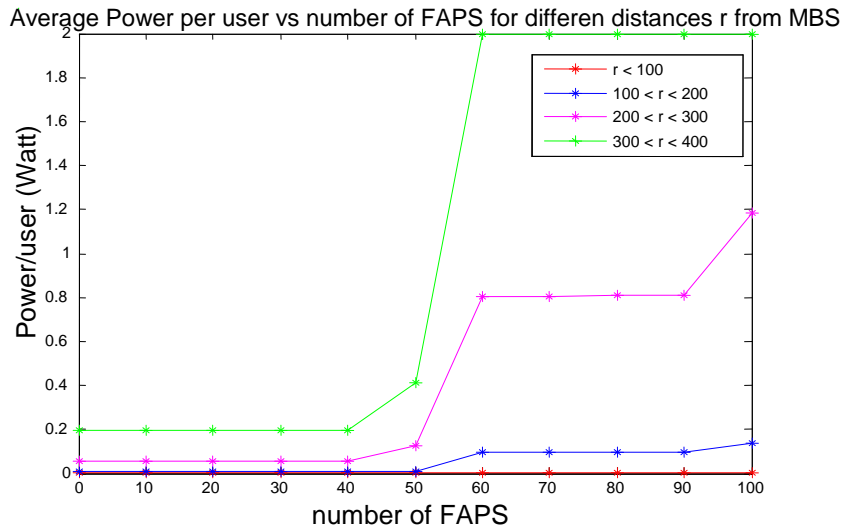
χρήστες και μακρο-χρήστες – κόκκινη και ανοικτό μοβ γραμμή αντίστοιχα) παρουσιάζοντας μικρότερες τιμές ρυθμού μετάδοσης για $\#FAP \geq 40$, όπου

χαρακτηριστικά η μέση ρυθμαπόδοση των μακρο-χρηστών δεδομένων πέφτει κάτω από $0.5Mbps$ ενώ των φεμτο-χρηστών δεδομένων λίγο κάτω από $1Mbps$. Ακόμα περισσότερο επηρεάζονται οι μακρο-χρήστες φωνής, που για $\#FAP > 50$ και χωρίς την κοστολόγηση των φεμτο-χρηστών, μεταδίδουν δεδομένα με ρυθμό μικρότερο του ελάχιστου αποδεκτού ορίου που έχει τεθεί (τα $54Kbps$ δηλαδή), οπότε σαν αποτέλεσμα λαμβάνουν και σχεδόν μηδενική χρησιμότητα (Βλ. γαλάζια γραμμή, Σχήμα 42):



Σχήμα 42: Μέση χρησιμότητα ανά κατηγορία χρήστη σε σχέση με τον αριθμό των FAPs του δικτύου χωρίς κοστολόγηση των φεμτο-χρηστών

Επίσης από το Σχήμα 42 (σε σύγκριση με το αντίστοιχο Σχήμα 35) με ευκολία συμπεραίνεται ότι οι μακρο-χρήστες είναι αυτοί που ζημιώνονται περισσότερο από την απουσία κοστολόγησης στους φεμτο-χρήστες, αφού οι χρήστες των FAP απλώς αυξάνουν ελάχιστα τις ισχύς τους διατηρώντας σχεδόν ίδια ποιότητα υπηρεσίας συγκριτικά με πριν που υπήρχε κοστολόγηση. Οι μακρο-χρήστες απ' την άλλη προκειμένου να αντιμετωπίσουν το πρόβλημα της υψηλότερης παρεμβολής στο δίκτυο εκπέμπουν με μεγαλύτερες ισχύς χωρίς όμως να καταφέρνουν να στέλνουν δεδομένα με ικανοποιητικούς ρυθμούς μετάδοσης – πράγμα το οποίο αντικατοπτρίζεται από την χρησιμότητα που λαμβάνουν (Βλ. Σχήμα 42).



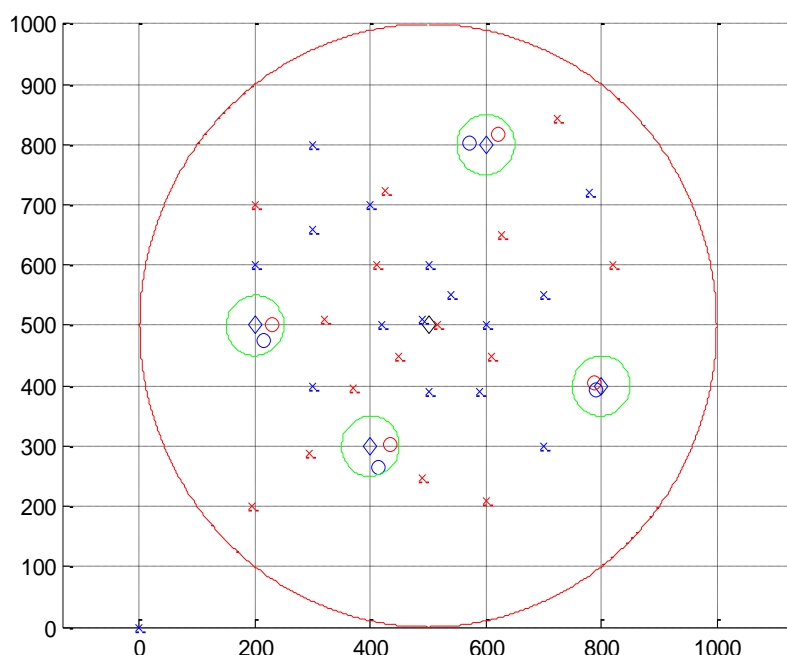
Σχήμα 43: Μέση ισχύς μακρο-χρηστών ανά ζώνη σε σχέση με τον αριθμό των FAPs χωρίς κοστολόγηση των φεμτο-χρηστών

Εν τέλει, στο τελευταίο γράφημα (Βλ. Σχήμα 43), παρατηρείται ότι από την τρίτη ζώνη και μετά ($r > 200m$) υφίσταται αύξηση της μέσης ισχύος πάνω από 50% στο σενάριο χωρίς κοστολόγηση σε σχέση με πριν, ενώ οι χρήστες της 4^{ης} ζώνης εκπέμπουν με τη μέγιστη δυνατή ισχύ (2W) χωρίς όμως αυτό να εγγυάται τη διατήρηση του QoS τους σε αποδεκτά επίπεδα όπως διαπιστώθηκε σε προηγούμενα γραφήματα (Βλ. Σχήμα 41). Συνεπώς, με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα, η χρήση κοστολόγησης στους φεμτο-χρήστες για την προστασία της ποιότητας υπηρεσιών των μακρο-χρηστών είναι κατά πρώτον αναγκαία και κατά δεύτερον απαραίτητη για την καλύτερη δυνατή κατανομή των πόρων του δικτύου στους χρήστες του.

4.2.4 Σενάριο 3

Αυτό το σενάριο είναι το συμπληρωματικό του 2^{ου} από την άποψη ότι προηγουμένως προτάθηκε μια σχεδιαστική λύση για το δίκτυο όσον αφορά τον αριθμό των τυχαία τοποθετημένων FAP – με τους μακρο-χρήστες να είναι συγκεκριμένοι σε θέση και αριθμό – ενώ τώρα το κύριο ζήτημα που τίθεται είναι η επίπτωση που θα έχει στο σύστημα η προσθήκη περισσότερων μακρο-χρηστών σε τυχαίες θέσεις μέσα στην μακροκυψέλη καθώς και το αν αυτοί καταφέρνουν τελικά

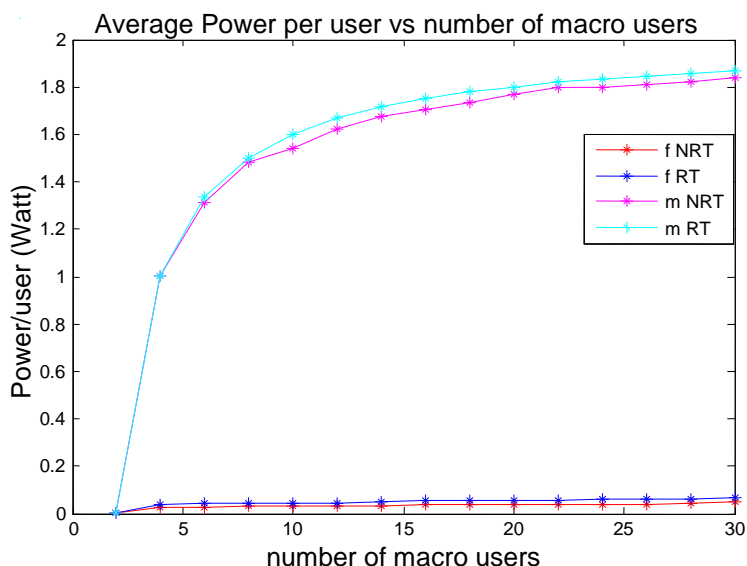
να επιτύχουν ικανοποιητική ρυθμαπόδοση (ο αριθμός των FAP σε αυτό το σενάριο παραμένει σταθερός).



Σχήμα 44: Τοπολογία δικτύου 3^{ου} Σεναρίου με 4 FAPs και 30 μακρο-χρήστες τυχαία τοποθετημένους μέσα στην μακροκυψέλη

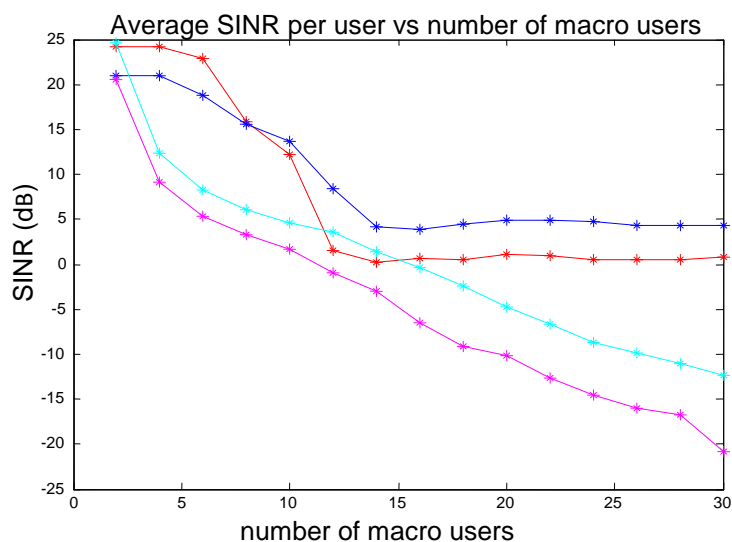
Στο Σχήμα 44 φαίνεται η τοπολογία του δικτύου για το τελευταίο στιγμιότυπο των μετρήσεων, όπου ο αριθμός των μακρο-χρηστών είναι 30 (15 χρήστες φωνής και 15 χρήστες δεδομένων). Σε κάθε μέτρηση προστίθονταν 2 μακρο-χρήστες (διατηρώντας σταθερές τις θέσεις των από πριν τοποθετημένων μακρο-χρηστών) – ένας που ζητούσε υπηρεσίες φωνής και ένας που ζητούσε υπηρεσίες δεδομένων – ξεκινώντας τις μετρήσεις με 2 τέτοιους χρήστες. Ο αριθμός των FAP σε κάθε στιγμιότυπο της προσομοίωσης είναι 4, με τις θέσεις των φεμτο-χρηστών να μη μεταβάλλονται καθόλου κατά τη διάρκεια των μετρήσεων (Βλ. Σχήμα 44), ενώ επίτηδες τοποθετήθηκαν οι μακρο-χρήστες αρκετά μακριά από τις φεμτοκυψέλες ώστε να μη δημιουργηθεί ισχυρή παρεμβολή διαφορετικών επιπέδων μεταξύ φεμτο-χρηστών και μακρο-χρηστών (πράγμα που εξετάστηκε αναλυτικά στο 1^ο Σενάριο) και έτσι όσο είναι δυνατόν να μην επηρεαστούν από παρεμβολές διαφορετικών επιπέδων τα αποτελέσματα της εν λόγω προσομοίωσης. Τέλος τα μεγέθη που εξετάζονται είναι τα ίδια με αυτά του 2^{ου} Σεναρίου, δηλαδή ισχύς ανά χρήστη, χρησιμότητα ανά

χρήστη, ρυθμός μετάδοσης ανά χρήστη καθώς και λόγος σήματος προς θόρυβο και παρεμβολή (SINR) ανά χρήστη, σε σχέση πάντα με τον αριθμό των χρηστών της μακροκυψέλης.



