



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Διαστρωματική Αλληλεπίδραση και Βελτιστοποίηση σε
Ευρυζωνικά Ραδιοδίκτυα πέραν της 3^{ης} Γενιάς**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Σταύρος Ε. Σαγκριώτης

Αθήνα, Απρίλιος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Διαστρωματική Αλληλεπίδραση και Βελτιστοποίηση σε Ευρυζωνικά Ραδιοδίκτυα πέραν της 3^{ης} Γενιάς

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Σταύρος Ε. Σαγκριώτης

Συμβουλευτική Επιτροπή : Αθανάσιος Δ.. Παναγόπουλος
Γιώργος Ι. Φικιώρης
Κίμων Π. Κοντοβασίλης

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 22^η Απριλίου 2016.

.....
Αθανάσιος Παναγόπουλος
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γιώργος Φικιώρης
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Κίμων Κοντοβασίλης
Δ/ντής Ερευνών του Ι.Π. & Τ.
Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκοιτος»

.....
Μιχαήλ Θεολογού
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ιωάννα Ρουσσάκη
Επ. Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

.....
Λάζαρος Μεράκος
Καθηγητής ΕΚΠΑ

.....
Μιχαήλ Ματθαίου
Αν. Καθηγητής Queen's
University Μπέλφαστ

Αθήνα, Απρίλιος 2016

.....

Σταύρος Ε. Σαγκριώτης

Απόφοιτος Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών ΕΚΠΑ, Διδάκτωρ Ε.Μ.Π.

Copyright © Σταύρος Ε. Σαγκριώτης,
2016.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Η παρούσα διατριβή εστιάζει στη μοντελοποίηση και ανάλυση της αλληλεπίδρασης συγκεκριμένων επιπέδων της στοίβας των πρωτοκόλλων στα ασύρματα δίκτυα: του Φυσικού Επιπέδου (PHY), του Επιπέδου Ζεύξης (Data Link Layer), του Επιπέδου Πρόσβασης στο Μέσο (MAC) και των ανωτέρων επιπέδων για την αξιολόγηση της επίδοσης μετρικών που αφορούν τόσο το κινητό χρήστη, όσο και το σύνθετο σύστημα εξυπηρέτησης των χρηστών στα Ευρυζωνικά Ραδιοδίκτυα πέραν της 3^{ης} Γενιάς.

Μια σειρά από εύρωστα μοντέλα εξυπηρέτησης και αναμονής που έχουν αναπτυχθεί εδώ και χρόνια στην επιστημονική βιβλιογραφία των δικτύων υπολογιστών καθώς και στοχαστικά μοντέλα διαλείψεων για συστήματα ευκαιριακού χρονοπρογραμματισμού επιτρέπουν την μοντελοποίηση της κίνησης δεδομένων στα σύγχρονα ασύρματα συστήματα και την εύρεση αναλυτικών προσεγγιστικών σχέσεων για τη ρυθμαπόδοση χρήστη, την ενεργειακή επίδοση χρήστη και την συνολική κατανάλωση ισχύος στο Σταθμό Βάσης.

Οι σχέσεις αυτές εκφράζονται με απλούς όρους που αντανakλούν τις βασικές παραμέτρους της αλληλεπίδρασης της στοίβας των πρωτοκόλλων, επιτρέποντας την αναλυτική αξιολόγηση σύνθετων προβλημάτων διαστασιοποίησης καθώς και δυναμικών πρωτοκόλλων δέσμευσης πόρων. Επιτρέπουν παράλληλα το σχεδιασμό αξιόπιστων πρωτοκόλλων μετάδοσης και δικτύωσης, που εξυπηρετούν τις ανάγκες των νέων συστημάτων, αξιοποιώντας δυναμικά χαρακτηριστικά εξυπηρέτησης που αναπτύσσονται στα ανώτερα επίπεδα της στοίβας των πρωτοκόλλων.

Η ανάλυση συνεχίζεται με την διατύπωση πρωτότυπων προβλημάτων βελτιστοποίησης για τα συστήματα πέραν της 3^{ης} Γενιάς. Συγκεκριμένα, προτείνεται αλγόριθμος προσαρμογής ζεύξης που βασίζεται στη μεγιστοποίηση της ενεργειακής επίδοσης. Η ενεργειακή επίδοση εκφράζεται ως συνάρτηση των ενεργών χρηστών του συστήματος και το αντίστοιχο πρόβλημα βελτιστοποίησης συγκαταλέγεται στα προβλήματα διαστρωματικής βελτιστοποίησης. Επιπλέον, παρουσιάζεται η αντικειμενική συνάρτησης της χωρητικότητας ενός συστήματος. Η συνάρτηση αυτή εκφράζει το μέγιστο όγκο δεδομένο ανά μονάδα χρόνου που μπορεί να εξυπηρετήσει ένα σύστημα εξυπηρέτησης.

Τέλος εξετάζονται πολιτικές βέλτιστης διαμέρισης της κυψέλης με εφαρμογή της σύγχρονης τεχνικής εξουδετέρωσης παρεμβολών, της Κλασματικής Επαναχρησιμοποίησης Συχνότητας, που μεγιστοποιούν κατάλληλες αντικειμενικές συναρτήσεις που αφορούν την επίδοση του συστήματος. Συγκεκριμένα εξετάζεται η βέλτιστη πολιτική που μεγιστοποιεί τη χωρητικότητα της κυψέλης και η βέλτιστη πολιτική που ελαχιστοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση της συνολικής κατανάλωσης ισχύος στο Σταθμό Βάσης.

Λέξεις κλειδιά: Ευκαιριακοί Χρονοπρογραμματιστές, Εύρωστα Μοντέλα Εξυπηρέτησης, Αναλογικά Δίκαιος Αλγόριθμος, Ενεργειακή Επίδοση, Διαστρωματική Αλληλεπίδραση, Μοντέλο Μερισμού του Εξυπηρετητή, Κλασματική Επαναχρησιμοποίηση Συχνότητας

Abstract

This thesis focuses on modeling the interaction of particular layers of the protocol stack in wireless networks: the Physical Layer (PHY), the Data Link Layer, the Medium Access Control (MAC) and upper layers to evaluate performance metrics both for the mobile user and the complex service system in broadband radio networks beyond 3G. A number of robust service systems and queuing models that have been developed for years in the scientific literature of computer networks, as well as stochastic fading models for opportunistic scheduling systems allow modeling of data traffic in modern wireless systems and finding approximate analytical relations for user throughput, user energy efficiency and total power consumption at the Base Station.

These analytical relations are expressed in simple terms that reflect the basic parameters of the interaction of the protocol stack and allow analytical evaluation of complex dimensioning problems and the performance of dynamic resource sharing protocols. At the same time they allow the design of reliable transmission and networking protocols that serve the needs of new systems, utilizing dynamic characteristics of service developed at the higher layers of the protocol stack.

The analysis continues with the formulation of novel optimization problems for systems beyond 3G. Specifically, a link adaptation algorithm is proposed that depends on maximum energy efficiency. The energy efficiency is expressed as a function of the active users of the system and the corresponding optimization problem is considered a cross-layer optimization problem. In addition, the objective function of the capacity of a system is presented. This function is the maximum volume of data per unit time that can be served by the system.

Finally, optimal policies of cell partitioning are investigated, by applying the interference cancellation technique of Fractional Frequency Reuse, maximizing appropriate objective functions related to system performance. Specifically, the optimal policy that maximizes the cell capacity and the optimal policy that minimizes the objective function of the total power consumption at the Base Station are investigated.

Keywords: Opportunistic Schedulers, Robust Queuing Models, Proportional Fair Scheduling, Energy Efficiency, Cross-Layer Interaction, Processor Sharing, Fractional Frequency Reuse

Ευχαριστίες

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εκπληρώνει ένα βασικό στόχο στην ερευνητική μου διαδρομή, στη κατανόηση και εμβάθυνση τόσο σε γενικά αλλά και σε εξειδικευμένα ζητήματα των ασύρματων τηλεπικοινωνιών και των σύγχρονων ασύρματων ευρυζωνικών δικτύων. Η έναρξη αυτής της κατά κοινή ομολογία δύσκολης και επίπονης εργασίας του διδακτορικού οφείλεται εν πολλοίς σε ένα τυχαίο περιστατικό που με απέτρεψε να ακολουθήσω το δρόμο της πλειοψηφίας των αποφοίτων πανεπιστημιακής σχολής, αυτού της άμεσης ένταξης στη παραγωγή μετά την εκπλήρωση των στρατιωτικών τους υποχρεώσεων. Οφείλω να το καταγράψω.

Ένας πολύ καλός φίλος και συνάδελφος από το εργαστήριο Δικτύων Τηλεπικοινωνιών του Ινστιτούτου Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών στο Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. Δημόκριτος, ο Ιωάννης Μανωλόπουλος μου συνέστησε τη προσοχή στην προκήρυξη θέσεων υποτρόφων για εκπόνηση διδακτορικής διατριβής στο Δημόκριτο. Υπέβαλλα τα χαρτιά μου, πέρασα επιτυχώς από τις αντίστοιχες εξετάσεις και βρέθηκα για ένα σημαντικό χρονικό διάστημα υπό την επίβλεψη του Διευθυντή Ερευνών Κίμωνα Κοντοβασίλη. Στον κύριο Κοντοβασίλη οφείλω σε μεγάλο βαθμό το ξεδιάλυμα καθοριστικών εννοιών στη μαθηματική θεωρία των δικτύων και συγκεκριμένα τις εύρωστες ιδιότητες των μαρκοβιανών μοντέλων. Η πανσπερμία θεμάτων της σύγχρονης βιβλιογραφίας αποσπά τον μέσο ερευνητή από τις ουσιώδεις αρχές μοντελοποίησης των δικτύων, αρχές που αξιοποίησαν από πολύ νωρίς μεγαλοφυείς μηχανικοί σαν τον Erlang για την ορθή διαστασιοποίηση των δικτύων και μπορούν να αξιοποιηθούν κατάλληλα στα σύγχρονα ευρυζωνικά συστήματα σήμερα. Δυστυχώς, η σημερινή βασική τάση στην έρευνα είναι η μελέτη σεναρίων με εκτεταμένες προσομοιώσεις, αφαιρώντας την θεωρητική ματιά των αναλυτικών εργαλείων, η οποία μπορεί να δώσει εξαρχής σημαντικά αποτελέσματα τόσο για την ανάλυση παραμέτρων, όσο και για την διατύπωση νέων αλγορίθμων και πρωτοκόλλων που κόντρα στη κοινή διαίσθηση των εκτεταμένων προσομοιώσεων, προσφέρουν νέες και καινοτόμες κατευθύνσεις.

Από το τίτλο της διατριβής συνάγει κανείς εύκολα ότι η αλληλεπίδραση των επιπέδων της στοίβας των πρωτοκόλλων για τα ασύρματα δίκτυα βασίζεται σε γνώσεις της θεωρίας των τηλεπικοινωνιών. Στο κύριο Παναγόπουλο, βασικό επιβλέποντα της διατριβής μου οφείλω πολλά πράγματα. Το πρώτο και βασικό αφορά

το περιεχόμενο της διατριβής και είναι η ορθή αφαίρεση παραμέτρων του μοντέλου του συστήματος στα χαμηλότερα επίπεδα της στοίβας των πρωτοκόλλων (μοντέλο διάδοσης, αρχές αποκατάστασης αξιόπιστης τηλεπικοινωνιακής ζεύξης) χωρίς να αλλοιώνεται η γενική εικόνα της επίδοσης του συστήματος. Η διαστασιοποίηση ενός ασύρματου συστήματος μπορεί να βασιστεί μόνο σε βασικές παραμέτρους που καθορίζουν τη γενική του επίδοση, τη γενική του λειτουργία. Ο εντοπισμός των παραμέτρων αυτών απαιτεί σε βάθος γνώση των επιμέρους σημαντικών λεπτομερειών του ασύρματου συστήματος. Στο κύριο Παναγόπουλο οφείλω βέβαια και κάτι εξίσου σημαντικό, την ολοκλήρωση της διατριβής αυτής καθ' αυτής. Είναι μερικές στιγμές που η χρονική στιγμή της λήξης του διδακτορικού φαίνεται μακριά στον ορίζοντα, τόσο μακριά που σου έρχεται να τα εγκαταλείψεις. Ο κύριος Παναγόπουλος μου στάθηκε πραγματικά σα φίλος αυτές τις στιγμές και χωρίς τη συμπαράστασή του δεν θα περνούσα ποτέ αυτό το δύσκολο και δύσβατο μονοπάτι προς την ολοκλήρωση της διατριβής. Θα ήμουν αχάριστος αν δεν το επεσήμανα σε λίγες αράδες στο τελικό καρπό των κόπων μου.

Δεν μπορώ να παραλείψω από τις ευχαριστίες μου τον κύριο Φικιώρη μέλος της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής μου που μου έδωσε απλόχερα την εμπιστοσύνη του εξαρχής. Ξεχωριστές ευχαριστίες οφείλω στα μέλη της εφταμελούς επιτροπής που αποδέχτηκαν να κρίνουν και να αξιολογήσουν τη δουλειά μου, τον κύριο Θεολόγου, την κυρία Ρουσσάκη, τον κύριο Μεράκο καλό μου δάσκαλο στη Πληροφορική του ΕΚΠΑ και βέβαια το Μιχάλη τον Ματθαίου, που τυχαίνει να γνωρίζω από μια κοινή περιπετειώδη περιπλάνηση στα σοκάκια των Βρυξελλών τέλη Αυγούστου, την ημέρα που έλαβα το βραβείο για τη δημοσίευσή μου στο Συνέδριο ISWCS. Είμαι σίγουρος ότι όσο καλός φίλος μου στάθηκε τότε στη γιορτή της επιβράβευσης μακριά από τη πατρίδα, άλλο τόσο αυστηρός επιστημονικός κριτής είναι της δουλειάς μου. Οι δυο ιδιότητες αυτές, της φιλίας και της κριτικής παρεξηγούνται τη σήμερον. Δεν θα έπρεπε.

Στους φίλους και καλούς συναδέλφους μου στο Πολυτεχνείο μάλλον οφείλω μια συγγνώμη για όλες εκείνες τις στιγμές που έβγαλα έντονα στοιχεία του απότομου και δύστροπου χαρακτήρα μου. Οι στιγμές αυτές θέλω να πιστεύω ότι ήταν λίγες και δεν επηρέασαν τη γενική μου εικόνα σαν άνθρωπο και σα συνάδελφο.

Στο σημείο αυτό οφείλω να ευχαριστήσω τους γονείς μου στους οποίους οφείλω και το ζην και το ευ ζην. Από μικρό μου καλλιέργησαν μέσα μου το μικρόβιο των μαθηματικών και της μελέτης, ίσως μάλιστα και εις βάρος άλλων εξίσου σημαντικών

ασχολιών, όπως της άθλησης, του παιχνιδιού και βασικών χειρωνακτικών ενασχολήσεων, κοπιάζοντας αργότερα να καλύψω το χαμένο έδαφος. Είμαι σίγουρος ότι στο μικρόβιο αυτό οφείλεται και το διδακτορικό.

Τέλος οφείλω να ευχαριστήσω την αγαπημένη μου Ελλη, που μου συμπαραστάθηκε ενεργά νύχτες και μέρες για μια δημοσίευση, για μελέτη, για τη συγγραφή και ολοκλήρωση της διατριβής. Η δουλειά αυτή αφιερώνεται σε αυτήν που αγαπώ πολύ.

Αθήνα,
Απρίλιος 2016
Σταύρος Σαγκριώτης

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	7
Abstract	9
Ευχαριστίες.....	11
Κεφάλαιο 1.....	17
Εισαγωγή.....	17
1.1 Σκοπός-Κίνητρα	17
1.2 Σχετική Βιβλιογραφία.....	24
1.3 Συνεισφορά διατριβής	32
1.4 Δομή της διατριβής	37
Κεφάλαιο 2.....	41
Μοντελοποίηση του δικτύου πρόσβασης με σταθερό πληθυσμό ροών	41
2.1 Εισαγωγή.....	41
2.2 Γενικές Υποθέσεις Συστήματος με σταθερό αριθμό ροών	43
2.3 Κέρδος χρονοπρογραμματισμού ευκαιριακών αλγορίθμων εξυπηρέτησης.....	46
2.4 Προσεγγίσεις μέσου ρυθμού ζεύξης και κέρδους χρονοπρογραμματισμού	48
2.5 Ενεργειακή Επίδοση.....	51
2.6 Αριθμητικά αποτελέσματα και σχολιασμός	56
2.7 Συμπεράσματα	64
Κεφάλαιο 3.....	65
Μοντελοποίηση του δικτύου πρόσβασης με μεταβαλλόμενο πληθυσμό ροών	65
3.1 Εισαγωγή.....	65
3.2 Εύρωστα Μοντέλα Εξυπηρέτησης	66
3.3 Round Robin	84
3.4 Τεχνική του «μόνιμου χρήστη»	88
3.5 Προτεινόμενος Αλγόριθμος Προσαρμογής Ζεύξης.....	90
3.6 Αναλογικά Δίκαιος Αλγόριθμος.....	99
3.7 Αριθμητικά αποτελέσματα και σχολιασμός	101
3.8 Συμπεράσματα	104
Κεφάλαιο 4.....	106
Βελτίωση της Ενεργειακής Επίδοσης στην Ανερχόμενη Ζεύξη	106
4.1 Εισαγωγή.....	106
4.2 Προτεινόμενος αλγόριθμος	107

4.3	Μοντελοποίηση Αλγορίθμου σε συνθήκες μεταβαλλόμενου πληθυσμού ενεργών χρηστών	109
4.4	Αξιολόγηση της Επίδοσης	111
4.5	Συμπεράσματα	115
Κεφάλαιο 5		116
Βέλτιστη Διαμέριση Κυψέλης σε συστήματα Κλασματικής Επαναχρησιμοποίησης Συχνότητας		116
5.1	Εισαγωγή	116
5.2	Γενικές Υποθέσεις Συστήματος	118
5.3	Βέλτιστη διαμέριση για την μεγιστοποίηση της χωρητικότητας	123
5.4	Βέλτιστη διαμέριση για την ελαχιστοποίηση της συνολικής κατανάλωσης ισχύος στο Σταθμό Βάσης	125
5.5	Αξιολόγηση της Επίδοσης	127
5.6	Συμπεράσματα	136
Κεφάλαιο 6		137
Συμπεράσματα Διατριβής και Μελλοντικές Κατευθύνσεις Έρευνας		137
6.1	Γενικά Συμπεράσματα	137
6.2	Ετερογενή Ραδιοδίκτυα και τεχνικές εκφόρτωσης	139
6.3	Δίκτυα Μηχανών (M2M)	141
6.4	Δίκτυα Συσκευών (D2D)	144
Παράρτημα Α		147
Υπολογισμός προσεγγιστικών σχέσεων για μεγέθη μεσοπρόθεσμης σύγκλισης		147
Παράρτημα Β		153
Υπολογισμός μεγεθών μακροπρόθεσμης σύγκλισης με χρήση Μερισμού Εξυπηρετητή. 153		
Παράρτημα Γ		158
Χαρακτηριστικά του Μοντέλου Μερισμού του Εξυπηρετητή για τον Αναλογικά Δίκαιο Αλγόριθμο		158
Βιβλιογραφία		162
Βιογραφικό Σημείωμα		168

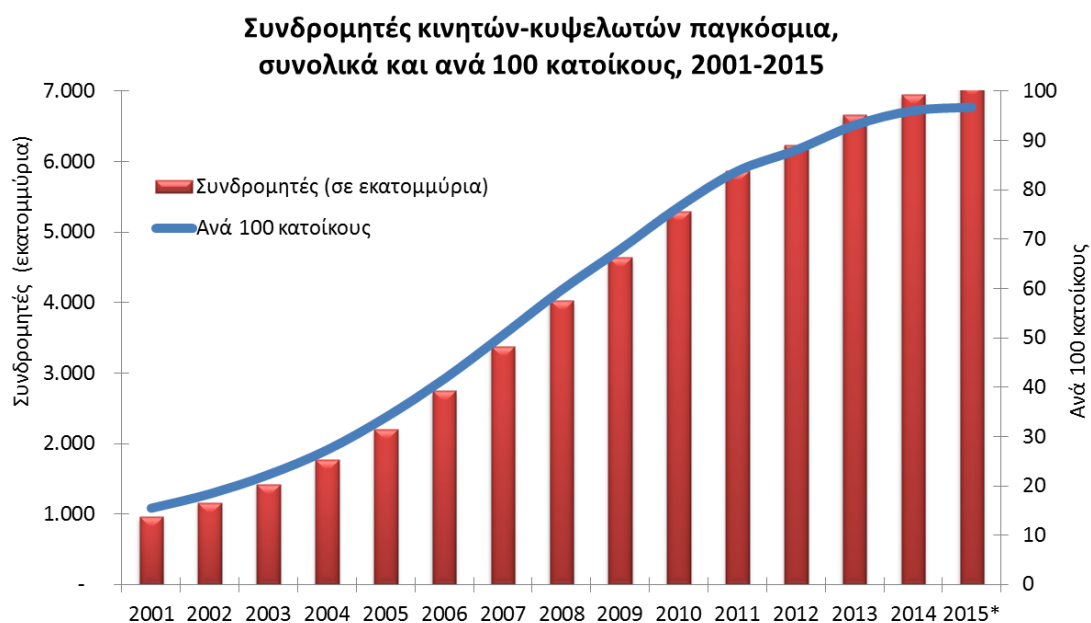
Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Σκοπός-Κίνητρα

1.1.1 Η ασύρματη ευρυζωνικότητα στο παρόν και στο εγγύς μέλλον

Αν ορίσουμε ως βαθμό διείσδυσης ενός εμπορεύματος το ποσοστό των πελατών μιας εθνικής αγοράς που αγοράζει το συγκεκριμένο εμπόρευμα σε μια χρονική περίοδο, σύμφωνα με τις τελευταίες εκθέσεις της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών (ITU) η 2.5 και 3η γενιά των κυψελωτών ασύρματων δικτύων παγίωσε στο 100% το βαθμό διείσδυσης των δυο υπηρεσιών των κινητών: του Short Message Service (SMS) και της φωνής παγκόσμια στα τέλη του 2015 (Σχήμα 1.1). Το 2014 η βιομηχανία της κινητής τηλεφωνίας αντιστοιχούσε στο 3.8% του παγκόσμιου ΑΕΠ [GSM15].



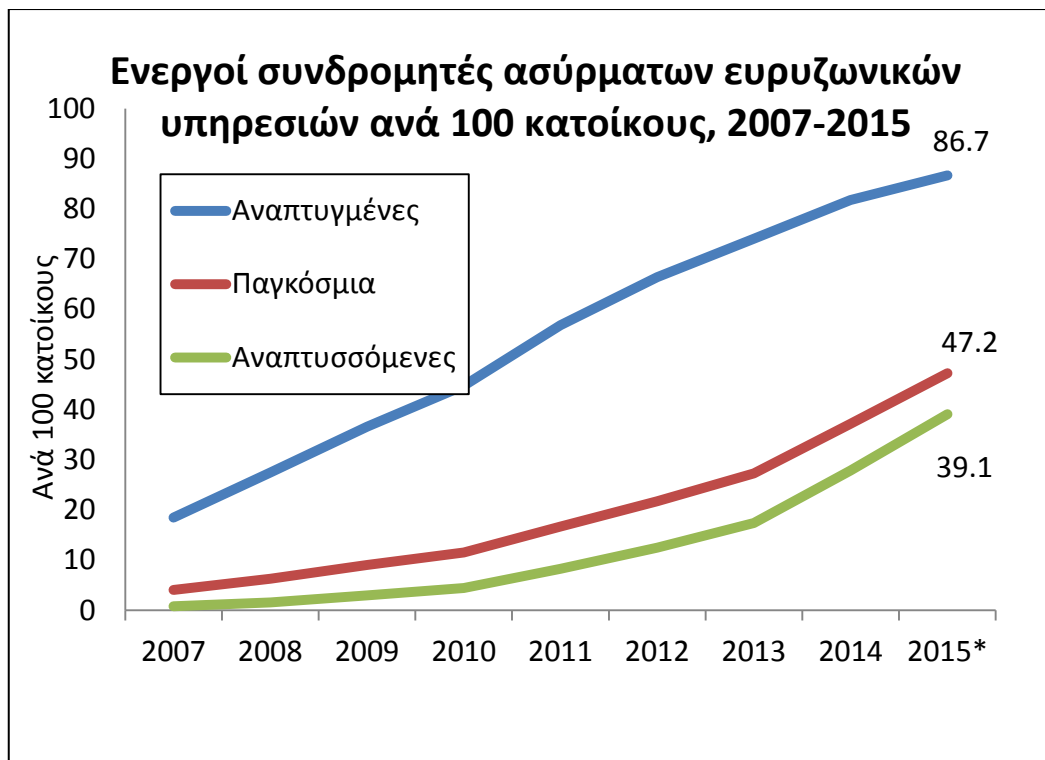
Σχήμα 1.1: Συνδρομητές κινητών-κυψελωτών παγκόσμια, συνολικά και ανά 100 κατοίκους. Πηγή: ITU World Telecommunication /ICT Indicators database

Η 3η Γενιά κινητών έφερε τις υπηρεσίες του διαδικτυακού ιστού (World Wide Web) στους κινητούς χρήστες. Από το General Packet Radio Service (GPRS) μια τεχνολογία εφάμιλλη της «56άρας σύνδεσης» modem, στο Enhanced Data for Global Evolution (EDGE) (το αντίστοιχο του ISDN) και τέλος το High Speed Packet Access (HSPA), ή High Data Rate (HDR) στις ΗΠΑ (το 1Mbps της A-DSL), η αρχιτεκτονική του ασύρματου διαδικτύου άρχισε να εξελίσσεται γοργά σύμφωνα με

τις νέες ανάγκες των κινητών χρηστών πρόσβασης σε κίνηση δεδομένων του διαδικτύου.

Η αύξηση της ζήτησης σε υψηλή ποιότητα υπηρεσιών (QoS) κυρίως για πολυμεσικές υπηρεσίες (βίντεο κατά παραγγελία) καθώς και σε γρήγορες εφαρμογές κοινωνικής δικτύωσης και ανάγνωσης διαδικτυακού ιστού, έφεραν στο προσκήνιο την 4η Γενιά των ασύρματων δικτύων. Όταν ο βαθμός διείσδυσης των διαδικτυακών ευρυζωνικών υπηρεσιών ξεπέρασε το 40% τέλη 2009 (Σχήμα 1.2) στις αναπτυγμένες οικονομικά χώρες του πλανήτη, οι βιομήχανοι των ασύρματων επικοινωνιών αποφάσισαν να επενδύσουν μαζικά κεφάλαια στην 4η Γενιά, υιοθετώντας παράλληλα πολιτική επιδότησης σύγχρονων τερματικών smartphones [GSM15].

Η 4^η Γενιά κινητών ξεπερνά σε κίνηση δεδομένων τη 3^η Γενιά κινητών για πρώτη φορά το 2015. Παρότι οι συνδέσεις της 4^{ης} Γενιάς αποτελούν μόνο το 14% του συνόλου των συνδέσεων κινητών τερματικών το 2015, είναι ήδη υπεύθυνες για το 47% της κίνησης δεδομένων των ασύρματων επικοινωνιών, ενώ οι συνδέσεις της 3^{ης} Γενιάς αποτελούν το 34% των συνδέσεων κινητών τερματικών και αντιστοιχούν στο 43% της κίνησης δεδομένων κινητών τερματικών. Το 2015 μια σύνδεση 4^{ης} Γενιάς παρήγαγε κατά μέσο όρο έξι φορές περισσότερη κίνηση δεδομένων από μια οποιαδήποτε άλλη σύνδεση [C19]. Παγκόσμια, οι «έξυπνες συσκευές», κινητά τερματικά που διαθέτουν προηγμένες υπολογιστικές ικανότητες και ικανότητες εφαρμογής πολυμεσικών υπηρεσιών, αποτελούν το 36% του συνόλου των κινητών τερματικών και συνδέσεων το 2015. Αντιστοιχούν δε στο 89% της κίνησης δεδομένων των κινητών τερματικών. Την ίδια χρονιά κατά μέσο όρο μια «έξυπνη συσκευή» παρήγαγε 14 φορές περισσότερα δεδομένα από οποιαδήποτε άλλη συσκευή [C19].



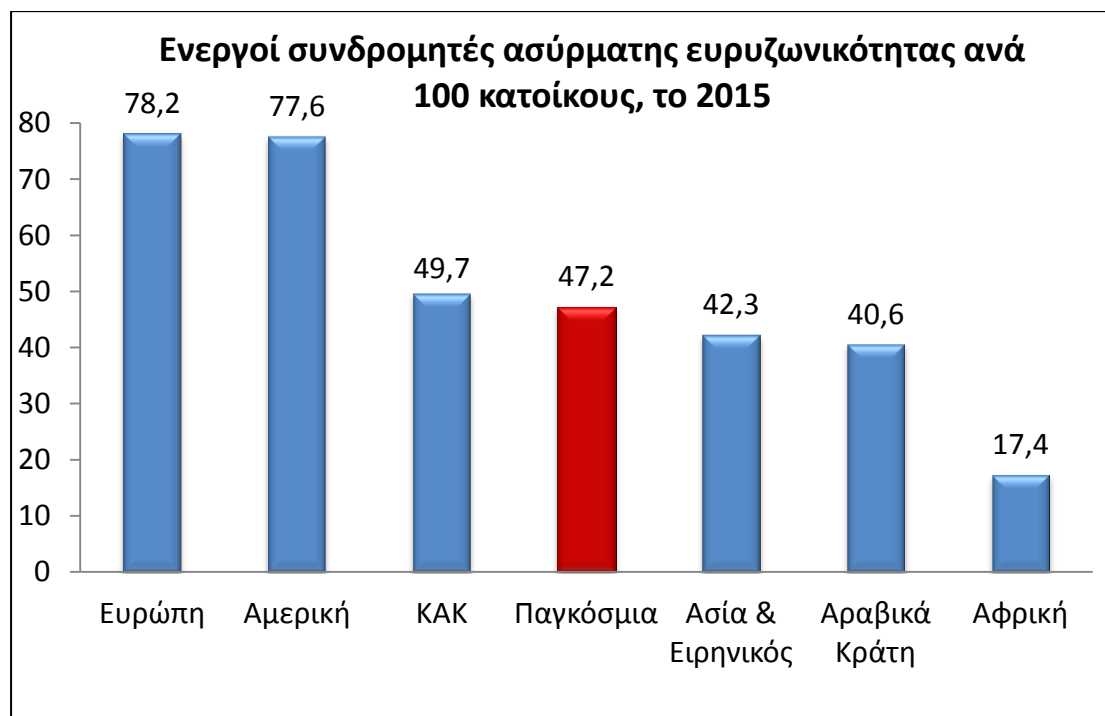
Σχήμα 1.2: Βαθμός διείσδυσης κινητών χρηστών σε ασύρματες ευρυζωνικές υπηρεσίες. Πηγή: ITU World Telecommunication /ICT Indicators database

Παρότι ο βαθμός διείσδυσης των ασύρματων ευρυζωνικών υπηρεσιών στις αναπτυγμένες χώρες αγγίζει το 87% (Σχήμα 1.2), παγκόσμια δεν έχει ξεπεράσει το 50%. Στις αναπτυγμένες χώρες τα προβλήματα που προκύπτουν από τη πλευρά του επενδυτικού ενδιαφέροντος των παρόχων είναι η βελτίωση της Ποιότητας Υπηρεσιών των χρηστών και η προσφορά νέων υπηρεσιών [GSM15]. Σύμφωνα με την τελευταία αναφορά της Cisco, η ζήτηση σε ρυθμούς μετάδοσης αναμένεται να αυξηθεί σε απροσδόκητα επίπεδα το 2020. Η Cisco προβλέπει ότι από το 2015 έως το 2020 η κίνηση δεδομένων στα κινητά τερματικά παγκόσμια θα οχταπλασιαστεί [C19].

Στις αναπτυσσόμενες χώρες η σοβαρή έλλειψη υποδομών του δικτύου ηλεκτρικού ρεύματος και η έλλειψη ενσύρματου δικτύου επικοινωνιών προσφέρει νέες ευκαιρίες για μαζικές επενδύσεις στους παρόχους των τηλεπικοινωνιών, ειδικά στην Ασία και τον Ειρηνικό, όπου ο βαθμός διείσδυσης της ασύρματης ευρυζωνικότητας για το 2015 δεν ξεπερνάει το 43% (Σχήμα 1.3).

Η εκρηκτική αύξηση της ζήτησης σε κίνηση δεδομένων προσελκύει το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας και της βιομηχανίας στη μελέτη και αξιοποίηση τεχνικών βελτιστοποίησης των παραμέτρων των ευρυζωνικών συστημάτων

ασύρματης δικτύωσης. Το εύρος ζώνης πρέπει να αξιοποιηθεί όσο το δυνατόν καλύτερα με μεθόδους και τεχνικές που θα είναι άμεσα εφαρμόσιμες στις υπαρκτές διαδικτυακές δομές από τους παρόχους χωρίς σημαντικό επιπρόσθετο κόστος επενδύσεων σε πάγιο κεφάλαιο, αυξάνοντας σημαντικά τη ρυθμαπόδοση των χρηστών, καλύπτοντας τη αυξανόμενη ζήτηση.



Σχήμα 1.3: Βαθμός διείσδυσης κινητών χρηστών σε ασύρματες ευρυζωνικές υπηρεσίες. Πηγή: ITU World Telecommunication /ICT Indicators database

1.1.2 Ευκαιριακοί Χρονοπρογραμματιστές

Η νέα γενιά κυψελωτών δικτύων προσφέρει νέες υπηρεσίες με υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης πακέτων. Από την εποχή που οι πάροχοι άρχισαν να εγκαθιστούν την αρχιτεκτονική High Data Rate (HDR) [BBG⁺00] στην Αμερική, και του High Speed Packet Access (HSPA) στην Ευρώπη [PDF⁺01], το σύστημα του χρονοπρογραμματισμού μετάδοσης των ροών δεδομένων των χρηστών τόσο στην ανερχόμενη (uplink), όσο και στην κατερχόμενη ζεύξη (downlink) μεταφέρεται στους Σταθμούς Βάσης (ΣΒ) των κυψελωτών συστημάτων. Ο στόχος ήταν η μείωση της καθυστέρησης των πακέτων. Με την μεταφορά του συστήματος χρονοπρογραμματισμού στο ΣΒ περιορίστηκε σημαντικά η ελάχιστη χρονοθυρίδα για την επιλογή του χρονοπρογραμματιστή. Συγκεκριμένα στο HDR η ελάχιστη χροθυρίδα έχει διάρκεια 1.67 msec ενώ στο HSDPA 0.67 mec [B04]. Έτσι δόθηκε η δυνατότητα της αξιοποίησης των μεταβαλλόμενων χαρακτηριστικών του ασύρματου καναλιού λόγω ταχέων διαλείψεων που επιφέρει κέρδος χρονοπρογραμματισμού έναντι ενός αλγορίθμου Round Robin που μοιράζει τυχαία το κανάλι ανάμεσα στους χρήστες [VTLO2]. Η νέα αυτή αρχιτεκτονική έδωσε τη δυνατότητα στη διατύπωση νέων αλγορίθμων ευκαιριακού χρονοπρογραμματισμού.

Η νέα γενιά που βασίζεται στην αρχιτεκτονική LTE-A (Long Term Evolution-Advanced) αξιοποιεί τα χαρακτηριστικά της τεχνικής πολυπλεξίας OFDMA για την παραπέρα αύξηση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων. Αν και πληθώρα αλγορίθμων έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία [AV13], οι περισσότεροι δεν παρουσιάζουν εύρωστα χαρακτηριστικά. Η επίδοσή τους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την κατανομή της κίνησης των δεδομένων και επιπλέον παρουσιάζουν αυξημένη πολυπλοκότητα στην υλοποίησή τους, πράγμα που συνιστά σοβαρό αντικίνητρο για την εφαρμογή τους.

Στις περισσότερες δημοσιεύσεις στη βιβλιογραφία, η εξέταση της επίδοσης των προτεινόμενων συστημάτων χρονοπρογραμματισμού πραγματοποιείται σε συνθήκες σταθερού πληθυσμού ενεργών χρηστών. Η αξιολόγηση της επίδοσής τους σε μεταβαλλόμενους πληθυσμούς ενεργών χρηστών και η σύγκρισή τους με απλούστερα σχήματα χρονοπρογραμματισμού αποτελεί ακόμη και σήμερα ανοιχτό πρόβλημα.

1.1.3 Ενεργειακή Επίδοση – Πράσινα Δίκτυα

Η νέα γενιά κινητών τερματικών (KT) όπως τα smart phones με μικρό μέγεθος συσκευής διαθέτουν περιορισμένους ενεργειακούς πόρους. Καθώς τα νέα πρότυπα επικοινωνιών προδιαγράφουν και επιβάλλουν αυξημένη χωρητικότητα στις ασύρματες ζεύξεις, οδηγούν αναπόφευκτα σε σημαντική αύξηση της μεταδιδόμενης ισχύος για την μεταφορά ροών μεγαλύτερων ποσοτήτων δεδομένων με μεταβαλλόμενα μεγέθη, περιορίζοντας τη χρονική διάρκεια της μπαταρίας του KT [GHY⁺09]. Επιπρόσθετα, νέα KT προσελκύουν το ενδιαφέρον του αγοραστικού κοινού επειδή προσφέρουν δημοφιλείς εφαρμογές όπως παιχνίδια ή εφαρμογές επίγνωσης τοποθεσίας (location-aware) που αυξάνουν την υπολογιστική ισχύ στη CPU του KT, αυξάνοντας σημαντικά στο σταθερό κομμάτι της καταναλισκόμενης ισχύος, επηρεάζοντας τελικά το κύκλο λειτουργίας της μετάδοσης των κινητών χρηστών. Σε συνηθισμένες συνθήκες η συνεισφορά της κατανάλωσης στη CPU μπορεί να φτάσει το 36% της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης στο κινητό τερματικό [AMI⁺07]. Επομένως ο σχεδιασμός πρωτοκόλλων μετάδοσης που λαμβάνουν υπόψη τους την ενεργειακή επίδοση των χρηστών παίζει σημαντικό ρόλο στα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα και προσελκύει το ενδιαφέρον τόσο της βιομηχανίας, όσο και της επιστημονικής κοινότητας.

Ταυτόχρονα, η κατασκευή των κινητών συσκευών, καθώς και η διάρκεια του κύκλου ζωής και λειτουργίας του δικτύου, δηλαδή ο κύκλος λειτουργίας των Σταθμών Βάσης, έχουν σημαντική συνεισφορά στο παγκόσμιο αποτύπωμα του άνθρακα [EL04]. Το συνολικό αποτύπωμα άνθρακα των κινητών επικοινωνιών αναμένεται να αυξηθεί γραμμικά μέχρι το 2020 με ετήσια αύξηση ίση με 11 Mto CO_{2e}, μια αύξηση που ισοδυναμεί με τις ετήσιες εκπομπές 2,5 εκατομμυρίων νοικοκυριών της Ευρωπαϊκής Ένωσης [FFM⁺11].