Σχήμα 45: Μέση ισχύς ανά κατηγορία χρήστη σε σχέση με τον αριθμό των μακρο-χρηστών του δικτύου

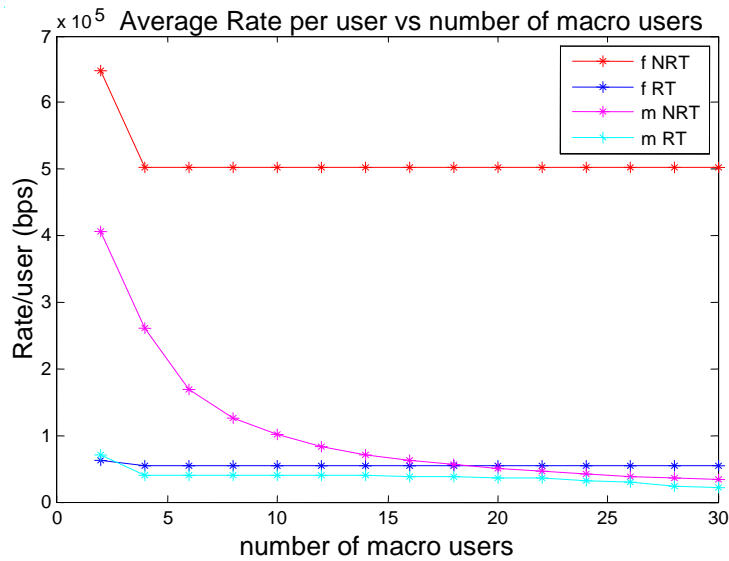
Στα Σχήματα 45 και 46 αντίστοιχα, όπου απεικονίζονται η ισχύς και το SINR ανά κατηγορία χρήστη σε σχέση με τον αριθμό των μακρο-χρηστών, παρατηρείται ότι οι φεμτο-χρήστες εκπέμπουν με μέση ισχύ κάτω των $100mW$ ανεξάρτητα από τον αριθμό των μακρο-χρηστών ενώ το μέσο SINR τους ξεκινάει από μεγάλες τιμές (που δικαιολογείται λόγω της μικρής απόστασής τους από τους σταθμούς των φεμτοκυψελών – άρα φτάνει ισχυρό σήμα στα FAPs – μαζί με το γεγονός ότι δεν υπάρχουν πολλοί μακρο-χρήστες στο δίκτυο στις αρχικές προσομοιώσεις και άρα οι παρεμβολές που φτάνουν στα FAPs από τους άλλους χρήστες είναι ελάχιστες) για να ισορροπήσει τελικά – για αριθμό μακρο-χρηστών μεγαλύτερο του 15 ($m > 15$) – σε μικρές τιμές ($\sim 5dB$ για τους χρήστες φωνής και $\sim 1dB$ για τους χρήστες δεδομένων – Βλ. Σχήμα 46).



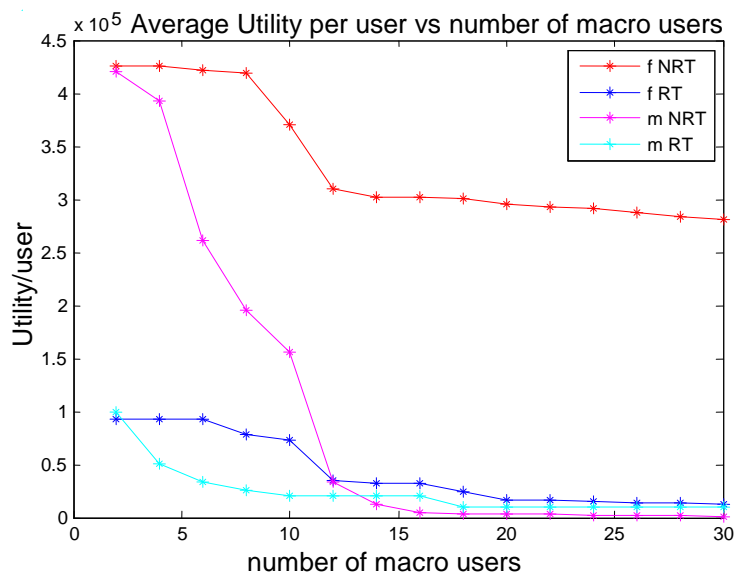
Σχήμα 46: Μέσος λόγος σήματος προς θόρυβο και παρεμβολή (SINR) ανά κατηγορία χρήστη σε σχέση με τον αριθμό των μακρο-χρηστών του δικτύου

Τα παραπάνω αποτελέσματα για το SINR των φεμτο-χρηστών οδηγούν στο συμπέρασμα ότι υπάρχουν πολλές παρεμβολές διαφορετικού επιπέδου στο δίκτυο, οι οποίες δημιουργούνται από την αυξημένη κατά μέσο όρο ισχύ των μακρο-χρηστών, που όπως φαίνεται και στο Σχήμα 45, η τιμή αυτή έχει ξεπεράσει τα $1.5W$ για $m > 15$. Αντίστοιχα, το μέσο SINR των μακρο-χρηστών συνέχεια μειώνεται (Βλ. Σχήμα 46) αφού με την προσθήκη νέων μακρο-χρηστών στο σύστημα, μεγαλώνει πάρα πολύ η παρεμβολή ιδίου επιπέδου που υφίστανται αυτοί οι χρήστες (οι παρεμβολές από τους φεμτο-χρήστες είναι ελάχιστες).

Στα δύο επόμενα γραφήματα (Βλ. Σχήματα 47 και 48) απεικονίζεται η ρυθμαπόδοση και η χρησιμότητα αντίστοιχα ανά κατηγορία χρήστη σε σχέση με τον αριθμό m των μακρο-χρηστών:



Σχήμα 47: Μέσος ρυθμός μετάδοσης ανά κατηγορία χρήστη σε σχέση με τον αριθμό των μακρο-χρηστών του δικτύου



Σχήμα 48: Μέση χρησιμότητα ανά κατηγορία χρήστη σε σχέση με τον αριθμό των μακρο-χρηστών του δικτύου

Οι φεμτο-χρήστες στο σύνολο τους διατηρούν σταθερή και ικανοποιητική ποιότητα υπηρεσίας όσον αφορά τον ρυθμό μετάδοσης που επιτυγχάνουν και συνεπώς αποκομίζουν μεγάλες τιμές της συνάρτησης χρησιμότητας τους από τη χρησιμοποίηση των πόρων του δικτύου. Απ' την άλλη, παρατηρείται ελάττωση της ρυθμαπόδοσης των μακρο-χρηστών με την αύξηση του αριθμού τους – τόσο των χρηστών φωνής όσο και των χρηστών δεδομένων. Συγκεκριμένα, οι πρώτοι για

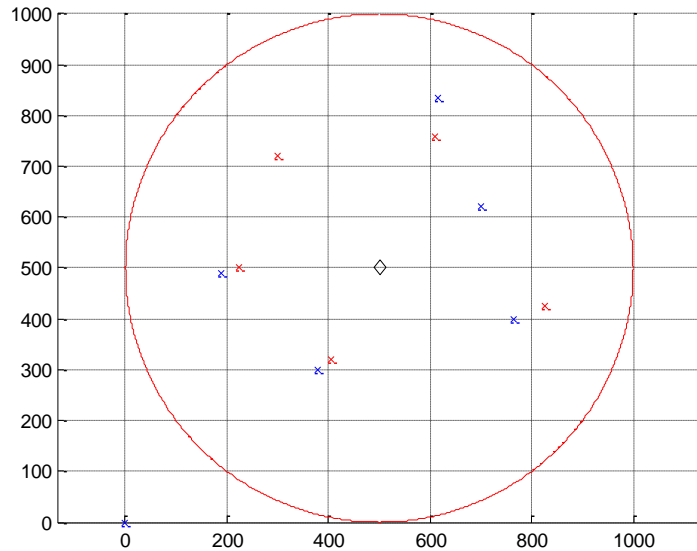
$m > 15$ φτάνουν να εκπέμπουν με ρυθμό μικρότερο των $54Kbps$ ενώ οι δεύτεροι κάτω από τα $100Kbps$ (Βλ. Σχήμα 47) πράγμα το οποίο αντικατοπτρίζεται και από την ραγδαία μείωση της χρησιμότητας τους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 48.

Συμπερασματικά, συμπληρώνοντας τις μετρήσεις και τα αποτελέσματα του 2^{ου} Σεναρίου, παρατηρείται ότι το υπό εξέταση δίκτυο μπορεί να “αντέξει” το πολύ μέχρι 12 με 15 μακρο-χρήστες, δηλαδή οπουδήποτε κι αν αυτοί βρεθούν μέσα στα όρια της μακροκυψέλης, θα πετυχαίνουν τον ελάχιστο αποδεκτό ρυθμό μετάδοσης για την υπηρεσία που ζητούν καθώς και μια μικρή έως μέτρια ισχύ (με την αντίστοιχη χρησιμότητα που θα δώσει η κατανομή αυτών των δύο πόρων του δικτύου στους μακρο-χρήστες). Βέβαια, μεγάλο ρόλο παίζει και η απόσταση από τον σταθμό της μακροκυψέλης (MBS) που καθορίζει τα επίπεδα ισχύος των μακρο-χρηστών: π.χ. στο Σενάριο 2, οι χρήστες της 4^{ης} ζώνης είναι εξ’ αρχής πολύ μακριά για να εκπέμπουν με μικρή ισχύ, αλλά παρ’ όλα αυτά έχουν ικανοποιητικό QoS, ενώ αντίθετα οι χρήστες της 1^{ης} ζώνης που βρίσκονται αρκετά κοντά στον MBS δεν έχουν πρόβλημα να φτάσουν τα άνω όρια των απαιτήσεων ποιότητας ($2.4Mbps$ για τους χρήστες δεδομένων και $74Kbps$ για τους χρήστες φωνής) εκπέμποντας ταυτόχρονα με ελάχιστη ισχύ όπως παρατηρήθηκε. Εν τέλει, περαιτέρω αύξηση του αριθμού των μακρο-χρηστών ($m > 15$) θα προκαλέσει και αύξηση του ποσοστού της παρεμβολής σε όλο το δίκτυο (διαφορετικού και ιδίου επιπέδου) μειώνοντας έτσι τις τιμές της συνάρτησης χρησιμότητας όλων των χρηστών και οδηγώντας το σύστημα σε όλο και μικρότερη απόδοση.