Επιπλέον, η αναμενόμενη αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας δημιουργεί κίνητρα για την ενεργειακά αποδοτική λειτουργία των δικτύων και τη μείωση των δαπανών λειτουργικού κόστους της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας των Σταθμών Βάσης στις αναπτυσσόμενες χώρες [FFM⁺11]. Σε παγκόσμιο επίπεδο η συνολική κατανάλωση ενέργειας αναμένεται να αυξηθεί από 49 TWh το 2007 έως 109 TWh το 2020, χωρίς τη χρήση των πράσινων τεχνολογιών, π.χ. ηλιακής ή άλλων εναλλακτικών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που χρειάζονται επιπρόσθετες δαπάνες κεφαλαίου. Στις αναπτυσσόμενες χώρες, ή ύπαρξη πυκνοκατοικημένων περιοχών που βρίσκονται

εκτός δικτύου παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, οδηγεί στη χρήση γεννητριών ντίζελ για τους Σταθμούς Βάσης, καθιστώντας την ηλιακή ενέργεια μια οικονομικά αποδοτική και αποδεκτή δαπάνη [FFM⁺11], [GSM09].

1.1.4 Σύγχρονες Τεχνικές Εξουδετέρωσης Παρεμβολών

Η διαστασιοποίηση των Κυψελωτών Δικτύων στο μέλλον προσανατολίζεται στρατηγικά στην αξιοποίηση κυψελών μικρού μεγέθους (small cells) με μεγάλη χωρητικότητα και μακρο-κυψελωτών συστημάτων που θα προσφέρουν κάλυψη στους χρήστες με μεγάλη κινητικότητα. Στη περίπτωση των χρηστών με μεγάλη κινητικότητα, η επιβάρυνση (overhead) από τις πολυάριθμες οριζόντιες μεταπομπές (horizontal handovers) στο φορτίο του δικτύου των μικρών κυψελών θα ήταν καταστροφική για τη συνολική επίδοση του συστήματος. Οι μικρές κυψέλες προσφέρουν τεράστια χωρητικότητα ανά μονάδα επιφάνειας σε τέτοιο βαθμό που οι παρεμβολές στους «απομακρυσμένους» χρήστες, τους χρήστες που επηρεάζονται κατά κύριο λόγο από τις παρεμβολές των ομοκαναλικών κυψελών, κρίνονται αμελητέες μπροστά στην αξιοποίηση στο έπακρο του ίδιου εύρους ζώνης σε όλο το δίκτυο των μικρών κυψελών. Συν τοις άλλοις, ο διαμοιρασμός της συνολικής κίνησης δεδομένων σε πολύ περισσότερους εξυπηρετητές αναμένεται να οδηγήσει στην αισθητή μείωση των παρεμβολών που συναντά ένας ενεργός χρήστης στη διάρκεια του χρόνου εξυπηρέτησης της ροής δεδομένων του [And07]. Για αυτούς τους λόγους κρίνεται σκόπιμο να επαναχρησιμοποιείται το ίδιο εύρος ζώνης από το δίκτυο των μικρών κυψελών [BPN⁺09].

Στη περίπτωση, των μακρο-κυψελών, η κάλυψη και η ρυθμαπόδοση των «απομακρυσμένων» χρηστών είναι μετρικές πρώτης προτεραιότητας και αναβαθμισμένου ενδιαφέροντος λόγω ακριβώς του προορισμού της αξιοποίησης των μακρο-κυψελών στο μελλοντικό δίκτυο. Η νέα τεχνολογία πρόσβασης στα Ευρυζωνικά Δίκτυα 4ης Γενιάς και συγκεκριμένα η αξιοποίηση κυψελών με τεχνική πολυπλεξίας και διαμόρφωσης του OFDMA προσφέρουν νέες τεχνικές εξουδετέρωσης των παρεμβολών (cancellation interference techniques), αντισταθμίζοντας τη μειωμένη επαναχρησιμοποίηση συχνότητας και τη μείωση της συνολικής χωρητικότητας της κυψέλης έναντι των στατικών σχημάτων

επαναχρησιμοποίησης συχνότητας, με τη σημαντική μείωση των παρεμβολών στους «απομακρυσμένους» χρήστες και εν τέλει με τη σημαντική αύξηση της ρυθμαπόδοσής τους. [BPN⁺09].

1.2 Σχετική Βιβλιογραφία

1.2.1 Στοχαστικά Μοντέλα για την επίδοση Ευκαιριακών Χρονοπρογραμματιστών

Οι ευκαιριακοί χρονοπρογραμματιστές είναι ένα βασικό στοιχείο του Επιπέδου Πρόσβασης στο Μέσο των σύγχρονων ασύρματων συστημάτων πρόσβασης [B04]. «Άπληστοι» (greedy) χρονοπρογραμματιστές, όπως ο Μεγίστου SNR, που έχουν ως κριτήριο επιλογής χρήστη το στιγμιαίο SNR, μεγιστοποιούν το συνολικό ρυθμό εξυπηρέτησης του συστήματος αλλά την ίδια στιγμή οδηγούν σε μειωμένους ρυθμούς εξυπηρέτησης τους «απομακρυσμένους» χρήστες, χρήστες με μεγάλη απόσταση από το Σταθμό Βάσης (ΣΒ). Μια αντισταθμιστική σχέση μεταξύ του μέγιστου συνολικού ρυθμού εξυπηρέτησης και της δικαιοσύνης στην εξυπηρέτηση των χρηστών μπορεί να πραγματοποιηθεί, εισάγοντας κατάλληλα βάρη στο κριτήριο επιλογής του χρήστη. Ένας από τους γνωστότερους αλγόριθμους που πραγματοποιούν αυτή την αντισταθμιστική σχέση είναι ο Αναλογικά Δίκαιος Αλγόριθμος (ΑΔ) (στη διεθνή βιβλιογραφία: Proportional Fair) [JPP00], [H00].

Αρκετές δημοσιεύσεις, σταχυολογούμε τις [H00], [CB07], [BJ04], [AML⁺04], [LL08], [YA06], εξετάζουν αναλυτικά στοχαστικά μοντέλα για την αξιολόγηση της επίδοσης του ρυθμού εξυπηρέτησης χρηστών σε ασύρματο κυψελωτό δίκτυο που εξυπηρετούνται από έναν Αναλογικά Δίκαιο αλγόριθμο. Παρά τον όγκο αυτής της δουλειάς στη βιβλιογραφία, αρκετές πτυχές της επίδοσης του ΑΔ παραμένουν ανοιχτές προς εξέταση, συγκεκριμένα σε σύνδεση με τις ετερογενείς συνθήκες διάδοσης που παρουσιάζουν οι χρήστες μια κυψέλης, ειδικά όταν οι αποστάσεις τους από το ΣΒ ποικίλλουν. Επιπλέον, η επίδραση της Προσαρμοσμένης Διαμόρφωσης και Κωδικοποίησης (Adaptive Modulation & Coding) στην επίδοση του ΑΔ

αλγόριθμοι και συγκεκριμένα στο κέρδος χρονοπρογραμματισμού δεν έχει μελετηθεί διεξοδικά.

Όσον αφορά τις συνθήκες διάδοσης οι δημοσιεύσεις [CB07], [BJ04], [AML⁺04], εξετάζουν το συνολικό ρυθμό εξυπηρέτησης της κυψέλης, χωρίς να εμβαθύνουν στη περίπτωση χρηστών με διαφορετικές αποστάσεις από το ΣΒ. Το περιεχόμενο της δημοσίευσης [YA06] είναι παρόμοιο με τη διαφορά ότι ασχολείται επιπρόσθετα με την συσχέτιση του στιγμιαίου SNR στο χρόνο. Οι εργασίες [H00] και [LL08] λαμβάνουν υπόψη τους την ετερογένεια συνθηκών διάδοσης, αλλά η [LL08] το κάνει αυτό μέσω μιας προσέγγισης με κανονική κατανομή του CDF του στιγμιαίου ρυθμού μετάδοσης, κατάλληλης μόνο για Rayleigh κατανομή διαλείψεων, ενώ η [H00] βασίζεται στη παραδοχή ότι ο στιγμιαίος ρυθμός μετάδοσης είναι γραμμική συνάρτηση του στιγμιαίου SNR, κάτι που ισχύει μόνο για χρήστες με μεγάλες αποστάσεις από το ΣΒ, που υφίστανται ταυτόχρονα ισχυρές παρεμβολές.

Οι αλγόριθμοι που προτάθηκαν, μελετήθηκαν εκτενώς στα πλαίσια στατικών πληθυσμών ροών. Η υπόθεση στατικού πληθυσμού ροών μπορεί να οδηγήσει σε ωφέλιμα συμπεράσματα όσον αφορά την βραχυπρόθεσμη, στιγμιαία επίδοση και συμπεριφορά ενός δικτύου. Δεν είναι όμως πάντα εφικτή η γενίκευση των αποτελεσμάτων αυτών στην μακροπρόθεσμη συμπεριφορά του Δικτύου. Η ανάλυση της μακροπρόθεσμης συμπεριφοράς και επίδοσης των δικτύων είναι απαραίτητη για τον ορθό σχεδιασμό τους. Η αλληλεπίδραση του Επιπέδου Ζεύξης δεδομένων και των ανώτερων επιπέδων της στοίβας των πρωτοκόλλων έχει μεγάλη σημασία στην μακροπρόθεσμη επίδοση των δικτύων [BH07].

1.2.2 Εύρωστα μοντέλα εξυπηρέτησης

Πάνω από 80 χρόνια οι μηχανικοί των τηλεπικοινωνιών χρησιμοποιούν τον τύπο του Erlang (Erlang-B) που παρέχει τη πιθανότητα αποκλεισμού κλήσεων για την διαστασιοποίηση των δικτύων μεταγωγής κυκλώματος σε ένα σύστημα όπου κάθε κλήση βρίσκει το δικό της εξυπηρετητή. Το σύνολο των εξυπηρετητών είναι πεπερασμένο. Το μοντέλο του Erlang βασίζεται αποκλειστικά στην ρεαλιστική παραδοχή της κατανομής αφίξεων ανεξάρτητων κλήσεων ως Poisson, για συνθήκες πολλαπλών (προσεγγιστικά άπειρων) ανεξάρτητων χρηστών με μικρή πιθανότητα άφιξης κλίσης σε κάθε χρήστη. Η μακροβιότητα της τεχνικής βασίζεται στο γεγονός

ότι ο τύπος του Erlang δεν εξαρτάται από την κατανομή της κίνησης δεδομένων των χρηστών. Το μοντέλο του Erlang είναι ένα εύρωστο μοντέλο απωλειών που εξαρτάται μόνο από το μέσο μέγεθος του χρόνου εξυπηρέτησης της κλήσης [BP02].

Ο Erlang είχε κατανοήσει τη μεγάλη σημασία των μαρκοβιανών μοντέλων στην εύρεση κλειστών και απλών τύπων που διευκολύνουν αφάνταστα τη μελέτη των βασικών παραμέτρων του συνολικού δικτύου. Η βασική ιδιότητα του μαρκοβιανού μοντέλου: η τιμή της τυχαίας μεταβλητής στο μέλλον εξαρτάται αποκλειστικά από την τιμή της στο παρόν, οδηγεί σε απλές εξισώσεις ισορροπίας και σε τελικούς τύπους με τη βοήθεια της εκθετικής κατανομής [K76]. Ο Cox απέδειξε ότι οποιαδήποτε κατανομή του χρόνου εξυπηρέτησης με μετασχηματισμό Laplace ρητή συνάρτηση μπορεί να αναλυθεί με τη μέθοδο των σταδίων σε ανεξάρτητους κόμβους ενός μαρκοβιανού δικτύου με εκθετικό χρόνο εξυπηρέτησης σε κάθε κόμβο (μέθοδος των σταδίων) [C55]. Από τη θεμελιώδη δουλειά των Jackson [Jac63] καθώς και Gordon και Newell [GN67], προκύπτει ότι το σύνθετο αυτό σύστημα μπορεί μοντελοποιηθεί ως ένας πολυδιάστατο μαρκοβιανό σύστημα με την συνδυασμένη (joint) κατανομή των ενεργών χρηστών να παίρνει μορφή γινομένου των επί μέρους (marginal) κατανομών του μοντέλου απωλειών Erlang των ενεργών χρηστών των ξεχωριστών κόμβων του δικτύου. Αθροίζοντας πάνω σε όλους τους δυνατούς συνδυασμούς χρηστών ανά κόμβο, καταλήγουμε σύμφωνα με το πολυωνυμικό θεώρημα στην κατανομή του μοντέλου απωλειών Erlang του συνόλου των ενεργών χρηστών με μέσο χρόνο εξυπηρέτησης το άθροισμα των μέσων χρόνων εξυπηρέτησης όλων των κόμβων. Για την μεταγωγή κυκλώματος, λοιπόν, αρκεί η εύρεση του μέσου χρόνου εξυπηρέτησης στο δίκτυο των σταδίων της κατανομής του Cox. Ισοδύναμα, αρκεί η εύρεση του μέσου χρόνου εξυπηρέτησης ροών από στατιστική ανάλυση της κίνησης δεδομένων σε μηνιαία ή χρονική βάση και τη εισαγωγή του μέσου χρόνου εξυπηρέτησης στο μαρκοβιανό μοντέλο, σαν να ακολουθούμε κατανομή εκθετική!

Τα πρώτα δίκτυα υπολογιστών βασίζονταν σε ροές δεδομένων με πολύ μικρό μέγεθος ταυτισμένες με ξεχωριστά πακέτα. Η δρομολόγηση και εξυπηρέτηση βασιζόταν λοιπόν σε απλά σχήματα ουρών αναμονής FCFS. Στη γενική περίπτωση η εφαρμογή του μοντέλου Jackson εξαρτάται από την κατανομή του μεγέθους των πακέτων γιατί το σύστημα εξυπηρέτησης FCFS συσχετίζει τους χρόνους εξυπηρέτησης σε διαδοχικούς κόμβους. Ο ρυθμός εξυπηρέτησης στις ουρές αναμονής των κόμβων του δικτύου εξαρτάται από το πληθυσμό και το μέγεθος των ροών σε

κάθε κόμβο κάθε στιγμή. Ο Kleinrock εισήγαγε πρώτος μια προσέγγιση ανεξαρτησίας για την εύρεση της καθυστέρησης του πακέτου σε δίκτυο κόμβων με συνθήκες μεγάλου φορτίου κίνησης, αξιοποιώντας το μοντέλο του Jackson, χωρίς να υπολογίζει τα στάδια του δικτύου του Cox, κάτι που είναι υπολογιστικά απαγορευτικό για ροές με διαφορετικές κατανομές εξυπηρέτησης και δίκτυα με μεγάλους κόμβους, θεωρώντας ότι κάθε κόμβος είναι ένα ανεξάρτητο M/M/1 σύστημα αναμονής [K64]. Ο Kleinrock διαπίστωσε ότι η προσέγγιση ήταν καλή στην περίπτωση που πακέτα από διαφορετικές αρτηρίες συσσωρεύονταν στους κεντρικούς κόμβους εξυπηρέτησης του δικτύου.

Η διόγκωση των μεγεθών των ροών, λόγω της ανάπτυξης των εφαρμογών των δικτύων και την υπολογιστών, οδήγησε στην εφαρμογή συστημάτων χρονοπρογραμματισμού με εφαρμογή TDMA, με τον βασικό αλγόριθμο χρονοπρογραμματισμού τον Round Robin (RR) που εξυπηρετεί εκ περιτροπής, ή τυχαία τις ροές δεδομένων που πλέον αποτελούνται από αρκετά πακέτα. Ο Kleinrock απέδειξε στη [K67], ότι στη περίπτωση που ο χρονοπρογραμματισμός εκτελείται σε κάθε χρονοθυρίδα του TDMA και ο χρόνος εξυπηρέτησης μιας ροής δεδομένων είναι ασύγκριτα μεγαλύτερος από τη διάρκεια της χροθυρίδας, η επίδοση του RR μπορεί να μοντελοποιηθεί από το εύρωστο μοντέλο εξυπηρέτησης Μερισμού του Εξυπηρετητή (Processor Sharing). Στο μοντέλο του Μερισμού του Εξυπηρετητή, ο εξυπηρετητής εξυπηρετεί στιγμιαία κάθε ροή και κατανομή των ενεργών χρηστών εξαρτάται μόνο από τη μέσο μέγεθος της ροής.

Η συνέχεια έρχεται με το Internet και την εμφάνιση των ελαστικών ροών δεδομένων. Ορίζουμε ως ελαστικές τις ροές δεδομένων που αντιστοιχούν σε υπηρεσίες που δεν έχουν απαιτήσεις ποιότητας σταθερού μέσου ρυθμού μετάδοσης. Αν οι συνθήκες μετάδοσης είναι ευνοϊκές, η χωρητικότητα των ζεύξεων μεγάλη, ο ρυθμός μετάδοσης των ελαστικών ροών μπορεί να αυξηθεί. Στις ελαστικές ροές δεδομένων κατατάσσονται εξορισμού υπηρεσίες μεταφοράς αρχείων (FTP) και ανάγνωσης ιστού (WWW) που συνδέονται με πρωτόκολλο μεταφοράς και ελέγχου της κίνησης των ροών TCP [R01]. Οι Roberts και Masoullie είναι οι πρώτοι που επαναφέρουν το εύρωστο μοντέλο του Μερισμού του Εξυπηρετητή για τον υπολογισμό της ρυθμαπόδοσης των ελαστικών ροών στο Internet [MJ99]. Στη συνέχεια οι Bonald, Proutiere, Roberts κ.α. έδειξαν η εξυπηρέτηση του TCP στη φάση λειτουργίας αποφυγής συμφόρησης (congestion avoidance) μπορεί να

μοντελοποιηθεί με τη χρήση του μοντέλου Μερισμού Εξυπηρετητή πολλαπλών κλάσεων για ροές με διαφορετικά μεγέθη [FBP⁺01].

Με την ανάπτυξη των ασύρματων δικτύων και ειδικά με τη καθιέρωση του χρονοπρογραμματισμού στο ΣΒ με το HDR, οι Bonald, Proutiere επανέφεραν στην [BP03] το μοντέλο Μερισμού του Εξυπηρετητή για τον RR στην κατερχόμενη ζεύξη. Παράλληλα ο Borst έδειξε ότι ο Αναλογικά Δίκαιος Αλγόριθμος μπορεί να μοντελοποιηθεί με το μοντέλο Μερισμού του Εξυπηρετητή [SB05]. Από κοινού, οι Bonald, Borst, Proutiere έδειξαν ότι οι τιμές της ρυθμαπόδοσης σύμφωνα με το ME είναι συντηρητικές εκτιμήσεις της ρυθμαπόδοσης ενός κινητού χρήστη με μέτρια έως χαμηλή ταχύτητα στη κυψέλη [BBP04]. Το αποτέλεσμα αυτό είναι σημαντικό γιατί αποσυνδέει την επίδραση της κινητικότητας των χρηστών από την εξέταση της ρυθμαπόδοσης των χρηστών σε συστήματα ευκαιριακού χρονοπρογραμματισμού.

Σχετικά πρόσφατα, οι Γιαννουλάκης, Κοντοβασίλης, Μήτρου πρότειναν στην [GK12] νέους αλγορίθμους χρονοπρογραμματισμού που αξιοποιούν τα δυναμικά χαρακτηριστικά αναμονής και εξυπηρέτησης των ροών στα ανώτερα επίπεδα της στοίβας των πρωτοκόλλων, εφαρμόζοντας πολιτικές προτεραιότητας εξυπηρέτησης στους χρήστες της κυψέλης. Η ανάλυση στην [GK12] βασίζεται στο Μοντέλο Μερισμού του Εξυπηρετητή. Αξιοποιεί το διαχωρισμό χρονικής κλίμακας ανάμεσα σε και αρκετά «κοντινούς» και αρκετά «απομακρυσμένους» χρήστες, καταλήγοντας σε ικανοποιητικά φράγματα επίδοσης για την κατανομή του χρόνου εξυπηρέτησης των ροών.

Το μοντέλο Μερισμού του Εξυπηρετητή μπορεί να εφαρμοστεί σε μια πληθώρα εφαρμογών στα ασύρματα δίκτυα, εξετάζοντας την επίδοσή τους μακροπρόθεσμα, όταν οι ροές δεδομένων μεταβάλλονται δυναμικά. Μια σειρά από προβλήματα βέλτιστης δέσμευσης πόρων, προσαρμογής ζεύξης μπορούν να μοντελοποιηθούν με αυτόν τον τρόπο, παρέχοντας σημαντικά συμπεράσματα για το σχεδιασμό αποδοτικών πρωτοκόλλων στα σύγχρονα ευρυζωνικά ασύρματα δίκτυα.

1.2.3 Ενεργειακή Επίδοση

Μια σειρά από δημοσιεύσεις στη βιβλιογραφία, σταχυολογούμε τις [SGB05], [MHL⁺08], [MHL10], [JC14] προτείνουν πρωτόκολλα βέλτιστης προσαρμογής ζεύξης, εξετάζοντας τη συναρτησιακή σχέση της ενεργειακής επίδοσης στο κινητό τερματικό με το μέσο ρυθμό ζεύξης, λαμβάνοντας υπόψη τους το σταθερό κομμάτι της ενεργειακής κατανάλωσης, κατά κύριο λόγο στον ενισχυτή του πομπού μετάδοσης του κινητού τερματικού. Οι συγγραφείς προτείνουν πρωτόκολλα προσαρμογής ζεύξης που μεγιστοποιούν παραλλαγμένες εκδοχές της βασικής αντικειμενικής συνάρτησης της ενεργειακής επίδοσης: του λόγου των μεταδιδόμενων bits πληροφορίας προς τη συνολική κατανάλωση ενέργειας σε μονάδα Joule. Στην [SGB05] λαμβάνονται υπόψη τα χαρακτηριστικά της διαμόρφωσης, στη [MHL⁺08] επιχειρείται η βέλτιστη δέσμευση υποφερουσών συχνοτήτων του OFDMA ανά χρήστη και στη [MHL10] εξετάζεται η επίδραση της επιλεκτικότητας συχνότητας του ασύρματου καναλιού. Οι χρήστες της κυψέλης κατηγοριοποιούνται συνήθως σύμφωνα με συνθήκες διάδοσης στην ανερχόμενη ζεύξη, κατά κανόνα σύμφωνα με την απόστασή τους από το Σταθμό Βάσης, σε «κοντινούς» και «απομακρυσμένους» χρήστες. Παρόλα αυτά οι δουλειές αυτές δεν παρέχουν αναλυτικές σχέσεις με απλούς όρους ώστε να παρέχουν σημαντική διαίσθηση στην επίδραση των συνθηκών μετάδοσης, και συγκεκριμένα της απόστασης από το ΣΒ και της κατανομής των ταχέων διαλείψεων στην ενεργειακή επίδοση.

Σε όλες τις παραπάνω δημοσιεύσεις η επίδραση του Επιπέδου Πρόσβασης στο Μέσο δεν λαμβάνεται υπόψη στην ενεργειακή επίδοση. Στην [YJB11], η επίδραση των συστημάτων ευκαιριακού χρονοπρογραμματισμού λαμβάνεται υπόψη στην σχεδίαση ενεργειακά αποδοτικών συστημάτων, εξετάζοντας όμως τη μείωση ενεργειακής κατανάλωσης λόγω της ορθής λήψης της κατάστασης καναλιού (channel state information) στο κανάλι ανατροφοδότησης, εφαρμόζοντας ένα περιορισμό στον μέγιστο επιτρεπόμενο αριθμό ενεργών χρηστών. Και εδώ οι συγγραφείς εξετάζουν όπως και οι προκάτοχοί τους το πρόβλημα σε συνθήκες σταθερού πληθυσμού ενεργών χρηστών.

Η επέκταση της αντικειμενικής συνάρτησης προκειμένου να ενσωματώνει την επίδραση των ανωτέρων επιπέδων της στοίβας των πρωτοκόλλων, απαιτεί τη χρήση μοντέλων εξυπηρέτησης ροών. Με αυτό τον τρόπο μοντελοποιείται η επίδοση του

συστήματος σε συνθήκες μεταβαλλόμενου πληθυσμού ανεξάρτητων ενεργών χρηστών που εμφανίζονται στο σύστημα ως ανεξάρτητες ροές στα ανώτερα επίπεδα της στοίβας των πρωτοκόλλων. Το εύρωστο μοντέλο εξυπηρέτησης του Μερισμού Εξυπηρετητή στο οποίο αναφερθήκαμε στην Ενότητα (§1.2.2) επιτρέπει την σύνδεση της δραστηριότητας κινητών τερματικών και εν τέλει της ενεργειακής επίδοσής τους με τα χαρακτηριστικά των ροών δεδομένων που εκπέμπουν στα ανώτερα επίπεδα της στοίβας των πρωτοκόλλων.

Τέλος, στις δημοσιεύσεις [WWZ⁺12] και [WZN13] παρουσιάζονται σχήματα μετάδοσης για την κατερχόμενη ζεύξη των κυψελωτών δικτύων που μειώνουν την συνολική κατανάλωση ισχύος στο Σταθμό Βάσης, αξιοποιώντας το μοντέλο του Μερισμού Εξυπηρετητή. Οι συγκεκριμένες δημοσιεύσεις προτείνουν αλγορίθμους προσαρμογής ισχύος σύμφωνα με τον αριθμό των ενεργών χρηστών στο σύστημα και το φορτίο του συστήματος στην κατερχόμενη ζεύξη, αξιοποιώντας έναν μοντέλο ενεργειακής κατανάλωσης “on-off” στο ΣΒ, για διαφορετικές τιμές κατανάλωσης ισχύος στην κατάσταση “on” και “off”. Οι συγκεκριμένες δημοσιεύσεις δεν περιλαμβάνουν την επίδραση του Αναλογικά Δίκαιου Αλγορίθμου στη κατερχόμενη ζεύξη.

1.2.4 Κλασματική Επαναχρησιμοποίηση Συχνότητας

Η τεχνική της Κλασματικής Επαναχρησιμοποίησης Συχνότητας (Fractional Frequency Reuse (FFR)) είναι μια από τις βασικές τεχνικές εξουδετέρωσης παρεμβολών που προσφέρει η τεχνική πολυπλεξίας και διαμόρφωσης του OFDMA. Οι κοντινοί χρήστες όλων των κυψελών, οι χρήστες που υφίστανται κατά κανόνα τη μικρότερη επιβάρυνση από τις παρεμβολές, διατηρούν το ίδιο εύρος ζώνης, ενώ αντίθετα οι «απομακρυσμένοι» χρήστες πραγματοποιούν σχήμα επαναχρησιμοποίησης-3. Η Κλασματική Επαναχρησιμοποίηση Συχνότητας επιφέρει πολύ μεγαλύτερη ρυθμαπόδοση στους απομακρυσμένους χρήστες από το στατικό σχήμα επαναχρησιμοποίησης-3 [NGG⁺11]. Το πρόβλημα της Κλασματικής Επαναχρησιμοποίησης Συχνότητας καταλήγει στη βέλτιστη διαμέριση του εύρους ζώνης σε «κοντινούς» και «απομακρυσμένους» χρήστες, μεγιστοποιώντας σχετικές

μετρικές, π.χ. την κάλυψη των «απομακρυσμένων» χρηστών, το μέσο ρυθμό μετάδοσης τους, τη συνολική χωρητικότητα της κυψέλης, μελετώντας κάθε φορά την αντισταθμιστική σχέση που επιφέρει η συγκεκριμένη διαμέριση του διαθέσιμου εύρους ζώνης, ανάμεσα στη συνολική χωρητικότητα της κυψέλης και στην επίδοση του «απομακρυσμένου» χρήστη.

Εδώ εστιάζουμε σε προβλήματα βέλτιστης διαμέρισης του εύρους ζώνης που μεγιστοποιούν τη χωρητικότητα της κυψέλης. Οι δημοσιεύσεις [ZCX12], [BH09], [CR13] εξετάζουν το πρόβλημα προτείνοντας διαφορετικές μετρικές για τη χωρητικότητα. Στη [ZCX12] η συνολική χωρητικότητα ορίζεται ως η μέση τιμή των κέντρων μάζας του ρυθμού εξυπηρέτησης των «απομακρυσμένων» και των «κοντινών» χρηστών σε συστήματα χρονοπρογραμματισμού Round Robin και Μεγίστου SINR. Όμως, αφενός μεν το βασικό σύστημα χρονοπρογραμματισμού του LTE είναι ο Αναλογικά Δίκαιος Αλγόριθμος, αφετέρου δε, η συγκεκριμένη μετρική για τη χωρητικότητα δεν εκφράζει τη μέγιστη ζήτηση της κίνησης σε ροές το δευτερόλεπτο που μπορεί να διεκπεραιώσει συνολικά το σύστημα σε συνθήκες ευστάθειας, πριν τον κορεσμό. Αντιθέτως, εκφράζει μια εκτίμηση του ρυθμού εξυπηρέτησης της κυψέλης βάσει δύο εκπροσώπων της κυψέλης, των κέντρων μαζών του ρυθμού εξυπηρέτησης δυο δακτυλίων της κυψέλης, με κάθε δακτύλιο να αντιστοιχεί στους «απομακρυσμένους» και τους «κοντινούς» χρήστες.

Στη δημοσίευση [BH09] η χωρητικότητα της κυψέλης ορίζεται ως το ελάχιστο των αρμονικών μέσων επιφανείας των ρυθμών μετάδοσης και των απομακρυσμένων και κοντινών χρηστών, με κάθε ομάδα χρηστών να σχετίζεται με έναν ανεξάρτητο θάλαμο εξυπηρέτησης. Ο χώρος της κυψέλης χωρίζεται σε δυο επιφάνειες δακτυλίων με ίσα εμβαδά, με κάθε δακτύλιο να σχετίζεται με ένα θάλαμο εξυπηρέτησης «απομακρυσμένων» ή «κοντινών» χρηστών. Η δημοσίευση [CR13] διατυπώνει ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης μεγίστου-ελαχίστου, εξετάζοντας τη μεγιστοποίηση της ελάχιστης τιμής του ρυθμού μετάδοσης όλων των χρηστών.

Η συνολική κατανάλωση ισχύος στην κατερχόμενη ζεύξη, αξιοποιώντας το μοντέλο “on-off” για την κατανάλωση ισχύος στο ΣΒ έχει μελετηθεί, όπως ήδη αναφέραμε Ενότητα (§1.2.3), για συστήματα με επαναχρησιμοποίηση συχνότητας-1 και για χρονοπρογραμματιστές RR. Το πρόβλημα της βελτιστοποίησης αλλάζει σημαντικά στην περίπτωση δυο ξεχωριστών θαλάμων εξυπηρέτησης που απαιτεί η Κλασματική Επαναχρησιμοποίηση Συχνότητας με σύστημα χρονοπρογραμματισμού Αναλογικά Δίκαιο Αλγόριθμο.

1.3 Συνεισφορά διατριβής

Η βασική συνεισφορά αυτής της διατριβής είναι η επανεξέταση του γενικού προβλήματος της δέσμευσης πόρων στην Νέα Γενιά Κυψελωτών Δικτύων, τόσο μεσοπρόθεσμα σε συνθήκες σταθερού πληθυσμού ενεργών χρηστών, όσο και μακροπρόθεσμα όταν ο πληθυσμός των ενεργών χρηστών μεταβάλλεται. Η αλληλεπίδραση των Επιπέδων της στοίβας των πρωτοκόλλων εμφανίζεται με απλότητα μέσω μιας γενικευμένης παραμέτρου που συγκεντρώνει τα βασικά χαρακτηριστικά των χαμηλότερων πρωτοκόλλων του Φυσικού Επιπέδου και του Επιπέδου Ζεύξης και οδηγεί σε απλές σχέσεις για βασικές μετρικές αξιολόγησης, όπως τη ρυθμαπόδοση ή την ενεργειακή επίδοση μακροπρόθεσμα. Το αναλυτικό αυτό πλαίσιο παρουσιάζει εύρωστα χαρακτηριστικά, αναλλοίωτα στη κατανομή της κίνησης των δεδομένων σε ανώτερα επίπεδα της στοίβας των πρωτοκόλλων, παρουσιάζοντας τη δυνατότητα επίλυσης σημαντικών προβλημάτων βελτιστοποίησης.

Συμπερασματικά τα πρωτότυπα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής είναι:

- Η σύνδεση του Επιπέδου Ζεύξης και του Φυσικού Επιπέδου στη μοντελοποίηση των τυχαίων χαρακτηριστικών του στιγμιαίου SNR και του στιγμιαίου ρυθμού ζεύξης του πλαισίου OFDMA λόγω ταχέων διαλείψεων.
- Η εύρεση πρωτότυπης αναλυτικής προσεγγιστικής σχέσης του μέσου ρυθμού ζεύξης που προσφέρει με απλότητα την επίδραση των διαλείψεων, μέσω μιας γενικευμένης παραμέτρου που αντανακλά τη συμπεριφορά της κανονικοποιημένης κατανομής διαλείψεων στην ουρά της.
- Η εύρεση πρωτότυπης αναλυτικής προσεγγιστικής σχέσης του κέρδους χρονοπρογραμματισμού του Αναλογικά Δίκαιου αλγόριθμου, αξιοποιώντας την γενικευμένη παράμετρο.
- Αξιοποιώντας τις δυο προσεγγιστικές σχέσεις οδηγούμαστε στο αποτέλεσμα ότι ο ρυθμός εξυπηρέτησης κάθε χρήστη σε σύστημα χρονοπρογραμματισμού Αναλογικά Δίκαιου Αλγορίθμου μεγιστοποιείται

όταν ελαχιστοποιείται το εύρος ζώνης της ελάχιστης δομικής μονάδας δέσμευσης εύρους ζώνης στο πλαίσιο OFDMA.

- Η εξέταση της ενεργειακής επίδοσης σε σύγχρονα κινητά τερματικά μέσω αλγορίθμων προσαρμογής ρυθμού ζεύξης. Λαμβάνεται υπόψη η σταθερή κατανάλωση ισχύος στο κύκλωμα του κινητού τερματικού, π.χ. κατανάλωση CPU ή οθόνης.
- Η εύρεση αναλυτικών σχέσεων με απλούς όρους για το βέλτιστο ρυθμό μετάδοσης και την αντίστοιχη ισχύ, που προσφέρουν σημαντική διαίσθηση στη κατανόηση των επίδρασης των χαρακτηριστικών διάδοσης και της σταθερής καταναλισκόμενης ισχύος. Σημαντική σε αυτή την κατεύθυνση είναι η συνεισφορά της πρωτότυπης προσεγγιστικής αναλυτικής σχέσης του μέσου ρυθμού ζεύξης.
- Η παρουσίαση νέου προτεινόμενου αλγόριθμου προσαρμογής ζεύξης που μεγιστοποιεί μεσοπρόθεσμα την ενεργειακή επίδοση χρήστη, λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση του πληθυσμού των ενεργών χρηστών στο ρυθμό ζεύξης.
- Η επέκταση του μοντέλου στην επίδοση του συστήματος μακροπρόθεσμα σε συνθήκες μεταβαλλόμενου πληθυσμού ενεργών χρηστών, αξιοποιώντας το μοντέλο εξυπηρέτησης του Μερισμού Εξυπηρετητή.
- Η αξιολόγηση της επίδοσης του προτεινόμενου αλγόριθμου προσαρμογής ζεύξης μακροπρόθεσμα σε συνθήκες μεταβαλλόμενου πληθυσμού ενεργών χρηστών. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος υπερισχύει σε επίδοση των αντίστοιχων αλγορίθμων στη βιβλιογραφία. Επιπλέον καθορίζονται και τα περιθώρια βελτίωσης της ενεργειακής επίδοσης των χρηστών όσον αφορά τη χρήση τεχνικών ρυθμού προσαρμογής ζεύξης.
- Η εύρεση ικανοποιητικών φραγμάτων επίδοσης για την ενεργειακή επίδοση και ρυθμαπόδοση χρήστη στον προτεινόμενο αλγόριθμο προσαρμογής ζεύξης για πολλαπλές κλάσεις ενεργών χρηστών.
- Η εύρεση αναλυτικής σχέσης της ρυθμαπόδοσης και της ενεργειακής επίδοσης χρήστη για τον Αναλογικά Δίκαιο Αλγόριθμο. Οι δυο σχέσεις εμφανίζονται με απλούς όρους, συνδέοντας την ζήτηση της κίνησης δεδομένων με το κέρδος χρονοπρογραμματισμού μέσω της γενικευμένης παραμέτρου και της χωρητικότητας του συστήματος.

- Εντοπίζεται για πρώτη φορά στη βιβλιογραφία και επισημαίνεται ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της επίδοσης του ευκαιριακού χρονοπρογραμματισμού έναντι του RR αλγορίθμου μακροπρόθεσμα. Η ενεργειακή επίδοση του χρήστη μακροπρόθεσμα, σε συνθήκες μεταβαλλόμενου πληθυσμού, στον Αναλογικά Δίκαιο αλγόριθμο αυξάνεται πολύ περισσότερο από το κέρδος χρονοπρογραμματισμού. Ο λόγος είναι η κατακόρυφη αύξηση της πιθανότητας μετάδοσης του χρήστη μακροπρόθεσμα για υψηλές τιμές ρυθμού αφίξεων ενεργών χρηστών στα ανώτερα επίπεδα της στοίβας των πρωτοκόλλων, λόγω της μείωσης του φορτίου που επιφέρει το κέρδος χρονοπρογραμματισμού. Η παρατήρηση αυτή είναι καίρια για τη δημιουργία πρωτοκόλλων στο μέλλον που θα στοχεύουν στη μείωση του φορτίου σε συγκεκριμένες κλάσεις χρηστών, ή συνολικά στη κυψέλη, αξιοποιώντας τη δυναμική εξυπηρέτησης των ενεργών χρηστών στα ανώτερα επίπεδα της Στοίβας των Πρωτοκόλλων.
- Παρουσιάζεται νέος προτεινόμενος αλγόριθμος ευκαιριακού χρονοπρογραμματισμού με απόλυτη προτεραιότητα εξυπηρέτησης κλάσης χρηστών, που αξιοποιεί τη διαφορά στη δυναμική εξυπηρέτησης των ενεργών χρηστών στα ανώτερα επίπεδα της Στοίβας των Πρωτοκόλλων και συγκεκριμένα στο ρυθμό απομάκρυνσης των ροών.
- Ο προτεινόμενος αλγόριθμος βελτιώνει την ρυθμαπόδοση και την ενεργειακή επίδοση τόσο των κοντινών, όσο και των απομακρυσμένων χρηστών στην ανερχόμενη ζεύξη, επιφέροντας μικρή μείωση στη χωρητικότητα του συνολικού συστήματος έναντι του συστήματος εξυπηρέτησης του Αναλογικά Δίκαιου Αλγορίθμου.
- Εύρεση αναλυτικών σχέσεων της ρυθμαπόδοσης και της ενεργειακής επίδοσης χρήστη του προτεινόμενου αλγορίθμου.
- Η υλοποίηση του προτεινόμενου αλγορίθμου είναι απλή χωρίς επιπρόσθετο κόστος και βασίζεται σε μικρή τροποποίηση της πολιτικής επιλογής χρηστών του Αναλογικά Δίκαιου Αλγορίθμου εξυπηρέτησης, μέσω της κατάλληλης αντιστοιχίας βαρών που πολλαπλασιάζονται στις στιγμιαίες τιμές του SNR των χρηστών.
- Εξετάζεται το πρόβλημα της εξουδετέρωσης παρεμβολών στα πλαίσια της τεχνικής της Κλασματικής Επαναχρησιμοποίησης Συχνότητας για OFDMA

μακρο-κυψέλες. Κατά την εφαρμογή της Κλασματικής Επαναχρησιμοποίησης Συχνότητας οι χρήστες κατηγοριοποιούνται σε «απομακρυσμένους» και «κοντινούς» και εξυπηρετούνται από δυο ξεχωριστούς θαλάμους εξυπηρέτησης. Εξετάζουμε αναλυτικά την επίδοση της Κλασματικής Επαναχρησιμοποίησης Συχνότητας όταν οι δυο θάλαμοι εξυπηρέτησης βασίζονται σε συστήματα χρονοπρογραμματισμού Αναλογικά Δίκαιου Αλγορίθμου

- Παρουσιάζεται η πρωτότυπη μετρική της μέσης συνολικής κατανάλωσης ισχύος στο Σταθμό Βάσης και για τους δυο θαλάμους εξυπηρέτησης της Κλασματικής Επαναχρησιμοποίησης Συχνότητας, λαμβάνοντας υπόψη ένα σύγχρονο δυναμικό σύστημα κατανάλωσης που ελαχιστοποιεί την ισχύ κατανάλωσης στο κύκλωμα του Σταθμού Βάσης όταν δεν υπάρχει ενεργός χρήστης στο σύστημα.
- Εξετάζεται το πρόβλημα της βέλτιστης διαμέρισης της κυψέλης και του εύρους ζώνης σε «απομακρυσμένους» και «κοντινούς» χρήστες που μεγιστοποιεί τη συνολική χωρητικότητα της κυψέλης στους δυο θαλάμους εξυπηρέτησης της Κλασματικής Επαναχρησιμοποίησης Συχνότητας.
- Παρουσιάζεται μια πρωτότυπη αναλυτική σχέση για την κατανομή του συνόλου των ενεργών χρηστών σε σύστημα χρονοπρογραμματισμού Αναλογικά Δίκαιου αλγορίθμου για πολλαπλές κλάσεις. Η σχέση αυτή αναπαριστά με ακρίβεια τη δραστηριότητα όλων των ενεργών χρηστών που εμφανίζονται με οποιαδήποτε χωρική κατανομή μέσα σε μια κυψέλη. Η μορφή της κατανομής δείχνει ότι το πλήθος των ενεργών χρηστών κυμαίνεται σε χαμηλές τιμές, χαμηλότερες απ' ότι στην περίπτωση του Round Robin για ίδιες τιμές ρυθμού αφίξεων ροών, όπου η αντίστοιχη κατανομή του συνόλου ενεργών χρηστών είναι γεωμετρική.
- Εξετάζεται το πρόβλημα της βέλτιστης διαμέρισης της κυψέλης και του εύρους ζώνης σε «απομακρυσμένους» και «κοντινούς» χρήστες που ελαχιστοποιεί τη μέση συνολική κατανάλωση ισχύος στο Σταθμό Βάσης, λαμβάνοντας υπόψη τη δραστηριότητα των ενεργών χρηστών και στους δυο θαλάμους εξυπηρέτησης της Κλασματικής Επαναχρησιμοποίησης Συχνότητας.