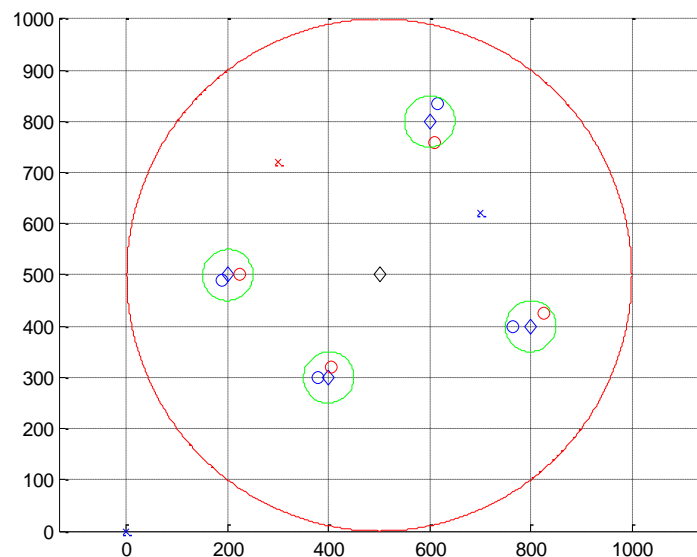
4.2.5 Σενάριο 4

Σε αυτό το σενάριο εξετάζεται κατά πόσο η χρήση των FAPs μπορεί να συνεισφέρει στην αύξηση της απόδοσης του συστήματος (συνολικά) καθώς και στα πλαίσια των χρηστών (ατομικά). Η προσομοίωση είχε δύο φάσεις: στην αρχή υπήρχαν 10 μακρο-χρήστες τοποθετημένοι τυχαία μέσα στο δίκτυο (Βλ. Σχήμα 49) και στη συνέχεια 8 από αυτούς εξυπηρετήθηκαν από 4 FAPS (δηλαδή μετατράπηκαν σε φεμτο-χρήστες και μάλιστα ίδιας υπηρεσίας, Βλ. Σχήμα 50 – δηλαδή οι μακρο-χρήστες δεδομένων έγιναν φεμτο-χρήστες δεδομένων και αντίστοιχα για τους χρήστες φωνής). Τα μεγέθη τα οποία μελετώνται είναι η μέση ισχύς και ο ρυθμός

μετάδοσης ανά χρήστη για όλο το δίκτυο, η συνολική χρησιμότητα των χρηστών καθώς και τα ίδια μεγέθη (ισχύς, ρυθμαπόδοση και χρησιμότητα ανά χρήστη) ξεχωριστά για τους μακρο-χρήστες που παρέμειναν να εκπέμπουν στον σταθμό της μακροκυψέλης και ξεχωριστά για τους μακρο-χρήστες που εξυπηρετήθηκαν από τα 4 FAP στην δεύτερη φάση της προσομοίωσης.

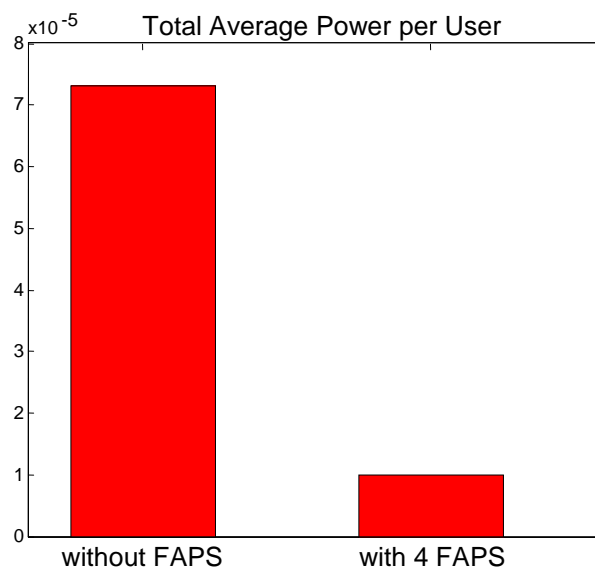


Σχήμα 49: Τοπολογία δικτύου 4^{ου} Σεναρίου πριν την προσθήκη των 4 FAPs – 10 μακρο-χρήστες

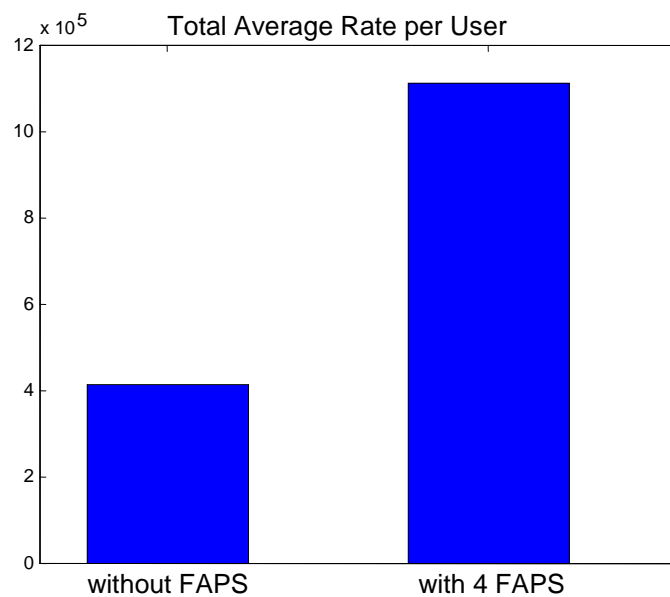


Σχήμα 50: Τοπολογία δικτύου 4^{ου} Σεναρίου μετά την προσθήκη των 4 FAPs – 2 μακρο-χρήστες και 8 φεμτο-χρήστες

Στα επόμενα δύο διαγράμματα απεικονίζεται η μέση ισχύς ανά χρήστη (Βλ. Σχήμα 51) καθώς και ο μέσος ρυθμός μετάδοσης όλων των χρηστών του δικτύου (Βλ. Σχήμα 52), πριν και μετά την προσθήκη των FAP. Παρατηρείται ότι με την προσθήκη των FAP, η μέση ισχύς ανά χρήστη **μειώνεται σε ποσοστό 86%** ενώ ο μέση ρυθμαπόδοση **αυξάνει κατά 175%**, δηλαδή παρότι οι μακρο-χρήστες είχαν ήδη χαμηλές ισχύς (Βλ. Σχήμα 54), καλυπτόμενοι από τα πιο κοντινά σε αυτούς FAP (που τοποθετήθηκαν εξάλλου γι' αυτόν τον σκοπό), κατάφεραν να εκπέμψουν σε ακόμα μικρότερες ισχύς, επιτυγχάνοντας ταυτόχρονα μεγαλύτερους κατά μέσο όρο ρυθμούς μετάδοσης, μειώνοντας με αυτό το τρόπο τον γενικό μέσο όρο.

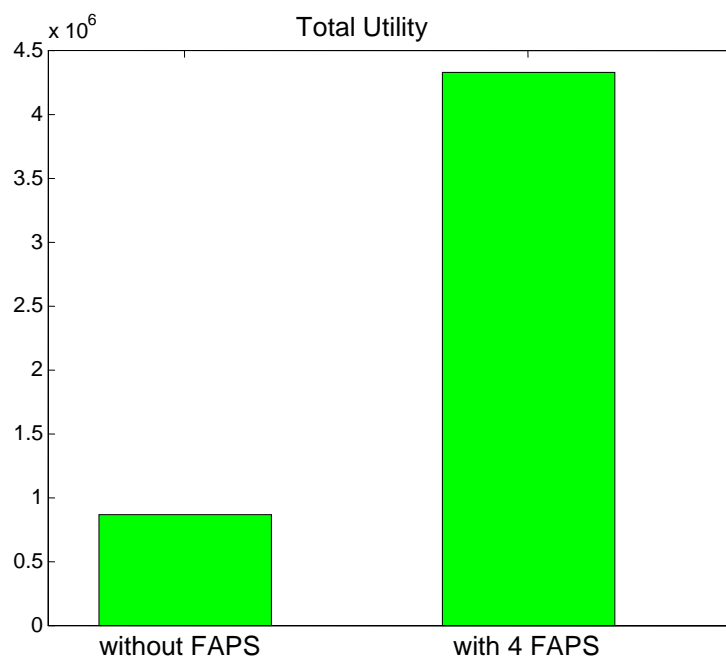


Σχήμα 51: Μέση ισχύς ανά χρήστη πριν και μετά την προσθήκη των 4 FAPs



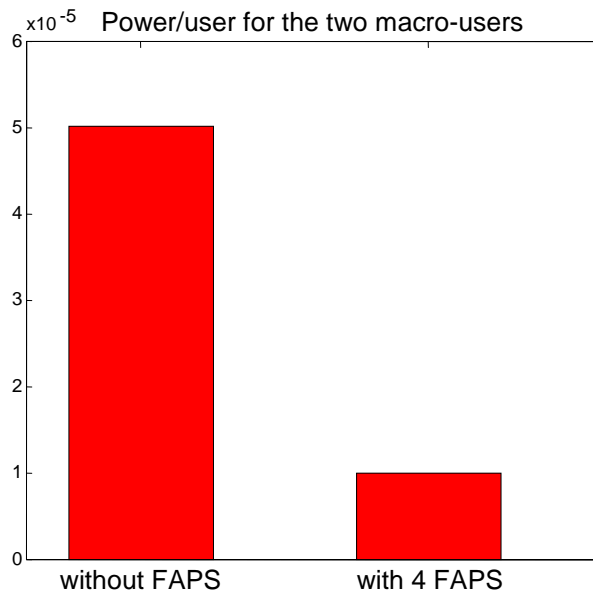
Σχήμα 52: Μέσος ρυθμός μετάδοσης ανά χρήστη πριν και μετά την προσθήκη των 4 FAPs

Ως φυσικό επακόλουθο των προηγούμενων, παρατηρείται αύξηση της συνολικής χρησιμότητας των χρηστών του συστήματος, **με ποσοστό μάλιστα 388%** (Βλ. Σχήμα 53), δηλαδή με την προσθήκη των 4 FAPs, η συνολική απόδοση του υπό εξέταση συστήματος όσον αφορά την κατανομή των πόρων του στους χρήστες του δικτύου, σχεδόν τετραπλασιάστηκε.