Οι βασικές δημοσιεύσεις για τη περάτωση της διατριβής στη βιβλιογραφία είναι οι εξής δυο σε IEEE διεθνή περιοδικά

S. Sagkriotis, K. Kontovassilis, A. D. Panagopoulos, “Proportional Fair Scheduling Gains for AMC-Aware Systems under Heterogeneous Radio Conditions”, IEEE Communication Letters, Dec. 2012.

S. Sagkriotis, A. D. Panagopoulos, “Optimal FFR Policies: Maximization of Traffic Capacity and Minimization of Base Station’s Power Consumption”, IEEE Wireless Communication Letters, 2015.

και μια δημοσίευση στο peer review IEEE ISWCS-2015 συνέδριο στις Βρυξέλλες

S. Sagkriotis, A. D. Panagopoulos, “Energy Efficiency Improvement of Mobile Terminals exploiting Opportunistic Scheduling and Upper Layers’ Queuing Dynamics”, ISWCS'2015, Brussels, Belgium, 2015.

Στη δουλειά αυτή απονεμήθηκε το βραβείο καλύτερης δημοσίευσης του Συνεδρίου στο τομέα των Δικτύων

<http://www.iswcs2015.org/index.php/program/awards>

ακολουθούν άλλες δημοσιεύσεις σε συνέδρια

M. Casoni, D. Saladino, A. Karagiannis, D. Komnakos. S.E. Sagkriotis, “An ad-hoc emergency network for crisis events,” in *Future Network and Mobile Summit (FutureNetworkSummit)*, 2013 , vol., no., pp.1-12, 3-5 July 2013

C. Kourogorgas, S. Sagkriotis, A. D. Panagopoulos, “Coverage and outage capacity evaluation in 5G millimeter wave cellular systems: impact of rain attenuation”, 9th EUCAP, 2015.

καθώς και δύο κεφάλαια σε διεθνή βιβλία

K. Mantzoukas, S. Sagkriotis, A. D. Panagopoulos, “On the Design of Energy-Efficient Wireless Access Networks A Cross-Layer Approach”, Book Chapter in the Book entitled “Green Networking and Communications : ICT for Sustainability”, CRC Press, USA, 2013.

S. Vassaki, G. Pitsiladis, S. Sagkriotis, A. D. Panagopoulos, ”Future M2M communication networks: Spectrum Sharing, Random Access, Connectivity and Energy Efficiency”, Handbook of Research in Next Generation Mobile Communication Systems, IGI-GLOBAL, 2015.

1.4 Δομή της διατριβής

Στην αρχή του πρώτου Κεφαλαίου παρουσιάζονται τα βασικά προβλήματα της ασύρματης ευρυζωνικότητας στο μέλλον, αναφορικά με την κάλυψη της κίνησης δεδομένων της οποίας ο όγκος αυξάνει εκθετικά με το χρόνο και την ανάγκη διαστασιοποίησης των ασύρματων δικτύων με γνώμονα τη σημαντική μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης, τόσο όσον αφορά τους Σταθμούς Βάσης των κυψελωτών Συστημάτων στη κατερχόμενη ζεύξη, όσο και τους τερματικούς κινητούς χρήστες στην ανερχόμενη ζεύξη. Η αντιμετώπιση των προβλημάτων αυτών εστιάζει στην αξιοποίηση συστημάτων ευκαιριακού χρονοπρογραμματισμού, αλγορίθμων προσαρμογής ρυθμού ζεύξης που αυξάνουν την ενεργειακή επίδοση των κινητών χρηστών, καθώς και στην αξιοποίηση σύγχρονων τεχνικών καταστολής παρεμβολών.

Στο Κεφάλαιο 2 εξετάζεται η επίδοση συστημάτων ευκαιριακών χρονοπρογραμματιστών και ενεργειακών πρωτοκόλλων προσαρμογής ρυθμού ζεύξης, σε συνθήκες σταθερού πληθυσμού ενεργών χρηστών. Μοντελοποιείται η αλληλεπίδραση του Επιπέδου Ζεύξης και του Φυσικού Επιπέδου, συνδυάζοντας τα τυχαία χαρακτηριστικά του στιγμιαίου SNR και του στιγμιαίου ρυθμού ζεύξης του πλαισίου OFDMA λόγω των ταχέων διαλείψεων. Η ανάλυση οδηγεί στην εύρεση πρωτότυπης αναλυτικής προσεγγιστικής σχέσης του μέσου ρυθμού ζεύξης που προσφέρει με απλότητα την επίδραση των διαλείψεων, μέσω μιας γενικευμένης παραμέτρου που αντανακλά τη συμπεριφορά της κατανομής διαλείψεων στην ουρά της. Παράλληλα παρουσιάζεται πρωτότυπη αναλυτική προσεγγιστική σχέση του κέρδους χρονοπρογραμματισμού του Αναλογικά Δίκαιου αλγόριθμου, αξιοποιώντας τη γενικευμένη παράμετρο [SKP12]. Από κοινού οι δυο προσεγγιστικές σχέσεις επιτρέπουν την εξέταση του κέρδους χρονοπρογραμματισμού της OFDMA τεχνικής έναντι του OFDM και προσφέρουν ένα μέτρο σύγκρισης για την επίδοση και την αξιολόγηση πολύπλοκων ευκαιριακών συστημάτων χρονοπρογραμματισμού.

Στη συνέχεια εξετάζεται η ενεργειακή επίδοση σε σύγχρονα κινητά τερματικά μέσω αλγορίθμων προσαρμογής ρυθμού ζεύξης, λαμβάνοντας υπόψη τη σταθερή κατανάλωση ισχύος στο κύκλωμα του κινητού τερματικού, π.χ. κατανάλωση CPU ή οθόνης. Η ανάλυση οδηγεί στην εύρεση αναλυτικών σχέσεων για το βέλτιστο ρυθμό

μετάδοσης και την αντίστοιχη ισχύ, που προσφέρουν απλότητα στη κατανόηση των επίδρασης των χαρακτηριστικών διάδοσης και της σταθερής καταναλισκόμενης ισχύος. Στο τέλος παρουσιάζεται ένας νέος προτεινόμενος αλγόριθμος προσαρμογής ζεύξης που βελτιστοποιεί μεσοπρόθεσμα την ενεργειακή επίδοση χρήστη, λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση του πληθυσμού των ενεργών χρηστών.

Στο Κεφάλαιο 3 εξετάζεται η επίδοση συστημάτων ευκαιριακών χρονοπρογραμματιστών και ενεργειακών πρωτοκόλλων βέλτιστης προσαρμογής ρυθμού ζεύξης, σε συνθήκες μεταβαλλόμενου πληθυσμού ενεργών χρηστών. Αρχικά εξετάζονται τα εύρωστα χαρακτηριστικά μοντέλων εξυπηρέτησης, όπως το μοντέλο απωλειών του Erlang, το μοντέλο εξυπηρέτησης με άπειρους εξυπηρετητές και το μοντέλο Μερισμού του Εξυπηρετητή. Στη τελευταία περίπτωση γίνεται η σύνδεση της εφαρμογής του Αναλογικά Δίκαιου Αλγορίθμου σε συστήματα OFDMA με το μοντέλο Μερισμού του Εξυπηρετητή. Η σύνδεση αυτή οδηγεί στην εύρεση αναλυτικής σχέσης της ρυθμαπόδοσης και της ενεργειακής επίδοσης χρήστη για τον Αναλογικά Δίκαιο Αλγόριθμο. Οι δυο σχέσεις εμφανίζονται με απλούς όρους, συνδέοντας την ζήτηση της κίνησης δεδομένων με το κέρδος χρονοπρογραμματισμού μέσω της γενικευμένης παραμέτρου και τη χωρητικότητα του συστήματος. Επιπρόσθετα, εντοπίζεται για πρώτη φορά στη βιβλιογραφία και επισημαίνεται ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της επίδοσης του ευκαιριακού χρονοπρογραμματισμού έναντι του RR αλγορίθμου μακροπρόθεσμα [SP15]. Η ενεργειακή επίδοση του χρήστη μακροπρόθεσμα, σε συνθήκες μεταβαλλόμενου πληθυσμού, στον Αναλογικά Δίκαιο αλγόριθμο αυξάνεται πολύ περισσότερο από το κέρδος χρονοπρογραμματισμού. Ο λόγος είναι η κατακόρυφη αύξηση της πιθανότητας μετάδοσης του χρήστη μακροπρόθεσμα για υψηλές τιμές ρυθμού αφίξεων ενεργών χρηστών στο Επίπεδο Συνόδου, λόγω της μείωσης του φορτίου που επιφέρει το κέρδος χρονοπρογραμματισμού. Η παρατήρηση αυτή είναι καίρια για τη δημιουργία πρωτοκόλλων στο μέλλον που θα στοχεύουν στη μείωση του φορτίου σε συγκεκριμένες κλάσεις χρηστών, ή συνολικά στη κυψέλη, αξιοποιώντας τη δυναμική εξυπηρέτησης των ενεργών χρηστών μακροπρόθεσμα στο Επίπεδο Συνόδου.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται ένας νέος αλγόριθμος ευκαιριακού χρονοπρογραμματισμού με απόλυτη προτεραιότητα εξυπηρέτησης κλάσεων χρηστών που δημοσιεύτηκε εδώ [SP15]. Ο αλγόριθμος αξιοποιεί τη διαφορετική δυναμική αναμονής όσον αφορά τον απαιτούμενο χρόνο εξυπηρέτησης «απομακρυσμένων» και «κοντινών» χρηστών που εκδηλώνεται στα ανώτερα επίπεδα της στοίβας των

πρωτοκόλλων. Η πολιτική επιλογής χρηστών του προτεινόμενου αλγορίθμου οδηγεί αυτόματα στο διαχωρισμό του κοινού θαλάμου εξυπηρέτησης του Αναλογικά Δίκαιου Αλγορίθμου σε δυο θαλάμους εξυπηρέτησης. Κάθε θάλαμος εξυπηρέτησης αντιστοιχεί στην εξυπηρέτηση αποκλειστικά «απομακρυσμένων» και αποκλειστικά «κοντινών χρηστών» από το Σταθμό Βάσης. Οι «απομακρυσμένοι» εξυπηρετούνται πρώτα, απομακρύνονται από το σύστημα και μετέπειτα εξυπηρετούνται οι «κοντινοί» χρήστες. Ο διαχωρισμός σε δυο θαλάμους εξυπηρέτησης οδηγεί αυτομάτως σε μείωση του φορτίου ανά θάλαμο και επομένως σε αύξηση της ρυθμαπόδοσης και της ενεργειακής επίδοσης όλων των χρηστών και «κοντινών» και «απομακρυσμένων». Αποδεικνύεται ότι αυτό συμβαίνει και σε χαμηλές και υψηλές συνθήκες φορτίου όταν η προτεραιότητα δίνεται στους απομακρυσμένους χρήστες, στις ρεαλιστικές συνθήκες όπου οι απομακρυσμένοι χρήστες είναι πολύ περισσότεροι από τους κοντινούς. Επιπλέον η συνολική χωρητικότητα του προτεινόμενου αλγορίθμου μειώνεται ελάχιστα σε σχέση με αυτή του αναλογικού δίκαιου αλγορίθμου.

Στο Κεφάλαιο 5 εξετάζεται η βέλτιστη εφαρμογή της σύγχρονης τεχνικής καταστολής των παρεμβολών, της Κλασματικής Επαναχρησιμοποίησης Συχνότητας για μακρο-κυψέλες. Συγκεκριμένα εξετάζονται δυο προβλήματα βέλτιστης διαμέρισης του εύρους ζώνης σε «απομακρυσμένους» και «κοντινούς» χρήστες, που μεγιστοποιούν την χωρητικότητα του συστήματος και την συνολική κατανάλωση σε ισχύ στο Σταθμό Βάσης [SaP15]. Αλγοριθμικά αποδεικνύεται ότι η εξυπηρέτηση χρηστών της κυψέλης σε σύστημα Κλασματικής Επαναχρησιμοποίησης Συχνότητας μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο με τη χρήση δυο ξεχωριστών θαλάμων εξυπηρέτησης. Επιπλέον, αποδεικνύεται ότι το πρόβλημα της βέλτιστης διαμέρισης του εύρους ζώνης, μεγιστοποιώντας τη συνολική χωρητικότητα του συστήματος, είναι πρόβλημα μεγίστου-ελαχίστου. Στη συνέχεια διατυπώνεται το πρωτότυπο πρόβλημα της συνολικής κατανάλωσης ισχύος στους δυο ανεξάρτητους θαλάμους εξυπηρέτησης, υπολογίζοντας κατάλληλα την αντικειμενική συνάρτηση. Λαμβάνεται υπόψη ένα σύγχρονο μοντέλο κατανάλωσης ισχύος στο Σταθμό Βάσης που ελαχιστοποιεί την κατανάλωση ισχύος όταν δεν υπάρχει ενεργός χρήστης στο σύστημα. Ακολουθεί η μελέτη της βέλτιστης διαμέρισης για την ελαχιστοποίηση της συγκεκριμένης αντικειμενικής συνάρτησης.

Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται γενικά συμπεράσματα για τη διατριβή και διατυπώνονται συγκεκριμένα προβλήματα για μελλοντική έρευνα. Συγκεκριμένα εντοπίζεται το βασικό πρόβλημα διαστασιοποίησης στα Δίκτυα Μηχανών ως ο

διαχωρισμός της δέσμευσης πόρων σε δυο στάδια: ένα που αφορά το χρονοπρογραμματισμό των κρατήσεων των ενεργών χρηστών, και ένα που αφορά το χρονοπρογραμματισμό των μεταδόσεων ροών των ενεργών χρηστών. Οι τεράστιοι ρυθμοί αφίξεων των ροών των Δικτύων Μηχανών απαιτούν μεγάλο εύρος ζώνης για το χρονοπρογραμματισμό των κρατήσεών τους στο Σταθμό Βάσης. Μια αξιόπιστη λύση είναι η διεκπεραίωση του χρονοπρογραμματισμού των κρατήσεων μέσω πυλών (gateways), π.χ. Wi-Fi που επεκτείνονται σε όλο το χώρο της κυψέλης και επαναχρησιμοποιούν την ίδια συχνότητα. Ένα άλλο σημαντικό πρόβλημα για μελλοντική έρευνα είναι η μελέτη του προβλήματος της εκφόρτωσης φορτίου από το κυψελωτό σύστημα στα Wi-Fi των σπιτιών. Η διαδικασία της εκφόρτωσης μπορεί να μοντελοποιηθεί με τα εύρωστα μοντέλα εξυπηρέτησης που αναπτύξαμε στη διατριβή, διατυπώνοντας το πρόβλημα της εκφόρτωσης σε πρόβλημα βέλτιστης πιθανοτικής δρομολόγησης, μεγιστοποιώντας συγκεκριμένες αντικειμενικές συναρτήσεις που περιγράφουν τη χωρητικότητα και την ενεργειακή κατανάλωση του συνολικού συστήματος.

Κεφάλαιο 2

Μοντελοποίηση του δικτύου πρόσβασης με σταθερό πληθυσμό ροών

2.1 Εισαγωγή

Το ασύρματο δίκτυο πρόσβασης στην ανερχόμενη/κατερχόμενη ζεύξη μπορεί να μοντελοποιηθεί ως ένα διάνυσμα $\vec{n} = (n_1, \dots, n_L)$, L τυχαίων μεταβλητών, με κάθε συνιστώσα n_i , $i = 1, 2, \dots, L$, του διανύσματος να αποτελεί τυχαία μεταβλητή του αριθμού των χρηστών σε μια κλάση- i χρηστών που αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο πόρο του δικτύου (ισχύς, ρυθμός ζεύξης, εύρος ζώνης). Ένας συγκεκριμένος συνδυασμός τιμών του διανύσματος \vec{n} αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη κατάσταση του συστήματος, δηλαδή σε έναν συγκεκριμένο πληθυσμό ενεργών χρηστών στο θάλαμο εξυπηρέτησης (service pool). Στα πλαίσια της διατριβής θεωρούμε ότι κάθε χρήστης που ετοιμάζεται να δεχτεί μια ροή στο Επίπεδο Συνόδου στην ανερχόμενη/κατερχόμενη ζεύξη μετατρέπεται σε ενεργό χρήστη. Κάθε ενεργός χρήστης αντιστοιχεί σε μια ροή αποκλειστικά. Ο ρυθμός εξυπηρέτησης των χρηστών σε σταθερή κατάσταση $\vec{n} = (n_1, \dots, n_L)$, εξαρτάται από τις ταχείες διαλείψεις και το ντετερμινιστικό μοντέλο απωλειών στο Φυσικό Επίπεδο, τους προσφερόμενους αστερισμούς και την κωδικοποίηση στο Επίπεδο Ζεύξης, την τεχνική πολυπλεξίας (OFDMA στο LTE, Wi-Fi) και βεβαίως το συγκεκριμένο χρονοπρογραμματιστή: Round Robin, Αναλογικά Δίκαιο (Proportional Fair), και Μεγίστου SNR στο Επίπεδο Πρόσβασης στο Μέσο.

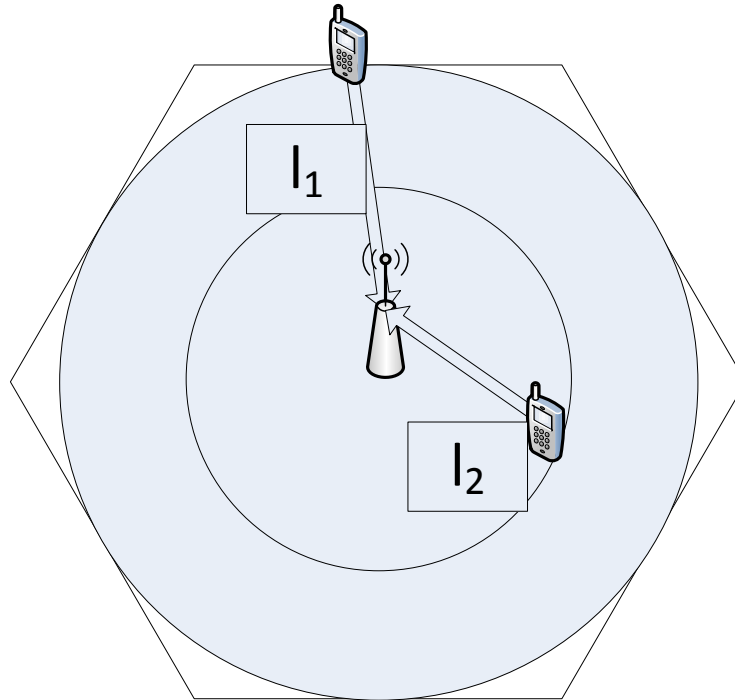
Μακροπρόθεσμα ένας μόνιμος ενεργός χρήστης βλέπει το σύστημα να αλλάζει όλες τις καταστάσεις και καταλήγει σε στατιστική ισορροπία. Η ρυθμαπόδοση λοιπόν του χρήστη καθώς κι άλλες μετρικές που συγκλίνουν μακροπρόθεσμα (όπως η μέση ισχύς και η ενεργειακή επίδοση) εξαρτώνται από τον μέσο όρο όλων των ρυθμών εξυπηρέτησης ανά κατάσταση. Όπως θα δούμε στο Κεφάλαιο 3, συγκεκριμένοι αλγόριθμοι χρονοπρογραμματισμού, όπως ο Round Robin ή ο Αναλογικά Δίκαιος Χρονοπρογραμματιστής (Proportional Fair) μπορούν να αξιολογηθούν αναλυτικά με τη χρήση εύρωστων μοντέλων εξυπηρέτησης που επιτρέπουν την εύρεση αναλυτικής σχέσης για τη κατανομή του πληθυσμού των ενεργών χρηστών $\pi(n_1 = k_1, \dots, n_L = k_L)$

και συνακόλουθα για τη κατανομή του συνόλου των ενεργών χρηστών $\pi(n=k)$, όπου $n = \sum_{i=1}^L n_i$ ο συνολικός αριθμός των ενεργών χρηστών στο θάλαμο εξυπηρέτησης. Η κατανομή αυτή εξαρτάται μόνο από το μέσο μέγεθος της ροής και όχι από την κατανομή της κίνησης των δεδομένων. Αυτό προσδίδει εύρωστα και αξιόπιστα χαρακτηριστικά στους αλγορίθμους χρονοπρογραμματισμού καθώς και σε πρωτόκολλα αποδοχής και αποκλεισμού ροών (Call Admission Control), δικτύωσης, τεχνικές βέλτιστης διαστασιοποίησης, ή αλγορίθμους προσαρμογής ζεύξης (link adaptation).

Σε αυτό το Κεφάλαιο εξετάζουμε μετρικές χρηστών σε σταθερή κατάσταση ($n_1 = k_1, \dots, n_L = k_L$). Ξεκινάμε στην Ενότητα (§2.2) με τις γενικές υποθέσεις του συστήματος και την μοντελοποίηση της αλληλεπίδρασης των δυο συγκεκριμένων επιπέδων της στοίβας των πρωτοκόλλων: Φυσικό Επίπεδο και Επίπεδο Ζεύξης. Οι ταχείες διαλείψεις και το ντετερμινιστικό μοντέλο απωλειών του Φυσικού Επιπέδου συνδέονται αρμονικά με τη συνάρτηση στιγμιαίου ρυθμού ζεύξης στο Επίπεδο Ζεύξης, αξιοποιώντας τα χαρακτηριστικά της τεχνικής πολυπλεξίας OFDMA του LTE. Στην Ενότητα (§2.3) εξετάζουμε το κέρδος χρονοπρογραμματισμού διαφορετικών ευκαιριακών αλγορίθμων με κριτήριο επιλογής χρήστη τιμές του στιγμιαίου SNR πολλαπλασιασμένες με σταθερά βάρη. Τα βάρη αυτά δύνανται να μεταβάλλονται μακροπρόθεσμα, ανάλογα με το φορτίο κίνησης της κυψέλης, ή ανάλογα με άλλους παράγοντες, όπως τις συνθήκες διάδοσης. Στην Ενότητα (§2.4) αναλύουμε δύο συνεισφορές της διατριβής: μια προσέγγιση για το κέρδος χρονοπρογραμματισμού του Αναλογικά Δίκαιου Αλγορίθμου και μια προσέγγιση για το μέσο ρυθμό ζεύξης. Στην Ενότητα (§2.5) διατυπώνουμε το πρόβλημα διαστρωματικής βελτιστοποίησης που αφορά την βέλτιστη προσαρμογή ζεύξης μεγιστοποιώντας ως μετρική την ενεργειακή επίδοση μεσοπρόθεσμα, λαμβάνοντας υπόψη την κατάσταση του συστήματος σε ανώτερα επίπεδα της στοίβας των πρωτοκόλλων. Στο Κεφάλαιο 3 επεκτείνουμε την αναλυτική αξιολόγηση της επίδοσης του προτεινόμενης βέλτιστης προσαρμογής ζεύξης μακροπρόθεσμα σε συνθήκες μεταβαλλόμενου πληθυσμού ροών.

2.2 Γενικές Υποθέσεις Συστήματος με σταθερό αριθμό ροών

Θεωρούμε μια OFDMA κυψέλη LTE και εστιάζουμε στην ανερχόμενη ζεύξη. Προς το παρόν δεν ασχολούμαστε με την επίδραση των παρεμβολών από άλλες κυψέλες. Υπάρχουν αρκετές δημοσιεύσεις στη βιβλιογραφία που δεν εξετάζουν τις παρεμβολές στην ανερχόμενη ζεύξη. Η ετερογένεια των συνθηκών μετάδοσης λόγω των διαφορετικών αποστάσεων των χρηστών από το ΣΒ περιγράφεται με έναν αριθμό από διαφορετικές κλάσεις $i=1,2,\dots,L$ με αποστάσεις l_i από το ΣΒ με $l_{i-1} > l_i$. Το μέσο SNR στο πομπό του ΣΒ που αντιστοιχεί στην κλάση- i ισούται με $\bar{x}_i = P(l_i)/(N_0W)A \cdot l_i^{-a}$, όπου W είναι το εύρος ζώνης του συστήματος, N_0 είναι η φασματική πυκνότητα ισχύος του Προσθετικού Γκαουσιανού Λευκού Θορύβου (AWGN), $P(l_i)$ είναι η ισχύς του πομπού στο Κινητό Τερματικό (KT), a είναι ο εκθέτης του ντετερμινιστικού μοντέλου απωλειών, και η σταθερά A συνδέεται με τη συχνότητα του φέροντος. Η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή ισχύος είναι ίση με P_{MAX} . Ορίζουμε το διάνυσμα $\vec{n} = (n_1, \dots, n_L)$ προκειμένου να περιγράψουμε το πληθυσμό των ενεργών χρηστών σε κάθε μια από τις κλάσεις και έστω $n = \sum_{i=1}^L n_i$ ο συνολικός αριθμός των ενεργών χρηστών στο θάλαμο εξυπηρέτησης.



Σχήμα 2.1: LTE κυψέλη και 2 κλάσεις χρηστών που αντιστοιχούν στους «απομακρυσμένους» από το ΣΒ χρήστες με απόσταση l_1 και τους «κοντινούς» χρήστες με απόσταση l_2 .

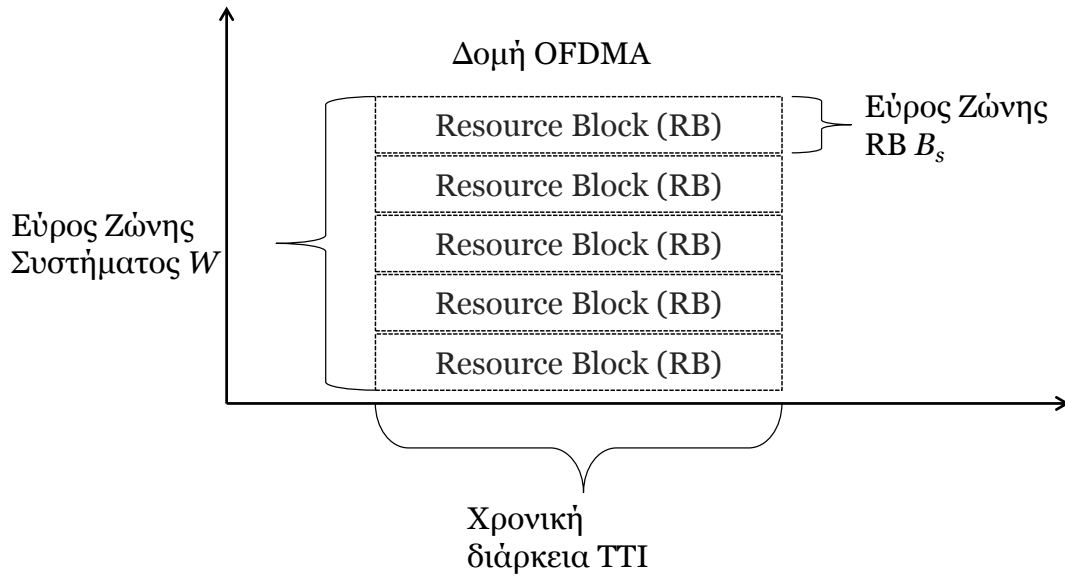
Ο άξονας του χρόνου χωρίζεται σε χρονοθυρίδες μετάδοσης (Transmission Time Intervals ή TTI) με σταθερή διάρκεια. Κάθε TTI αντιστοιχεί σε ένα πλαίσιο OFDMA με ανεξάρτητα Resource Blocks (RBs) που υφίστανται την ίδια κατανομή ταχέων διαλείψεων (Σχήμα 2.2). Ένα RB στο LTE αποτελείται από ένα σύνολο υποφερουσών συχνοτήτων OFDMA τόσο για μετάδοση δεδομένων ή συμβόλων πιλότων (pilots). Εδώ δεν λαμβάνουμε υπόψη μας τους πιλότους. Σε κάθε RB ένας χρονοπρογραμματιστής εκτελείται ανεξάρτητα και επιλέγει ένα χρήστη για εξυπηρέτηση. Εξαιτίας της ανεξαρτησίας των RB και της ανεξάρτητης εκτέλεσης του χρονοπρογραμματιστή σε κάθε RB, μπορούμε να εξετάσουμε τη τιμή του στιγμιαίου SNR x_i σε ένα RB, στο δέκτη του ΣΒ λόγω της μετάδοσης του πομπού του χρήστη της κλάσης- i . Αυτό παραμένει σταθερό για τη διάρκεια ενός TTI, σε μια τυχαία τιμή που ακολουθεί τα χαρακτηριστικά των ταχέων διαλείψεων.

Επιπλέον, ο στιγμιαίος ρυθμός μετάδοσης ενός χρήστη που βρίσκεται μόνος του στη κυψέλη, ισούται με το ρυθμό μετάδοσης που αντιστοιχεί σε ένα RB πολλαπλασιασμένο από τον αριθμό των RB σε κάθε TTI. Έτσι υιοθετούμε τον παρακάτω τύπο του Shannon ως συνάρτηση στιγμιαίου ρυθμού ζεύξης

Προσαρμοσμένης Κωδικοποίησης και Διαμόρφωσης (Adaptive Modulation and Coding)

$$h(x) = R_0 \log_2(1+x), \quad (2.1)$$

όπου $R_0 = W \frac{Mbps}{10^6 Hz}$.



Σχήμα 2.2: Συχνотική Δομή πλαισίου OFDMA στη διάρκεια ενός TTI.

Υποθέτουμε ότι οι κλάσεις έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά ταχέων διαλείψεων. Συγκεκριμένα, ορίζουμε ως “κανονικοποιημένο SNR” τη μεταβλητή $y_i = x_i/\bar{x}_i$ και θεωρούμε ότι οι μεταβλητές y_i είναι ανεξάρτητες και όμοια κατανομημένες για τις κλάσεις $i=1, \dots, L$ με CDF $\hat{F}(y)$, ανεξάρτητα από τη κλάση στην οποία ανήκει ένας χρήστης. Με δεδομένο το $\hat{F}(\cdot)$, το CDF του SNR μπορεί να γραφεί ως $F(x) = \hat{F}(x/\bar{x})$. Υποθέτουμε ότι αν το εύρος ζώνης κάθε RB (B_s) είναι μικρότερο ή ίσο από το εύρος ζώνης συνοχής (B_c) τότε η μεταβλητή y ακολουθεί την εκθετική κατανομή $\hat{F}(y) = 1 - e^{-y}$. Αλλιώς ακολουθεί κανονικοποιημένη m-Erlang κατανομή με $m = \lceil B_s/B_c \rceil$ και $\hat{F}(y) = (\Gamma(m))^{-1} \int_0^{my} t^{m-1} e^{-t} dt$, όπου $\Gamma(m)$ είναι η συνάρτηση Γάμμα. Μια αντίστοιχη μοντελοποίηση για το OFDMA γίνεται εδώ [YSC⁺04]. Το κανονικοποιημένο SNR y έχει μέση τιμή

$$E[y_i] = \int_0^\infty y d\hat{F}(y) = \int_0^\infty (1 - \hat{F}(y)) dy = 1, \quad (2.2)$$

και διασπορά $Var[y_i]=1/m$.

Τέλος, ορίζουμε ως μέσο ρυθμό μετάδοσης ζεύξης του χρήστη της κλάσης- i το μέσο ρυθμό μετάδοσης του χρήστη αν ήταν μόνος του στη κυψέλη. Ο μέσος ρυθμός μετάδοσης ζεύξης είναι ίσος με

$$\bar{r}_i(1) = \int_0^\infty h(\bar{x}_i, y) d\hat{F}(y). \quad (2.3)$$

2.3 Κέρδος χρονοπρογραμματισμού ευκαιριακών αλγορίθμων εξυπηρέτησης

Όταν πολλαπλοί ενεργοί χρήστες βρίσκονται στο θάλαμο εξυπηρέτησης, ο ρυθμός εξυπηρέτησης εξαρτάται από τον πληθυσμό των χρηστών στις κλάσεις και από την πολιτική του χρονοπρογραμματιστή. Εδώ εξετάζουμε χρονοπρογραμματιστές που επιλέγουν για εξυπηρέτηση χρήστες, μεγιστοποιώντας τιμές του στιγμιαίου SNR, πολλαπλασιασμένες με συγκεκριμένα βάρη που δεν μεταβάλλονται μεσοπρόθεσμα. Η επιλογή του χρονοπρογραμματιστή βασίζεται στην ακόλουθη πολιτική $i = \arg \max_j \varphi_j x_j$, όπου ίσα βάρη φ_j αντιστοιχίζονται σε όλους τους χρήστες της ίδιας κλάσης. Η συγκεκριμένη αναλυτική μορφή μπορεί να συμπεριλάβει όλες τις σημαντικές περιπτώσεις αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται ήδη στη βιβλιογραφία και στη πράξη στα σύγχρονα συστήματα, π.χ. του Αναλογικά Δίκαιου αλγορίθμου και του Μεγίστου SNR. Ο αναγνώστης μπορεί να παρατηρήσει ότι η επιλογή χρήστη μπορεί να εκφραστεί αναλυτικά σύμφωνα με τις κανονικοποιημένες τιμές του SNR, $i = \arg \max_j \varphi_j \bar{x}_j y_j$, όπου τώρα τα γινόμενα $\varphi_j \bar{x}_j$ παίζουν το ρόλο των βαρών.

Έστω ότι εξετάζουμε το ενδεχόμενο ότι ο χρήστης i επιλέγεται για εξυπηρέτηση. Αυτό ισοδυναμεί με $y_j \leq y_i (\varphi_i \bar{x}_i) / (\varphi_j \bar{x}_j)$ για όλα τα $j \neq i$. Δοσμένου του πληθυσμού των χρηστών και λόγω της παραδοχής ότι οι τιμές του κανονικοποιημένου SNR είναι ανεξάρτητες και όμοια κατανομημένες, ο ρυθμός εξυπηρέτησης της κλάσης- i με πληθυσμό κυψέλης \bar{n} ισούται με

$$\bar{r}_i(\bar{n}) = \int_0^\infty h(\bar{x}_i, y) \prod_{\substack{1 \leq j \leq L \\ j \neq i}} \hat{F}(y \frac{\bar{x}_i \varphi_i}{\bar{x}_j \varphi_j})^{n_j} \hat{F}(y)^{n_i} d\hat{F}(y). \quad (2.4)$$

Το κέρδος χρονοπρογραμματισμού των ευκαιριακών αλγορίθμων εξυπηρέτησης ορίζεται στη βιβλιογραφία [BJ04] ως ο λόγος του ρυθμού εξυπηρέτησης της κλάσης- i προς τον αντίστοιχο μέσο ρυθμό μετάδοσης ζεύξης με

$$g_i(\vec{n}) = \bar{r}_i(\vec{n})/\bar{r}_i(1). \quad (2.5)$$

Το κέρδος χρονοπρογραμματισμού $g_i(\vec{n})$ περιγράφει το κέρδος έναντι της εξυπηρέτησης με τον Round Robin (RR) αλγόριθμο, που δίνει τυχαία το κανάλι σε κάθε χρήστη, ανεξάρτητα από τις συνθήκες μετάδοσης. Στην περίπτωση του RR ο μέσος ρυθμός εξυπηρέτησης της κλάσης- i ισούται με το μέσο ρυθμό μετάδοσης ζεύξης. Το κέρδος χρονοπρογραμματισμού συμπεριλαμβάνει το συνδυασμένο αποτέλεσμα της επίδρασης της πολιτικής του χρονοπρογραμματισμού (μέσω των βαρών φ_j), της ετερογένειας του πληθυσμού (μέσω του \vec{n} και των μέσων τιμών SNR $\{\bar{x}_k\}_{k=1}^L$), του μοντέλου ταχέων διαλείψεων (μέσω της CDF $\hat{F}(\cdot)$ που είναι ίδια για όλες τις κλάσεις) και του Επιπέδου Ζεύξης μέσω της συνάρτησης στιγμιαίου ρυθμού μετάδοσης $h(\cdot)$.

Στην περίπτωση του ευκαιριακού αλγορίθμου Μεγίστου SNR, θέτουμε $\varphi_i = 1$ για όλες τις κλάσεις. Τότε τα κλάσματα στα ορίσματα του $\hat{F}(\cdot)$ στην (2.4) καταλήγουν απλώς σε \bar{x}_i/\bar{x}_j . Για τις κλάσεις i με χαμηλό μέσο SNR, $\bar{x}_i/\bar{x}_j \ll 1$ και ο μέσος ρυθμός εξυπηρέτησης καθώς και το κέρδος χρονοπρογραμματισμού μηδενίζονται. Αντιθέτως, για κλάσεις i με μεγάλο SNR, $\bar{x}_i/\bar{x}_j \gg 1$ για όλα τα $j \neq i$, το γινόμενο στη (2.4) τείνει στο 1 και τότε ο ρυθμός εξυπηρέτησης καθώς και το κέρδος χρονοπρογραμματισμού της συγκεκριμένης κλάσης προσεγγίζει την αντίστοιχη τιμή ενός συστήματος όπου στο θάλαμο εξυπηρέτησης υπάρχουν μόνο οι χρήστες της κλάσης- i . Η εξέταση λοιπόν της επίδοσης του Μεγίστου SNR υπό σταθερό πληθυσμό ροών, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι «απομακρυσμένοι» από το ΣΒ χρήστες θα εξυπηρετούνται ελάχιστα, ενώ οι «κοντινοί» στο ΣΒ χρήστες θα μονοπωλούν το κανάλι. Ο αλγόριθμος αυτός υπό αυτή την οπτική, μεσοπρόθεσμα, είναι εντελώς άδικος.

Ένας αλγόριθμος που προσφέρει δικαιοσύνη ανάμεσα στις κλάσεις, είναι ο Αναλογικά Δίκαιος (ΑΔ) Αλγόριθμος. Η πρωταρχική εκδοχή του ΑΔ για το HDR ήταν βάρη αντιστρόφως ανάλογα στο ρυθμό εξυπηρέτησης που λαμβάνει ένας χρήστης σε ένα χρονικό παράθυρο του πρόσφατου παρελθόντος. Εδώ ακολουθούμε

τη βιβλιογραφία [CB07], [AML⁺04], και χρησιμοποιούμε βάρη αντίστροφα ανάλογα στις τιμές του μέσου SNR, $\varphi_i = 1/\bar{x}_i$ για όλες τις κλάσεις i . Με αυτή την επιλογή, από την Σχέση (2.4) καταλήγουμε στην Σχέση:

$$\bar{r}_i(\bar{n}) = \bar{r}_i(n) = \int_0^\infty h(\bar{x}_i, y) \hat{F}(y)^n d\hat{F}(y). \quad (2.6)$$

Ο ρυθμός εξυπηρέτησης (και το κέρδος χρονοπρογραμματισμού) οποιασδήποτε κλάσης εξαρτάται από το συνολικό αριθμό των χρηστών n και όχι από το πληθυσμό των χρηστών στις κλάσεις. Ο ρυθμός εξυπηρέτησης ενός χρήστη της κλάσης- i από τον ΑΔ αλγόριθμο είναι $\bar{r}_i(n)/n$. Η πιθανότητα ένας χρήστης της κλάσης- i να μεταδώσει δεδομένα είναι $\int_0^\infty \hat{F}(y)^{n-1} d\hat{F}(y) = 1/n$. Στην επόμενη Ενότητα παρουσιάζουμε προσεγγίσεις που προσφέρουν σημαντικά συμπεράσματα στην αξιολόγηση της επίδοσης του ΑΔ.

2.4 Προσεγγίσεις μέσου ρυθμού ζεύξης και κέρδους χρονοπρογραμματισμού

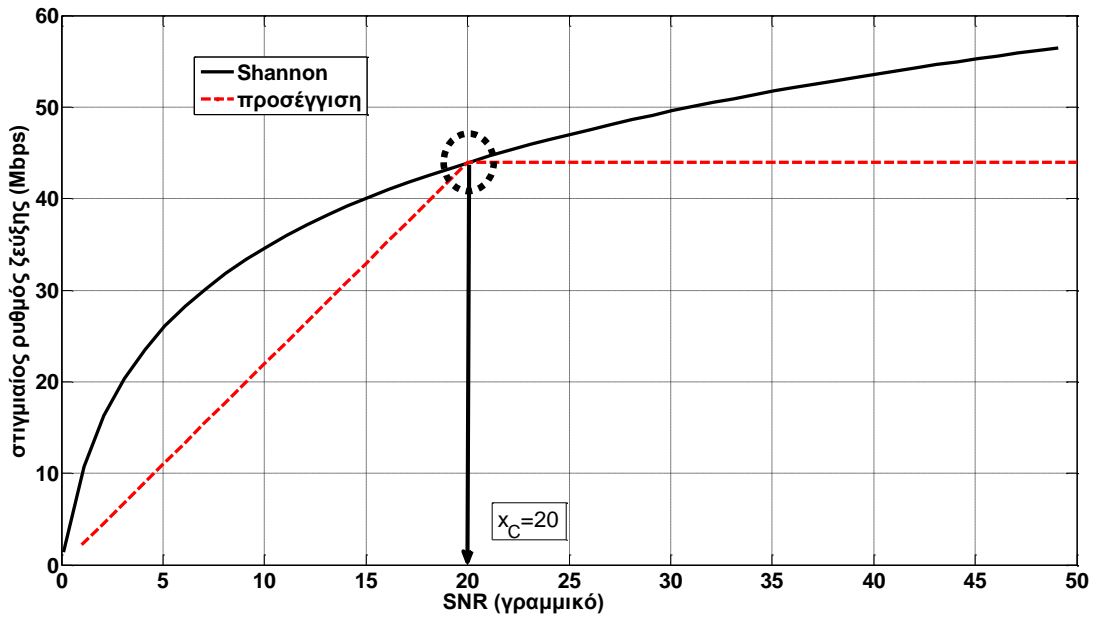
Για την κατανόηση της επίδρασης των παραμέτρων των διαλείψεων (Φυσικό Επίπεδο) στο στοχαστικό μοντέλο στην Ενότητα (§2.3) προχωρούμε σε πρωτότυπες προσεγγίσεις του κέρδους χρονοπρογραμματισμού και του μέσου ρυθμού μετάδοσης ζεύξης που προσφέρουν με απλότητα και ενάργεια την επίδραση του Φυσικού Επιπέδου στο ρυθμό εξυπηρέτησης στο Επίπεδο Μέσου. Οι σχέσεις αυτές επιτρέπουν την εύκολη ρύθμιση παραμέτρων του συστήματος καθώς και διατύπωση προβλημάτων βελτιστοποίησης. Στο Κεφάλαιο 3 οι προσεγγίσεις αυτές βοηθούν στην επίλυση προβλημάτων εύρεσης της κατανομής των ενεργών χρηστών που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία στα πλαίσια της Διατριβής.

2.4.1 Προσέγγιση κέρδους χρονοπρογραμματισμού

Μπορούμε να προσεγγίσουμε το στιγμιαίο ρυθμό μετάδοσης $h(\bar{x}_i, y)$ στη (2.1) με τη κάτωθι τμηματικά γραμμική και τμηματικά σταθερή συνάρτηση:

$$h(\bar{x}_i y) \approx \check{h}(\bar{x}_i y) = \begin{cases} \beta \bar{x}_i y, & \bar{x}_i y \leq x_c, \\ \beta \bar{x}_i, & \bar{x}_i y > x_c, \end{cases} \quad (2.7)$$

όπου β είναι ο συντελεστής αναλογίας της τμηματικά γραμμικής προσέγγισης, $x_c \geq 1$ είναι το κατώφλι της μετάβασης από τμηματικά γραμμική σε τμηματικά σταθερή προσέγγιση (Σχήμα 2.3). Η σταθερά x_c είναι ίδια για όλες τις κλάσεις.



Σχήμα 2.3: Τμηματική γραμμική και τμηματικά σταθερή προσέγγιση του στιγμιαίου ρυθμού ζεύξης.

Ακολουθεί η προσεγγιστική σχέση του κέρδους χρονοπρογραμματισμού του ΑΔ αλγόριθμου κατόπιν της χρήσης της τμηματικά γραμμικής και τμηματικά σταθερής συνάρτησης στιγμιαίου ρυθμού μετάδοσης ζεύξης. Η απόδειξη δίδεται στο Παράρτημα Α.1.

$$g_i(n) \approx g_{PF} = \frac{1}{1-f_1} \text{ για } \bar{x}_i \leq x_c, \quad (2.8)$$

$$\text{όπου } f_1 = \int_1^\infty (1-\hat{F}(y))dy.$$

Η παράμετρος f_1 αντιστοιχεί στο ολοκλήρωμα της CCDF της κανονικοποιημένης κατανομής Erlang-m και αντανακλά τη συμπεριφορά της κανονικοποιημένης κατανομής στην ουρά της.

Σύμφωνα με τη (2.8) το κέρδος χρονοπρογραμματισμού που επιφέρει ο ΑΔ αλγόριθμος είναι προσεγγιστικά σταθερό, δεν εξαρτάται δηλαδή από τον αριθμό των ενεργών χρηστών στο θάλαμο εξυπηρέτησης και μάλιστα είναι ίδιο για όλες τις

κλάσεις. Συγκεκριμένα, το κέρδος χρονοπρογραμματισμού εξαρτάται μόνο από τα χαρακτηριστικά της κανονικοποιημένης κατανομής Erlang- m . Το συμπέρασμα αυτό απλοποιεί τρομερά όπως θα δούμε στο Κεφάλαιο 3 την εύρεση της ρυθμαπόδοσης ενός χρήστη μακροπρόθεσμα, καθώς και την κατανομή των ενεργών χρηστών. Επειδή η διασπορά της μεταβλητής y είναι $1/m$, η ποσότητα f_1 μειώνεται όσο αυξάνει το m και έτσι το μεγαλύτερο κέρδος χρονοπρογραμματισμού στον ΑΔ είναι $g_{PF} = 1.58$ στην περίπτωση της εκθετικής κατανομής.

2.4.2 Προσέγγιση μέσου ρυθμού ζεύξης

Εισάγουμε την παρακάτω κανονικοποιημένη κατανομή CDF $\check{F}(y)$

$$\check{F}(y) = \begin{cases} \hat{F}(y), & y < b, \\ u(y-b), & y \geq b, \end{cases} \quad (2.9)$$

όπου $u(\cdot)$ είναι η συνάρτηση μοναδιαίου βήματος. Η σταθερά b παίρνει την ίδια τιμή για όλες τις κλάσεις. Ακολουθεί η προσεγγιστική σχέση για το μέσο ρυθμό ζεύξης. Η απόδειξη δίδεται στο Παράρτημα Α2.

$$\begin{aligned} \bar{r}_i(1) &\approx R_0 \log_2(1 + (1 - f_1)\bar{x}_i), \\ \text{όπου } f_1 &= \int_1^\infty (1 - \hat{F}(y))dy < 1, \end{aligned} \quad (2.10)$$

Για σταθερό εύρος ζώνης συνοχής B_c , δηλαδή για συγκεκριμένο περιβάλλον διάδοσης, λαμβάνοντας υπόψη τις σχέσεις (2.8) και (2.10) συνάγουμε ότι το κέρδος χρονοπρογραμματισμού στον ΑΔ αλγόριθμο αυξάνεται όταν μειώνεται το m και ο μέσος ρυθμός ζεύξης αυξάνεται όταν αυξάνεται το m . Όμως, λόγω της (2.10) ο ρυθμός ζεύξης αυξάνεται πολύ αργά. Το γινόμενο των δυο δίνει το ρυθμό εξυπηρέτησης της κλάσης- i κατά την εφαρμογή του ΑΔ αλγορίθμου. Επομένως, ένα πρώτο σημαντικό συμπέρασμα που βγαίνει από τις προσεγγιστικές σχέσεις για τη σχεδίαση των RBs στο πλαίσιο OFDMA σε κάθε ΤΤΙ είναι ότι το εύρος ζώνης του RB B_s πρέπει να είναι όσο πιο κοντά γίνεται στο εύρος ζώνης συνοχής B_c και $m=1$. Το εύρος ζώνης συνοχής είναι συνήθως μικρό στους εξωτερικούς χώρους (~KHz) και αρκετά μεγάλο στους εσωτερικούς χώρους (~MHz) [ZS07]. Λόγοι σηματοδοσίας (signaling) αναγκάζουν το $m > 1$, ειδικά στην περίπτωση των εξωτερικών χώρων διάδοσης σε μεγάλες πόλεις. Επιπλέον, ένα άλλο συμπέρασμα είναι ότι η αξιοποίηση

της τεχνικής του OFDMA ακόμη και με τον απλό τρόπο της τυχαίας επιλογής χρήστη για κάθε RB ξεχωριστά αναμένεται να επιφέρει κέρδος έναντι της τεχνικής OFDM.

2.5 Ενεργειακή Επίδοση

Η ενεργειακή επίδοση ενός χρήστη ορίζεται ως ο λόγος των μεταδιδόμενων bits προς τη συνολικά καταναλισκόμενη ενέργεια στο τερματικό ενός χρήστη σε μονάδα Joule. Η ενέργεια που καταναλίσκεται στο τερματικό ενός χρήστη της κλάσης- i εξαρτάται από το σταθερό κομμάτι κατανάλωσης ισχύος (CPU, οθόνη, ενισχυτής κτλ...) και από το δυναμικό κομμάτι κατανάλωσης που σχετίζεται με τη μεταδιδόμενη ισχύ $P(l_i)$. Στην Ενότητα (§2.5.1) αξιολογούμε την προσέγγιση του μέσου ρυθμού ζεύξης στην Ενότητα (§2.4.2), στη σχέση (2.10), προκειμένου να καταλήξουμε πάλι σε απλές αναλυτικές σχέσεις που παρέχουν σημαντικά συμπεράσματα για το βέλτιστο ρυθμό εξυπηρέτησης που μεγιστοποιεί την ενεργειακή επίδοση ενός χρήστη στο δίκτυο. Επιπρόσθετα προτείνουμε έναν αλγόριθμο προσαρμογής βέλτιστου ρυθμού ζεύξης που δέχεται ως όρισμα τον αριθμό των συνολικών ενεργών ροών. Στο Κεφάλαιο 3 θα δούμε ότι η ενεργειακή επίδοση μακροπρόθεσμα, με μεταβαλλόμενο πληθυσμό ροών, είναι πολύ μεγαλύτερη απ' αυτή που περιμένουμε με σταθερό αριθμό ροών. Αυτό το συμπέρασμα είναι πολύ σημαντικό γιατί μας επιβάλλει την ξεχωριστή εξέταση της ενεργειακής επίδοσης και συνακόλουθα διαφορετική παραμετροποίηση του συστήματος όταν χρησιμοποιείται ένας ευκαιριακός χρονοπρογραμματιστής.

2.5.1 Βέλτιστη προσαρμογή ρυθμού εξυπηρέτησης και ρυθμού ζεύξης

Ορίζουμε την παράμετρο $\nu(l)$ που εξαρτάται μόνο από σταθερές του μοντέλου απωλειών, την απόσταση από το ΣΒ και το γινόμενο N_0W ,

$$\nu(l) = N_0W / (A \cdot l^{-\alpha}) \quad (2.11)$$

Σε αυτή την Ενότητα θεωρούμε ότι έχουμε χρονοπρογραμματιστή RR. Λόγω της προσεγγιστικής σχέσης της (2.10), η μεταδιδόμενη ισχύς $P(l)$ μετατρέπεται σε συνάρτηση του ρυθμού εξυπηρέτησης της κλάσης- i ως εξής:

$$\begin{aligned}
P(\bar{r}_i(n)) &= \left(2^{\bar{r}_i(n)/R_0} - 1\right) v(l_i) / (1 - f_1) = \\
&= \left(\exp(\log(2)\bar{r}_i(n)/R_0) - 1\right) v(l_i) / (1 - f_1).
\end{aligned} \tag{2.12}$$

Υποθέτουμε ότι όλοι οι χρήστες έχουν σταθερή κατανάλωση P_c στη CPU του τερματικού τους και ότι η μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύς μετάδοσης είναι P_{MAX} . Υποθέτουμε $P_c = \beta_c P_{MAX}$, όπου η σταθερά $\beta_c < 1$, ασχολούμενοι με τερματικά των οποίων η μετάδοση προκαλεί μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας, απ' ότι ο υπολογισμός και η επεξεργασία στο κύκλωμα της CPU. Σύμφωνα με πειραματικά δεδομένα στη [AMJ⁺07], η σταθερά P_c μπορεί υπό συνήθεις συνθήκες να είναι συγκρίσιμη με την μέση μεταδιδόμενη ισχύ. Η μέση μεταδιδόμενη ισχύς προκύπτει ως το γινόμενο της μεταδιδόμενης ισχύος επί του ποσοστού του χρόνου που ο χρήστης εξυπηρετείται. Στην περίπτωση του χρονοπρογραμματιστή RR, η μέση ισχύς είναι: $P(\bar{r}_i(n))/n$.

Η ενεργειακή επίδοση του χρήστη της κλάσης- i ορίζεται ως ο λόγος του ρυθμού εξυπηρέτησης του χρήστη $\bar{r}_i(n)/n$ προς το άθροισμα της συνολικής ισχύος κατανάλωσης στο κινητό τερματικό του μεσοπρόθεσμα. Στη περίπτωση του χρονοπρογραμματιστή RR η ενεργειακή επίδοση του χρήστη της κλάσης- i είναι:

$$U_i = \frac{\bar{r}_i(n)/n}{P(\bar{r}_i(n))/n + P_c} = \frac{\bar{r}_i(n)}{P(\bar{r}_i(n)) + P_c n}, \tag{2.13}$$

εκφράζοντας το λόγο του αριθμού των bits που μεταδίδονται από τον χρήστη προς τη συνολική καταναλισκόμενη ενέργεια στο κινητό τερματικό του μεσοπρόθεσμα. Αν ο ρυθμός εξυπηρέτησης $\bar{r}_i(n)$ είναι γνησίως αύξουσα και κοίλη συνάρτηση της στιγμιαίας μεταδιδόμενης ισχύος $P(\bar{r}_i(n))$, τότε υπάρχει πάντα μια βέλτιστη τιμή $\bar{r}_i^*(n)$ που μεγιστοποιεί την ενεργειακή επίδοση U_i . Συγκεκριμένα, σύμφωνα με την [MHL⁺08, εξ.(8)],

$$\bar{r}_i^*(n) = \frac{P(\bar{r}_i^*(n)) + P_c n}{P'(\bar{r}_i^*(n))}, \tag{2.14}$$

όπου $P'(\bar{r}_i^*(n))$ είναι η πρώτη παράγωγος σε σχέση με το $\bar{r}_i(n)$. Παρότι η ανάλυση στο [MHL⁺08] παρέχει την (2.14) θεωρώντας $n=1$, (η επέκταση για $n>0$ είναι ξεκάθαρη), σταματά στην συγκεκριμένη μορφή παρουσίασης του βέλτιστου μέσου

ρυθμού εξυπηρέτησης $\bar{r}_i^*(n)$, ακολουθώντας αριθμητικές μεθόδους για την αξιολόγηση της επίδοσής της. Το παρακάτω Θεώρημα παρέχει αναλυτικό τύπο κλειστής μορφής για τον βέλτιστο μέσο ρυθμό εξυπηρέτησης $\bar{r}_i^*(n)$, αξιοποιώντας τις ιδιότητες της συνάρτησης. Η απόδειξη παρέχεται στο Παράρτημα Α.3.

Θεώρημα 1: *Ο βέλτιστος ρυθμός εξυπηρέτησης $\bar{r}_i^*(n)$ παρέχεται από τον κάτωθι αναλυτικό τύπο*

$$\bar{r}_i^*(n) = \frac{R_0}{\log(2)} \left(\mathbf{W} \left(\frac{((1-f_1)nP_C/v(l_i)-1)}{\exp(1)} \right) + 1 \right), \quad (2.15)$$

όπου $\mathbf{W}(z)$ είναι η συνάρτηση Lambert που ικανοποιεί τη σχέση $z = \mathbf{W}(z) \exp(\mathbf{W}(z))$. Η σχέση (2.15) μας επιτρέπει να προτείνουμε έναν αλγόριθμο βέλτιστης προσαρμογής ζεύξης που δέχεται ως όρισμα τη κατάσταση του συστήματος n , δηλαδή τον αριθμό των ενεργών χρηστών, τον οποίο ονομάζουμε Καταστασιακά Εξαρτημένο (ΚΕ) αλγόριθμο. Η πληροφορία για την κατάσταση του συστήματος μπορεί να ανακτηθεί εύκολα από το σύστημα με την μετάδοση ενός πακέτου ανά τακτά χρονικά διαστήματα σε όλους στους χρήστες στη κατερχόμενη ζεύξη.

Επιπρόσθετα, παρέχουμε προσεγγιστικές σχέσεις για την αναλυτική σχέση (2.15), εκφρασμένες σε απλούς όρους που επιτρέπουν την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων για την επίδοση του προτεινόμενου βέλτιστου αλγόριθμου προσαρμογής ζεύξης ΚΕ. Σε αυτή την κατεύθυνση αξιοποιούνται προσεγγιστικές αναλυτικές σχέσεις της συνάρτησης Lambert για διαφορετικές παραμέτρους που παρατίθενται στη [H05]. Η παρακάτω Πρόταση παρέχει τις προσεγγιστικές σχέσεις για το βέλτιστο ρυθμό εξυπηρέτησης. Η απόδειξη παρέχεται στο Παράρτημα Α.4.

Πρόταση 1: *Ο βέλτιστος ρυθμός εξυπηρέτησης $\bar{r}_i^*(n)$ του ΚΕ μπορεί να προσεγγιστεί από τις κάτωθι σχέσεις*

$$\bar{r}_i^*(n) \approx \begin{cases} R_0 \log_2 \left(\frac{(1-f_1)P_C n}{v(l)} \right) - \\ \frac{R_0}{\log(2)} \log \left(\log \left(\frac{(1-f_1)P_C n}{v(l)} \right) \right), & \frac{(1-f_1)P_C n}{v(l_i)} \geq 41.19, \\ R_0 \log_2 \left(\frac{(1-f_1)P_C n}{v(l)} \right), & 41.19 > \frac{(1-f_1)P_C n}{v(l_i)} \geq 5, \\ \frac{R_0}{\log(2)} \sqrt{2 \frac{(1-f_1)P_C}{v(l)} n}, & \frac{(1-f_1)P_C n}{v(l_i)} \ll 1. \end{cases} \quad (2.16)$$

Οι προσεγγιστικές σχέσεις για την ισχύ μετάδοσης που σχετίζεται τις αναλυτικές προσεγγιστικές σχέσεις του βέλτιστου ρυθμού εξυπηρέτησης είναι οι ακόλουθες:

$$P(\bar{r}_i^*(n)) \approx \begin{cases} P_C n / \log \left(\frac{(1-f_1)P_C n}{v(l)} \right), & \frac{(1-f_1)P_C n}{v(l_i)} \geq 41.19, \\ P_C n, & 41.19 > \frac{(1-f_1)P_C n}{v(l_i)} \geq 5, \\ P_C n + \sqrt{2 \frac{v(l)}{(1-f_1)} P_C n}, & \frac{(1-f_1)P_C n}{v(l_i)} \ll 1. \end{cases} \quad (2.17)$$

Για $n=1$ και $f_1=0$ (διάδοση χωρίς διαλείψεις) καταλήγουμε στον Καταστασιακά Ανεξάρτητο (ΚΑ) αλγόριθμο προσαρμογής ζεύξης που έχει προταθεί εδώ [MHL⁺08].

Και οι τρεις σχέσεις της (2.17) μας παρέχουν άμεσα συμπεράσματα για την επίδοση του ΚΕ αλγορίθμου προσαρμογής ζεύξης συναρτήσει του σταθερού κομματιού της κατανάλωσης ισχύος P_C . Η τρίτη σχέση στην (2.17) αποκαλύπτει ότι για τους «απομακρυσμένους» χρήστες, η βέλτιστη μεταδιδόμενη ισχύς είναι μεγαλύτερη από $P_C n$ και ακολουθεί αύξηση μεγαλύτερη από γραμμική τόσο όσον αφορά την απόσταση l , όσο και την κατάσταση n , πλησιάζοντας γρήγορα τη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή μεταδιδόμενης ισχύος P_{MAX} για σχετικά μικρή τιμή n , μην αφήνοντας σημαντικά περιθώρια για βελτίωση της ενεργειακής επίδοσης του «απομακρυσμένου» χρήστη.

Σύμφωνα με τις δυο πρώτες σχέσεις στη (2.17) για τους «κοντινούς χρήστες» η μεταδιδόμενη ισχύς είναι μικρότερη ή ίση από $P_C n$. Για σχετικά χαμηλή τιμή του n , ο βέλτιστος μέσος ρυθμός εξυπηρέτησης $\bar{r}_i^*(n)$ αναμένεται να φτάσει γρήγορα στη μέγιστη τιμή του, εάν η παράμετρος P_C παίρνει τιμή κοντά στη P_{MAX} , έστω $\beta_C \geq 0.5$.

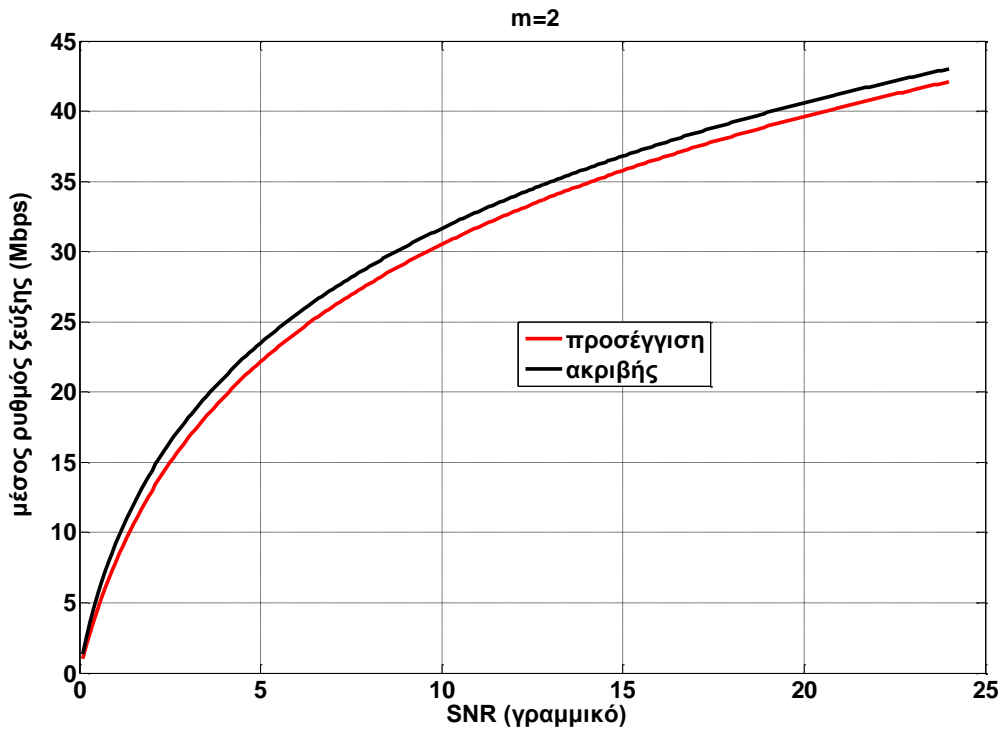
Σε αυτή την περίπτωση ο προτεινόμενος αλγόριθμος δεν έχει σημαντικό αποτέλεσμα στην επίδοση έναντι του αλγορίθμου KA στην [MHL⁺08], εκτός από τις πολύ κοντινές αποστάσεις στο ΣΒ, όπως φαίνεται από τη πρώτη σχέση της (2.17). Παρόλα αυτά, αν η παράμετρος P_C είναι αρκετά μικρότερη από την P_{MAX} , έστω $\beta_C = 0.1$ τότε ο βέλτιστος ρυθμός εξυπηρέτησης $\bar{r}_i^*(n)$ αυξάνεται σημαντικά ως συνάρτηση της κατάστασης n και τότε ο προτεινόμενος αλγόριθμος KE αναμένεται να ξεπεράσει σε επίδοση τον αλγόριθμο KA στη [MHL⁺08].

2.6 Αριθμητικά αποτελέσματα και σχολιασμός

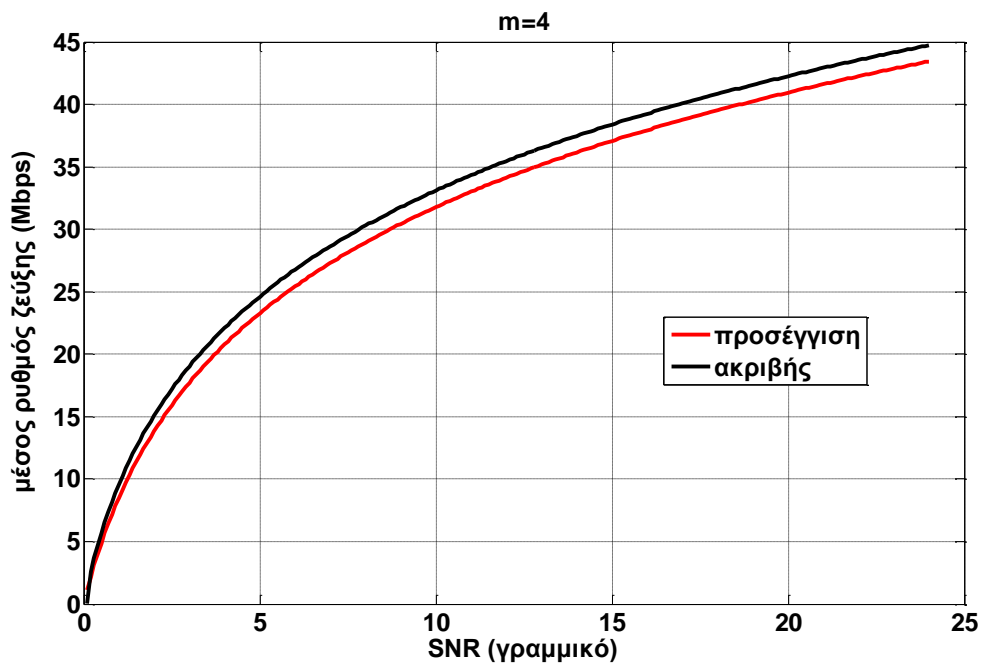
Θεωρούμε μια μικρή κυψέλη LTE στα 2 GHz με εύρος ζώνης $W=10\text{MHz}$ και εξετάζουμε την ανερχόμενη ζεύξη. Οι σταθερές του ντετερμινιστικού μοντέλου απωλειών είναι $A=0.0017$ όπως εδώ [CEG97, εξ.(10)] και $a=3.8$. Η φασματική πυκνότητα ισχύος του Προσθετικού Λευκού Γκαουσιανού Θορύβου είναι $N_0=-174\text{dbm/Hz}$. Το εύρος ζώνης ενός RB στο LTE είναι $B_s=180\text{kHz}$. Η διάρκεια του TTI είναι 1 msec. Στη δημοσίευση [ZS07], το εύρος ζώνης συνοχής που αντιστοιχεί στη διάδοση σε ανοιχτό εξωτερικό χώρο σε συνθήκες διαλείψεων Rayleigh υπολογίζεται $B_c=100\text{kHz}$. Τότε το στιγμιαίο x ακολουθεί Erlang- $m=2$ κατανομή, η αντίστοιχη ποσότητα $f_1=0.27$ στη σχέση (2.9) στην Ενότητα (§2.4.1), και το κέρδος χρονοπρογραμματισμού, εφόσον αξιοποιείται ο ΑΔ αλγόριθμος, είναι σύμφωνα με την προσέγγιση στη (2.9) $g_{PF} = \frac{1}{1-f_1} = 1.37$.

2.6.1 Αξιολόγηση της επίδοσης των βασικών προσεγγιστικών σχέσεων για το κέρδος χρονοπρογραμματισμού και το μέσο ρυθμό ζεύξης

Στα Σχήματα 2.4, 2.5 παρουσιάζονται οι καμπύλες του μέσου ρυθμού ζεύξης $\bar{r}_i(1)$ στη (2.3) συναρτήσει του μέσου SNR \bar{x}_i καθώς η προσεγγιστική σχέση του μέσου ρυθμού ζεύξης στη (2.10) για Erlang-2 και Erlang-4. Στην τελευταία περίπτωση $f_1=0.2$ και το αντίστοιχο κέρδος χρονοπρογραμματισμού στην περίπτωση που εφαρμόζεται ο ΑΔ είναι $g_{PF}=1.25$. Τα αποτελέσματα που βασίζονται στη προσέγγιση $\bar{r}_i(1) \approx R_0 \log_2(1+(1-f_1)\bar{x}_i)$ στη (2.10) πλησιάζουν αρκετά καλά τα αριθμητικά αποτελέσματα της ακριβούς έκφρασης του μέσου ρυθμού ζεύξης. Επιπλέον, βλέπουμε ότι για μεγαλύτερη τιμή της παραμέτρου m ο μέσος ρυθμός ζεύξης αυξάνεται, όπως αναμένεται λόγω της ποσότητας f_1 που μειώνεται με την αύξηση της τιμής της παραμέτρου m .



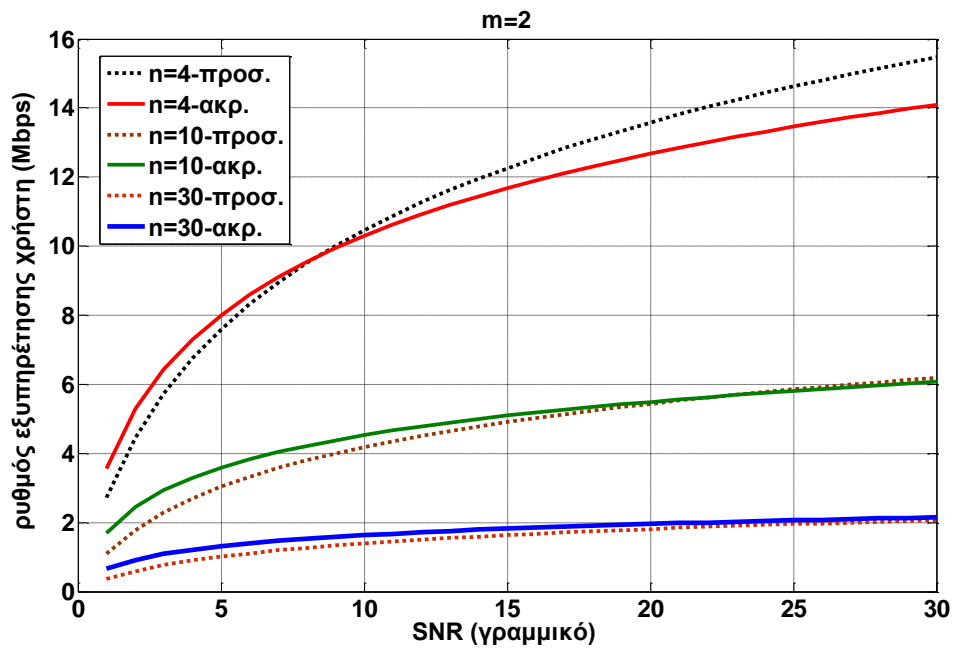
Σχήμα 2.4: Μέσος ρυθμός ζεύξης, ακριβή αριθμητικά αποτελέσματα και προσεγγιστική σχέση για Erlang-m=2.



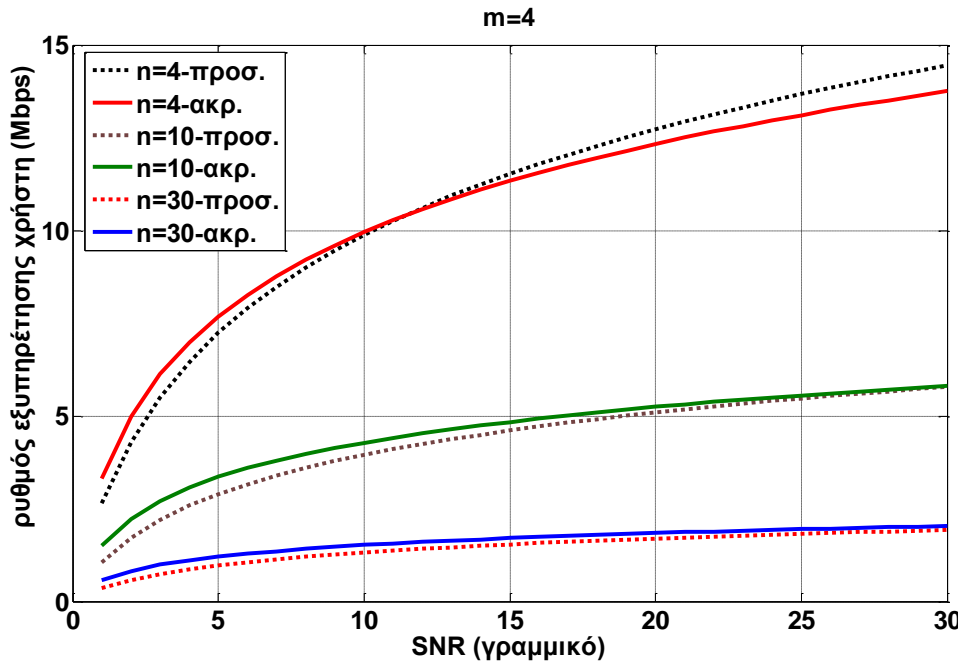
Σχήμα 2.5: Μέσος ρυθμός ζεύξης, ακριβή αριθμητικά αποτελέσματα και προσεγγιστική σχέση για Erlang-m=4.

Τα Σχήματα 2.6, 2.7 παρουσιάζουν την ακριβή σχέση του ρυθμού εξυπηρέτησης του χρήστη $\bar{r}_i(n)/n$ στη (2.6) συναρτήσει του μέσου SNR \bar{x}_i καθώς και την

αντίστοιχη προσέγγιση που προκύπτει από το γινόμενο του προσεγγιστικά σταθερού κέρδους χρονοπρογραμματισμού στη σχέση (2.8), $g_{PF} = \frac{1}{1-f_1}$ και της προσέγγισης του μέσου ρυθμού ζεύξης στη (2.10), για τιμές κατάστασης συστήματος $n=4$, $n=10$, $n=30$. Σε όλες τις περιπτώσεις η προτεινόμενη προσέγγιση πλησιάζει ικανοποιητικά τα αριθμητικά αποτελέσματα της ακριβούς έκφρασης του ρυθμού εξυπηρέτησης του χρήστη $\bar{r}_i(n)/n$ στη (2.6).



Σχήμα 2.6: Ρυθμός εξυπηρέτησης χρήστη στον ΑΔ αλγόριθμο, ακριβή αριθμητικά αποτελέσματα και προσεγγιστική σχέση για Erlang- $m=2$.



Σχήμα 2.7: Ρυθμός εξυπηρέτησης χρήστη στον ΑΔ αλγόριθμο, ακριβή αριθμητικά αποτελέσματα και προσεγγιστική σχέση για Erlang- $m=4$.

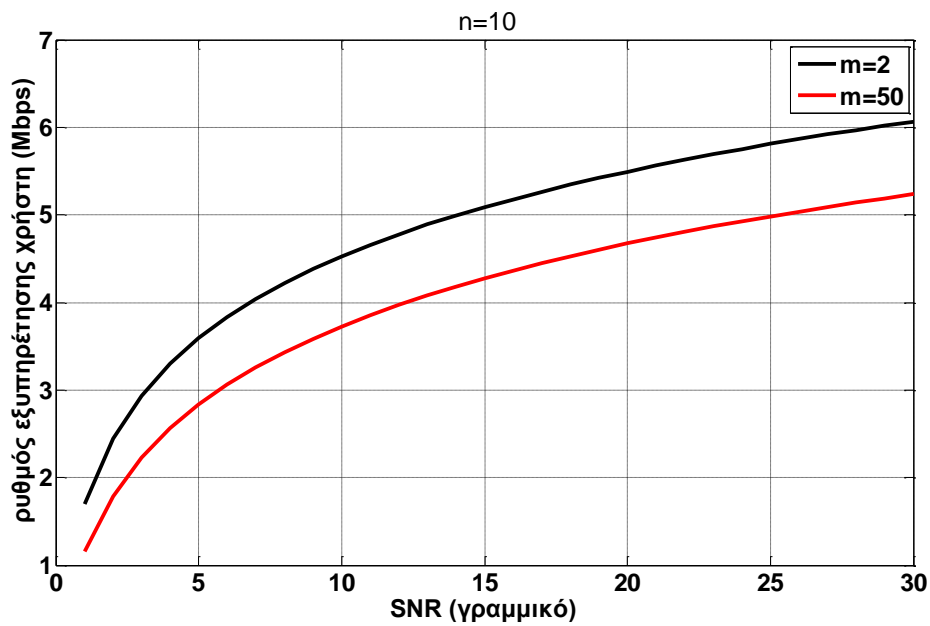
Τα αποτελέσματα αποκαλύπτουν ότι οι προτεινόμενες προσεγγιστικές σχέσεις μπορούν να είναι αρκετά χρήσιμες για την αξιολόγηση της επίδοσης χρηστών σε συγκεκριμένα συστήματα.