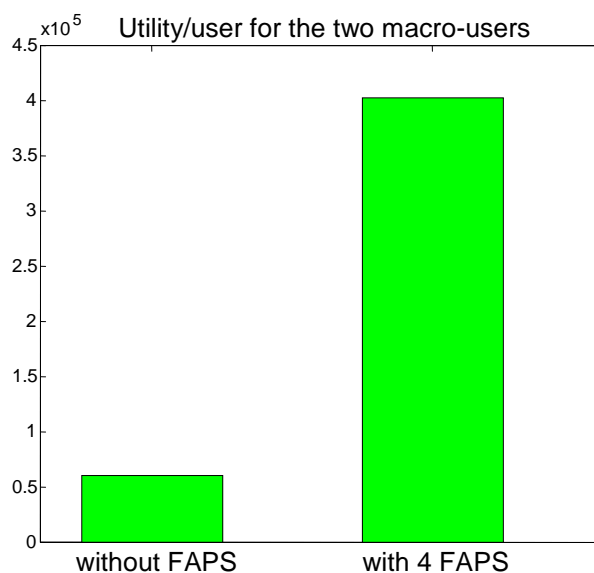


Σχήμα 53: Συνολική χρησιμότητα των χρηστών του δικτύου με και χωρίς κάλυψη από τις φεμτοκυψέλες

Στη συνέχεια εξετάζονται ξεχωριστά οι αντιδράσεις των 2 μακρο-χρηστών που μετά την προσθήκη των 4 FAPs στο δίκτυο παρέμειναν να εκπέμπουν στον αρχικό σταθμό τους (τον MBS).



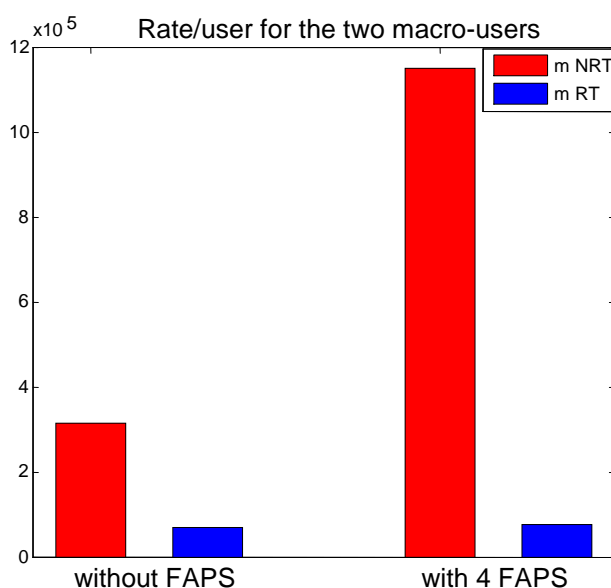
Σχήμα 54: Μέση ισχύς ανά μακρο-χρήστη πριν και μετά την προσθήκη των 4 FAPs



Σχήμα 55: Μέση χρησιμότητα ανά μακρο-χρήστη πριν και μετά την προσθήκη των 4 FAPs

Παρατηρώντας τα δύο παραπάνω διαγράμματα συμπεραίνεται ότι η μέση ισχύς ανά μακρο-χρήστη **μειώνεται σε ποσοστό 80%** ενώ η μέση χρησιμότητα των 2 μακρο-χρηστών αυξάνεται, **με ποσοστό μάλιστα αύξησης 566%**. Οι τιμές της συνάρτησης χρησιμότητας των δύο αυτών μακρο-χρηστών αυξάνονται τόσο πολύ επειδή η ισχύ τους ελαττώνεται περίπου στο 1/5 της αρχικής και αυτό διότι πλέον στο δίκτυο δεν υπάρχουν παρεμβολές ιδίου επιπέδου (από άλλους μακρο-χρήστες

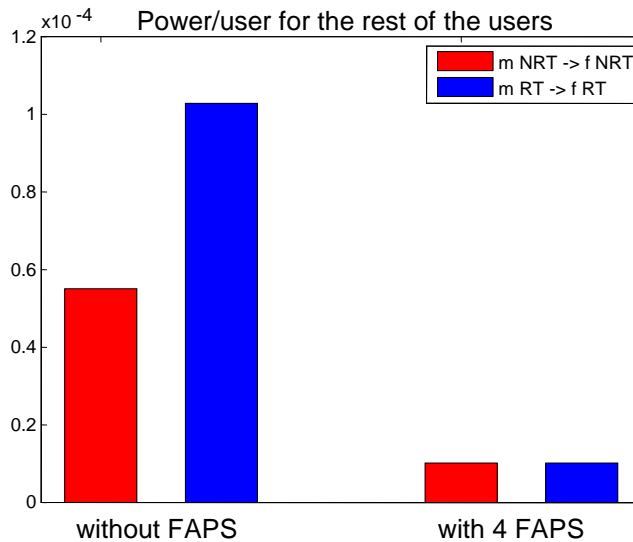
δηλαδή) αφού στην δεύτερη φάση της προσομοίωσης οι υπόλοιποι μακρο-χρήστες έγιναν ουσιαστικά φεμτο-χρήστες με συνέπεια οι παρεμβολές διαφορετικού επιπέδου που προκαλούν τώρα στους 2 μακρο-χρήστες που παρέμειναν, να θεωρούνται αμελητέες (ως φεμτο-χρήστες εκπέμπουν με πολύ μικρότερες ισχύς δηλαδή). Αντίστοιχα στο επόμενο διάγραμμα (Βλ. Σχήμα 56) φαίνεται πως επηρεάστηκε η ρυθμαπόδοση καθενός από τους δύο αυτούς μακρο-χρήστες με την προσθήκη των FAP:



Σχήμα 56: Ρυθμοί μετάδοσης των δύο μακρο-χρηστών πριν και μετά την προσθήκη των 4 FAPs

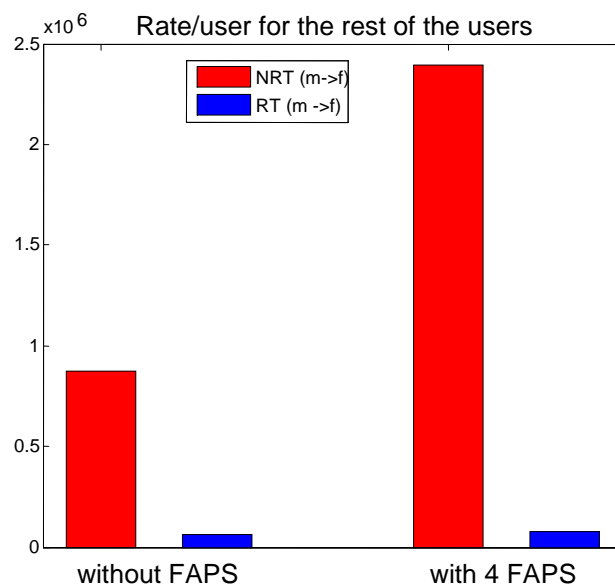
Παρατηρείται ότι ο μακρο-χρήστης δεδομένων από $0.33Mbps$ έχει τώρα ρυθμό μετάδοσης $1.15Mbps$ (αύξηση κατά **248%**) ενώ ο μακρο-χρήστης φωνής από $55Kbps$ μεταδίδει με ρυθμό $67Kbps$ (αύξηση κατά **22%**).

Η αντίδραση των υπολοίπων χρηστών του δικτύου (που άλλαξαν σταθμό εκπομπής από τον MBS σε FAP) μπορεί να φανεί συνοπτικά στα επόμενα διαγράμματα (Βλ. Σχήματα 57, 58 και 59) όπου απεικονίζονται τα μεγέθη: ισχύς, ρυθμός μετάδοσης και χρησιμότητα ανά χρήστη καθώς και ανά είδος υπηρεσίας προς ικανοποίηση (υπηρεσίες πραγματικού (RT) και μη-πραγματικού χρόνου (NRT services)).



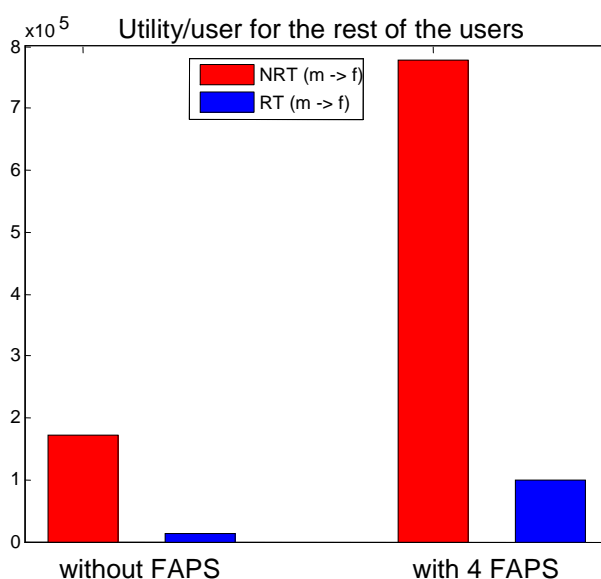
Σχήμα 57: Μέση ισχύς ανά χρήστη και ανά είδος υπηρεσίας για τους υπόλοιπους 8 χρήστες του δικτύου

Έτσι, όπως φαίνεται στο προηγούμενο Σχήμα 57, παρατηρείται μείωση της μέσης ισχύος των NRT χρηστών κατά **80%**, ενώ συντελείται ακόμα μεγαλύτερη μείωση της ισχύος των RT χρηστών (της τάξης του **90%**). Οι πρώην μακρο-χρήστες, λόγω απουσίας ισχυρών παρεμβολών μέσα στις φεμτοκυψέλες, εκπέμπουν ουσιαστικά με την ελάχιστη δυνατή ισχύ που έχει τεθεί στην εν λόγω προσομοίωση.



Σχήμα 58: Μέσος ρυθμός μετάδοσης ανά χρήστη και ανά είδος υπηρεσίας για τους υπόλοιπους 8 χρήστες του δικτύου

Στην συνέχεια, από το Σχήμα 58, παρατηρείται αύξηση του ρυθμού μετάδοσης των εν λόγω χρηστών (και των 2 κατηγοριών) και κατά συνέπεια της μέσης χρησιμότητας τους (Βλ. Σχήμα 59). Συγκεκριμένα, οι χρήστες δεδομένων μεταδίδουν σχεδόν με διπλάσιο μέσο ρυθμό μετάδοσης, αγγίζοντας τα $2.4Mbps$ (αύξηση **200%**), ενώ αντίστοιχα οι χρήστες φωνής αγγίζουν τα $70Kbps$ από $\sim 60 Kbps$ – ρυθμό με τον οποίο μετέδιδαν δεδομένα πριν ως μακρο-χρήστες (αύξηση **κατά 15%**). Αντίστοιχες αυξήσεις παρατηρούνται και στο διάγραμμα της χρησιμότητας (Βλ. Σχήμα 59).