Σε αυτό το σημείο θα δείξουμε το κέρδος που προκύπτει από τη χρήση της τεχνικής του OFDMA έναντι του OFDM. Το Σχήμα 2.8 παρουσιάζει αριθμητικά αποτελέσματα της ακριβούς σχέσης του ρυθμού εξυπηρέτησης του χρήστη $\bar{r}_i(n)/n$ στη (2.6) συναρτήσει του μέσου SNR \bar{x}_i για $m=2$ (περίπτωση OFDMA) και $m=50$ (περίπτωση OFDM). Στο Σχήμα 2.8 παρατηρούμε ότι ο ρυθμός εξυπηρέτησης χρήστη αυξάνεται όταν το m μειώνεται, πράγμα που όπως σχολιάσαμε στην Ενότητα (§2.4.2) αναμένουμε λόγω της μορφής του γινομένου των προσεγγιστικών σχέσεων για το ρυθμό εξυπηρέτησης της κλάσης- i σύμφωνα με τον

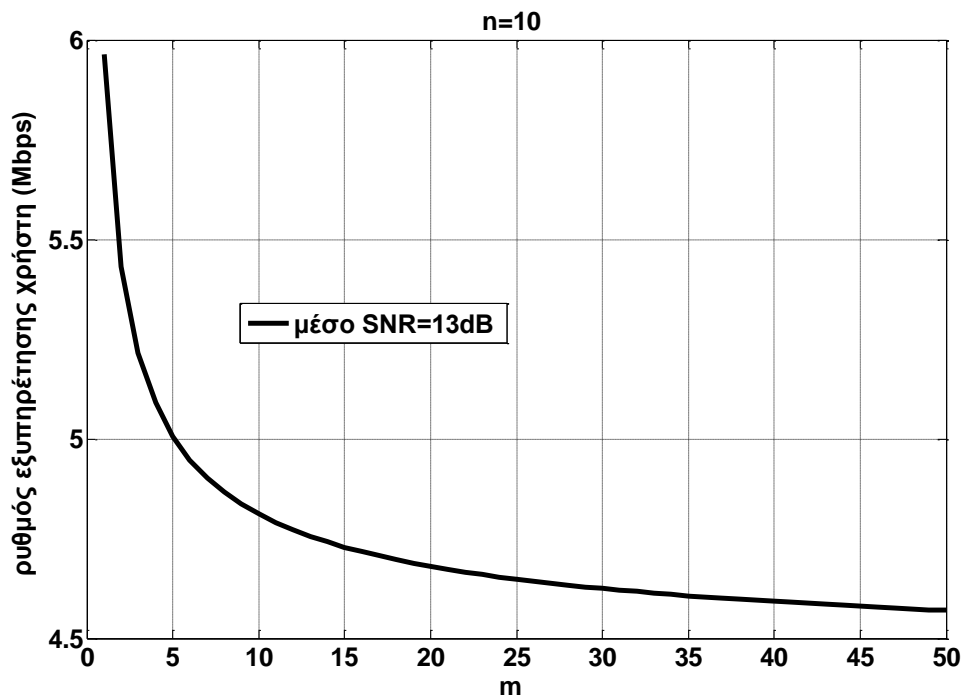
ΑΔ αλγόριθμο, $\bar{r}_i(n) \approx \frac{1}{1-f_1} R_0 \log_2(1+(1-f_1)\bar{x}_i)$. Στο σχήμα 2.9 παρουσιάζεται η

προσεγγιστική σχέση του γινομένου διηρημένου δια της κατάστασης συστήματος, συναρτήσει του της παραμέτρου m και για κατάσταση συστήματος $n=10$ και $\bar{x}_i=20$ ή 13dB. Είναι ολοφάνερο ότι η επιλογή προτίμησης εύρους ζώνης

στοιχειώδους μονάδας δέσμευσης πόρων στο OFDMA (RB στο LTE) πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη.



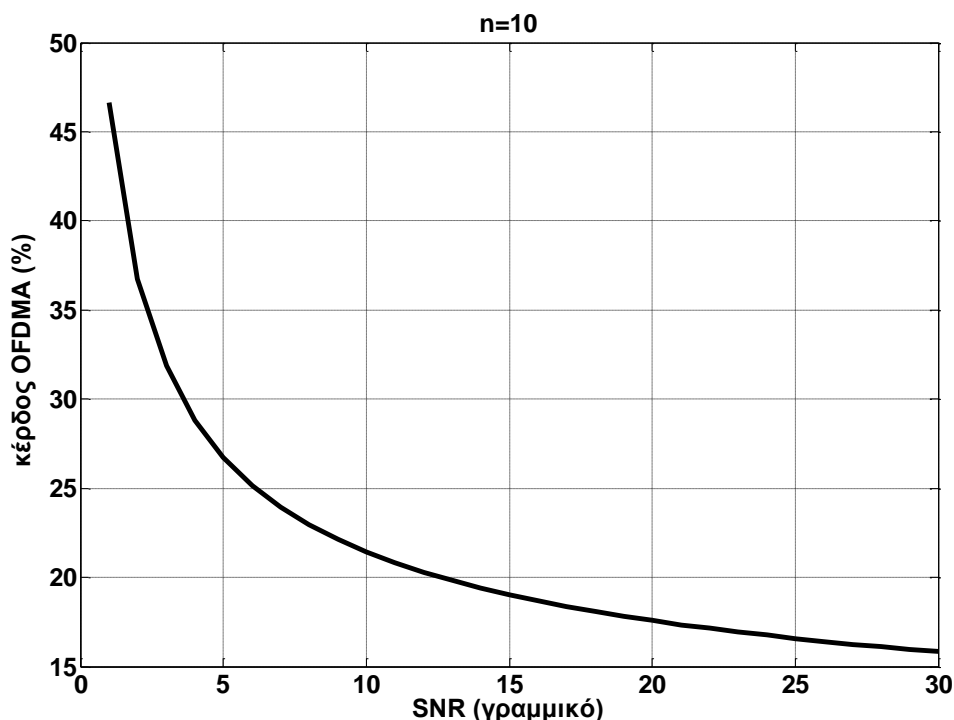
Σχήμα 2.8: Ρυθμός εξυπηρέτησης χρήστη στο ΑΔ αλγόριθμο, ακριβή αριθμητικά αποτελέσματα Erlang-m=2 και Erlang-m=50.



Σχήμα 2.9: Προσεγγιστική σχέση ρυθμού εξυπηρέτησης χρήστη στο ΑΔ αλγόριθμο συναρτήσει της παραμέτρου m.

Ακολούθως, το Σχήμα 2.10 παρουσιάζει τη ποσοστιαία αύξηση του ρυθμού εξυπηρέτησης χρήστη του OFDMA έναντι του OFDM συναρτήσει του SNR για

κατάσταση συστήματος $n = 10$. Για χαμηλή τιμή μέσου SNR, $\bar{x}_i = 1(0dB)$ το κέρδος είναι 45% και για υψηλές τιμές SNR, $\bar{x}_i = 30(14,4dB)$ 16%. Η υπεροχή της τεχνικής του OFDMA έναντι του OFDM όσον αφορά το ρυθμό εξυπηρέτησης, αξιοποιώντας το κέρδος χρονοπρογραμματισμού είναι αρκετά σημαντική.

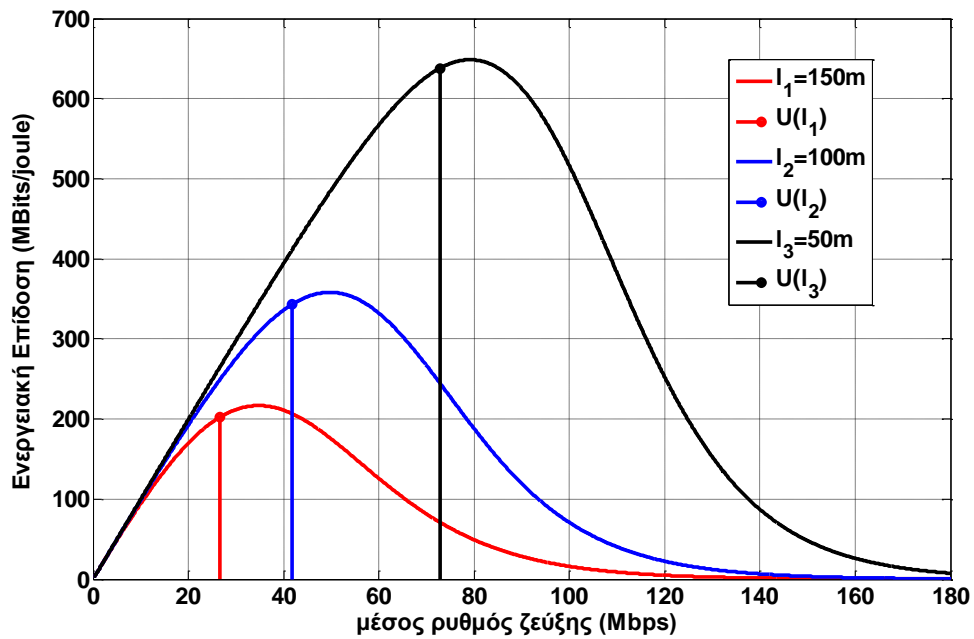


Σχήμα 2.10: Ποσοστιαία αύξηση του ρυθμού εξυπηρέτησης χρήστη με χρήση τεχνικής OFDMA έναντι OFDM.

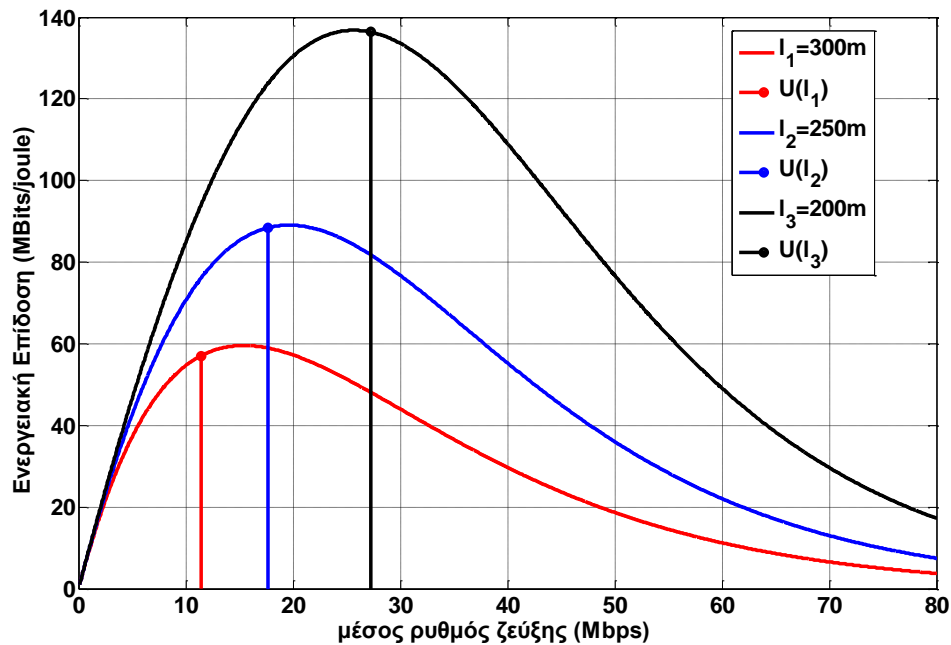
2.6.2 Αξιολόγηση της επίδοσης του βέλτιστου αλγορίθμου προσαρμογής ζεύξης

Σε αυτό το σημείο προχωρούμε στην αξιολόγηση των προσεγγιστικών σχέσεων για το βέλτιστο ρυθμό ζεύξης στην Ενότητα (§2.5.1). Τα Σχήματα 2.11, 2.12 και 2.13 παρουσιάζουν την ενεργειακή επίδοση $U(l_i)$ στη (2.13) συναρτήσει του μέσου ρυθμού εξυπηρέτησης $\bar{r}_i(1)$ για διαφορετικές αποστάσεις και Erlang-m=2. Εδώ θεωρούμε ότι η σταθερή καταναλισκόμενη ισχύς είναι $P_C = 0.1Watt$ και ότι η μέγιστη μεταδιδόμενη ισχύς είναι $P_{MAX} = \infty$. Οι κατακόρυφες γραμμές αντιπροσωπεύουν διαφορετικές τιμές της ενεργειακής επίδοσης $U(l_i)$ σε τιμές της βέλτιστης επίδοσης $\bar{r}_i^*(1)$ όπως προσεγγίζονται από τις τρεις προσεγγιστικές σχέσεις στη (2.16). Στο

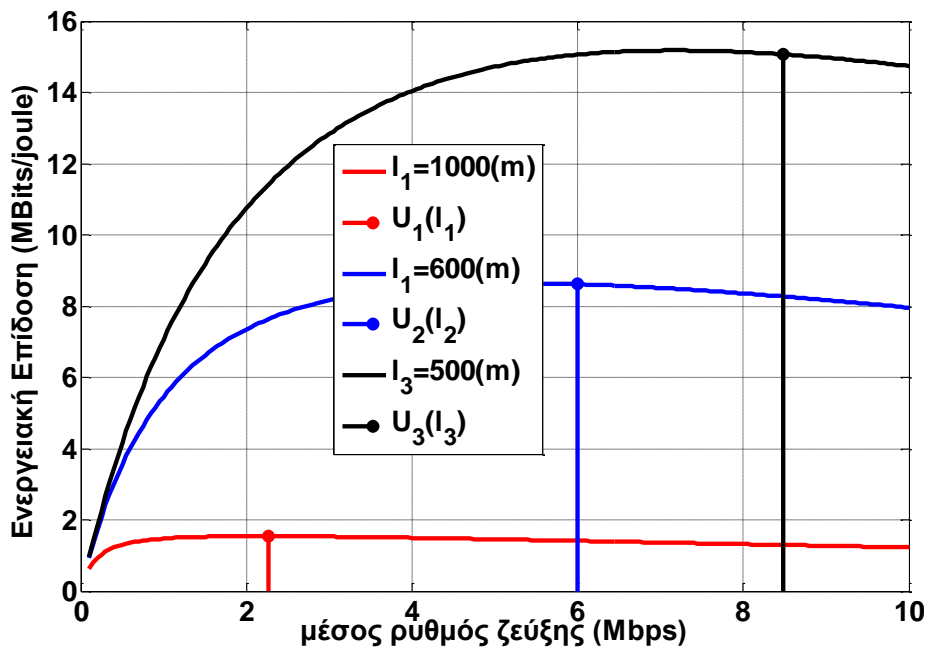
Σχήμα 2.11 οι κατακόρυφες γραμμές αντιστοιχούν στη πρώτη σχέση, στο Σχήμα 2.12 στη δεύτερη σχέση και στο Σχήμα 2.13 στη τρίτη σχέση της (2.16). Παρατηρούμε ότι οι μέγιστες τιμές της $U(l_i)$ είναι αρκετά κοντά στις κατακόρυφες γραμμές και στα τρία σχήματα, επιβεβαιώνοντας έτσι την αξία των προσεγγιστικών σχέσεων στη (2.16) και συνακόλουθα στη (2.17).



Σχήμα 2.11: Ενεργειακή Επίδοση χρήστη συναρτήσεϊ του μέσου ρυθμού ζεύξης



Σχήμα 2.12: Ενεργειακή Επίδοση χρήστη συναρτήσεϊ του μέσου ρυθμού ζεύξης.



Σχήμα 2.13: Ενεργειακή Επίδοση χρήστη συναρτήσει του μέσου ρυθμού ζεύξης.

Οι τιμές της μεταδιδόμενης ισχύος που αντιστοιχούν στις κατακόρυφες γραμμές στο Σχήμα 2.13 είναι $\{ 1.37\text{Watt}, 0.59\text{Watt}, 0.46\text{Watt} \}$ για $\{ 1000\text{m}, 600\text{m}, 500\text{m} \}$ αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι βέλτιστες τιμές μεταδιδόμενης ισχύος σε διαφορετικές αποστάσεις από το Σταθμό Βάσης μιας κυψέλης 1000m (Σχήμα 2.13), είναι στη χειρότερη περίπτωση δεκαπλάσιες της τιμής της σταθερά καταναλισκόμενης ισχύος P_C , μην αφήνοντας αρκετά περιθώρια για βελτίωση της ενεργειακής επίδοσης, αν η μέγιστη μεταδιδόμενη ισχύς P_{MAX} είναι πεπερασμένη και ίση με 0.6 Watt όπως είναι η συνηθισμένη περίπτωση στους πομπούς στην ανερχόμενη ζεύξη [CH10]. Υποθέτοντας ομοιόμορφη κατανομή χρηστών σε μια μακρο-κυψέλη, η πλειοψηφία των χρηστών σε κυψέλη με ακτίνα 1000m, ισοδύναμα το 75% όλων των χρηστών, θα βρίσκονται σε απόσταση από το Σταθμό Βάσης μεγαλύτερη ή ίση με 500m. Το συγκεκριμένο ποσοστό προκύπτει αν αγνοήσουμε τη ελάχιστη απόσταση που μπορεί να έχει ένας χρήστης από το Σταθμό Βάσης, μια προσέγγιση που είναι αρκετά ικανοποιητική για μακρο-κυψέλες μεγάλου μεγέθους.

Τέλος, παρατηρούμε ότι η ενεργειακή επίδοση χρήστη σε μια κυψέλη 1000m (Σχήμα 2.13) είναι τουλάχιστον 1 φορά μικρότερη σε τάξη μεγέθους από ότι σε κυψέλες μικρότερου μεγέθους, μικρο-κυψέλες (Σχήμα 2.12) ή μικρές κυψέλες (Σχήμα 2.11), αποκαλύπτοντας ότι τα χαρακτηριστικά της διάδοσης είναι κυρίαρχα στην

επίδοση της ενεργειακής επίδοσης. Οι μικρού μεγέθους κυψέλες, λοιπόν, ενδείκνυνται για υψηλές τιμές ενεργειακής επίδοσης.

2.7 Συμπεράσματα

Στο Κεφάλαιο αυτό είδαμε ότι με τη χρήση της γενικευμένης παραμέτρου $f_1 = \int_1^{\infty} (1 - \hat{F}(y)) dy$ που συγκεντρώνει τα χαρακτηριστικά του Φυσικού Επιπέδου, και της τεχνικής τους OFDMA (παραμετροποίηση Erlang-m) μπορούμε να έχουμε μια σειρά από σημαντικά συμπεράσματα για το κέρδος του Αναλογικά Δίκαιου Χρονοπρογραμματιστή με τη χρήση OFDMA έναντι OFDM, καθώς και για το γεγονός ότι το στον Αναλογικά Δίκαιο αλγόριθμο όλοι οι χρήστες της κυψέλης, τόσο οι «απομακρυσμένοι», όσο και οι «κοντινοί» προσεγγιστικά έχουν το ίδιο κέρδος χρονοπρογραμματισμού, το οποίο υπολογίσαμε $1/(1 - f_1)$. Η επίδοση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέτρο σύγκρισης για την ανάλυση πολυπλοκότερων αλγορίθμων ευκαιριακού χρονοπρογραμματισμού.

Στη συνέχεια δείξαμε ότι η αναλυτική προσεγγιστική σχέση του μέσου ρυθμού ζεύξης οδηγεί σε κλειστό τύπο για το βέλτιστο μέσο ρυθμό ζεύξης σε πρωτόκολλο προσαρμογής ζεύξης, όσον αφορά την μεγιστοποίηση της ενεργειακής επίδοσης στην ανερχόμενη ζεύξη. Για χρήστες σε κυψέλες μικρού μεγέθους η βέλτιστη εκπεμπόμενη ισχύς είναι μικρότερη ή ίση του γινομένου της σταθερής κατανάλωσης ισχύος nP_C . Για κυψέλες με μεγαλύτερη ακτίνα, η βέλτιστη ισχύς ακολουθεί αύξηση μεγαλύτερη από γραμμική συναρτήσει της απόστασης από το Σταθμό Βάσης, οδηγώντας γρήγορα στη μέγιστη τιμή μεταδιδόμενης ισχύος, πράγμα που σημαίνει ότι υπάρχουν περιορισμένα περιθώρια βελτίωσης της ενεργειακής επίδοσης των «απομακρυσμένων» χρηστών με την αξιοποίηση τεχνικών προσαρμογής ζεύξης. Τέλος, δείχνουμε αριθμητικά ότι οι κυψέλες μικρού μεγέθους έχουν μια τάξη μεγέθους τουλάχιστον μεγαλύτερη ενεργειακή επίδοση απ' ότι οι κυψέλες μεγάλου μεγέθους.

Κεφάλαιο 3

Μοντελοποίηση του δικτύου πρόσβασης με μεταβαλλόμενο πληθυσμό ροών

3.1 Εισαγωγή

Στο Κεφάλαιο 2 ορίσαμε το ρυθμό εξυπηρέτησης της κλάσης- i $\bar{r}_i(\bar{n})$ σε ένα θάλαμο εξυπηρέτησης ενός συστήματος χρονοπρογραμματισμού που έχει ως κριτήριο επιλογής σταθερά βάρη πολλαπλασιασμένα με το στιγμιαίο SNR του χρήστη. Στο Κεφάλαιο 2, εξετάσαμε την επίδοση των μετρικών του ρυθμού εξυπηρέτησης και της ενεργειακής επίδοσης χρήστη μεσοπρόθεσμα σε σταθερό πληθυσμό ροών. Μακροπρόθεσμα, ο πληθυσμός των ροών \bar{n} μεταβάλλεται συνεχώς. Οι ροές εμφανίζονται στα ανώτερα επίπεδα της στοίβας των πρωτοκόλλων, εισάγονται στην αναμονή του θαλάμου εξυπηρέτησης και κατόπιν αποχωρούν απ' αυτόν. Όπως θα δούμε στην Ενότητα (§3.3), εφόσον το εξεταζόμενο σύστημα χρονοπρογραμματισμού ακολουθεί την ιδιότητα της ισορροπίας (balanced property), τότε μπορεί να περιγραφεί αναλυτικά με το εύρωστο μοντέλο εξυπηρέτησης Μερισμού του Εξυπηρετητή (ME) Πολλαπλών Κλάσεων (Multi-Class Processor Sharing). Το μοντέλο ME οδηγεί στην εύρεση αναλυτικής σχέσης για τη κατανομή του πληθυσμού των ενεργών χρηστών $\pi(n_1 = k_1, \dots, n_L = k_L)$ και συνακόλουθα για τη κατανομή του συνόλου των ενεργών χρηστών $\pi(n = k)$. Η κατανομή αυτή δεν εξαρτάται από τη κατανομή της κίνησης των δεδομένων, παρά μόνο από τη μέση τιμή του μεγέθους της ροής. Αρκεί λοιπόν από τη στατιστική των δικτύων να γνωρίζουμε το μέσο μέγεθος των ροών, προκειμένου να αντιστοιχίζουμε σωστά την ένταση της κίνησης (η αλλιώς το φορτίο) που είναι αδιάστατο μέγεθος με το ρυθμό αφίξεων των ροών στο σύστημα. Αυτή η εξάρτηση μόνο από τη μέση τιμή του μεγέθους της ροής, προσδίδει ακριβώς εύρωστα χαρακτηριστικά στο μοντέλο εξυπηρέτησης του ME, και οδηγεί αντίστοιχα στην ανάλυση και μοντελοποίηση εύρωστων αλγορίθμων ευκαιριακού χρονοπρογραμματισμού καθώς και εύρωστων πρωτοκόλλων προσαρμογής ζεύξης. Μια από τις βασικές προϋποθέσεις για να ισχύει το μοντέλο του ME είναι ότι οι ροές αφικνούνται στο σύστημα με κατανομή Poisson, πράγμα που ισχύει σε μεγάλα δίκτυα πρόσβασης σε πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές, που κατακλύζονται από

ανεξάρτητους χιλιάδες χρήστες, οι οποίοι δεν είναι συνεχώς ενεργοί, δεν δέχονται/η εκπέμπουν συνεχώς ροές.

Σε αυτό το Κεφάλαιο εξετάζουμε μετρικές χρηστών μακροπρόθεσμα, σε συνθήκες μεταβαλλόμενου πληθυσμού χρηστών. Ξεκινάμε στην Ενότητα (§3.2) με τις γενικές ιδιότητες και αρχές των εύρωστων μοντέλων εξυπηρέτησης, το μοντέλο απωλειών Erlang, το μοντέλο άπειρων εξυπηρετητών και το μοντέλο Μερισμού Εξυπηρετητή (§3.2.4). Η μαθηματική αυτή μοντελοποίηση μας βοηθάει στην εύρεση αναλυτικών σχέσεων και φραγμάτων για την επίδοση μετρικών μακροπρόθεσμα. Στις υπόλοιπες ενότητες οι σχέσεις της Ενότητας (§3.2.4) εφαρμόζονται, εξειδικεύοντας στους συγκεκριμένους περιορισμούς κάθε προβλήματος. Στην Ενότητα (§3.3) εξετάζουμε το μοντέλο του Μερισμού του Εξυπηρετητή για πολλαπλές κλάσεις χρηστών στην περίπτωση του RR. Στην Ενότητα (§3.4) εισάγουμε τη τεχνική του «μόνιμου χρήστη» που επιτρέπει τη μελέτη της επίδοσης του συστήματος από τη «σκοπιά του χρήστη». Στην Ενότητα (§3.5) αξιολογείται η επίδοση του προτεινόμενου Καταστασιακά Εξαρτημένου αλγορίθμου προσαρμογής ζεύξης στη (§3.5.1) και συγκρίνεται έναντι του Καταστασιακά Ανεξάρτητου με προσομοιώσεις και αριθμητικά αποτελέσματα στην (§3.5.2). Στην Ενότητα (§3.6) αξιολογείται η επίδοση του Αναλογικά Δίκαιου αλγορίθμου και συγκρίνεται η επίδοσή του, τόσο όσον αφορά τη ρυθμαπόδοση και την ενεργειακή επίδοση έναντι του RR. Στην Ενότητα (§3.6) χρησιμοποιούμε τη προσεγγιστική σχέση για το κέρδος χρονοπρογραμματισμού που παρουσιάσαμε στην Ενότητα (§2.4.1) και καταλήγουμε σε αναλυτικές σχέσεις για τη ρυθμαπόδοση και την ενεργειακή επίδοση του χρήστη σε σύστημα χρονοπρογραμματισμού με Αναλογικά Δίκαιο Αλγόριθμο.

3.2 Εύρωστα Μοντέλα Εξυπηρέτησης

Ο Erlang ήταν από τους πρώτους που κατανόησε τη σημασία των μαρκοβιανών μοντέλων στη διαμόρφωση εύρωστων μοντέλων εξυπηρέτησης που επιτρέπουν τη

σωστή και αξιόπιστη διαστασιοποίηση των δικτύων σύμφωνα με τη μέγιστη αναμενόμενη κίνηση εξυπηρέτησης [COO81], [FB11]. Το μαρκοβιανό μοντέλο επιτρέπει την εύρεση απλών αναλυτικών κλειστών τύπων για την αξιολόγηση της επίδοσης των δικτύων. Το ελκυστικό στην περίπτωση του μαρκοβιανού μοντέλου εντοπίζεται στα χαρακτηριστικά της εκθετικής κατανομής. Παρότι ο χρόνος εξυπηρέτησης των κλήσεων, ή των ελαστικών ροών δεν είναι εκθετικά κατανεμημένος, το μαρκοβιανό μοντέλο μας επιτρέπει την εύρεση της κατανομής των ενεργών κλήσεων και ροών η οποία σε αρκετές περιπτώσεις, όπως θα δούμε, δεν εξαρτάται από την κατανομή της κίνησης των κλήσεων ή των ροών, παρά μόνο από τη μέση διάρκεια της κλήσης, ή από το μέσο μέγεθος της ροής, προσδίδοντας έτσι εύρωστα χαρακτηριστικά στα συγκεκριμένα μοντέλα εξυπηρέτησης. Από την κατανομή των ενεργών κλήσεων ή ενεργών ροών, μπορούμε να βρούμε στη συνέχεια μέσα μεγέθη επίδοσης, όπως το ρυθμό αποκλεισμού κλήσεων, τη ρυθμαπόδοση, τη μέση καθυστέρηση, την ενεργειακή επίδοση. Η εύρεση της κατανομής των ενεργών ροών ή ενεργών κλήσεων οφείλεται ακριβώς στις ιδιότητες της εκθετικής κατανομής.

Πριν καταλήξουμε στο εύρωστο μοντέλο απωλειών του Erlang για τη πιθανότητα αποκλεισμού κλήσεων σε δίκτυο μεταγωγής κυκλώματος, θα εξετάσουμε πρώτα τα βασικά χαρακτηριστικά του μαρκοβιανού μοντέλου και θα τα συνδέσουμε με την κατανομή των ενεργών κλήσεων του μοντέλου του Erlang. Στη συνέχεια θα δούμε πως αυτά τα χαρακτηριστικά συνδέονται με τα συστήματα ευκαιριακού χρονοπρογραμματισμού που εξετάσαμε στο Κεφάλαιο 2 μέσω του μοντέλου Μερισμού του Εξυπηρετητή (Processor Sharing Model).

3.2.1 Μαρκοβιανή Στοχαστική Διαδικασία Γέννησης-Θανάτου

Θεωρούμε μια στοχαστική διαδικασία $n(t)$, όπου $n(t)$ είναι ο αριθμός των ενεργών χρηστών στο χρονικό διάστημα διάρκειας t . Το σύστημα βρίσκεται στην κατάσταση E_j τη χρονική στιγμή t αν $n(t) = j$. Μια διαδικασία $n(t)$ που υπακούει στα παρακάτω αξιώματα ορίζεται ως διαδικασία γέννησης-θανάτου (birth-death) [COO81]:

1) Αν τη στιγμή t το σύστημα είναι στη κατάσταση E_j , η υπό συνθήκη πιθανότητα ότι κατά τη διάρκεια $(t, t+h)$ πραγματοποιείται η μετάβαση $E_j \rightarrow E_{j+1}$ ($j=0,1,\dots$) ισούται με $\lambda_j h + o(h)$ καθώς $h \rightarrow 0$.

2) Αν τη στιγμή t το σύστημα είναι στη κατάσταση E_j , η υπό συνθήκη πιθανότητα ότι κατά τη διάρκεια $(t, t+h)$ πραγματοποιείται η μετάβαση $E_j \rightarrow E_{j-1}$ ($j=1,2,\dots$) ισούται με $\mu_j h + o(h)$ καθώς $h \rightarrow 0$.

3) Η πιθανότητα κατά τη διάρκεια $(t, t+h)$ ο δείκτης j να μεταβληθεί περισσότερο από μια μονάδα είναι $o(h)$ καθώς $h \rightarrow 0$.

Μια ποσότητα $f(h) = o(h)$ αν το όριο $\lim_{h \rightarrow 0} f(h)/h = 0$.

Από τα τρία αυτά αξιώματα προκύπτουν τα εξής για την υπό συνθήκη πιθανότητα:

$$P\{n(t+h) = j \mid n(t) = i\} = \begin{cases} \lambda_{j-1} h + o(h), & \text{όταν } i = j-1 \\ \mu_{j+1} h + o(h), & \text{όταν } i = j+1 \\ o(h), & \text{όταν } |i-j| \geq 2 \end{cases} \quad (3.1)$$

$$\text{Επειδή θα πρέπει } \sum_{k=0}^{\infty} P\{n(t+h) = k \mid n(t) = i\} = 1,$$

προκύπτει ότι καθώς $h \rightarrow 0$, $P\{n(t+h) = j \mid n(t) = j\} = 1 - (\lambda_j + \mu_j)h + o(h)$.

Σύμφωνα με το θεώρημα ολικής πιθανότητας

$$P\{n(t+h) = j\} = \sum_{i=0}^{\infty} P\{n(t+h) = j \mid n(t) = i\} P\{n(t) = i\} \text{ και τελικά}$$

$$P\{n(t+h) = j\} = \lambda_{j-1} h P\{n(t) = j-1\} + \mu_{j+1} h P\{n(t) = j+1\} + [1 - (\lambda_{j-1} + \mu_{j+1})h] P\{n(t) = j\} + o(h)$$

Ισοδύναμα,

$$\frac{P\{n(t+h)=j\}-P\{n(t)=j\}}{h} = \lambda_{j-1}P\{n(t)=j-1\} + \mu_{j+1}P\{n(t)=j+1\} +$$

$$\left[-(\lambda_{j-1} + \mu_{j+1})\right]P\{n(t)=j\} + \frac{o(h)}{h}$$

Όμως, $\lim_{h \rightarrow 0} \frac{P\{n(t+h)=j\}-P\{n(t)=j\}}{h} = \frac{dP\{n(t)=j\}}{dt}$

και οδηγούμαστε σε μια διαφορική εξίσωση.

Σε κατάσταση στατιστικής ισορροπίας, όταν $t \rightarrow \infty$, η παράγωγος $\frac{dP\{n(t)=j\}}{dt} = 0$

επειδή η διαδικασία είναι στατική και η κατανομή δεν μεταβάλλεται με το χρόνο.

Καταλήγουμε λοιπόν στις γνωστές εξισώσεις ισορροπίας:

$$\begin{aligned} (\lambda_{j-1} + \mu_{j+1})P\{n(t)=j\} = \\ \lambda_{j-1}P\{n(t)=j-1\} + \mu_{j+1}P\{n(t)=j+1\} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Σε αυτό το σημείο θα χρησιμοποιούμε την ορολογία $\pi(n=j) = P_j$ για να αναφερθούμε στη κατανομή των ενεργών χρηστών.

Με απλή επαγωγή μπορούμε να βρούμε ότι

$$\pi(n=j) = \begin{cases} S^{-1} & , j=0 \\ \frac{\lambda_0 \lambda_1 \dots \lambda_{j-1}}{\mu_1 \mu_2 \dots \mu_j} \pi(0) & , j=1, 2, \dots, \end{cases} \quad (3.3)$$

όπου $S = 1 + \sum_{k=1}^j \prod_{i=1}^k \frac{\lambda_{i-1}}{\mu_i}$. Στη περίπτωση που $k = \infty$ θα πρέπει $S < 0$.

Παρακάτω δείχνουμε ότι τα τρία αυτά αξιώματα πληρούνται όταν οι ροές αφικνούνται σύμφωνα με μια διαδικασία Poisson με ρυθμό αφίξεων λ ,

$\frac{(\lambda h)^k}{k!} \exp(-\lambda h)$ και η χρονική διάρκεια εξυπηρέτησης είναι εκθετική κατανομή με

μέση τιμή $1/\mu$ ή ισοδύναμα οι ροές απομακρύνονται με διαδικασία Poisson με ρυθμό

αφίξεων μ , $\frac{(\mu h)^k}{k!} \exp(-\mu h)$. Ο χρόνος εξυπηρέτησης είναι ανεξάρτητος από τη διαδικασία αφίξεων και ο χρόνος εξυπηρέτησης κάθε ροής είναι ανεξάρτητος από το χρόνο εξυπηρέτησης κάθε άλλης ροής στο σύστημα εξυπηρέτησης.

Η εκθετική κατανομή αναπτύσσεται σε σειρά Taylor ως εξής:

$$1 - \exp(-\mu h) = 1 - \left(1 - \mu h + \frac{(\mu h)^2}{2!} - \dots \right) = \mu h + o(h), \quad (3.4)$$

$$h \rightarrow 0$$

Πρώτα δείχνουμε ότι η χρονική διάρκεια $(t, t+h)$ στην οποία πραγματοποιείται ως γεγονός μια άφιξη ροής ή μια απομάκρυνση ροής είναι εκθετικά κατανομημένη με μέση τιμή $1/(\mu + \lambda)$. Αυτό συμβαίνει επειδή η χρονική διάρκεια μέχρι το επόμενο γεγονός είναι το ελάχιστο της χρονικής διάρκειας να πραγματοποιηθεί μια άφιξη ή να πραγματοποιηθεί μια απομάκρυνση. Επομένως η πιθανότητα να συμβεί ένα γεγονός στη διάρκεια $(t, t+h)$ είναι $(\lambda + \mu)h + o(h)$. Όταν συμβεί ένα γεγονός, η πιθανότητα το γεγονός αυτό να οφείλεται σε άφιξη είναι ίση με $\frac{\lambda}{\lambda + \mu}$. Επομένως, η πιθανότητα

να συμβεί μια μετάβαση $E_j \rightarrow E_{j+1}$ στη διάρκεια $(t, t+h)$ είναι ίση με

$$\left[(\lambda + \mu)h + o(h) \right] \frac{\lambda}{\lambda + \mu} = \lambda h + o(h).$$

Επομένως, η υπό συνθήκη πιθανότητα

$$P\{n(t+h) = j \mid n(t) = j-1\} = \lambda h + o(h).$$

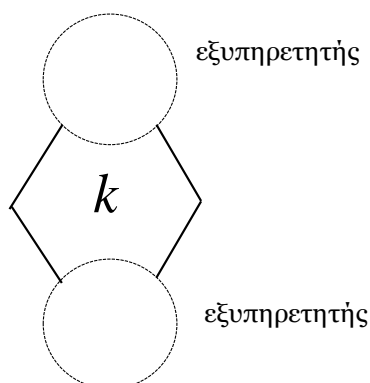
Ομοίως, η υπό συνθήκη πιθανότητα

$$P\{n(t+h) = j \mid n(t) = j+1\} = \mu h + o(h).$$

Τα αξιώματα της διαδικασίας Γέννησης-Θανάτου πληρούνται από το συγκεκριμένο σύστημα χρονοπρογραμματισμού.

3.2.2 Μοντέλο Απωλειών Erlang

Στο μοντέλο Απωλειών Erlang κάθε ροή εξυπηρετείται από έναν εξυπηρετητή με μέσο χρόνο εξυπηρέτησης $\tau = 1/\mu$. Στα σύγχρονα συστήματα ο ρυθμός εξυπηρέτησης των ανελαστικών streaming ροών εξαρτάται από το κωδικοποιητή της συγκεκριμένης εφαρμογής video ή τηλεφωνίας και είναι στην ιδανική περίπτωση ανεξάρτητος από τις διακυμάνσεις του ασύρματου καναλιού. Εναπόκειται στη κατάλληλη διαστασιοποίηση του δικτύου και στο κατάλληλο σχήμα δέσμευσης πόρων η εξασφάλιση του σταθερού αυτού ρυθμού.



Σχήμα 3.1: Μοντέλο πεπερασμένων εξυπηρετητών.