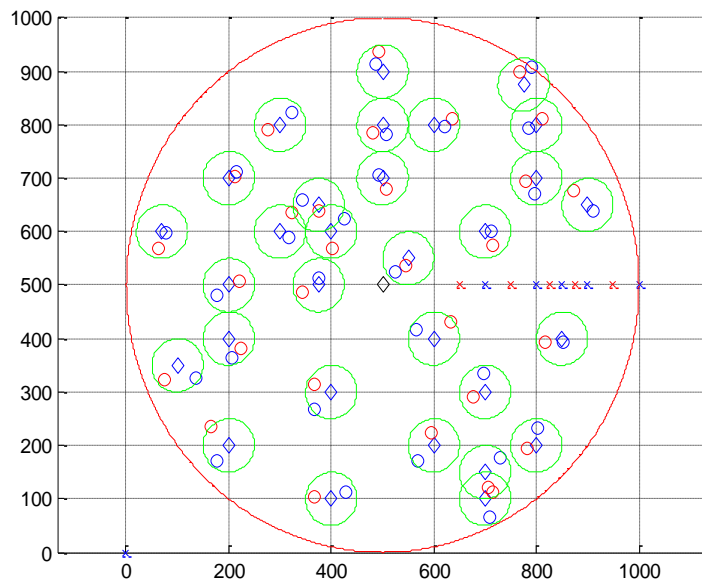
Σχήμα 59: Μέση χρησιμότητα ανά χρήστη και ανά είδος υπηρεσίας για τους υπόλοιπους 8 χρήστες του δικτύου

Κύριο συμπέρασμα όλων των παραπάνω αποτελεσμάτων είναι ότι η εξυπηρέτηση μακρο-χρηστών από FAPs προσδίδει μεγαλύτερη απόδοση στο σύστημα, η οποία συνίσταται στην καλύτερη κατανομή των πόρων του στους χρήστες του δικτύου καθώς και στην παροχή καλύτερης ποιότητας υπηρεσιών προς όλους τους χρήστες (μεγαλύτερη ρυθμαπόδοση με μικρότερη κατανάλωση ισχύος), ανεξάρτητα από το σταθμό βάσης στον οποίο εκπέμπουν. Έτσι, η χρήση των πόρων των φεμτοκυψελών από χρήστες εκτός του CSG της, συνεισφέρει στην αποσυμφόρηση της κίνησης στην μακροκυψέλη και αποτελεί και ένα πλεονέκτημα της χρήσης ανοικτού ή υβριδικού τύπου πολιτικής πρόσβασης στις φεμτοκυψέλες έναντι του κλειστού τύπου πρόσβασης που έχει υιοθετηθεί στην παρούσα εργασία,

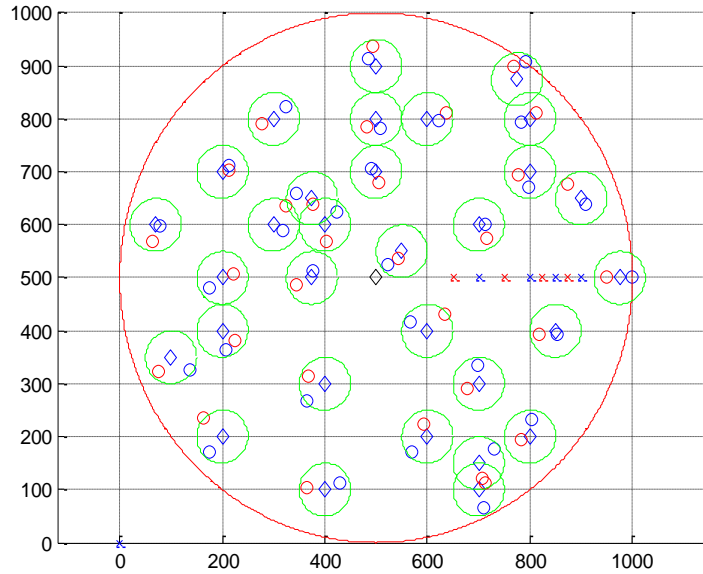
που όπως είδαμε στα προηγούμενα γραφήματα καθώς και στο Σενάριο 1, παρουσιάζει αρκετά μειονεκτήματα.

4.2.6 Σενάριο 5

Σε αυτό το Σενάριο εξετάζεται η συμπεριφορά του αλγορίθμου MTTPG με την βοήθεια δύο διαφορετικών τοπολογιών του κυψελωτού δικτύου δύο επιπέδων. Στην πρώτη τοπολογία, που φαίνεται στο Σχήμα 60, υπάρχουν 30 τυχαία τοποθετημένα FAPs με τους χρήστες τους και 10 μακρο-χρήστες σειριακά τοποθετημένοι που εναλλάξ ζητούν ικανοποίηση διαφορετικής υπηρεσίας (φωνή και δεδομένα). Η δεύτερη τοπολογία είναι ουσιαστικά η ίδια με την πρώτη (Βλ. Σχήμα 61) με τη διαφορά ότι οι δύο πιο μακρινοί μακρο-χρήστες (που βρίσκονται στα όρια της μακροκυψέλης) εξυπηρετούνται από ένα επιπλέον FAP που τοποθετείται στο δίκτυο γι' αυτόν ακριβώς τον σκοπό – οπότε μειώνεται και ο αριθμός των μακρο-χρηστών σε 8. Κύριος στόχος του Σεναρίου είναι η ανάδειξη των κύριων παραγόντων οι οποίοι επηρεάζουν τη διάρκεια καθώς και την ταχύτητα σύγκλισης του αλγορίθμου MTTPG στο διάνυσμα ισχύος NE του αντίστοιχου παίγνιου.

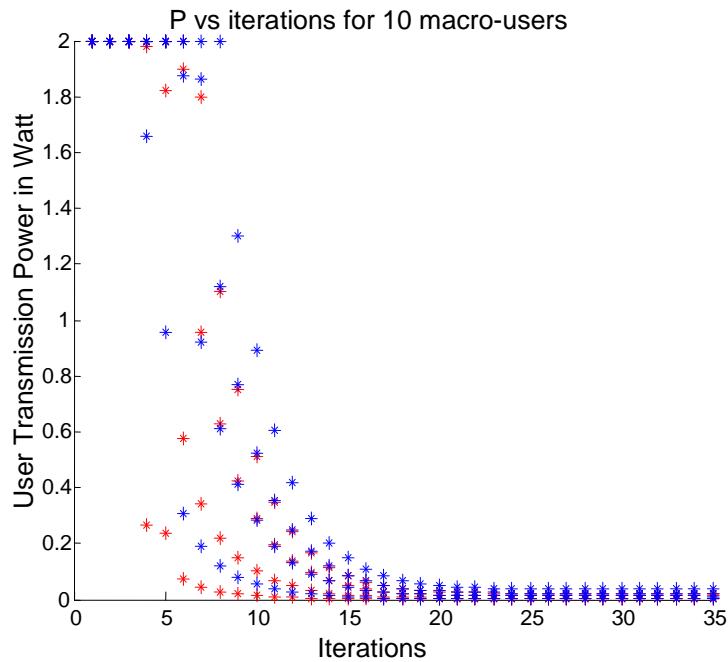


Σχήμα 60: Τοπολογία δικτύου 5^{ου} Σεναρίου (1^η προσομοίωση) – 30 FAPs και 10 μακρο-χρήστες τοποθετημένοι σε σειρά

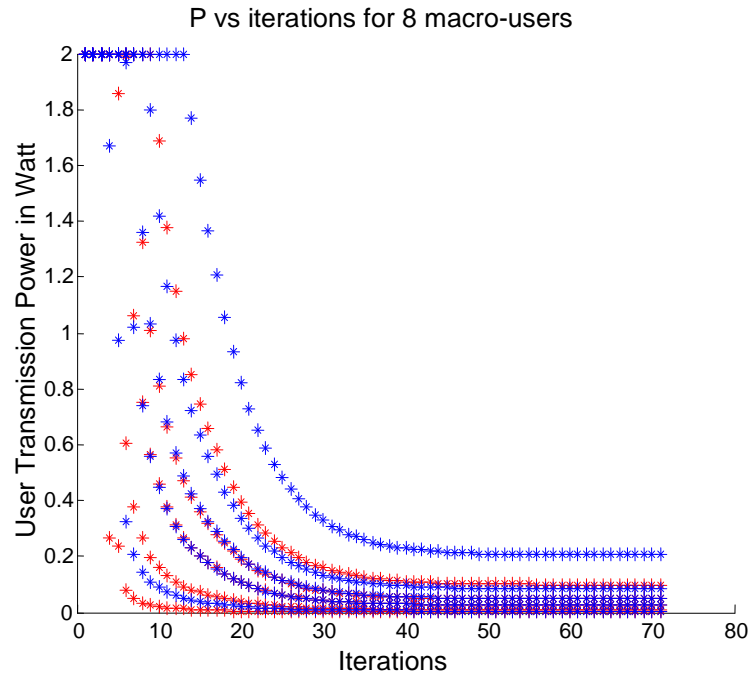


Σχήμα 61: Τοπολογία δικτύου 5^{ου} Σεναρίου (2^η προσομοίωση)– 31 FAPs και 8 μακρο-χρήστες τοποθετημένοι σε σειρά

Στην συνέχεια παρουσιάζονται δύο γραφήματα (Βλ. Σχήματα 62 και 63) που αναπαριστούν την σύγκλιση των ισχύων των μακρο-χρηστών του δικτύου στις βέλτιστες δυνατές για την πρώτη και δεύτερη αντίστοιχα προσομοίωση:



Σχήμα 62: Σύγκλιση ισχύων μακρο-χρηστών για την 1^η προσομοίωση

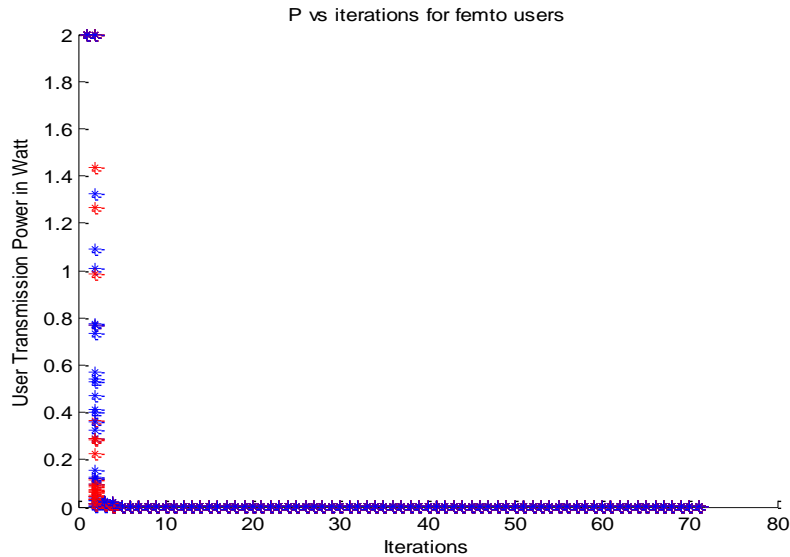


Σχήμα 63: Σύγκλιση ισχύων μακρο-χρηστών για την 2^η προσομοίωση

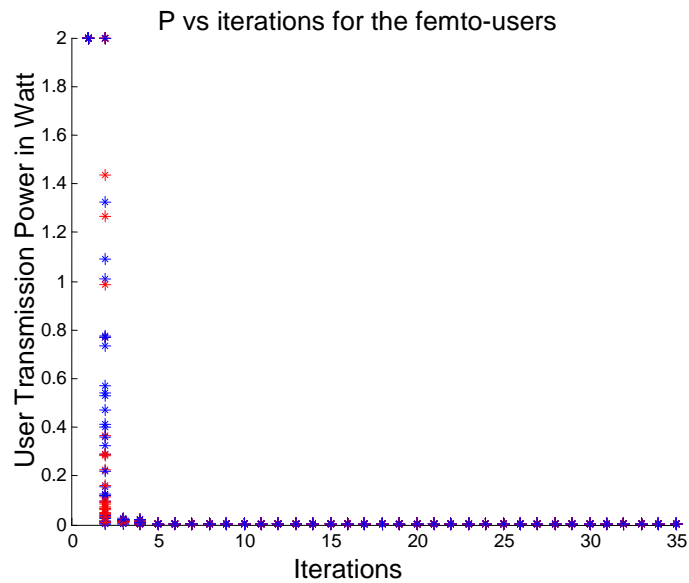
Παρατηρείται ότι ένας παράγοντας που επηρεάζει την ταχύτητα σύγκλισης του αλγορίθμου είναι **η απόσταση από τον σταθμό βάσης**, και εδώ συγκεκριμένα αναφερόμαστε στον MBS. Και στα δύο παραπάνω διαγράμματα, οι μακρο-χρήστες που είναι πιο κοντά στον MBS συγκλίνουν στην ισχύ ισορροπίας πιο γρήγορα από τους χρήστες που βρίσκονται πιο μακριά και μάλιστα η σύγκλιση στην βέλτιστη ισχύ γίνεται με την σειρά που αυτοί είναι τοποθετημένοι στα Σχήματα 60 και 61, αρχίζοντας δηλαδή από τον πιο κοντινό στον MBS μακρο-χρήστη μέχρι τον πιο μακρινό αντίστοιχα (η σειριακή τοποθέτηση αντικατοπτρίζεται δηλαδή σε ομοιόμορφη σειριακή σύγκλιση). Επίσης παρατηρείται ότι στην πρώτη προσομοίωση χρειάζονται περίπου 50 επαναλήψεις του αλγόριθμου για να βρεθεί το διάλυμα NE (να συγκλίνουν δηλαδή οι ισχύς των μακρο-χρηστών στις βέλτιστες δυνατές) ενώ στην δεύτερη περίπου στις 25. Ο κύριος παράγοντας που παίζει καθοριστικό ρόλο γι' αυτό είναι **ο αριθμός των μακρο-χρηστών** του δικτύου που στην δεύτερη περίπτωση ελαττώθηκε κατά 2, με συνέπεια η διάρκεια σύγκλισης του αλγορίθμου να μειωθεί σχεδόν στο μισό.

Από τα παρακάτω δύο γραφήματα (Βλ. Σχήματα 64 και 65), όπου απεικονίζεται η σύγκλιση των ισχύων των φεμτο-χρηστών του δικτύου στις δύο προσομοιώσεις, παρατηρείται ότι ο αριθμός των φεμτο-χρηστών δεν επηρεάζει

ουσιαστικά τις παραπάνω παρατηρήσεις, αφού και στην πρώτη και στη δεύτερη περίπτωση οι φεμτο-χρήστες έχουν τον σταθμό βάσης (FAP) αρκετά κοντά τους, σε απόσταση δηλαδή $r < R_f = 50m$ από αυτούς, οπότε η σύγκλιση στις βέλτιστες ισχύς είναι σχεδόν άμεση (5 με 10 επαναλήψεις για κάθε φεμτο-χρήστη).

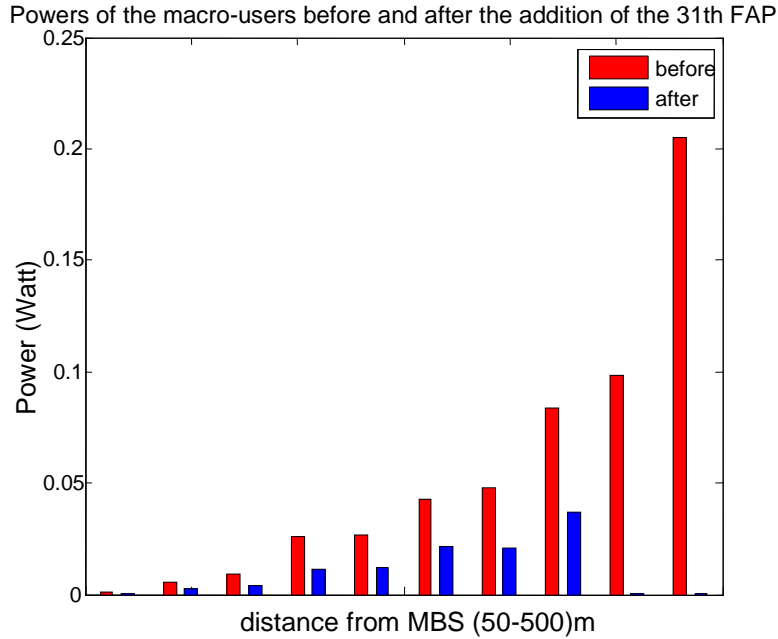


Σχήμα 64: Σύγκλιση ισχύων φεμτο-χρηστών για την 1^η προσομοίωση



Σχήμα 65: Σύγκλιση ισχύων φεμτο-χρηστών για την 2^η προσομοίωση

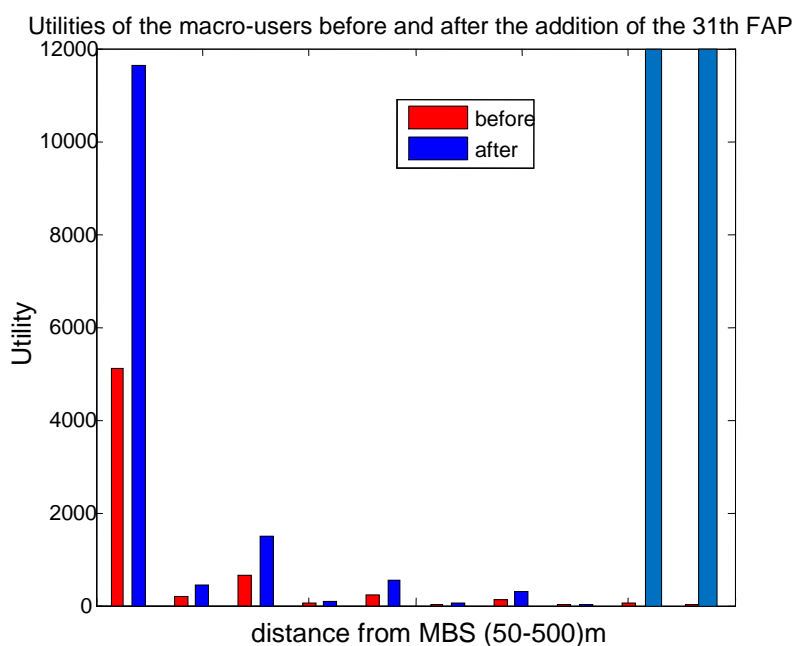
Στη συνέχεια, στο επόμενο διάγραμμα (Βλ. Σχήμα 66) απεικονίζεται η ισχύς NE των 10 μακρο-χρηστών του δικτύου, πριν και μετά την προσθήκη του τελευταίου FAP (όπου οι δύο πιο μακρινοί μάκρο έγιναν τελικά χρήστες του).



Σχήμα 66: Ισχύς μακρο-χρηστών πριν και μετά την προσθήκη του FAP (975,500) σε σχέση με την απόσταση από τον MBS

Παρατηρείται ότι οι τιμές της ισχύος όλων των μακρο-χρηστών ελαττώνονται σχεδόν στο μισό της προηγούμενης τιμής, αφού μειώνεται η παρεμβολή ίδιου επιπέδου με την μείωση του αριθμού των μακρο-χρηστών από 10 σε 8 (οι παρεμβολές των φεμτο-χρηστών είναι ελάχιστες και εξάλλου παραμένουν οι ίδιες σε κάθε προσομοίωση αφού δεν αλλάζει η τοπολογία του δικτύου). Οι δύο τελευταίοι μακρο-χρήστες (οι πιο μακρινοί στην σειρά από τον MBS) οι οποίοι είχαν και τις μεγαλύτερες ισχύς εκπομπής, γίνονται εν τέλει οι φεμτο-χρήστες του FAP (975,500), εκπέμποντας με ελάχιστες ισχύς – πράγμα το οποίο αντικατοπτρίζεται και από το γράφημα του Σχήματος 67, όπου απεικονίζεται η χρησιμότητα κάθε μακρο-χρήστη για τις δύο προσομοιώσεις.

Η χρησιμότητα λοιπόν, λόγω της μείωσης της εκπεμπόμενης ισχύος, γίνεται διπλάσια (και παραπάνω) για κάθε μακρο-χρήστη στην δεύτερη προσομοίωση, ενώ των δύο τελευταίων που γίνονται φεμτο-χρήστες (η χρησιμότητα τους) αυξάνει δραματικά (είναι της τάξης του 10^5).

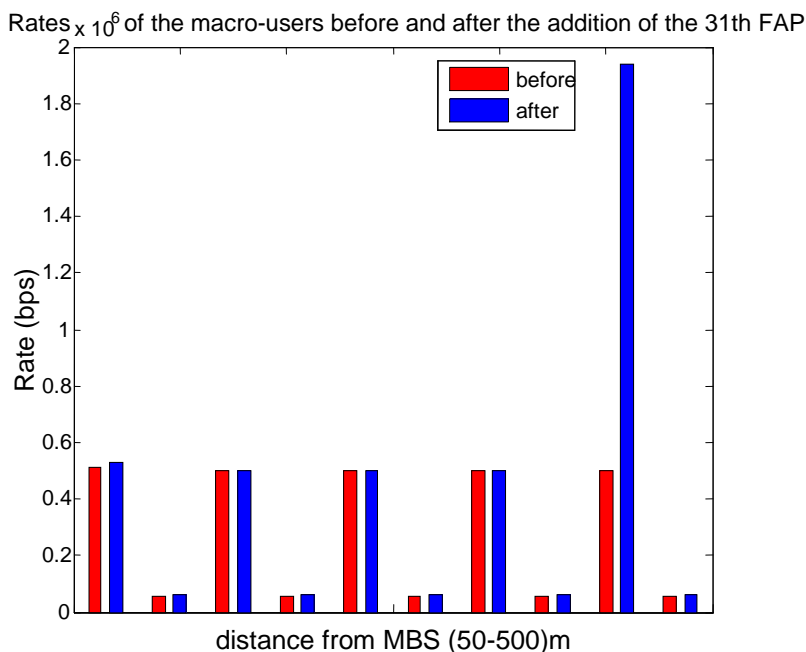


Σχήμα 67: Χρησιμότητα μακρο-χρηστών πριν και μετά την προσθήκη του FAP (975,500) σε σχέση με την απόσταση από τον MBS

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η αύξηση της χρησιμότητας που παρατηρήθηκε στο παραπάνω διάγραμμα έχει να κάνει κυρίως με την ελάττωση της ισχύος και όχι με την αλλαγή του ρυθμού μετάδοσης, μιας και από το παρακάτω γράφημα (Βλ. Σχήμα 68) παρατηρείται ότι η ρυθμαπόδοση των 8 μακρο-χρηστών ανεβαίνει ελάχιστα με την προσθήκη του νέου FAP, μιας και αυτοί είχαν ικανοποιητική ποιότητα υπηρεσίας (QoS) και από πριν. Μόνο ο NRT μακρο-χρήστης που γίνεται φεμτο-χρήστης παρουσιάζει μεγάλη αύξηση του ρυθμού μετάδοσης, συγκεκριμένα αύξηση από $0.5Mbps$ σε $1.9Mbps$, ενώ όλοι οι RT μακρο-χρήστες από $54Kbps$ (το κατώτερο αποδεκτό όριο) εκπέμπουν πια στα $64Kbps$ (την τιμή-στόχο).

Συμπερασματικά, η σύγκλιση των ισχύων των χρηστών στις βέλτιστες τιμές τους σχετίζεται με την απόσταση των χρηστών από τους σταθμούς εξυπηρέτησης του δικτύου (MBS, FAPs). Συνεπώς σε ένα δίκτυο δύο επιπέδων, οι πρώτοι χρήστες των οποίων η ισχύς θα συγκλίνει στη βέλτιστη (NE) είναι οι χρήστες των φεμτοκυβελών μιας και είναι πιο κοντά στους σταθμούς τους – τα FAPs – σε σχέση με τους άλλους χρήστες. Έπειτα ακολουθούν οι υπόλοιποι (μάκρο) χρήστες του δικτύου όπου και πάλι οι τιμές της ισχύος θα συγκλίνουν με την σειρά των αποστάσεων των μακρο-

χρηστών από τον MBS: από την ισχύ δηλαδή του πιο κοντινού χρήστη στον σταθμό της μακροκυψέλης μέχρι αντίστοιχα την ισχύ του πιο μακρινού.



Σχήμα 68: Ρυθμαπόδοση μακρο-χρηστών πριν και μετά την προσθήκη του FAP (975,500) σε σχέση με την απόσταση από τον MBS

Επίσης, ένας παράγοντας που επηρεάζει τον χρόνο σύγκλισης του αλγορίθμου MTTTPG είναι – όπως παρατηρήθηκε στα παραπάνω αποτελέσματα – ο αριθμός των μακροχρηστών του δικτύου: περισσότεροι μακρο-χρήστες σημαίνει και μεγαλύτερος χρόνος σύγκλισης. Τέλος, το σενάριο που μόλις εξετάστηκε δίνει ένα ακόμα υπέρ για την χρήση των FAP με πολιτική πρόσβασης ανοικτού ή υβριδικού τύπου σε ένα τέτοιο δίκτυο: όχι μόνο αποσυμφορίζεται η κίνηση στην μακροκυψέλη (Βλ. Σενάριο 4), αλλά υφίσταται και ταχύτερη σύγκλιση των ισχύων των χρηστών στο *NE* (αφού μειώνονται οι μακρο-χρήστες που εκπέμπουν στον MBS – εξυπηρετούνται δηλαδή από τα FAPs) γεγονός που αντιστοιχεί σε γρηγορότερες αποφάσεις – λιγότερη απαιτούμενη υπολογιστική ισχύ στην συσκευή του χρήστη για να την εκτέλεση σε κάθε χρονοσχιμή του καταναμημένου αλγόριθμου που προτείνεται, άρα και σε μεγαλύτερη διάρκεια ζωής της μπαταρίας της συσκευής αυτής.

5

Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Στο παρόν κεφάλαιο, αρχικά αναλύονται τα πιο σημαντικά συμπεράσματα στα οποία καταλήξαμε στη παρούσα διπλωματική εργασία και στη συνέχεια αναφέρονται οι κατευθύνσεις που μπορούν να αποτελέσουν τροφή για περαιτέρω έρευνα.

5.1 Συμπεράσματα

- Η χρήση της **θεωρίας παιγνίων** (συνάρτηση χρησιμότητας, *Nash Equilibrium* θεωρία) ήταν καθοριστικής σημασίας για την επίλυση του κύριου προβλήματος της παρούσας εργασίας – τη μεγιστοποίηση δηλαδή της χρησιμότητας όλων των χρηστών του δικτύου. Μέσα από την χρήση της, παρατηρήθηκε ότι η εφαρμογή μιας τέτοιας οικονομικής θεωρίας σε προβλήματα βελτιστοποίησης (που παρόμοια εμφανίζονται αρκετά σε θέματα ασυρμάτων δικτύων) προσφέρει ευελιξία (flexibility), ευκολία γενικευσιμότητας (generalization) και επίλυσης (solving) καθώς και πολλά

άλλα εργαλεία (τα οποία με σωστή χρήση μπορούν να βοηθήσουν καταλυτικά σε αποδείξεις προτάσεων και θεωρημάτων) – σε αντίθεση, άλλες θεωρίες που θα μπορούσαν να είχαν χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία, δεν συνδυάζουν όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά με τέτοιο τρόπο ώστε να αποτελούν πιο κατάλληλο “εργαλείο” για να την εύρεση λύσης στο συγκεκριμένο πρόβλημα.

- Μέσω των προσομοιώσεων (Σενάριο 4) δείξαμε ότι **η χρήση των φεμτοκυψελών (FAPs)** έχει θετική επίδραση στην απόδοση του συστήματος. Όπως παρατηρήθηκε, με τη χρήση φεμτοκυψελών η συνολική χρησιμότητα των χρηστών του δικτύου είναι κατά πολύ μεγαλύτερη, γεγονός που δικαιολογείται από την ιδιότητα των φεμτοκυψελών να αποσυμφορίζουν την κίνηση στην μακροκυψέλη, αναλαμβάνοντας την εξυπηρέτηση των κοντινών χρηστών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την παροχή καλής ποιότητας υπηρεσιών σε όλους τους χρήστες του συστήματος και συνεπώς την αύξηση της συνολικής χρησιμότητας. Σε αντίστοιχα αποτελέσματα καταλήξαμε και για την μέση ρυθμαπόδοση ανά χρήστη του συστήματος, ενώ η μέση κατανάλωση ισχύος ανά χρήστη, όταν γίνεται χρήση των φεμτοκυψελών, είναι πολύ μικρότερη, γεγονός που αποτελεί ακόμη ένα λόγο που επιβεβαιώνει το συμπέρασμα μας.
- Μέσω των προσομοιώσεων δείξαμε επίσης την σημαντικότητα της **χρήσης κοστολόγησης** στους φεμτο-χρήστες για την προστασία της ποιότητας υπηρεσιών (QoS) των μακρο-χρηστών (που αποτελούν και τους κύριους χρήστες του ραδιοφάσματος) καθώς και για την καλύτερη δυνατή κατανομή των πόρων του δικτύου στους χρήστες του (της ισχύς συγκεκριμένα). Η ισχύς, που αποτελεί έναν από τους πιο σημαντικούς πόρους του δικτύου, θα πρέπει να κατανέμεται στους χρήστες αποδοτικά και η χρησιμοποίηση μιας στρατηγικής κοστολόγησης βοηθά προς αυτήν την κατεύθυνση έτσι ώστε όχι μόνο να μειώνεται η παρεμβολή διαφορετικών επιπέδων προς τους μακρο-χρήστες αλλά και να αυξάνεται η χρησιμότητα όλων των χρηστών και κατά συνέπεια η απόδοση του εν λόγω δικτύου. Στα αποτελέσματα του Σεναρίου 2, παρουσιάστηκαν οι αρνητικές επιπτώσεις που θα είχε στο δίκτυο η μη ύπαρξη τέτοιας στρατηγικής κοστολόγησης και όπως φάνηκε (και περιμέναμε), κυρίως πλήττονται οι μακρο-χρήστες του συστήματος.

- Όσον αφορά τον **σχεδιασμό** ενός κυψελωτού δικτύου δύο επιπέδων (τομέας του *network design*), τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων (Βλ. Σενάρια 2,3) οδηγούν στο συμπέρασμα ότι για ακτίνα μακροκυψέλης και φεμτοκυψέλης $R_c = 500m$ και $R_f = 50m$ αντίστοιχα, μπορούμε να έχουμε μια τοπολογία με γύρω στα 40 με 50 FAPs τυχαία τοποθετημένα μέσα στην μακροκυψέλη καθώς και με 12 έως 15 μακρο-χρήστες σε τυχαίες σταθερές θέσεις (μιας και στην παρούσα εργασία δεν εξετάζεται η κινητικότητα των χρηστών), δεδομένου όμως ότι αυτοί δεν πλησιάζουν αρκετά κοντά στους σταθμούς βάσης των αντίστοιχων φεμτοκυψελών δημιουργώντας προβλήματα παρεμβολών. Δεδομένου λοιπόν μιας τέτοιας τοπολογίας, όλοι οι χρήστες του δικτύου – είτε είναι χρήστες φωνής είτε χρήστες δεδομένων – θα πετυχαίνουν ικανοποιητική ποιότητα υπηρεσίας (δηλαδή ρυθμούς μετάδοσης άνω των $54Kbps$ για τους RT χρήστες και άνω των $0.5Mbps$ για τους NRT χρήστες), ενώ παράλληλα θα εκπέμπουν με αρκετά μικρές ισχύς – σε σχέση πάντα με την απόσταση από τον σταθμό που τους εξυπηρετεί.
- Η αιτία για την οποία δεν είναι επιθυμητό ένας μακρο-χρήστης να βρίσκεται κοντά στον σταθμό βάσης μιας φεμτοκυψέλης στο προηγούμενο σχεδιασμό δικτύου, είναι οι **μεγάλες παρεμβολές που προκαλεί στους χρήστες του FAP**, που σχεδόν μηδενίζουν την ποιότητα υπηρεσίας τους, όπως παρουσιάστηκε στο 1^ο Σενάριο. Συνεπώς, για την ζεύξη ανόδου, η υιοθέτηση **μιας κλειστής πολιτικής πρόσβασης** στις φεμτοκυψέλες (δηλαδή ότι μόνο οι εγγεγραμμένοι χρήστες μπορούν να συνδεθούν σε αυτές) θα επέφερε καταστροφικά αποτελέσματα στην ποιότητα υπηρεσίας των τελευταίων, στην περίπτωση που μακρο-χρήστες εξυπηρετούνταν σε χωρικά κοντινές αποστάσεις σε σχέση με τον σταθμό βάσης της φεμτοκυψέλης (π.χ. εντός ενός κτηρίου στο οποίο έχει εγκατασταθεί ένα FAP). Συνεπώς, διαφαίνεται η κρισιμότητα και η ανάγκη εξέτασης από κοινού σε ένα τέτοιο διεπίπεδο σύστημα κυψελών **α)** των μηχανισμών ανάθεσης πόρων του συστήματος στους χρήστες, ώστε να μεγιστοποιηθεί η συνολική τους απόδοση, και **β)** η πολιτική πρόσβασης των χρηστών στα διάφορα στρώματα του επιπέδου (call admission control policies).
- Τέλος, οι προσομοιώσεις του Σεναρίου 5 έδωσαν αποτελέσματα για την **συμπεριφορά του αλγορίθμου κατανομής ισχύος** στο δίκτυο καθώς και για