Υπάρχουν k πεπερασμένοι διαθέσιμοι εξυπηρετητές (Σχήμα 3.1). Αν μια ροή δεν βρει διαθέσιμο εξυπηρετητή τότε αποκλείεται από το σύστημα. Ο ρυθμός αφίξεων είναι σταθερός σε κάθε κατάσταση του συστήματος και η κατανομή των αφίξεων είναι Poisson. Ο ρυθμός απομακρύνσεων πολλαπλασιάζεται επί τον αριθμό των καταστάσεων j , ισοδύναμα $\mu_j = j\mu$. Τότε η κατανομή των ενεργών χρηστών με τη βοήθεια της (3.3) δίνεται ως εξής:

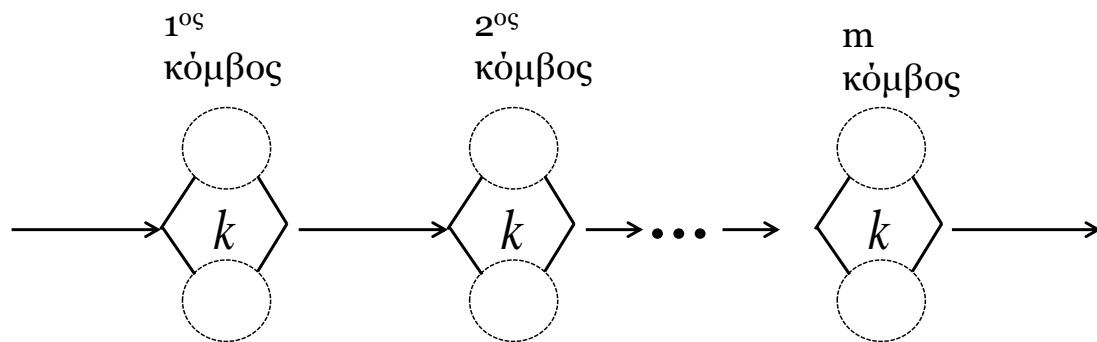
$$\pi(n = j) = \begin{cases} S^{-1} & , j = 0 \\ \frac{\lambda^j}{\mu^j j!} \pi(0) & , j = 1, 2, \dots, \end{cases} \quad (3.5)$$

$$\text{με } S = 1 + \sum_{j=1}^k \frac{\lambda^j}{\mu^j j!}.$$

Η πιθανότητα αποκλεισμού ροής δίνεται από τη σχέση

$$Erl(\lambda/\mu, B) = \frac{\lambda^B}{\sum_{j=0}^B \frac{\mu^j j!}{\lambda^j}}, \quad (3.6)$$

όπου $k = B$. Η σχέση (3.6) είναι ο γνωστός τύπος Erlang-B για τη πιθανότητα αποκλεισμού εισερχόμενης κλήσης σε δίκτυο μεταγωγής κυκλώματος. Η σχέση αυτή δεν εξαρτάται από τη κατανομή της κίνησης των ανελαστικών ροών, παρά μόνο από το μέσο χρόνο εξυπηρέτησης της ροής $\tau = 1/\mu$. Το γεγονός αυτό προσδίδει εύρωστα χαρακτηριστικά στο μοντέλο απωλειών του Erlang, και η σχέση (3.6) παραμένει για δεκαετίες μια από τις βασικές σχέσεις για την εύρωστη διαστασιοποίηση ενσύρματων και ασύρματων δικτύων ανελαστικών ροών.



Σχήμα 3.2: Δίκτυο m κόμβων σε σειρά για την μοντελοποίηση του χρόνου εξυπηρέτησης με κατανομή Erlang- m .

Προκειμένου να αποδείξουμε την εύρωστη ιδιότητα του μοντέλου απωλειών Erlang καταφεύγουμε στη μέθοδο των σταδίων, μια μέθοδο που αξιοποιεί τα χαρακτηριστικά του μαρκοβιανού μοντέλου για την μοντελοποίηση κατανομής εξυπηρέτησης ροής που δεν είναι εκθετική. Σύμφωνα με την θεμελιώδη δουλειά του Jackson [Jac63], και των Gordon και Newel [GN67], ένα δίκτυο από m κόμβους σε σειρά (Σχήμα 3.2), όπου κάθε κόμβος αποτελείται από k πεπερασμένους εξυπηρετητές, με κατανομή εξυπηρέτησης εκθετική ανεξάρτητη σε κάθε επιμέρους κόμβο, μπορεί να μοντελοποιηθεί ως μια πολυδιάστατη μαρκοβιανή αλυσίδα, με κάθε διάσταση να αντιστοιχεί στο επιμέρους κόμβο-σύστημα εξυπηρέτησης των k πεπερασμένων εξυπηρετητών. Η ανεξαρτησία των επιμέρους συστημάτων όσον αφορά την εξυπηρέτηση σημαίνει ότι κάθε ροή που εισέρχεται σε ένα επιμέρους σύστημα εξυπηρέτησης k πεπερασμένων κόμβων θα έχει χρόνο εξυπηρέτησης τυχαία μεταβλητή που θα υπακούει στην εκθετική κατανομή. Η κατανομή του πληθυσμού

των ροών σε όλους τους κόμβους του συστήματος είναι το γινόμενο των κατανομών σε κάθε κόμβο ξεχωριστά.

Μια ροή που φτάνει στο πρώτο σύστημα εξυπηρέτησης σε σειρά έχει συνολικό χρόνο εξυπηρέτησης μέχρι να αποχωρήσει από τον τελευταίο κόμβο, το άθροισμα των ανεξάρτητων τυχαίων μεταβλητών των χρόνων εξυπηρέτησης σε κάθε διαδοχικό επιμέρους σύστημα. Η κατανομή του συνολικού χρόνου εξυπηρέτησης της ροής στο δίκτυο είναι η κανονικοποιημένη Erlang- m , εφόσον κάθε χρόνος εξυπηρέτησης με μέση τιμή τ_i ($i = 1, 2, \dots, m$) ισούται $1/(m\mu)$. Η Erlang- m μπορεί να προσεγγίσει ένα μεγάλο υποσύνολο όλων των κατανομών εξυπηρέτησης του ενδιαφέροντός μας. Θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε την κατανομή του Cox, εφαρμόζοντας τη μέθοδο των σταδίων. Η κατανομή Cox μπορεί να προσεγγίσει οποιαδήποτε κατανομή εξυπηρέτησης που έχει μετασχηματισμό Laplace ρητή συνάρτηση, αλλά προτιμούμε την Erlang- m για χάρη απλότητας. Τότε η κατανομή του πληθυσμού $\vec{n} = (n_1, \dots, n_m)$ ροών στο συνολικό σύστημα είναι ίση με:

$$\pi(n_1, \dots, n_m) = \pi(0) \frac{(\lambda \tau_1)^{n_1}}{n_1!} \frac{(\lambda \tau_2)^{n_2}}{n_2!} \dots \frac{(\lambda \tau_m)^{n_m}}{n_m!},$$

όπου $\pi(0)$ είναι η σταθερά κανονικοποίησης της κατανομής του πολυδιάστατου μαρκοβιανού μοντέλου και ισούται με τη πιθανότητα να μην υπάρχει κανένας ενεργός χρήστης στο σύστημα. Πολλαπλασιάζοντας με $n!$ αριθμητή και παρανομαστή, όπου $n = \sum_{i=1}^m n_i$ το σύνολο των ροών σε όλους τους κόμβους του δικτύου,

$$\frac{1}{n!} \pi(0) \frac{n!}{n_1! n_2! \dots n_m!} (\lambda \tau_1)^{n_1} (\lambda \tau_2)^{n_2} (\lambda \tau_m)^{n_m} \quad (3.7)$$

Ο όρος $\frac{n!}{n_1! n_2! \dots n_m!}$ είναι πολυωνυμικός συντελεστής. Σύμφωνα, με το πολυωνυμικό θεώρημα, η κατανομή του συνόλου n των ροών προκύπτει, αθροίζοντας τη σχέση (3.7) ως προς όλους τους συνδυασμούς (n_1, \dots, n_m) . Επομένως,

$$\pi(n) = \pi(0) \frac{(\lambda \tau_1 + \lambda \tau_2 + \dots + \lambda \tau_m)^n}{n!}, \text{ όπου } \tau_i = 1/(m\mu) (i = 1, 2, \dots, m)$$

δηλαδή $\pi(n) = \pi(0) \frac{(\lambda/\mu)^n}{n!}$, ίση με τη σχέση (3.5).

Αρκεί λοιπόν να γνωρίζουμε τη μέση διάρκεια εξυπηρέτησης της ανελαστικής ροής και να εφαρμόσουμε το μοντέλο του Erlang. Θα δούμε αργότερα ότι υπάρχει αντίστοιχο εύρωστο μοντέλο για ελαστικές ροές.

3.2.3 Μοντέλο άπειρων εξυπηρετητών

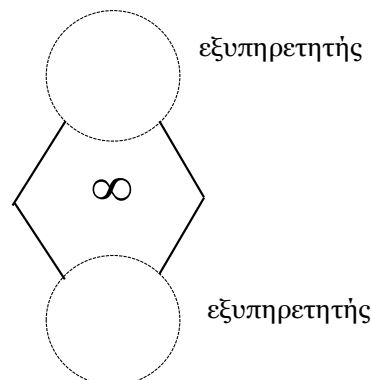
Στη περίπτωση που οι εξυπηρετητές είναι άπειροι (Σχήμα 3.3), τότε η κατανομή των ανελαστικών ροών ισούται με

$$\pi(n) = \exp(-\lambda\tau) \frac{(\lambda\tau)^n}{n!}. \quad (3.8)$$

Η σχέση (3.8) προκύπτει από την (3.5) θέτοντας $k = \infty$. Συγκεκριμένα,

$S = \sum_{j=0}^{\infty} \frac{(\lambda\tau)^j}{j!} = \exp(\lambda\tau)$ και $\pi(0) = S^{-1} = \exp(-\lambda\tau)$. Η (3.8) είναι μια κατανομή

Poisson με μέση τιμή $\lambda\tau$. Με το μοντέλο αυτό μπορούμε να μοντελοποιήσουμε ανελαστικές ροές με μικρό ρυθμό εξυπηρέτησης της τάξης των kbps τη στιγμή που το διαθέσιμο εύρος ζώνης είναι δεκάδες Mbps, ροές στο Δίκτυο Κορμού που βρίσκουν πάντα εξυπηρετητή, καθώς και νέα Δίκτυα όπως τα D2D, όπου κάθε D2D δέκτης βρίσκει ένα D2D ανάμεσα στους πολυάριθμους χρήστες της κυψέλης.



Σχήμα 3.3: Μοντέλο άπειρων εξυπηρετητών.

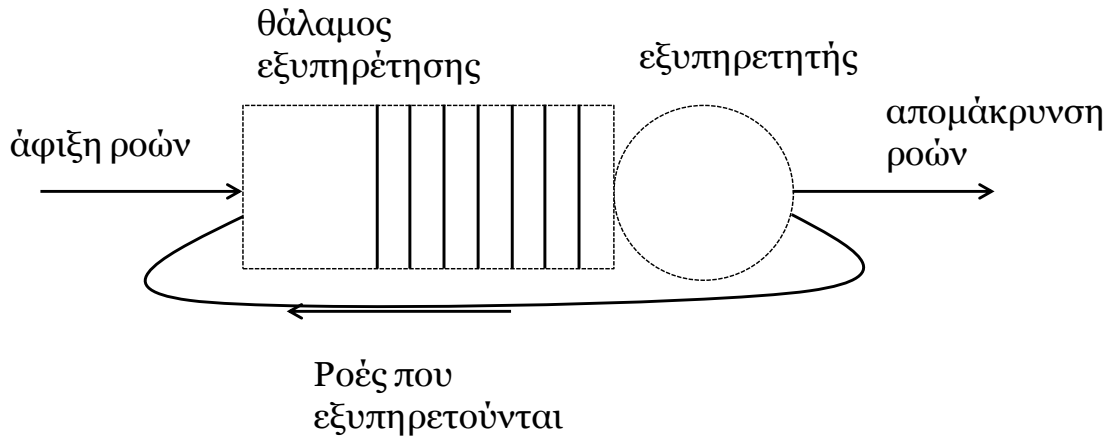
3.2.4 Μοντέλο Μερισμού του Εξυπηρετητή

Σε αυτή την ενότητα θα δούμε πως μπορούμε να μελετήσουμε το σύστημα εξυπηρέτησης ελαστικών ροών που μελετήσαμε στο Κεφάλαιο 2 μακροπρόθεσμα, όταν οι καταστάσεις του συστήματος μεταβάλλονται σε στατιστική ισορροπία. Θεωρούμε όπως στο Κεφάλαιο 2 ότι ο χρόνος χωρίζεται σε πολύ μικρά διαστήματα διάρκειας h (Σχήμα 3.4) Σε κάθε τέτοιο διάστημα, ένας εξυπηρετητής εξυπηρετεί σε κατάσταση συστήματος n , n ροές εκ περιτροπής (Σχήμα 3.5). Κάθε ροή που εξέρχεται από την εξυπηρετητή και δεν έχει εξυπηρετηθεί εξολοκλήρου μπαίνει στο θάλαμο εξυπηρέτησης σε σειρά FIFO. Κάθε ροή έχει μέσο μέγεθος σ . Η εξυπηρέτηση μιας ροής απαιτεί αρκετά χρονικά διαστήματα διάρκειας h . Προς το παρόν υποθέτουμε ότι σε κατάσταση συστήματος $n = j$ ο εξυπηρετητής εξυπηρετεί μια κλάση χρηστών με ρυθμό εξυπηρέτησης $\bar{r}_i(n = j)$ που αντιστοιχεί σε σταθερή απόσταση l_i των $n = j$ ενεργών χρηστών από το Σταθμό Βάσης.



Σχήμα 3.4: Διαχωρισμός άξονα χρόνου σε χρονοσχισμές.

Το μοντέλο αυτό είναι κατάλληλο για κάθε σύστημα χρονοπρογραμματισμού, όπου ο ρυθμός εξυπηρέτησης του χρήστη είναι μεσοπρόθεσμα $\frac{\bar{r}_i(n)}{n}$ και η πιθανότητα πρόσβασης στον εξυπηρετητή για κάθε ενεργό χρήστη είναι $\frac{1}{n}$. Ο Αναλογικά Δίκαιος Αλγόριθμος εμπίπτει στη κατηγορία αυτή.



Σχήμα 3.5: Μοντέλο Μερισμού του εξυπηρετητή

Ορίζουμε ως ρυθμό απομάκρυνσης από το σύστημα εξυπηρέτησης τη μεταβλητή $\mu_j = \frac{\bar{r}_i(j)}{\sigma}$. Σε κάθε διάστημα h αντιστοιχεί μια τυχαία δοκιμή Bernoulli με πιθανότητα $\frac{\mu_j}{j}h + o(h)$ να απομακρυνθεί ένας ενεργός χρήστης από το σύστημα εξυπηρέτησης. Επιπλέον, σε κάθε διάστημα h αντιστοιχεί μια τυχαία δοκιμή Bernoulli με πιθανότητα $\lambda h + o(h)$ να αφιχθεί ροή.

Σε αυτό το σημείο εξετάζουμε αν το μοντέλο Μερισμού Εξυπηρετητή πληροί τα αξιώματα της Μαρκοβιανής Στοχαστικής Διαδικασίας Γέννησης-Θανάτου. Η πιθανότητα να απομακρυνθεί ένας χρήστης από τους $n = j$ χρήστες στη διάρκεια του

διαστήματος h είναι $\binom{j}{1} \left(\frac{\mu_j}{j}h + o(h) \right) \left(1 - \frac{\mu_j}{j}h + o(h) \right)^{j-1}$.

Θεωρούμε τη στοχαστική διαδικασία διακριτού χρόνου $n(kh)$ όπου $n(kh)$ είναι ο αριθμός των ενεργών χρηστών τη χρονική στιγμή kh και k ακέραιος μεγαλύτερος του μηδενός. Η υπό συνθήκη πιθανότητα να αφιχθεί ένας χρήστης στη διάρκεια του διαστήματος $(kh, (k+1)h)$ όταν το σύστημα είναι στην κατάσταση $n(kh) = j$ ισούται με το γινόμενο της πιθανότητας να μην απομακρυνθεί κανένας χρήστης στη διάρκεια του διαστήματος $(kh, (k+1)h)$ επί την πιθανότητα να αφιχθεί ένας χρήστης, ισοδύναμα:

$$\begin{aligned}
P\{n((k+1)h) = j+1 | n(kh) = j\} &= \\
&= \left(1 - \frac{\mu_j}{j}h + o(h)\right)^j (\lambda h + o(h)) = \\
&= \lambda h + o(h)
\end{aligned}$$

Η υπό συνθήκη πιθανότητα να απομακρυνθεί ένας χρήστης στη διάρκεια του διαστήματος $(kh, (k+1)h)$ όταν το σύστημα είναι στην κατάσταση $n = j$ ισούται με το γινόμενο της πιθανότητας να απομακρυνθεί ένας χρήστης στη διάρκεια του διαστήματος $(kh, (k+1)h)$ επί την πιθανότητα να μην αφιχθεί κανένας χρήστης στη διάρκεια του διαστήματος $(kh, (k+1)h)$, ήτοι

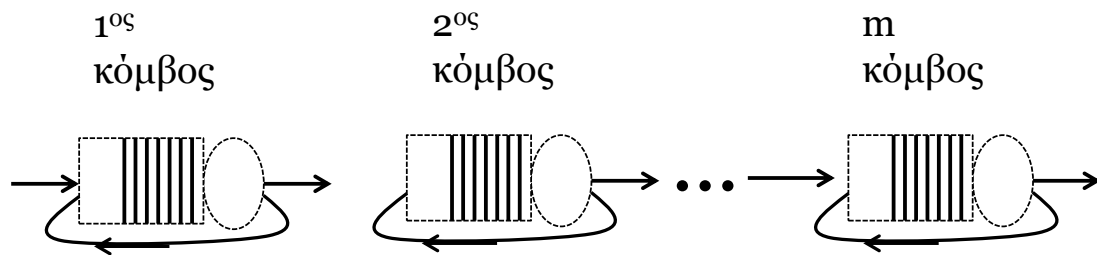
$$\begin{aligned}
P\{n((k+1)h) = j-1 | n(kh) = j\} &= \\
&= \binom{j}{1} \left(\frac{\mu_j}{j}h + o(h)\right) \left(1 - \frac{\mu_j}{j}h + o(h)\right)^{j-1} (1 - \lambda h + o(h)) = \\
&= \mu_j h + o(h)
\end{aligned}$$

Σε αυτό το σημείο παρατηρούμε ότι τα αξιώματα της στοχαστικής μαρκοβιανής διαδικασίας γέννησης θανάτου πληρούνται, άρα, το μοντέλο μερισμού του εξυπηρετητή έχει κατανομή ενεργών χρηστών που δίνεται από την (3.3).

Συγκεκριμένα,

$$\begin{aligned}
\pi(n = j) &= \pi(0) \prod_{m=1}^j \left(\frac{\lambda \sigma}{\bar{r}_i(m)}\right), \\
\pi(0) &= 1 / \left(1 + \sum_{j=1}^B \prod_{m=1}^j \left(\frac{\lambda \sigma}{\bar{r}_i(m)}\right)\right),
\end{aligned} \tag{3.9}$$

όπου B είναι ο μέγιστος επιτρεπόμενος αριθμός χρηστών στο σύστημα.



Σχήμα 3.6: Δίκτυο Whittle m κόμβων σε σειρά

Παρακάτω μελετάμε τα εύρωστα χαρακτηριστικά του Μερισμού του Εξυπηρετητή στη περίπτωση μιας κλάσης χρηστών. Το μέγεθος των ροών ακολουθεί κατανομή κανονικοποιημένη Erlang- m και το μέσο μέγεθος της ροής είναι ίσο με σ . Ακολουθούμε ξανά τη μέθοδο των σταδίων. Θεωρούμε οι ελαστικές ροές (FTP, ιστοσελίδες, e-mail) αφικνούνται σε ένα δίκτυο m κόμβων σε σειρά με κατανομή Poisson. Κάθε κόμβος l ($l=1,2,\dots,m$) αντιστοιχεί σε ένα ανεξάρτητο σύστημα χρονοπρογραμματισμού Μερισμού του Εξυπηρετητή με εκθετικά κατανομημένο μέγεθος ροής ίσο με $\sigma_l = \sigma/m$. (Σχήμα 3.6). Ο πληθυσμός ροών σε όλους τους κόμβους $\vec{n} = (n_1, \dots, n_m)$ και ο συνολικός αριθμός ροών είναι $n = \sum_{l=1}^m n_l$. Όλοι οι κόμβοι έχουν μέσο ρυθμό μετάδοσης $\bar{r}_i(n)$ για κατάσταση συστήματος n . Ο χρόνος εξυπηρέτησης είναι εκθετικά κατανομημένος σε κάθε κόμβο. Επιπλέον, ορίζουμε τη συνάρτηση $\Phi_n = \frac{1}{\bar{r}_i(1)\bar{r}_i(2)\dots\bar{r}_i(n)}$. Το συγκεκριμένο δίκτυο ανεξάρτητων κόμβων ονομάζεται δίκτυο Whittle [BP02].

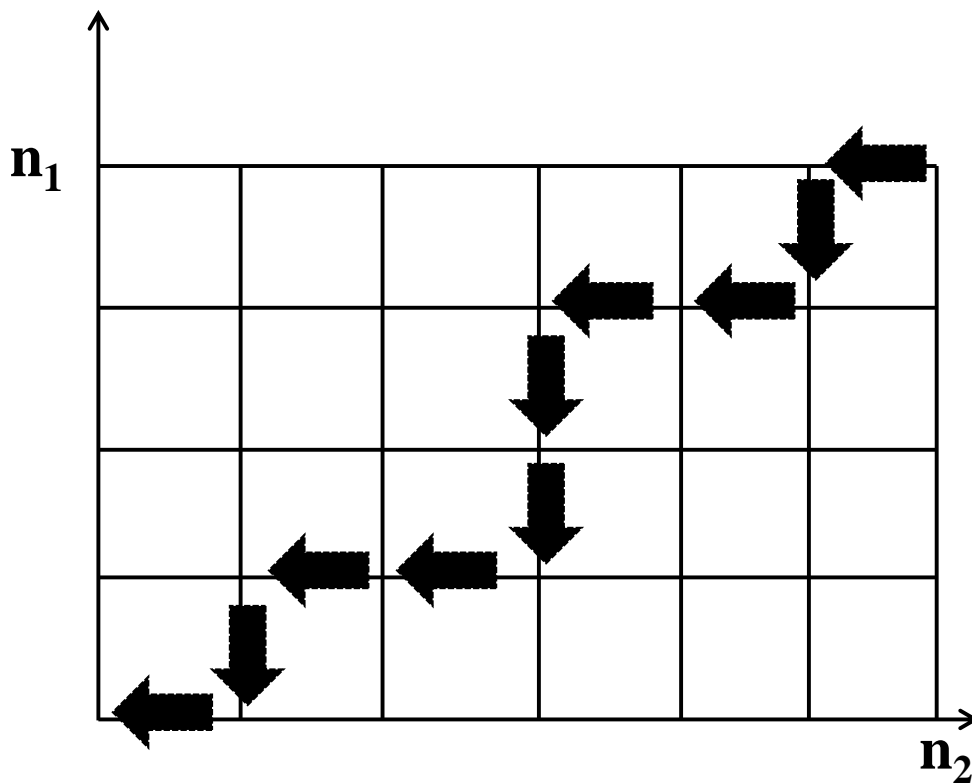
Η υπό συνθήκη πιθανότητα να απομακρυνθεί μια ροή από το κόμβο l στη διάρκεια του διαστήματος $(kh, (k+1)h)$ όταν το πλήθος των ροών στον κόμβο l είναι $n_l(kh) = j_l$ και η κατάσταση του συστήματος είναι $n(kh) = j$ ισούται με το γινόμενο της πιθανότητας να απομακρυνθεί μια ροή από τον κόμβο l στη διάρκεια του διαστήματος $(kh, (k+1)h)$ επί την πιθανότητα να μην αφιχθεί ένας χρήστης στο κόμβο l , ισοδύναμα:

$$\begin{aligned}
P\{n_l((k+1)h) = j_l - 1 \mid n_l(kh) = j_l\} &= \\
&= \binom{j_l}{1} \left(\frac{\bar{r}_i(j)m}{j\sigma} h + o(h) \right) \left(1 - \frac{\bar{r}_i(j)m}{j\sigma} h + o(h) \right)^{n_l-1} (1 - \lambda h + o(h)) = \\
&= \frac{j_l \bar{r}_i(j)m}{j\sigma} h + o(h)
\end{aligned} \tag{3.10}$$

Από τις εξισώσεις ισορροπίας του δικτύου Whittle προκύπτει ότι η κατανομή του πληθυσμού των ενεργών χρηστών στο δίκτυο είναι

$$\begin{aligned} \pi(n_1, \dots, n_m) &= \\ &= \pi(0) \frac{(n_1 + n_2 + \dots + n_m)!}{n_1! n_2! \dots n_m!} \Phi_n (\lambda \sigma_1)^{n_1} (\lambda \sigma_2)^{n_2} \dots (\lambda \sigma_m)^{n_m} \end{aligned} \quad (3.11)$$

Η σχέση (3.11) προκύπτει εύκολα αν αναλογιστούμε ένα δίκτυο Whittle με δυο κόμβους (Σχήμα 3.7). Για οποιοδήποτε μονοπάτι από την κατάσταση (n_1, n_2) έως την κατάσταση $(0, 0)$ το γινόμενο των ρυθμών εξυπηρέτησης είναι το ίδιο.



Σχήμα 3.7: Διάγραμμα εξυπηρέτησης ροών σε δίκτυο Whittle με δύο κόμβους σε σειρά.

Τότε η πιθανότητα $\pi(n_1, n_2) = \pi(0) \frac{(n_1 + n_2)!}{n_1! n_2!} \Phi_n (\lambda \sigma_1)^{n_1} (\lambda \sigma_2)^{n_2}$ λόγω της

εφαρμογής της υπό συνθήκης πιθανότητας (3.10) στην (3.3).

Για να βρούμε την κατανομή του συνόλου των ενεργών χρηστών πρέπει να αθροίσουμε όλους τους συνδυασμούς των ενεργών χρηστών.

$$\begin{aligned}
\pi(n) &= \sum_{n_1+n_2+\dots+n_m=n} \pi(n_1, \dots, n_m) \\
\pi(n) &= \pi(0) \Phi_n(\lambda(\sigma_1 + \sigma_2 + \dots + \sigma_m))^n \\
\pi(n) &= \pi(0) \Phi_n(\lambda\sigma)^n
\end{aligned} \tag{3.12}$$

όπου

$$\pi(0) = 1 / \left(1 + \sum_{j=1}^B \prod_{m=1}^j \left(\frac{\lambda\sigma}{\bar{r}_i(m)} \right) \right)$$

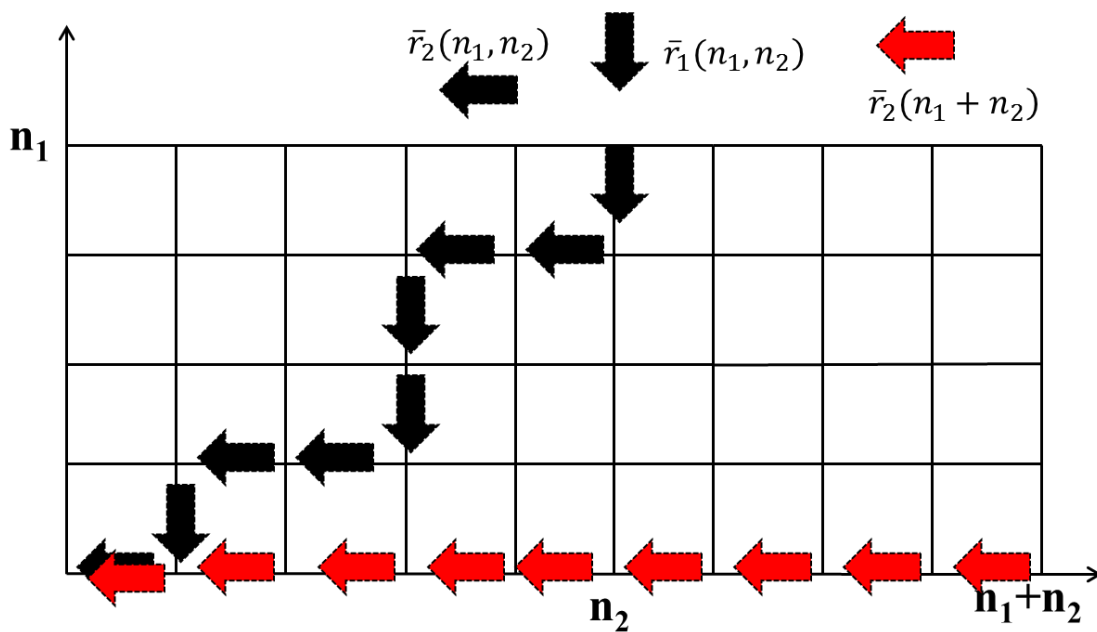
Καταλήγουμε λοιπόν, όπως, και στην περίπτωση του μοντέλου απωλειών του Erlang, ότι η κατανομή των ενεργών χρηστών στο μοντέλο Μερισμού του Εξυπηρετητή εξαρτάται μόνο από το μέσο μέγεθος της ροής σ . Επομένως, το μοντέλο του Μερισμού του Εξυπηρετητή (ME) παρουσιάζει εύρωστα χαρακτηριστικά για μια κλάση χρηστών.

Το ερώτημα που προκύπτει είναι τι γίνεται για περισσότερες κλάσεις χρηστών. Είναι εύκολο να διαπιστώσουμε ότι στη γενική περίπτωση για περισσότερες της μιας κλάσης χρηστών το μοντέλο του Μερισμού του Εξυπηρετητή δεν παρουσιάζει εύρωστα χαρακτηριστικά. Για να είναι εύρωστο το Μοντέλο του ME θα πρέπει να ισχύει το κριτήριο του Kolmogorov [BP02]. Σύμφωνα με το κριτήριο αυτό, ένα σύστημα χρονοπρογραμματισμού με πληθυσμό $\vec{n} = (n_1, \dots, n_L)$ είναι εύρωστο αν το γινόμενο των ρυθμών εξυπηρέτησης των κλάσεων $\bar{r}_i(\vec{n})$ είναι ίδιο σε κάθε μονοπάτι από την κατάσταση (n_1, \dots, n_L) έως την κατάσταση $(0, \dots, 0)$. Στην περίπτωση που το κριτήριο του Kolmogorov δεν ισχύει, τότε το συγκεκριμένο δίκτυο δεν έχει αναλλοίωτα χαρακτηριστικά στην κατανομή της κίνησης των δεδομένων.

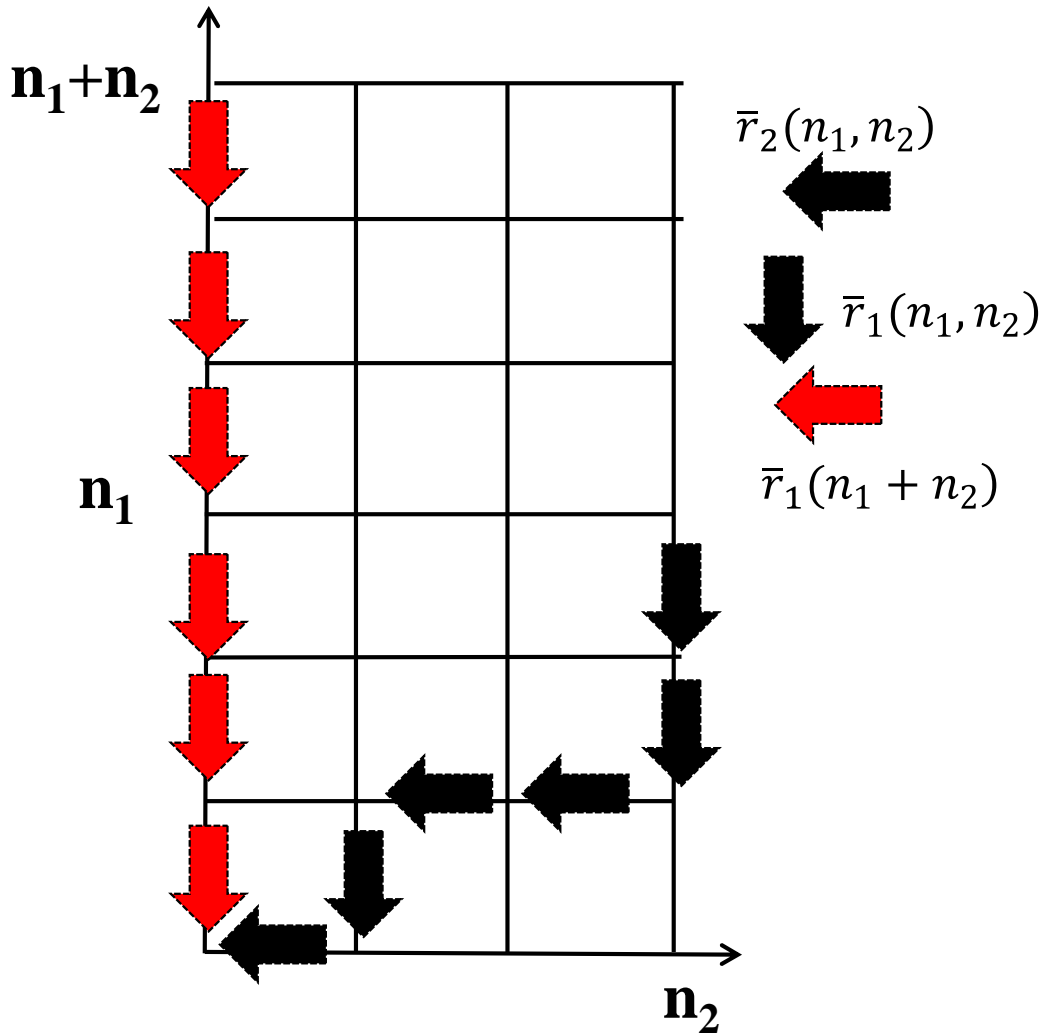
Παρόλα αυτά μπορούμε να υπολογίσουμε χρήσιμα φράγματα επίδοσης για την κατανομή των ενεργών χρηστών του συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη γινόμενα ρυθμών εξυπηρέτησης κλάσεων σε συγκεκριμένα μονοπάτια στο διάγραμμα εξυπηρέτησης ροών. Στην περίπτωση συστήματος χρονοπρογραμματισμού με πληθυσμό $\vec{n} = (n_1, n_2)$ μπορούμε να υπολογίσουμε ένα άνω φράγμα επίδοσης,

θέτοντας $\hat{\Phi}_n = \frac{1}{\bar{r}_2(1)\bar{r}_2(2)\dots\bar{r}_2(n_1+n_2)}$ (Σχήμα 3.8) και ένα κάτω φράγμα επίδοσης,

θέτοντας $\check{\Phi}_n = \frac{1}{\bar{r}_1(1)\bar{r}_1(2)\dots\bar{r}_1(n_1+n_2)}$ (Σχήμα 3.9) στη (3.11).



Σχήμα 3.8: Προσέγγιση άνω φράγματος σε διάγραμμα εξυπηρέτησης ροών σε δίκτυο Whittle με δύο κλάσεις χρηστών.



Σχήμα 3.9: Προσέγγιση κάτω φράγματος σε διάγραμμα εξυπηρέτησης ροών σε δίκτυο Whittle με δυο κλάσεις χρηστών.

Το Μοντέλο ME μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μοντελοποίηση συστημάτων χρονοπρογραμματισμού που ακολουθούν την ιδιότητα της ισορροπίας.

Πρόταση 2: Ένα σύστημα χρονοπρογραμματισμού με πληθυσμό $\vec{n} = (n_1, \dots, n_L)$ και ρυθμό εξυπηρέτησης κλάση- i $\bar{r}_i(\vec{n})$ ακολουθεί την ιδιότητα της ισορροπίας εφόσον για όλα τα ζεύγη των κλάσεων, i, j ισχύει η κάτωθι σχέση [BP04]:

$$\frac{\bar{r}_i(\vec{n} - e_j)}{\bar{r}_i(\vec{n})} = \frac{\bar{r}_j(\vec{n} - e_i)}{\bar{r}_j(\vec{n})}, \forall \vec{n}: n_i > 0, n_j > 0, \quad (3.13)$$

όπου e_i είναι το διάνυσμα με μονάδα στη θέση i και 0 σε όλες τις άλλες θέσεις.

Στην περίπτωση του Μεγίστου SNR αλγορίθμου, $\frac{\bar{r}_i(\vec{n} - e_j)}{\bar{r}_i(\vec{n})} \neq \frac{\bar{r}_j(\vec{n} - e_i)}{\bar{r}_j(\vec{n})}$

οπότε και η κατανομή των ενεργών χρηστών εξαρτάται από τη κατανομή της κίνησης των δεδομένων. Στην περίπτωση του Καταστασιακά Εξαρτημένου Αλγορίθμου η σχέση (3.13) δεν ισχύει και για πολλαπλές κλάσεις. Ο Καταστασιακά Ανεξάρτητος Αλγόριθμος δεν είναι αναλλοίωτος στη κατανομή των δεδομένων για πολλαπλές κλάσεις. Θα δούμε, όμως, ότι τα φράγματα επίδοσης σύμφωνα με τα Σχήματα (3.8) και (3.9) είναι ικανοποιητικά.

3.3 Round Robin

Σε συνθήκες μεταβαλλόμενου πληθυσμού ροών υποθέτουμε ότι οι ενεργοί χρήστες εμφανίζονται ως ανεξάρτητες ελαστικές ροές με Poisson κατανομή με ρυθμό αφίξεων λ ροές το δευτερόλεπτο σε όλη τη κυψέλη. Ορίζουμε ως ζήτηση κίνησης των ελαστικών ροών το γινόμενο $\lambda\sigma$, όπου σ είναι το μέσο μέγεθος της ελαστικής ροής. Σε κάθε κλάση- i αντιστοιχεί άφιξη $\lambda_i = p_i\lambda$ ροών, όπου $0 < p_i < 1$ είναι η πιθανότητα εύρεσης ενός χρήστη κυψέλης στη κλάση- i , και $\sum_{i=1}^L p_i = 1$. Ορίζουμε ως φορτίο της κλάσης- i :

$$\rho_i = \lambda_i\sigma/\bar{r}_i(1) = p_i\lambda\sigma/\bar{r}_i(1) \quad (3.14)$$

Το συνολικό φορτίο της κυψέλης είναι το άθροισμα $\rho = \sum_{i=1}^L \rho_i$.

Στην περίπτωση του RR η ιδιότητα της ισοροπίας ισχύει. Τότε, η κατανομή του πληθυσμού των ενεργών χρηστών στο σύστημα χρονοπρογραμματισμού RR είναι ίση με αυτή των πελατών ενός συστήματος εξυπηρέτησης πολλαπλών κλάσεων Μερισμού του Εξυπηρετητή [B05] και σύμφωνα με την (3.11):

$$\pi(n_1, \dots, n_L) = \pi(0) \frac{(n_1 + n_2 + \dots + n_L)!}{n_1! n_2! \dots n_L!} \rho_1^{n_1} \rho_2^{n_2} \dots \rho_L^{n_L}, \quad (3.15)$$

όπου $\pi(0)$ είναι η σταθερά κανονικοποίησης της κατανομής του πολυδιάστατου μαρκοβιανού μοντέλου και ισούται με τη πιθανότητα να μην υπάρχει κανένας ενεργός χρήστης στο σύστημα. Η κατανομή του συνόλου n των ενεργών χρηστών είναι,

$$\pi(n) = \pi(0)\rho^n, \quad (3.16)$$

όπου $\pi(0) = 1 / \sum_{k=0}^{\infty} (\rho)^k = 1 - \rho$. Η πιθανότητα να υπάρχει τουλάχιστον ένας χρήστης στο σύστημα είναι $\pi(n > 0) = \rho$.

Παρατήρηση 1: Η κατανομή του συνόλου των ενεργών χρηστών στη (3.16) είναι γεωμετρική κατανομή. Αυτό σημαίνει ότι η πιθανότητα να υπάρχουν πολλοί ενεργοί χρήστες στο σύστημα παίρνει συνήθως αρκετά μικρή τιμή. Ο αριθμός των ενεργών χρηστών κυμαίνεται συνήθως σε χαμηλές τιμές για χαμηλές μέχρι «μέτριες» τιμές

φορτίου. Η επίδοση αυτή των ενεργών χρηστών σε σύστημα χρονοπρογραμματισμού RR, έρχεται σε αντίθεση με την κοινή διαίσθηση. Κι όμως, όσοι έχουν ασχοληθεί με προσομοίωση του συστήματος έρχονται αμέσως αντιμέτωποι με αυτό το παράδοξο. Βλέπουν δηλαδή «εμπειρικά» ότι οι ενεργοί χρήστες σε κάθε TTI είναι πολύ λίγοι για μεγάλες τιμές ρυθμού αφίξεων λ . Επομένως, η αξιολόγηση της επίδοσης των συστημάτων ευκαιριακού χρονοπρογραμματισμού καθώς και άλλων πρωτοκόλλων π.χ. προσαρμογής ζεύξης σε συνθήκες μεταβαλλόμενου πληθυσμού ροών μπορεί να δώσει διαφορετικά συμπεράσματα από αυτά κατά την αξιολόγηση σε συνθήκες σταθερού πληθυσμού ροών.