τους κύριους παράγοντες που επηρεάζουν αυτή τη συμπεριφορά. Συγκεκριμένα, ο πιο σημαντικός παράγοντας είναι η **απόσταση** ενός χρήστη από το σταθμό που τον εξυπηρετεί: μικρότερη απόσταση οδηγεί σε πιο γρήγορη σύγκλιση στην ισχύ ισορροπίας κατά *Nash* του χρήστη και γι' αυτό εξάλλου οι φεμτο-χρήστες είναι και οι πρώτοι των οποίων η ισχύς συγκλίνει. Ένας δεύτερος παράγοντας έχει να κάνει με τον **αριθμό των μακρο-χρηστών** του δικτύου: όσο περισσότεροι είναι οι εν λόγω χρήστες, τόσο περισσότερο αυξάνει η διάρκεια σύγκλισης του προτεινόμενου αλγορίθμου.

5.2 Κατευθύνσεις για περαιτέρω έρευνα

Σε αυτήν την ενότητα προτείνονται οι κατευθύνσεις στις οποίες κάποιος μπορεί να πραγματοποιήσει περαιτέρω έρευνα, βασιζόμενος στην παρούσα εργασία.

- **Εξέταση ζεύξης καθόδου (Downlink Case):** Η εργασία αυτή επικεντρώθηκε μόνο στη μελέτη της ζεύξης ανόδου. Ωστόσο, θα μπορούσε κανείς να μελετήσει και τη ζεύξη καθόδου, υιοθετώντας κατάλληλες συναρτήσεις χρησιμότητας (utility functions).
- **Εξέταση κινητικότητας των χρηστών:** Στην παρούσα εργασία θεωρήθηκε ότι όλοι οι χρήστες ήταν ακίνητοι και συνεπώς δεν ασχοληθήκαμε καθόλου με θέματα διαπομπών και με το πως ένας αλγόριθμος ελέγχου ισχύος σε δίκτυο δύο επιπέδων μπορεί να πραγματοποιηθεί ενόσω οι χρήστες του δικτύου αλλάζουν συνέχεια θέση ή ακόμα και σταθμό εκπομπής (από κάποιο FAP στον MBS και αντίστροφα).
- **Χρησιμοποίηση άλλου τύπου πολιτικής πρόσβασης:** Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκε πρόσβαση κλειστού τύπου (closed access), η οποία όμως όπως είδαμε από τις προσομοιώσεις, εμφανίζει αρκετά μειονεκτήματα. Έτσι, θα είχε ιδιαίτερο ενδιαφέρον ο συνδυασμός της παραπάνω μελέτης π.χ. με υβριδικού τύπου πρόσβαση (hybrid access), η οποία και αποτελεί την πιο ισορροπημένη λύση μεταξύ παρεμβολής και απόδοσης του συστήματος.

- **Εξέταση άλλου τύπου πολιτικής ανάθεσης φάσματος στις φεμτοκυψέλες:** Συγκεκριμένα, στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε πολιτική κοινού φάσματος μεταξύ μακροκυψέλης και φεμτοκυψελών (δηλαδή μοιράζονταν όλα τα διαθέσιμα κανάλια), ενώ θα μπορούσε να εξεταστεί μια πολιτική ανάθεσης όπως αυτή του μερικώς μοιρασμένου φάσματος (Partially Shared Spectrum) όπου το επίπεδο της μακροκυψέλης έχει πρόσβαση σε όλες τις ζώνες φάσματος, ενώ οι φεμτοκυψέλες λειτουργούν μόνο σε ένα υποσύνολο αυτών. Μια τέτοια πολιτική ανάθεσης φάσματος θα είχε τα πλεονεκτήματα που περιγράψαμε στην ενότητα (1.3).
- **Χρησιμοποίηση άλλου είδους συνάρτησης κοστολόγησης:** Στο άρθρο [16] έχει αποδειχθεί ότι μια εκθετική και κυρτή συνάρτηση κοστολόγησης επιφέρει μεγαλύτερη απόδοση στο σύστημα απ' ότι μία στρατηγική γραμμικής κοστολόγησης και γι' αυτό στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η πρώτη. Στο άρθρο όμως [9], γίνεται χρήση μιας άλλης συνάρτησης κοστολόγησης διαφορετικής μορφής, που εμπεριέχει και την συνολική παρεμβολή που δέχεται μια φεμτοκυψέλη από τους χρήστες του συστήματος, έτσι ώστε φεμτοκυψέλες που δέχονται περισσότερες παρεμβολές, να κοστολογούνται λιγότερο. Επίσης υπάρχουν και άλλες μορφές πολιτικών κοστολόγησης που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με την παρούσα εργασία (όπου χρησιμοποιήθηκε στρατηγική βασισμένη στην χρησιμοποίηση – usage-based policy δηλαδή), όπως είναι πολιτικές βασισμένες στην πρόσβαση (access-based) , στην προτεραιότητα (priority-based) , στην ισοκατανομή της ρυθμαπόδοσης (flat-rate), κ.ά.
- **Εξέταση μεγαλύτερου αριθμού φεμτο-χρηστών:** Μια μικρή προσθήκη στην παρούσα εργασία θα ήταν η μελέτη του ίδιου συστήματος όπου δεν θα υπήρχαν μόνο 2 φεμτο-χρήστες σε κάθε FAP (ένας χρήστης φωνής και ένας δεδομένων), αλλά περισσότεροι (4-5) και με διαφορετική αναλογία ως προς την ζήτηση υπηρεσιών. Σε συνδυασμό μάλιστα με μια πολιτική πρόσβασης υβριδικού τύπου, θα μπορούσε να εξεταστεί το πόσο παραπάνω χρήστες μπορεί να έχει μια φεμτοκυψέλη, δεδομένου ότι αυτοί λαμβάνουν ικανοποιητικό QoS.

6

Βιβλιογραφία

- [1] V.Chandrasekhar, J. G. Andrews, “Femtocell Networks: A Survey”, *IEEE Communications Magazine*, Sempتمبر 2008.
- [2] Jeffrey G. Andrews, Holger Claussen, Mischä Dohler, Sundeep Rangan, Mark C. Reed, “Femtocells: Past, Present, and Future”, *IEEE journal on Selected Areas In Communications*, vol.30, no.3, pp.497-508, April 2012.
- [3] Abdulrahman Alkandari, Mohammad A. Ahmad, “Interference Management in Femtocells”, *Journal of Advanced Computer Science and Technology Research*, March 2012.
- [4] Αγάπη Ι. Μεσοδιακάκη, “Service-oriented utility-based uplink power control in two-tier femtocells networks”, June 2011.
- [5] G. Roche, A. Valcarce, D. Lopez-Perez, and J. Zhang, “Access Control Mechanisms for Femtocells,” *IEEE Communications Magazine*, vol.48, no.1, pp.33-39, January 2010.
- [6] D. Choi, P. Monajemi, S. Kang, and J. Villasenor, “Dealing with loud neighbors: the benefits and tradeoffs of adaptive femtocell access,” *In Proc. of IEEE Global Telecommunications Conference*, pp.1-5, Nov.-Dec. 2008.
- [7] H.-S. Jo, C. Mun, J. Moon, and J.-G. Yook, "Interference mitigation using uplink power control for two-tier femtocell networks," *IEEE Transactions on*

Wireless Communications, vol.8, no.10, pp.4906-4910, October 2009.

- [8] V. Chandrasekhar and J. G. Andrews, "Uplink Capacity and Interference Avoidance for Two-Tier Femtocell Networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol.8, no.8, pp.4316-4328, August 2009.
- [9] V. Chandrasekhar, T. Muharemovic, Z. Shen, J. G. Andrews, and A. Gatherer, "Power Control in Two-Tier Femtocell Networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol.8, no.7, pp.3498-3509, July 2009.
- [10] D. T. Ngo, L. B. Le, T. Le-Ngoc, E. Hossain, and D. I. Kim, "Distributed interference management in femtocell networks," *IEEE Trans. Wireless Communications*, vol. 11, no. 3, pp. 979-989, Mar. 2012.
- [11] Kang Xin, Ying-Chang Liang, Garg, H.K., "Distributed Power Control for Spectrum-Sharing Femtocell Networks Using Stackelberg Game," in *Communications (ICC), 2011 IEEE International Conference on*, 2011, pp. 1-5.
- [12] Duy Trong Ngo, Long Bao Le, Tho Le-Ngoc, "Distributed Pareto-Optimal Power Control for Utility Maximization in Femtocell Networks" *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol.11, no.10, pp.3434-3446, October 2012.
- [13] Wei-Sheng Lai, Ta-Sung Lee, "A Distributed Cluster-Based Self-Organizing Approach to Resource Allocation in Femtocell Networks", *Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 2012 IEEE 75th, pp. 1-5, May 2012.
- [14] Mi Seong Jin, Seung Ah Chae, Dong In Kim, "Per Cluster Based Opportunistic Power Control for Heterogeneous Networks", *Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 2012 IEEE 73th, pp. 1-5, May 2011.
- [15] E.E. Tsiropoulou, T. Kastrinogiannis, and S. Papavassiliou, "QoS-Driven Uplink Power Control in Multi-Service CDMA Wireless Networks - A Game Theoretic Framework," *J. Comm.*, vol. 4, no. 9, pp. 654-668, Oct. 2009.
- [16] E. E. Tsiropoulou, Georgios K. Katsinis, and S. Papavassiliou, "Distributed Uplink Power Control in Multiservice Wireless Networks via a Game Theoretic Approach with Convex Pricing", *IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems*, vol. 23, no. 1, January 2012.

- [17] C. U. Saraydar, N. B. Mandayam, and D. J. Goodman, "Efficient power control via pricing in wireless data networks," *IEEE Trans. on Commun.*, vol. 50, pp. 291–303, Feb. 2002.
- [18] V. Rodriguez, "An analytical foundation for resource management in wireless communication," in *Proc. Of GLOBECOM '03*, vol.2, no.2, pp. 898-902, 1-5 Dec. 2003.
- [19] C. Goffman, *The Calculus: An Introduction*. Harper & Row, Publisher, 1971.
- [20] R. D. Yates, "A framework for uplink power control in cellular radio systems," *IEEE J. Select. Areas Commun.* vol. 13, pp. 1341–1347, 1995.