Επιπλέον, ο μέσος αριθμός του συνόλου των ενεργών χρηστών $E(n)$ δίδεται από τον εξής τύπο:

$$E(n) = \sum_{n=1}^{\infty} n\pi(n) = \frac{\rho}{1-\rho} \quad (3.17)$$

Ο μέσος αριθμός των ενεργών χρηστών στην κλάση- i είναι ανάλογος του φορτίου που αντιστοιχεί στη κλάση- i , ήτοι $E(n_i) = \rho_i / \rho E(n)$. Από τον Νόμο του Little, $E(n_i) = \lambda_i \cdot d_i$, όπου d_i είναι η καθυστέρηση διάδοσης της ροής του ενεργού χρήστη της κλάσης- i . Η ρυθμαπόδοση του χρήστη της κλάσης- i είναι ίση με $\gamma_i = \frac{\sigma}{d_i} = \lambda_i \sigma / E(n_i) = \rho_i \bar{r}_i(1) / E(n_i)$ και τελικά έχουμε:

$$\gamma_i = \bar{r}_i(1)(1-\rho). \quad (3.18)$$

Η αναλυτική σχέση της (3.18) είναι τρομερά απλή και παρέχει σημαντική διαίσθηση για την αλληλεπίδραση των ανώτερων επιπέδων της στοίβας των πρωτοκόλλων με τα χαμηλότερα επίπεδα που μελετήσαμε στο Κεφάλαιο 2. Η ρυθμαπόδοση ενός χρήστη της κλάσης- i στο σύστημα χρονοπρογραμματισμού του RR μειώνεται γραμμικά με το φορτίο. Η μέγιστη τιμή που λαμβάνει είναι για $\rho = 0$, που όπως θα δούμε ισοδυναμεί με την κατάσταση συστήματος στην οποία υπάρχει μόνο ένας «μόνιμος χρήστης» της κλάσης- i στο θάλαμο εξυπηρέτησης και καταναλώνει όλους τους πόρους του συστήματος, μόνος του, είναι ίση με το μέσο ρυθμό ζεύξης $\bar{r}_i(1)$ στη (2.3). Στην περίπτωση μιας κλάσης χρηστών η ρυθμαπόδοση μετατρέπεται στη διαφορά: $thr_i = \bar{r}_i(1) - \lambda\sigma$. Τότε η ρυθμαπόδοση ενός χρήστη είναι ίση με τη διαφορά της «χωρητικότητας» μείον της ζήτησης κίνησης.

Η καθυστέρηση του χρήστη της κλάσης- i είναι ίση με:

$$d_i = \frac{\sigma}{\gamma_i} = \frac{\sigma}{\bar{r}_i(1)(1-\rho)}. \quad (3.19)$$

Ορίζουμε ως χωρητικότητα του συστήματος το ελάχιστο άνω φράγμα της ζήτησης σε κίνηση $\lambda\sigma$ των ελαστικών ροών που μπορεί να ικανοποιήσει το σύστημα. Για να την υπολογίσουμε επανερχόμαστε στον ορισμό του φορτίου της κυψέλης

$$\rho = \sum_{i=1}^L \rho_i = \sum_{i=1}^L (p_i \lambda \sigma / \bar{r}_i(1)).$$

Το ελάχιστο άνω φράγμα προκύπτει όταν θέσουμε

$\rho = 1$. Τότε η χωρητικότητα του συστήματος είναι ίση με:

$$C = \left(\sum_{i=1}^L (p_i / \bar{r}_i(1)) \right)^{-1} \quad (3.20)$$

Η σχέση (3.20) είναι ο αρμονικός μέσος των ρυθμών μετάδοσης των κλάσεων. Ο αρμονικός μέσος είναι πάντα μικρότερος ίσος του αριθμητικού μέσου των μέσων

$$\text{ρυθμών ζεύξης των κλάσεων, } \left(\sum_{i=1}^L (p_i / \bar{r}_i(1)) \right)^{-1} \leq \sum_{i=1}^L (p_i \bar{r}_i(1)).$$

Η ισότητα ισχύει πάντα για μια κλάση χρηστών. Για πολλαπλές κλάσεις χρηστών η χωρητικότητα του συστήματος είναι αρκετά διαφορετική από τον αριθμητικό μέσο. Σε περίπτωση μιας κλάσης- i η χωρητικότητα είναι ίση με το μέσο ρυθμός ζεύξης $\bar{r}_i(1)$.

Στην περίπτωση ανελαστικών ροών η χωρητικότητα υπολογίζεται πάλι από τη σχέση (3.20). Για L κλάσεις και πληθυσμό ενεργών ροών $\vec{n} = (n_1, \dots, n_L)$, θέτοντας ως διάρκεια εξυπηρέτησης $\tau_i = \sigma / \bar{r}_i(1)$, προκύπτει τη κατανομή του πληθυσμού των ενεργών χρηστών:

$$\pi(n_1, \dots, n_L) = \pi(0) \frac{(\lambda_1 \tau_1)^{n_1}}{n_1!} \frac{(\lambda_2 \tau_2)^{n_2}}{n_2!} \dots \frac{(\lambda_L \tau_L)^{n_L}}{n_L!}$$

Από την Ενότητα (§3.2.2), γνωρίζουμε ότι η κατανομή του συνόλου των ενεργών χρηστών είναι ίση με:

$$\pi(n) = \pi(0) \frac{\left(\sum_{i=1}^L \lambda_i \tau_i \right)^n}{n!} = \frac{\left(\sum_{i=1}^L (\lambda \sigma p_i) / \bar{r}_i(1) \right)^n}{n!}$$

Επομένως η χωρητικότητα ενός συστήματος απωλειών Erlang πολλαπλών κλάσεων είναι ίση με αυτήν της (3.20).

Αντίστοιχα, μπορούμε να υπολογίσουμε τη χωρητικότητα και στην περίπτωση που οι χρήστες βρίσκονται σε οποιαδήποτε απόσταση μέσα στη κυψέλη ακολουθώντας οποιαδήποτε χωρική κατανομή $\eta(l)$, όπου l η απόσταση από το Σταθμό Βάσης και $\bar{r}(1;l)$ ο μέσος ρυθμός ζεύξης που αντιστοιχεί στην απόσταση l . Στην περίπτωση της ομοιόμορφης κατανομής των χρηστών σε μια κυψέλη με ακτίνα D_0 και ελάχιστη απόσταση από το Σταθμό Βάσης D_1 , $\eta(l) = \frac{2l}{D_0^2 - D_1^2}$.

$$\eta(l) = \frac{2l}{D_0^2 - D_1^2}.$$

Τότε το φορτίο της κυψέλης ορίζεται ως εξής:

$$\rho = \lambda \sigma \int_{D_1}^{D_0} \frac{\eta(l)}{\bar{r}(1;l)} dl, \quad (3.21)$$

Η χωρητικότητα της κυψέλης είναι ίση με [B05]:

$$C = \left(\int_{D_1}^{D_0} \frac{\eta(l)}{\bar{r}(1;l)} dl \right)^{-1}. \quad (3.22)$$

Η (3.22) εκφράζει το μέσο αρμονικό επιφανείας. Και εδώ αξίζει να τονιστεί ότι ο μέσος αρμονικός επιφανείας είναι διαφορετικός από το μέσο αριθμητικό επιφανείας:

$$\dots \dots \dots \left(\int_{D_1}^{D_0} \frac{\eta(l)}{\bar{r}(1;l)} dl \right)^{-1} \leq \int_{D_1}^{D_0} \eta(l) \bar{r}(1;l) dl.$$

Αρκετές εργασίες στη σύγχρονη βιβλιογραφία, για παράδειγμα [SA12], [TSA12] βασίζονται στο μέσο αριθμητικό επιφανείας για τη διαστασιοποίηση των δικτύων. Ο μέσος αριθμητικός επιφανείας, όμως, δεν εκφράζει τη μέγιστη ζήτηση σε κίνηση δεδομένων που μπορεί να εξυπηρετήσει το σύστημα. Εκφράζει το μέσο ρυθμό ζεύξης επιφανείας.

3.4 Τεχνική του «μόνιμου χρήστη»

Σε αυτό το σημείο, παρουσιάζουμε την τεχνική του «μόνιμου χρήστη». Θεωρούμε ότι ένας χρήστης της κλάσης- i είναι μόνιμα στο θάλαμο εξυπηρέτησης. Τότε το μαρκοβιανό μοντέλο του ΜΕ προφανώς τροποποιείται, και η κατανομή των ενεργών χρηστών αλλάζει. Όπως θα δούμε, όμως, η κατανομή των ενεργών χρηστών είναι η ίδια με το μη τροποποιημένο μοντέλο του ΜΕ, πολλαπλασιασμένη με 2 παραμέτρους του μη τροποποιημένου μοντέλου. Το τροποποιημένο μοντέλο του ΜΕ μας επιτρέπει να υπολογίσουμε τη ρυθμαπόδοση καθώς και άλλες μετρικές από τη «πλευρά του χρήστη». Ο Νόμος του Little μας επιτρέπει να υπολογίσουμε τη ρυθμαπόδοση από τη «πλευρά του συστήματος» [BP06]. Εκ πρώτης όψεως αυτή η διάκριση μπορεί να παρουσιάζεται ως θεωρητική αφαίρεση. Κι όμως, έχει πολύ συγκεκριμένο πρακτικό περιεχόμενο όπως θα δούμε πολύ σύντομα, όσον αφορά τη πραγματοποίηση πειραμάτων προσομοίωσης. Η **Πρόταση 3** παρέχει την κατανομή των ενεργών χρηστών του τροποποιημένου μοντέλου ΜΕ. Η απόδειξη δίδεται στο Παράρτημα Β1.

Πρόταση 3: Η κατανομή των ενεργών χρηστών στο μοντέλο του τροποποιημένου ΜΕ $\pi'(n)$, λόγω της ύπαρξης ενός μόνιμου χρήστη, συναρτήσσει της κατανομής των ενεργών χρηστών και άλλων χαρακτηριστικών του μη τροποποιημένου μοντέλου ΜΕ δίδεται ως εξής:

$$\pi'(n) = n\pi(n)/E[n] \quad (3.23)$$

Η **Πρόταση 3** είναι πολύ σημαντική γιατί μας επιτρέπει να υπολογίζουμε μετρικές μακροπρόθεσμα, παίρνοντας το μέσο όρο των μετρικών που εξαρτώνται από τις καταστάσεις συστήματος μεσοπρόθεσμα. Σε συνθήκες σταθερού πληθυσμού ενεργών χρηστών $n > 0$, ο ρυθμός εξυπηρέτησης κλάσης- i $\bar{r}_i(n)$ καθώς και η μεταδιδόμενη ισχύς εξαρτώνται εν γένει από τη κατάσταση συστήματος n . Σε σύστημα χρονοπρογραμματισμού RR, κάθε ενεργός χρήστης μεταδίδει μεσοπρόθεσμα δεδομένα με ρυθμό εξυπηρέτησης χρήστη $\bar{r}_i(n)/n$, με ισχύ $P(\bar{r}_i(n))/n$ και εξυπηρετείται με πιθανότητα $1/n$.

Τότε η ρυθμαπόδοση του χρήστη της κλάσης- i προκύπτει ως εξής:

$$\gamma_i = \frac{\sum_{k=1}^{\infty} \frac{\bar{r}_i(k)}{k} k \pi(n=k)}{E[n]} = \frac{\sum_{k=1}^{\infty} \bar{r}_i(k) \pi(n=k)}{E[n]}. \quad (3.24)$$

Τότε η μέση ισχύς του χρήστη της κλάσης- i προκύπτει ως εξής:

$$\nu_i = \frac{\sum_{k=1}^{\infty} \frac{P(\bar{r}_i(k))}{k} k \pi(n=k)}{E[n]} = \frac{\sum_{k=1}^{\infty} P(\bar{r}_i(k)) \pi(n=k)}{E[n]}. \quad (3.25)$$

Στη περίπτωση που ο ρυθμός εξυπηρέτησης κλάσης δεν εξαρτάται από τη κατάσταση συστήματος, όπως π.χ. στην περίπτωση του αλγορίθμου RR, $\bar{r}_i(n) = \bar{r}_i(1)$ και η ρυθμαπόδοση του χρήστη της κλάσης- i μετατρέπεται σε

$$\gamma_i = \frac{\bar{r}_i(1) \pi(n > 0)}{E[n]} = \bar{r}_i(1)(1 - \rho), \text{ ίση με αυτή του μη τροποποιημένου μοντέλου ME.}$$

Παρατήρηση 2: Τόσο στο τροποποιημένο, όσο και στο μη τροποποιημένο μοντέλο ME οι μετρικές που εξετάζουμε μακροπρόθεσμα λαμβάνουν ακριβώς την ίδια τιμή. Αντί λοιπόν να εφαρμόζουμε το Νόμο των Μεγάλων Αριθμών στις προσομοιώσεις, δεσμεύοντας μνήμη για τους ρυθμούς εξυπηρέτησης κάθε ροής, αρκεί να μελετάμε μόνο την εξέλιξη της ρυθμαπόδοσης (ή της μέσης συνολικής ισχύος) ενός μόνιμου χρήστη σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Σε δύσκολα προβλήματα προσομοίωσης ο χρόνος υλοποίησης μπορεί να κρατήσει μέρες και η αναγκαία μνήμη να είναι αρκετά μεγάλη. Στην περίπτωση που τα εξεταζόμενα δίκτυα δεν ακολουθούν την ιδιότητα της ισορροπίας, τότε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης θα είναι διαφορετικά. Τότε οι μετρικές στο τροποποιημένο ME και στο μη τροποποιημένο ME θα δίνουν διαφορετικές τιμές. Ο Νόμος των Μεγάλων Αριθμών θα δίνει αποτελέσματα από τη «σκοπιά του συστήματος» και η τεχνική του μόνιμου χρήστη από τη «σκοπιά του χρήστη».

3.5 Προτεινόμενος Αλγόριθμος Προσαρμογής Ζεύξης

Σε αυτή την Ενότητα εξετάζουμε την επίδοση του προτεινόμενου βέλτιστου αλγόριθμου προσαρμογής ζεύξης, του Καταστασιακά Εξαρτημένου αλγορίθμου που ορίσαμε στην Ενότητα (§2.5.1). Στην Ενότητα (§3.5.1) εξετάζεται η αναλυτική επίδοση του ΚΕ σε συνθήκες μεταβαλλόμενου πληθυσμού ροών και στην Ενότητα (§3.5.2) αξιολογείται η επίδοση του ΚΕ με αριθμητικά αποτελέσματα και σενάρια προσομοίωσης.

3.5.1 Αναλυτική αξιολόγηση της επίδοσης του ΚΕ

Η ενεργειακή επίδοση ενός χρήστη σε συνθήκες μεταβαλλόμενου πληθυσμού χρηστών ορίζεται ως ο λόγος της ρυθμαπόδοσης του χρήστη προς τη συνολική μέση ισχύ που καταναλώνει μεσοπρόθεσμα στο Κινητό Τερματικό (ΚΤ). Με τη βοήθεια των σχέσεων (3.24)-(3.25), η ενεργειακή επίδοση χρήστη υπολογίζεται ως εξής:

$$U_i = \frac{\gamma_i}{v_i + P_C}, \quad (3.26)$$

εκφράζοντας τον αριθμό των μεταδιδόμενων bits του χρήστη της κλάσης- i προς τη συνολική ενέργεια σε joule που καταναλίσκει στο ΚΤ μακροπρόθεσμα.

Στην Ενότητα (§2.5.1) βρήκαμε την αναλυτική σχέση για το βέλτιστο ρυθμό εξυπηρέτησης $\bar{r}_i^*(n)$ στη (2.16) σε συνθήκες σταθερού πληθυσμού ενεργών χρηστών σε κατάσταση συστήματος n . Στη συνέχεια θεωρούμε ότι κάθε χρήστης μεταδίδει σύμφωνα με την (2.16).

Παρατηρούμε ότι η Ιδιότητα της Ισορροπίας δεν ισχύει στην περίπτωση του ΚΕ αλγόριθμου. Συγκεκριμένα, για δυο κλάσεις χρηστών, έστω «απομακρυσμένων» κλάσης- i και «κοντινών», κλάσης- j

$$\frac{\bar{r}_i^*(n-1)}{\bar{r}_i^*(n)} \neq \frac{\bar{r}_j^*(n-1)}{\bar{r}_j^*(n)}, \forall n > 0. \quad (3.27)$$

Σύμφωνα με τη σχέση (3.13) και την **Πρόταση 2** (Ιδιότητα Ισορροπίας) ο αλγόριθμος ΚΕ δεν είναι αναλλοίωτος στη κατανομή της κίνησης των δεδομένων για

πολλαπλές κλάσεις. Είναι εύρωστος για μια κλάση. Στη συνέχεια, λοιπόν, θεωρούμε ενεργούς χρήστες μιας κλάσης. Στην περίπτωση πολλαπλών κλάσεων θα πραγματοποιήσουμε προσομοίωση και θα παρουσιάσουμε φράγματα επίδοσης υπολογισμένα σύμφωνα με την προσέγγιση στα Σχήματα (3.8), (3.9).

Προκειμένου να υπολογίσουμε τη ρυθμαπόδοση γ_i στη (3.24), τη μέση ισχύ v_i στη (3.25) και τελικά την ενεργειακή επίδοση U_i στη (3.26) σε συνθήκες μεταβαλλόμενου πληθυσμού ενεργών χρηστών, πρέπει πρώτα να βρούμε την αναλυτική σχέση της κατανομής των ενεργών χρηστών $\pi(n=k)$. Η κατανομή των ενεργών χρηστών, σύμφωνα με την (3.9) είναι η ακόλουθη:

$$\pi(n=k) = \pi(0) \prod_{m=1}^k \left(\frac{\lambda \sigma}{\bar{r}_i^*(m)} \right), \quad (3.28)$$

όπου $\pi(0) = 1 / \left(1 + \sum_{j=1}^B \prod_{m=1}^j \left(\frac{\lambda \sigma}{\bar{r}_i^*(m)} \right) \right)$ είναι η πιθανότητα να μην υπάρχει κανένας

ενεργός χρήστης στο σύστημα και B είναι ο μέγιστος επιτρεπόμενος αριθμός αφίξεων στο σύστημα. Ο Καταστασιακά Ανεξάρτητος (ΚΑ) αλγόριθμος ακολουθεί τη γεωμετρική κατανομή στη (3.16).

Παρατήρηση 3: Για σταθερή τιμή ζήτησης κίνησης $\lambda \sigma$, η $\pi(n=k)$ στη (3.28) για τον ΚΕ μειώνεται ταχύτερα συναρτήσει του συνόλου των ενεργών χρηστών από ότι η $\pi(n=k)$ στη (3.16), για τον ΚΑ αλγόριθμο. Επομένως, περιμένουμε ότι το σύνολο των ενεργών ροών στον ΚΕ κυμαίνεται σε πολύ χαμηλότερες τιμές από ότι στον ΚΑ.

Στη Ενότητα (§2.5.1) τονίσαμε ότι οι αλγόριθμοι ΚΕ και ΚΑ αναμένεται να δώσουν παρόμοιο βέλτιστο ρυθμό εξυπηρέτησης αν $\beta_C \geq 0.5$. Τότε και τα δυο σχήματα προσαρμογής ζεύξης αναμένεται να δώσουν παρόμοιες τιμές όσον αφορά την κατανομή του συνόλου των ενεργών χρηστών $\pi(n=k)$. Το ακριβώς αντίθετο θα συμβεί στην περίπτωση που $\beta_C = 0.1$.

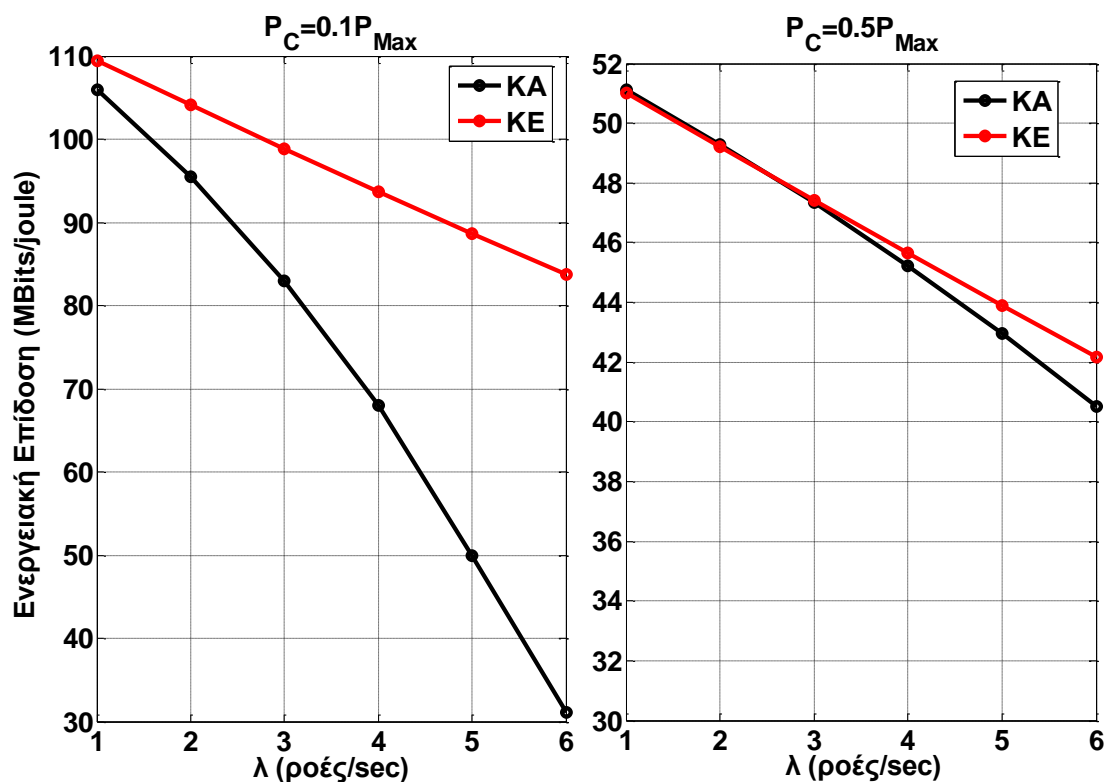
3.5.2 Αξιολόγηση της επίδοσης του ΚΕ αλγορίθμου προσαρμογής ζεύξης

Θεωρούμε ελαστικές ροές με μέσο μέγεθος $\sigma = 2\text{Mbits}$. Ο μέγιστος επιτρεπόμενος αριθμός ροών στο σύστημα είναι $B = 20$. Η μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύς στην ανερχόμενη ζεύξη είναι $P_{MAX} = 0.6\text{Watt}$. Εδώ θεωρούμε διάδοση σε μια μικρο-κυψέλη. Θεωρούμε δυο περιπτώσεις σταθερής κατανάλωσης ισχύος $P_C = 0.1P_{MAX}$ και $P_C = 0.5P_{MAX}$, που αντιστοιχούν σε $\beta_C = 0.1$ και $\beta_C \geq 0.5$. Οι τιμές αυτές έχουν επιλεγεί σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα στη λεπτομερειακή τεχνική ανάλυση της συνολικής κατανάλωσης ισχύος σε smart phone στη [CH10]. Συγκεκριμένα, η πρώτη περίπτωση $\beta_C = 0.1$ αφορά την περίπτωση της μετάδοσης ελαστικών ροών. Η δεύτερη περίπτωση συνδέεται με την ακραία κατανάλωση ισχύος στη CPU λόγω χρήσης παιχνιδιών στο ΚΤ [AMJ⁺07].

Εδώ εξετάζουμε τρία σενάρια: Α) όλοι οι χρήστες έχουν την ίδια P_C και βρίσκονται σε απόσταση $l = 200\text{m}$ από τον ΣΒ, Β) μισοί από αυτούς, οι χρήστες της κλάσης-1, έχουν $P_C = 0.1P_{MAX}$ και οι άλλοι μισοί, χρήστες της κλάσης-2, έχουν $P_C = 0.5P_{MAX}$, Γ) όλοι οι χρήστες έχουν την ίδια $P_C = 0.1P_{MAX}$, αλλά μισοί από αυτούς, οι χρήστες της κλάσης-1, είναι σε απόσταση $l_1 = 200\text{m}$ και οι άλλοι μισοί, χρήστες της κλάσης-2, σε απόσταση $l_2 = 141\text{m}$. Η επίδοση των χρηστών της κλάσης- i είναι μια συντηρητική εκτίμηση της επίδοσης χρηστών μέσα σε δυο δακτυλίους στη κυψέλη με όρια $[200\text{m}, 141\text{m}]$ και $[141\text{m}, 0\text{m}]$, θεωρώντας ομοιόμορφη κατανομή χρηστών στο χώρο. Για το πρώτο σενάριο τα αποτελέσματα είναι αριθμητικά. Για το δεύτερο και το τρίτο σενάριο πραγματοποιούμε προσομοίωση. Η κατανομή του μεγέθους της ροής θεωρείται εκθετική. Επιπλέον, παρουσιάζονται αποτελέσματα για φράγματα επίδοσης σύμφωνα με τη προσέγγιση της κατανομής των ενεργών χρηστών πολλαπλών κλάσεων στα Σχήματα (3.8) και (3.9).

Για το πρώτο σενάριο, το Σχήμα 3.10 παρουσιάζει την ενεργειακή επίδοση συναρτήσεως του ρυθμού αφίξεων ροών λ , τόσο για τον ΚΕ, όσο και για τον ΚΑ αλγόριθμο. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ο προτεινόμενος ΚΕ υπερισχύει σε επίδοση του ΚΑ τόσο σε υψηλές τιμές φορτίου, όσο σε και σε χαμηλές τιμές φορτίου,

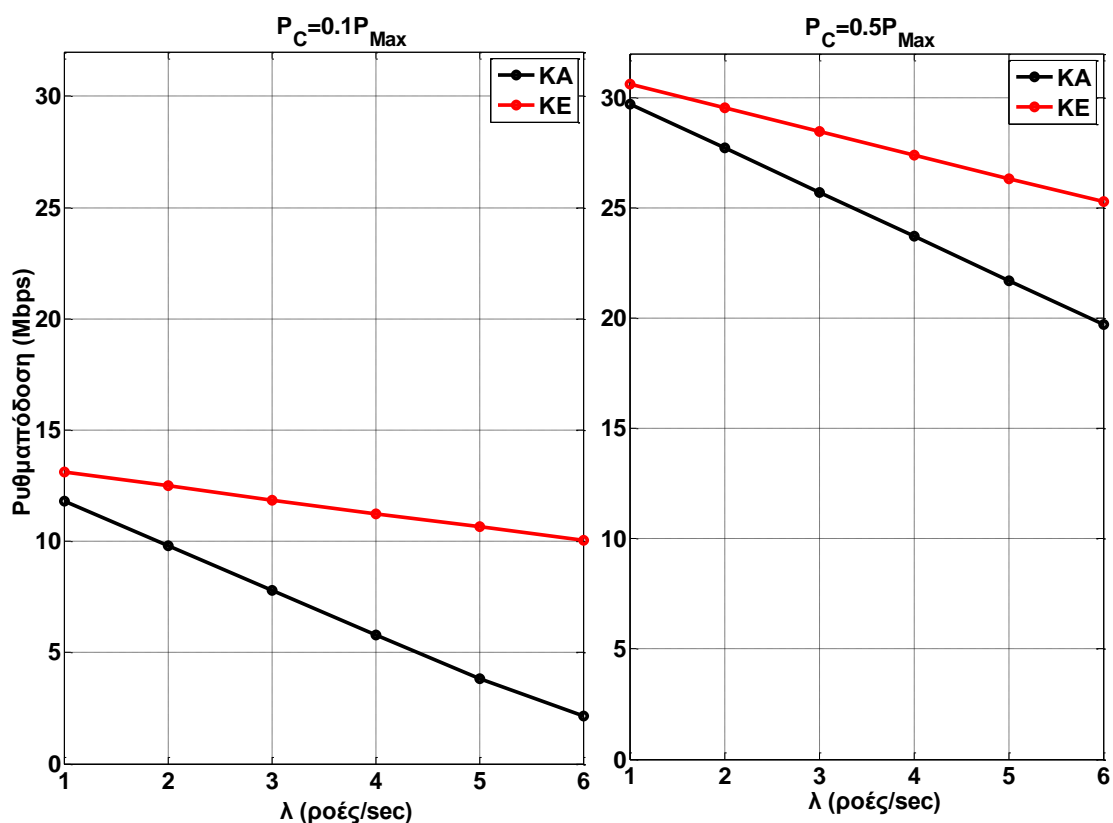
όταν $P_C = 0.1P_{MAX}$. Συγκεκριμένα, για $\lambda = 3$ η ενεργειακή επίδοση στον ΚΕ είναι 19% μεγαλύτερη από ότι στον ΚΑ. Για $\lambda = 6$, η αύξηση είναι σημαντικά μεγαλύτερη, 169%. Όταν $P_C = 0.5P_{MAX}$ ο ΚΕ παρουσιάζει σχεδόν την ίδια ενεργειακή επίδοση με αυτή του ΚΑ, τόσο στις χαμηλές, όσο και στις υψηλές τιμές φορτίου. Τα αποτελέσματα συμπίπτουν με τα συμπεράσματα της ανάλυσης στην Ενότητα (§2.5.1) και (§3.5.1), επιβεβαιώνοντας ένα από τα βασικά συμπεράσματα της ανάλυσης: ότι υπάρχουν περιορισμένα περιθώρια για αύξηση της ενεργειακής επίδοσης, αξιοποιώντας την προσαρμογή ζεύξης όταν η σταθερά καταναλισκόμενη ισχύς P_C είναι κοντά στη μέγιστη επιτρεπόμενη μεταδιδόμενη ισχύ P_{MAX} .



Σχήμα 3.10: Ενεργειακή Επίδοση χρήστη για ΚΕ και ΚΑ αλγορίθμους συναρτήσει του ρυθμού αφίξεων ροών για το πρώτο σενάριο.

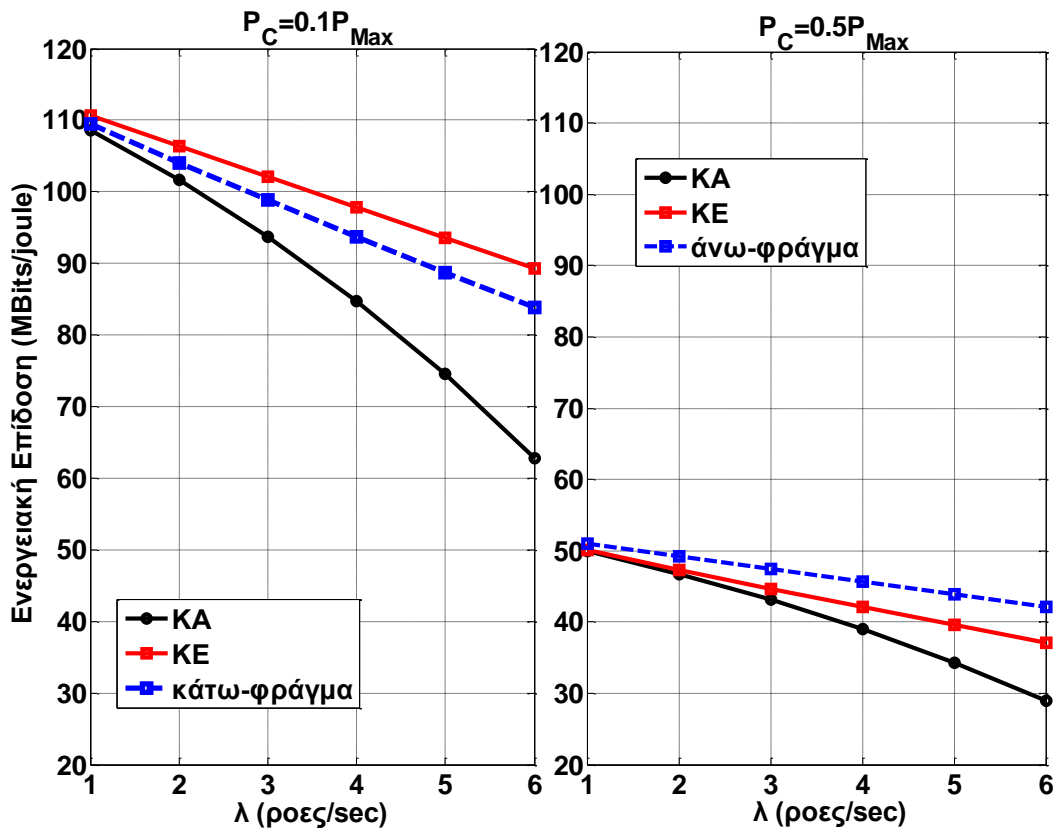
Επιπρόσθετα, όταν $P_C = 0.5P_{MAX}$, για $\lambda = 6$ $E[n] = 0.53$ στο ΚΕ και $E[n] = 0.6$ στο ΚΑ. Όπως έχουμε ήδη τονίσει στην Ενότητα (§3.5.1), ο αριθμός των ενεργών ροών κυμαίνεται σε εξαιρετικά χαμηλές τιμές, ακόμη και σε υψηλές τιμές ρυθμού αφίξεων λόγω της μορφής της πιθανότητας $\pi(n = k)$ που μειώνεται ταχύτερα από τη γεωμετρική κατανομή. Σε αυτή την περίπτωση, πρακτικά ο ΚΕ έχει παρόμοια

επίδοση με τον ΚΑ. Όταν $P_C = 0.1P_{MAX}$ για $\lambda = 6$, $E[n] = 1.19$ για τον ΚΕ και $E[n] = 5.5$ για τον ΚΑ, εξηγώντας την τεράστια διαφορά στην επίδοση στις υψηλές τιμές φορτίου. Στο Σχήμα 3.11 παρουσιάζονται αναλυτικά αποτελέσματα για την ρυθμαπόδοση χρήστη στις δυο κλάσεις. Για $\lambda = 6$ και $P_C = 0.1P_{MAX}$ η ρυθμαπόδοση στον ΚΕ είναι 365% μεγαλύτερη έναντι του ΚΑ. Για $\lambda = 6$ και $P_C = 0.5P_{MAX}$ η ρυθμαπόδοση στον ΚΕ είναι 25% μεγαλύτερη έναντι του ΚΑ.



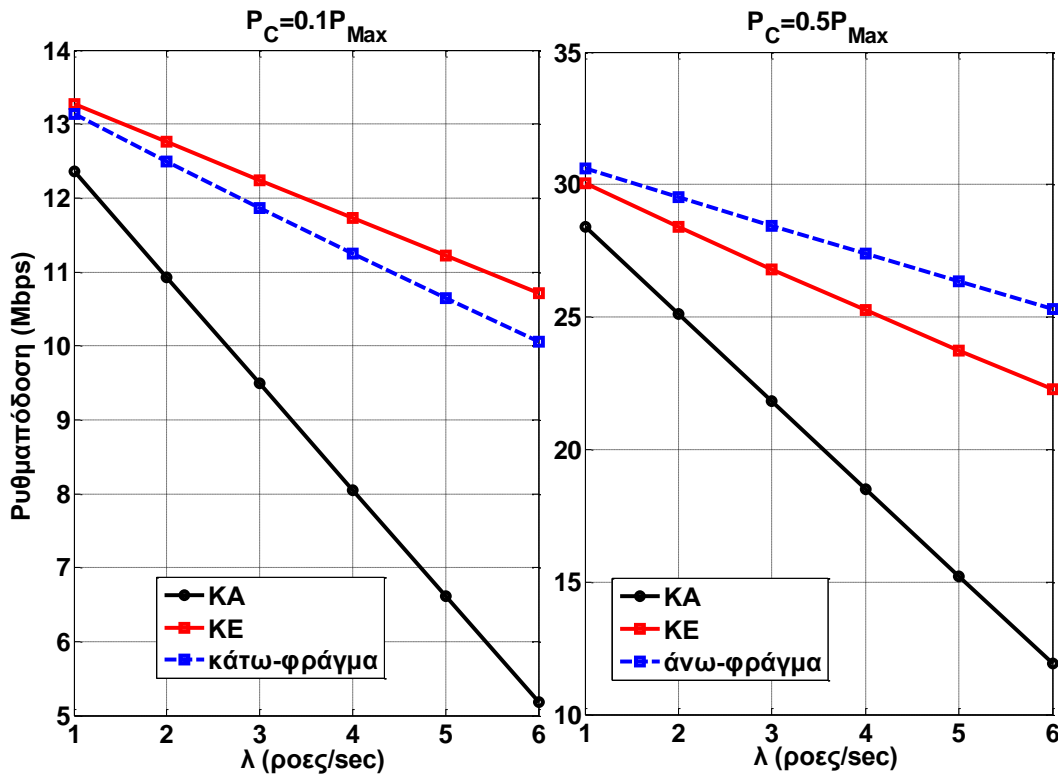
Σχήμα 3.11: Ρυθμαπόδοση χρήστη για ΚΕ και ΚΑ αλγορίθμους συναρτήσει του ρυθμού αφίξεων ροών για το πρώτο σενάριο

Για το δεύτερο σενάριο, το Σχήμα 3.12 παρουσιάζει την ενεργειακή επίδοση τόσο για στον ΚΕ, όσο και στον ΚΑ για τους χρήστες της κλάσης-1 και τους χρήστες της κλάσης-2. Ξανά ο ΚΕ υπερिशύει του ΚΑ, αυτή τη φορά και στις δυο κλάσεις. Για $\lambda = 6$, η αύξηση της επίδοσης των χρηστών της κλάσης-1 στον ΚΕ είναι 42% και για τους χρήστες της κλάσης-2 είναι 28%.



Σχήμα 3.12: Ενεργειακή Επίδοση χρήστη κλάσης- i για ΚΕ και ΚΑ αλγορίθμους για το δεύτερο σενάριο. Οι διακεκομμένες γραμμές είναι αποτελέσματα των φραγμάτων επίδοσης.

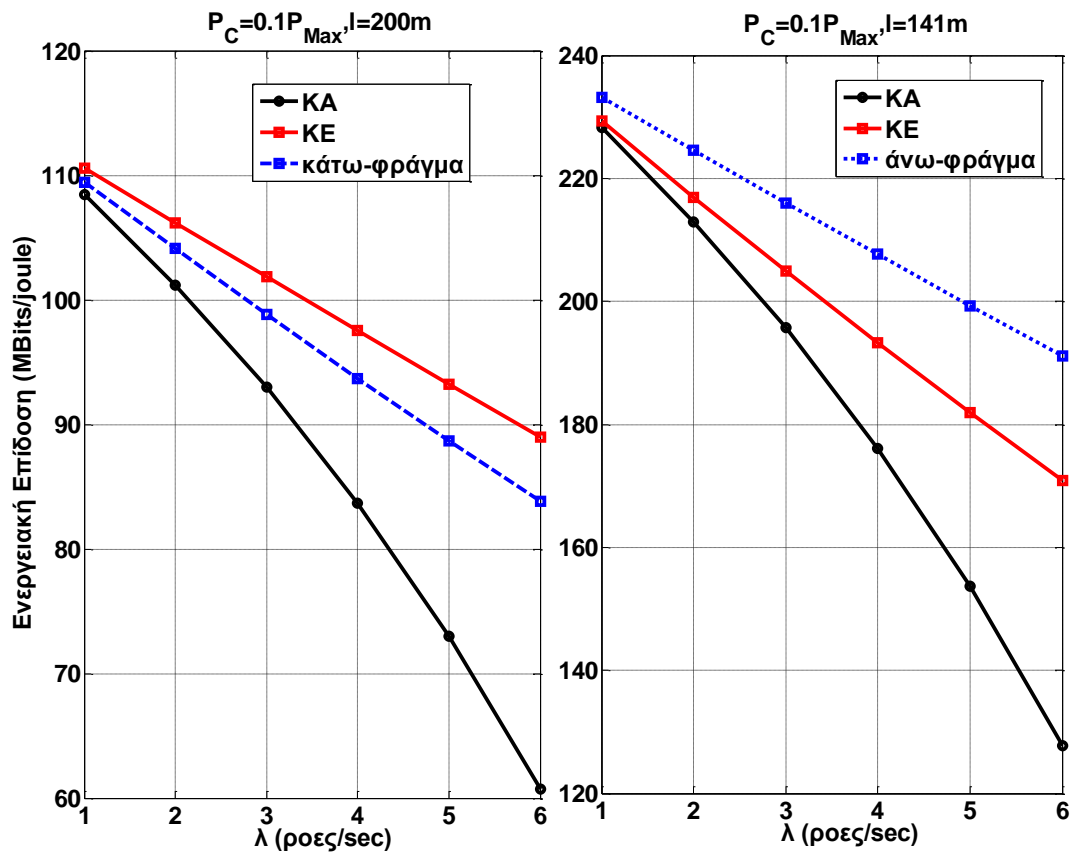
Εδώ πρέπει να τονιστεί ότι τα αποτελέσματα στο πρώτο σενάριο είναι ίσα με τα χαμηλότερα και υψηλότερα φράγματα επίδοσης για την κλάση-1 και την κλάση-2 στο σενάριο 2 αντίστοιχα. Στο Σχήμα 3.13 παρουσιάζονται αποτελέσματα για την ρυθμαπόδοση χρήστη στις δυο κλάσεις. Για $\lambda = 6$ και $P_C = 0.1 P_{MAX}$ η ρυθμαπόδοση στον ΚΕ είναι 105% μεγαλύτερη έναντι του ΚΑ. Για $\lambda = 6$ και $P_C = 0.5 P_{MAX}$ η ρυθμαπόδοση στον ΚΕ είναι 87,3% μεγαλύτερη έναντι του ΚΑ.



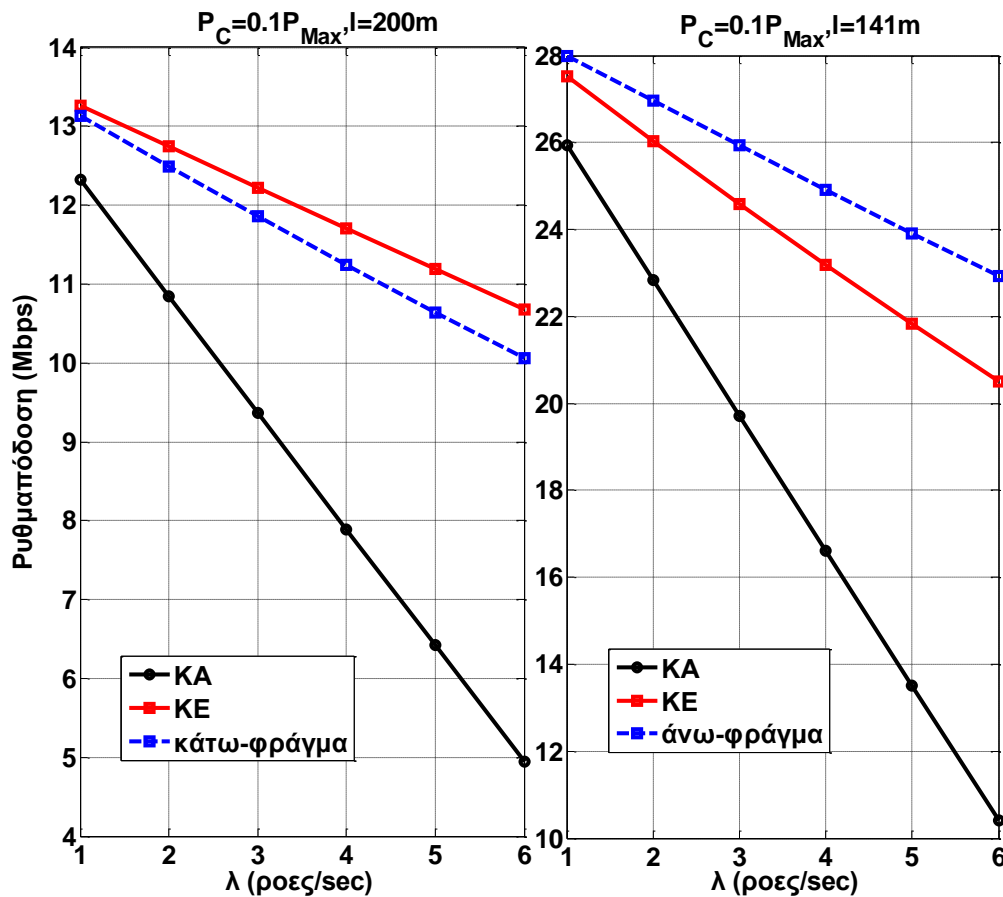
Σχήμα 3.13: Ρυθμαπόδοση χρήστη κλάσης- i για KE και KA αλγορίθμους για το δεύτερο σενάριο. Οι διακεκομμένες γραμμές είναι αποτελέσματα των φραγμάτων επίδοσης.

Για το τρίτο σενάριο, το Σχήμα 3.14 παρουσιάζει την ενεργειακή επίδοση για KE και KO, για τους χρήστες της κλάσης-1 και τους χρήστες της κλάσης-2. Ο KE υπερσχύει του KO και στις δυο κλάσεις. Για $\lambda = 6$, η αύξηση για τους χρήστες της κλάσης-1 στον KE είναι 46% έναντι του KO για τους χρήστες της κλάσης-2 32%.

Στο Σχήμα 3.15 παρουσιάζονται αποτελέσματα για την ρυθμαπόδοση χρήστη στις δυο κλάσεις. Για $\lambda = 6$ και $l = 200m$ η ρυθμαπόδοση στον KE είναι 116% μεγαλύτερη έναντι του KA. Για $\lambda = 6$ και $l = 141m$ η ρυθμαπόδοση στον KE είναι 97% μεγαλύτερη έναντι του KA.



Σχήμα 3.14: Ενεργειακή Επίδοση χρήστη κλάσης- i για KE και KA αλγορίθμους για το τρίτο σενάριο. Οι διακεκομμένες γραμμές είναι αποτελέσματα των φραγμάτων επίδοσης.



Σχήμα 3.15: Ρυθμαπόδοση χρήστη κλάσης- i για KE και KA αλγορίθμους για το τρίτο σενάριο. Οι διακεκομμένες γραμμές είναι αποτελέσματα των φραγμάτων επίδοσης.

Στα Σενάρια 2 και 3, σχεδόν πάντα τα αναλυτικά φράγματα επίδοσης είναι αρκετά κοντά στα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Η εγγύτητα αυτή τονίζει τη σημασία των προσεγγίσεων της κατανομής των ενεργών χρηστών σε συστήματα χρονοπρογραμματισμού πολλαπλών κλάσεων που δεν είναι αναλλοίωτα στη κατανομή της κίνησης των δεδομένων μέσω των Σχημάτων (3.8), (3.9).

3.6 Αναλογικά Δίκαιος Αλγόριθμος

Σε αυτή την Ενότητα θα εξετάσουμε την επίδοση του ΑΔ αλγορίθμου σε συνθήκες μεταβαλλόμενου πληθυσμού, αξιοποιώντας τη προσεγγιστική σχέση που βρήκαμε στην (2.8) για το κέρδος χρονοπρογραμματισμού $g_{PF} = \frac{1}{1-f_1}$. Χωρίς βλάβη της

γενικότητας αλλά για την εναργέστερη παρουσίαση του προβλήματος θεωρούμε δυο κλάσεις χρηστών, την κλάση-1 των «απομακρυσμένων χρηστών και την κλάση-2 των «κοντινών» χρηστών. Οι χρήστες στη κλάση- i εμφανίζονται με πιθανότητα p_i ($i=1,2$), όπου $p_1 + p_2 = 1$ και $p_1 > p_2$, εκφράζοντας το γεγονός ότι συνήθως οι «απομακρυσμένοι» είναι περισσότεροι απ' ότι οι «κοντινοί».

Σε αυτό το σημείο εξετάζουμε αν το σύστημα του ΑΔ ευκαιριακού χρονοπρογραμματισμού πληροί την Ιδιότητα της Ισορροπίας. Συγκεκριμένα, για τις δυο κλάσεις χρηστών, έστω «απομακρυσμένων» κλάσης-1 και «κοντινών», κλάσης-2

$$\frac{\bar{r}_1(n-1)}{\bar{r}_1(n)} \neq \frac{\bar{r}_2(n-1)}{\bar{r}_2(n)}, \forall n > 0. \quad (3.29)$$

Αν εφαρμόσουμε, όμως, την προσέγγιση για το κέρδος χρονοπρογραμματισμού, τότε

$$\frac{\bar{r}_1(n-1)}{\bar{r}_1(n)} \approx \frac{g_{PF}\bar{r}_1(1)}{g_{PF}\bar{r}_1(1)} = \frac{g_{PF}\bar{r}_2(1)}{g_{PF}\bar{r}_2(1)} \approx \frac{\bar{r}_2(n-1)}{\bar{r}_2(n)}, \forall n > 2. \quad (3.30)$$

οπότε το μοντέλο ΜΕ μπορεί να αξιοποιηθεί για την μοντελοποίηση του συστήματος χρονοπρογραμματισμού του ΑΔ αλγορίθμου. Το μοντέλο ΜΕ παρέχει την κατανομή του συνόλου των ενεργών χρηστών $\pi(n=k)$ που εξυπηρετούνται από τον ΑΔ. Ακολουθώντας την τεχνική του «μόνιμου» χρήστη, η πιθανότητα ένας μόνιμος χρήστης να βλέπει το σύστημα σε κατάσταση $n=k$, ισούται με $k\pi(n=k)/E[n]$. Όπως είδαμε στην Ενότητα (§2.3), τόσο στην περίπτωση του RR, όσο και στην περίπτωση του ΑΔ, ένας ενεργός χρήστης επιλέγεται στη κατάσταση συστήματος $n=k$ μεσοπρόθεσμα με πιθανότητα $1/k$. Τότε η πιθανότητα εκπομπής του μόνιμου χρήστη μακροπρόθεσμα ισούται με:

$$q = \frac{\sum_{k=1}^{\infty} \pi(n=k)}{E[n]} = \frac{\pi(n>0)}{E[n]}. \quad (3.31)$$

Με τη βοήθεια των σχέσεων (3.24) και (3.25) η ρυθμαπόδοση του χρήστη της κλάσης- i ισούται με $\gamma_i = \bar{r}_i(1)q$ και η μέση ισχύς $\varphi_i = P(\bar{r}_i(1))q$. Τελικά η ενεργειακή επίδοση καταλήγει ως εξής:

$$U_i = \frac{\gamma_i}{\varphi_i + P_C} = \frac{\bar{r}_i(1)}{P(\bar{r}_i(1)) + P_C/q}. \quad (3.32)$$

Παρατήρηση 4: Σύμφωνα με την (3.32) η ενεργειακή επίδοση του χρήστη της κλάσης- i είναι αύξουσα συνάρτηση της πιθανότητας q .

Υπενθυμίζουμε ότι έχουμε ορίσει το φορτίο της κλάσης- i ως το λόγο $\rho_i = (\lambda \sigma p_i) / \bar{r}_i(1)$. Το συνολικό φορτίο της κυψέλης ισούται με $\rho = \rho_1 + \rho_2$. Το ελάχιστο άνω φράγμα της τιμής του συνολικού φορτίου ρ για ευστάθεια στον RR είναι 1. Στον ΑΔ, η αντίστοιχη τιμή είναι g_{PF} . Υπενθυμίζουμε ότι οι πιθανότητες στο σύστημα χρονοπρογραμματισμού RR $\pi(n=0) = (1-\rho)$ και $\pi(n>0) = \rho$. Ο μέσος αριθμός των ενεργών χρηστών είναι $E[n] = \rho / (1-\rho)$ και η πιθανότητα μετάδοσης είναι $q = (1-\rho)$. Προκειμένου να βρούμε τις αντίστοιχες ποσότητες για τον ΑΔ αλγόριθμο, αξιοποιούμε την παρακάτω παρατήρηση στην [B05, Ενότητα 6.1], ότι η πιθανότητα εκπομπής στον ΑΔ μειώνεται γραμμικά ως συνάρτηση του φορτίου. Εφόσον γνωρίζουμε ότι η μέγιστη τιμή φορτίου στον ΑΔ είναι g_{PF} και η ελάχιστη τιμή είναι 0, τότε η πιθανότητα εκπομπής στην ΑΔ ισούται με:

$$q = (1 - \rho / g_{PF}). \quad (3.33)$$

Παρατήρηση 5: Η πιθανότητα εκπομπής είναι γραμμική φθίνουσα συνάρτηση του φορτίου. Ο ΑΔ μειώνει (σε απόλυτες τιμές) τη κλίση της γραμμικότητας. Επομένως ο ΑΔ αυξάνει την πιθανότητα εκπομπής σε σταθερή τιμή φορτίου.

Για τον ΑΔ, $\pi(n>0) = \rho / g_{PF}$. Επιπλέον, ο μέσος αριθμός των ενεργών χρηστών της κλάσης- i είναι ανάλογος του φορτίου της κλάσης- i , $E[n_i] = (\rho_i / \rho) E[n]$. Τότε από τον Νόμο του Little προκύπτει ότι, $\gamma_i = \bar{r}_i(1)q = \lambda \sigma p_i / E[n_i]$ και τελικά ο μέσος συνολικός αριθμός των ενεργών χρηστών εφαρμόζοντας τον ΑΔ, ισούται με:

$$E[n] = \frac{\rho}{(1 - \rho/g_{PF})}. \quad (3.34)$$

Τελικά η ενεργειακή επίδοση του χρήστη της κλάσης- i για τον ΑΔ ισούται με:

$$U_i = \frac{\bar{r}_i(1)}{P(\bar{r}_i(1)) + P_c / [(1 - \rho/g_{PF})]}. \quad (3.35)$$

Με τη βοήθεια της (2.13), σε συνθήκες σταθερού πληθυσμού ενεργών χρηστών, ο λόγος της ενεργειακής επίδοσης για τον ΑΔ προς τον αντίστοιχο για τον RR ισούται με το κέρδος χρονοπρογραμματισμού g_{PF} . Αν $P(\bar{r}_i(1)) = P_c$, τότε ο λόγος της ενεργειακής επίδοσης U_i στη (3.35) εφαρμόζοντας τον ΑΔ, προς την αντίστοιχη

ποσότητα εφαρμόζοντας τον RR, ισούται με $\Lambda = \frac{1 + 1/(1 - \rho)}{1 + 1/(1 - \rho/g_{PF})}$. Ο λόγος Λ είναι

συνάρτηση του φορτίου ρ . Για $\rho = 0$, $\Lambda = 1$. Το όριο $\lim_{\rho \rightarrow 1} \Lambda = \infty$. Επομένως, σε

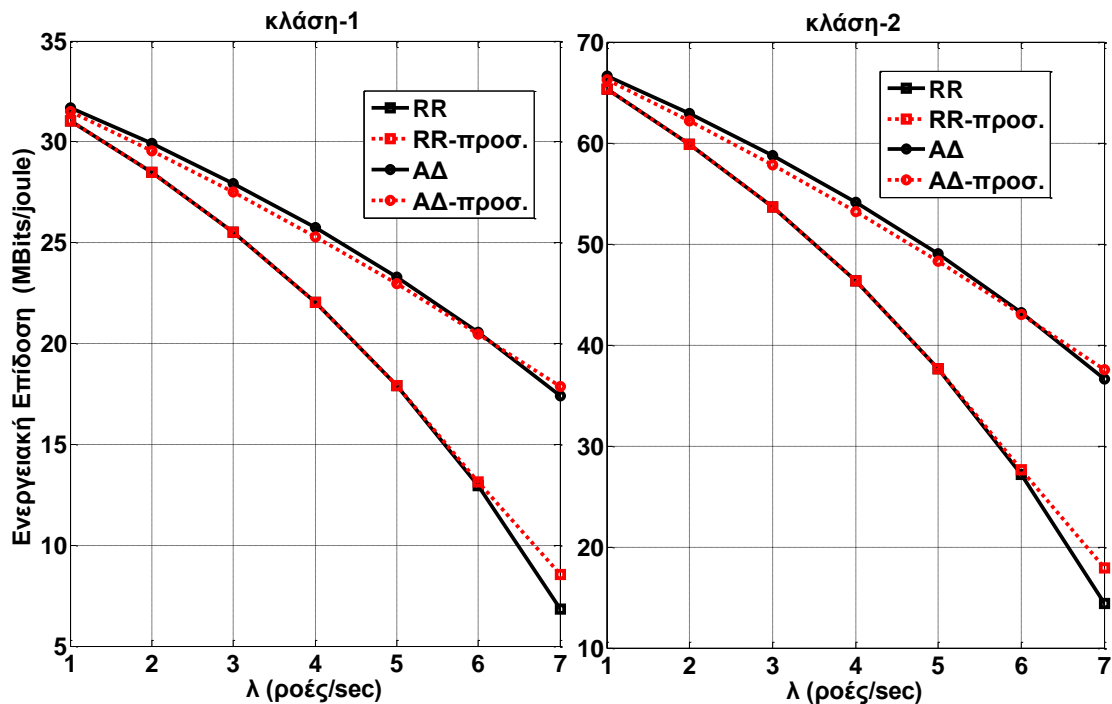
υψηλές τιμές φορτίου ο ΑΔ παρουσιάζει σημαντικό κέρδος έναντι του RR όσον αφορά την ενεργειακή επίδοση, πολύ περισσότερο από 58% ($g_{PF} = 1.58$), που θα αναμενόταν κάτω από ένα σταθερό πληθυσμό χρηστών και για εκθετική κατανομή διαλείψεων ($m=1$).

3.7 Αριθμητικά αποτελέσματα και σχολιασμός

Θεωρούμε μια OFDMA LTE μικρο-κυψέλη με ακτίνα $D = 400m$, με εύρος ζώνης συστήματος bandwidth $W = 10MHz$. Οι σταθερές του ντετερμινιστικού μοντέλου είναι $A = 0.0017$ (διάδοση φέροντος σε 2GHz) και $a = 3.8$ (πυκνό αστικό περιβάλλον διάδοσης). Η μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύς στην ανερχόμενη ζεύξη είναι $P_{MAX} = 0.4W$ και η σταθερά καταναλισκόμενη ισχύς είναι $P_c = 0.2W$. Το μέσο μέγεθος της ροής είναι $\sigma = 2Mbits$. Οι χρήστες συνδέονται με δυο κλάσεις με αποστάσεις $\{l_k\}_{k=1}^2 = \{400, 222\}m$. Η πιθανότητα να εμφανίζεται ένας χρήστης στην κλάση-2 είναι $p_2 = l_2^2/D^2$ δίνοντας $\{p_k\}_{k=1}^2 = \{0.7, 0.3\}$. Τα αποτελέσματα που ακολουθούν είναι συντηρητικές εκτιμήσεις των αποτελεσμάτων στην περίπτωση που οι χρήστες βρίσκονται στην κυψέλη με ομοιόμορφη κατανομή. Όπως και προηγούμενα

θεωρούμε ότι το στιγμιαίο SNR ακολουθεί κατανομή Erlang- $m=2$, με παράμετρο $f_1=0.27$, and $g_{PF}=1.37$. Επιλέγουμε ρυθμούς εξυπηρέτησης (και αντίστοιχες τιμές για την ισχύ μετάδοσης) $\bar{r}_1^*(1)=13.3$ Mbps ($P(l_1)=0.37$ Watt) and $\bar{r}_2^*(1)=28$ Mbps ($P(l_2)=0.15$ W). Οι τιμές αυτές προκύπτουν από την (2.16) για $n=1$ (περίπτωση Καταστασιακά Ανεξάρτητου Αλγορίθμου Προσαρμογής Ζεύξης). Παράλληλα πραγματοποιήσαμε εκτεταμένες προσομοιώσεις. Ο μέγιστος επιτρεπόμενος αριθμός ροών στο σύστημα είναι 20.

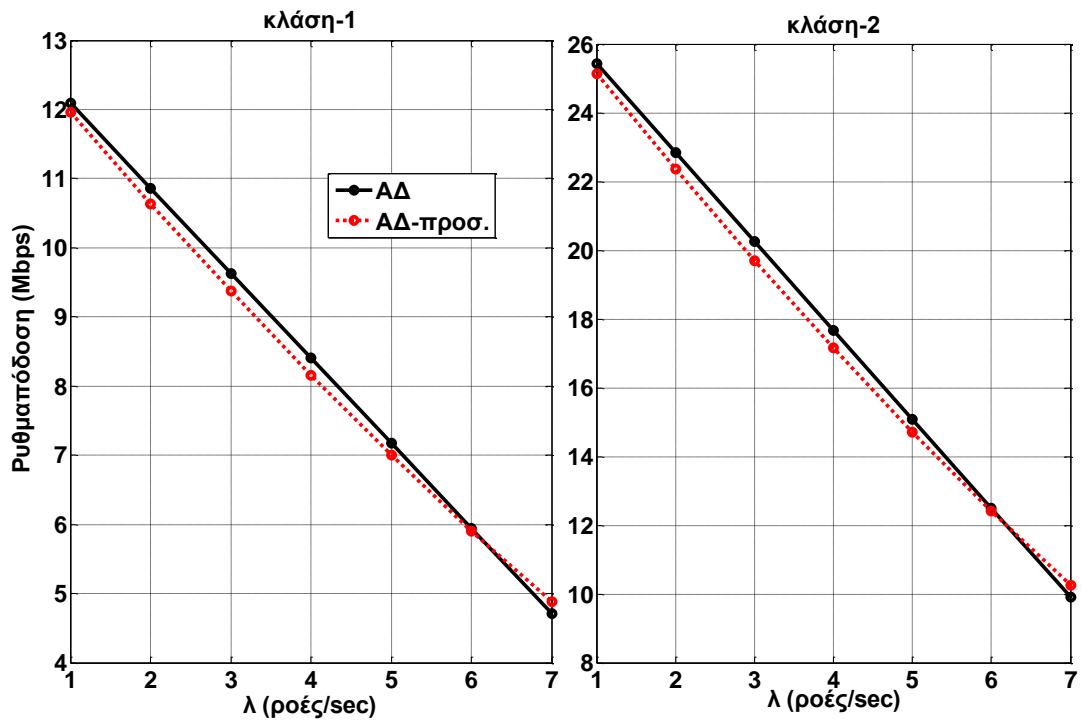
Στο Σχήμα 3.16 παρουσιάζονται αναλυτικά αποτελέσματα και αποτελέσματα προσομοίωσης για την ενεργειακή επίδοση χρήστη της κλάσης- i για τον RR και τον ΑΔ συναρτήσει του ρυθμού αφίξεων λ . Ο ΑΔ υπερισχύει σημαντικά έναντι του RR. Για $\lambda=7$, το κέρδος του ΑΔ έναντι του RR για την κλάση-1 είναι 109% και για τη κλάση-2 είναι 108%, πολύ μεγαλύτερο από την τιμή 37% που αναμένεται σε συνθήκες σταθερού πληθυσμού χρηστών.



Σχήμα 3.16: Ενεργειακή Επίδοση χρήστη κλάσης- i για RR και ΑΔ αλγορίθμους. Οι διακεκομμένες γραμμές είναι αποτελέσματα προσομοίωσης.

Στο Σχήμα 3.17 παρουσιάζονται αποτελέσματα αναλυτικά και προσομοίωσης για τη ρυθμαπόδοση σε κάθε κλάση. Παρατηρούμε ότι τόσο στο Σχήμα 3.16, όσο και στο Σχήμα 3.17 τα αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι σημαντικά κοντά στα

αποτελέσματα της ανάλυσης, επιβεβαιώνοντας έτσι τη χρησιμότητα της προσέγγισης του κέρδους χρονοπρογραμματισμού για τον ΑΔ αλγόριθμο.



Σχήμα 3.17: Ρυθμαπόδοση χρήστη κλάσης- i για τον ΑΔ αλγόριθμο. Οι διακεκομμένες γραμμές είναι αποτελέσματα προσομοίωσης.

3.8 Συμπεράσματα

Ένα από τα βασικά συμπεράσματα του τρίτου Κεφαλαίου είναι ότι αρκετά από τα σύγχρονα συστήματα χρονοπρογραμματισμού μπορούν να μοντελοποιηθούν με τη βοήθεια εύρωστων μοντέλων εξυπηρέτησης. Επιπλέον, σε περιπτώσεις συστημάτων χρονοπρογραμματισμού που δεν είναι αναλλοίωτα στη κατανομή των δεδομένων κίνησης, μπορούμε να βρούμε ικανοποιητικά φράγματα επίδοσης με τη βοήθεια των εύρωστων μοντέλων εξυπηρέτησης και δη το μοντέλο του Μερισμού του Εξυπηρετητή.

Συνακόλουθα, η μοντελοποίηση αυτή μας επιτρέπει να αντιληφθούμε ότι η επίδοση των συστημάτων χρονοπρογραμματισμού και αλγορίθμων προσαρμογής ζεύξης σε συνθήκες μεταβαλλόμενου πληθυσμού ενεργών χρηστών μπορεί να διαφέρει σημαντικά από ότι η επίδοση συστημάτων σε συνθήκες σταθερού πληθυσμού ενεργών χρηστών. Το γεγονός αυτό οφείλεται όπως είδαμε πρωτίστως στην κατανομή των ενεργών χρηστών -που προκύπτει με τη βοήθεια του μοντέλου Μερισμού του Εξυπηρετητή- και που είναι απλή γεωμετρική στην περίπτωση του RR, ερμηνεύοντας το φαινόμενο ο αριθμός των ενεργών χρηστών να κυμαίνεται συνήθως σε χαμηλές τιμές ακόμη και για υψηλές τιμές ρυθμού αφίξεων ροών.

Όσον αφορά την ενεργειακή επίδοση της βέλτιστης προσαρμογής ζεύξης, συμπεραίνουμε ότι για χρήστες που καταναλώνουν σταθερή ισχύ στο κύκλωμά τους κοντά στη μέγιστη μεταδιδόμενη ισχύ, δεν υπάρχουν μεγάλα περιθώρια για βελτίωση της ενεργειακής τους επίδοσης.

Στην περίπτωση του Αναλογικά Δίκαιου Αλγορίθμου, το φορτίο της κυψέλης μειώνεται διαιρεμένο με το κέρδος χρονοπρογραμματισμού, οδηγώντας σε εντυπωσιακή αύξηση της ενεργειακής επίδοσης έναντι του RR αλγορίθμου, πάνω από 100%. Το αποτέλεσμα αυτό συν τοις άλλοις τονίζει την αναγκαιότητα να αξιολογείται η ενεργειακή επίδοση στα νέα συστήματα επικοινωνιών με τη χρήση ευκαιριακού χρονοπρογραμματιστή και όχι απλώς RR. Η παρατήρηση αυτή είναι καίρια για τη δημιουργία πρωτοκόλλων στο μέλλον που θα στοχεύουν στη μείωση του φορτίου σε συγκεκριμένες κλάσεις χρηστών, ή συνολικά στη κυψέλη, αξιοποιώντας τη δυναμική εξυπηρέτησης των ενεργών χρηστών μακροπρόθεσμα στα ανώτερα επίπεδα της στοίβας των Πρωτοκόλλων. Η παρατήρηση αυτή αξιοποιείται από έναν προτεινόμενο αλγόριθμο στο Κεφάλαιο 4.

Τέλος, η αναλυτική συνάρτηση της ρυθμαπόδοσης που παρουσιάζουμε για τον Αναλογικά Δίκαιο Αλγόριθμο είναι απλή και προσφέρει σημαντική διαίσθηση για την αλληλεπίδραση των χαμηλών στρωμάτων με τα υψηλότερα στρώματα της στοίβας των πρωτοκόλλων.

Κεφάλαιο 4

Βελτίωση της Ενεργειακής Επίδοσης στην Ανερχόμενη Ζεύξη

4.1 Εισαγωγή

Είδαμε στο Κεφάλαιο 2 ότι η προσαρμογή ζεύξης μπορεί να αυξήσει σημαντικά την ενεργειακή επίδοση των κινητών τερματικών. Παρόλα αυτά οι «απομακρυσμένοι» χρήστες, οι χρήστες που αντιμετωπίζουν συνθήκες μετάδοσης μη ικανοποιητικές στην ανερχόμενη ζεύξη, έχουν περιορισμένα περιθώρια βελτίωσης όσον αφορά την αξιοποίηση της προσαρμογής ζεύξης. Στο Κεφάλαιο αυτό εξετάζουμε επιπρόσθετους τρόπους αύξησης της ενεργειακής επίδοσης τόσο των «απομακρυσμένων», όσο και των «κοντινών» χρηστών, χωρίς να θυσιάζουμε τη συνολική επίδοση του συστήματος. Σε αυτή την κατεύθυνση αξιοποιούνται οι ιδιότητες του Επιπέδου Πρόσβασης στο Μέσο καθώς και των ανώτερων επιπέδων της στοίβας των πρωτοκόλλων και συγκεκριμένα η δυναμική της αναμονής και της εξυπηρέτησης.

Συγκεκριμένα εξετάζουμε τις επιπρόσθετες ευκαιρίες μετάδοσης που εμφανίζονται εξαιτίας των διαφορετικών διαρκειών εξυπηρέτησης των ροών των «κοντινών» και των «απομακρυσμένων» χρηστών, προτείνοντας μια απλή στην υλοποίηση στρατηγική ευκαιριακού χρονοπρογραμματισμού με προτεραιότητα επιλογής κλάσης χρηστών. Η προτεινόμενη στρατηγική υπερισχύει του ΑΔ στην ενεργειακή επίδοση χωρίς να προκαλεί μείωση της ρυθμαπόδοσης των χρηστών. Πράγματι, η ρυθμαπόδοση τόσο των «απομακρυσμένων», όσο και των «κοντινών» χρηστών αυξάνεται σε πρακτικές συνθήκες διαστασιοποίησης δικτύων, όταν οι «απομακρυσμένοι» χρήστες είναι πολύ περισσότεροι από τους «κοντινούς» χρήστες.

Στην Ενότητα (§4.2) παρουσιάζεται και μοντελοποιείται ο προτεινόμενος αλγόριθμος για δυο κλάσεις χρηστών σε συνθήκες σταθερού πληθυσμού ενεργών χρηστών, αξιοποιώντας το στοχαστικό μοντέλο χρονοπρογραμματισμού που εξετάσαμε στο Κεφάλαιο 2. Στην Ενότητα (§4.3) μοντελοποιείται ο προτεινόμενος αλγόριθμος σε συνθήκες μεταβαλλόμενου πληθυσμού ροών, αξιοποιώντας το εύρωστο μοντέλο Μερισμού του Εξυπηρετητή. Στην Ενότητα (§4.4) παρουσιάζεται η αξιολόγηση της επίδοσης των χρηστών για τις δυο κλάσεις με αριθμητικά αποτελέσματα και αποτελέσματα προσομοίωσης.

4.2 Προτεινόμενος αλγόριθμος

Μπορούμε να μειώσουμε το συνολικό φορτίο και τελικά να αυξήσουμε τη πιθανότητα εκπομπής q στη (3.33), χωρίς να θυσιάσουμε τη ρυθμαπόδοση, αξιοποιώντας τη δυναμική της αναμονής των δικτύων δεδομένων: το γεγονός ότι οι χρήστες της κυψέλης δεν είναι συνεχώς ενεργοί, αφικνούνται στο σύστημα, εξυπηρετούνται και αφήνουν επιπρόσθετο χρόνο για την εξυπηρέτηση άλλων χρηστών κατά την απομάκρυνσή τους. Για την εναργέστερη παρουσίαση του προβλήματος, χωρίς βλάβη της γενικότητας, θεωρούμε ότι οι ενεργοί χρήστες της κυψέλης, n_1 «απομακρυσμένοι» και n_2 «κοντινοί» διαχωρίζονται σε δυο κλάσεις \bar{x}_1 , \bar{x}_2 με μέσους ρυθμούς ζεύξης $\bar{r}_1(1) < \bar{r}_1(2)$.

Η βασική ιδέα είναι να δώσουμε απόλυτη προτεραιότητα πρόσβασης στο κανάλι σε μια κλάση χρηστών. Τότε οι χρήστες με υψηλή προτεραιότητα εξυπηρετούνται ταχύτερα από πριν και αφήνουν επιπρόσθετες ευκαιρίες μετάδοσης στους χρήστες της άλλης κλάσης που περιμένουν για μετάδοση. Προτιμούμε να δώσουμε απόλυτη προτεραιότητα στους απομακρυσμένους χρήστες, τους χρήστες που όπως είδαμε στο Κεφάλαιο 2, έχουν μικρά περιθώρια αύξησης της ενεργειακής επίδοσης με χρήση αλγορίθμων προσαρμογής ζεύξης. Αποδεικνύουμε ότι αυτή είναι η βέλτιστη στρατηγική, στοχεύοντας στην αύξηση της ενεργειακής επίδοσης και της ρυθμαπόδοσης και για τις δυο κλάσεις χρηστών. Ονομάζουμε αυτή τη στρατηγική Απλό Ενεργειακά Αποδοτικό Ευκαιριακό Χρονοπρογραμματιστή (Simple Energy Efficient Priority Opportunistic - SEEPO). Η υλοποίηση του SEEPO βασίζεται στο υπάρχον κύκλωμα υλοποίησης του ΑΔ αλγορίθμου. Συγκεκριμένα, όλα τα κινητά τερματικά συνδέονται με τη σταθερά

$$\varphi_i = \begin{cases} (1/\bar{x}_i) \cdot \delta, & \bar{x}_i < \bar{x}_{CUT}, \\ 1/\bar{x}_i, & \bar{x}_i \geq \bar{x}_{CUT}, \end{cases} \quad (4.1)$$

όπου το \bar{x}_{CUT} είναι ένα κατώφλι μέσου SNR που ξεχωρίζει τους n_1 ενεργούς «απομακρυσμένους» χρήστες από τους n_2 «κοντινούς» χρήστες και η παράμετρος $\delta > 10000$, λαμβάνει μια μεγάλη τιμή. Το σύστημα μπορεί να κατηγοριοποιεί τους χρήστες σύμφωνα με το \bar{x}_{CUT} , απλώς παίρνοντας το μέσο όρο των δειγμάτων του στιγμιαίου SNR στην ανερχόμενη ζεύξη, όπως προτείνεται στη βασική δουλειά του Lee [L85].

Σύμφωνα με τη στρατηγική SEEPO η πολιτική επιλογής χρήστη του προκύπτοντος συστήματος ευκαιριακού χρονοπρογραμματισμού είναι της μορφής $i = \arg \max_j \varphi_j x_j$. Σύμφωνα με την ανάλυση που αναπτύξαμε στο Κεφάλαιο 2, αν θεωρήσουμε το γεγονός ότι ο χρήστης i της κλάσης-1 επιλέγεται για εξυπηρέτηση τότε $y_j \leq y_i (\varphi_i \bar{x}_i) / (\varphi_j \bar{x}_j) = y_i \delta$ και ο ρυθμός εξυπηρέτησης της κλάσης-1 με σταθερό πληθυσμό ενεργών χρηστών $\vec{n} = (n_1, n_2)$ σύμφωνα με την εξίσωση (2.4) είναι:

$$\begin{aligned} \bar{r}_1(n_1, n_2) &= \int_0^\infty h(\bar{x}_i, y) \hat{F}(y\delta)^{n_2} \hat{F}(y)^{n_1} d\hat{F}(y) = \\ &= \int_0^\infty h(\bar{x}_i, y) \hat{F}(y)^{n_1} d\hat{F}(y) \approx g_{PF} \bar{r}_1(1), \end{aligned} \quad (4.2)$$

επειδή $\hat{F}(\delta y) \approx 1$. Οι ενεργοί χρήστες της κλάσης-1 απομονώνονται από τους ενεργούς χρήστες της κλάσης-2 και εξυπηρετούνται από τον ΑΔ αλγόριθμο. Ομοίως, ο ρυθμός εξυπηρέτησης της κλάσης-2 προκύπτει ως εξής:

$$\begin{aligned} \bar{r}_2(n_1, n_2) &= \int_0^\infty h(\bar{x}_i, y) \hat{F}(y \frac{1}{\delta})^{n_1} \hat{F}(y)^{n_2} d\hat{F}(y) = \\ &= 0, \end{aligned} \quad (4.3)$$

επειδή $\hat{F}((1/\delta)y) \approx 0$. Αυτό σημαίνει ότι οι «κοντινοί» χρήστες δεν εξυπηρετούνται αν υπάρχει τουλάχιστον ένας «απομακρυσμένος» χρήστης. Στην περίπτωση που δεν υπάρχει κανένας ενεργός χρήστης στη κλάση-1, τότε

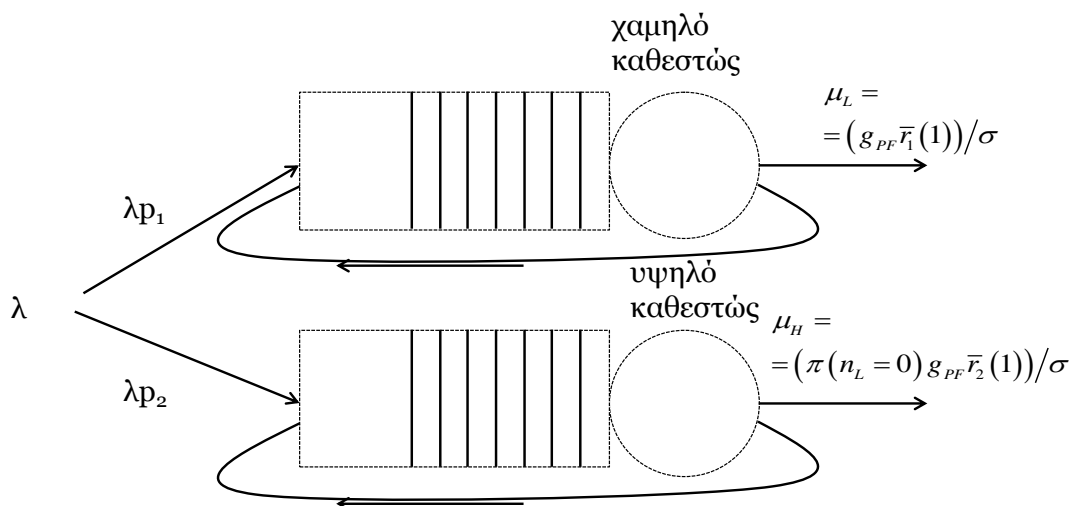
$$\begin{aligned} \bar{r}_2(0, n_2) &= \int_0^\infty h(\bar{x}_i, y) \hat{F}(y)^{n_2} d\hat{F}(y) = \\ &= g_{PF} \bar{r}_2(1). \end{aligned} \quad (4.4)$$

Σε αυτή την περίπτωση οι ενεργοί χρήστες της κλάσης-2 εξυπηρετούνται από τον ΑΔ αλγόριθμο. Σε συνθήκες σταθερού πληθυσμού ενεργών χρηστών, μεσοπρόθεσμα, ο αλγόριθμος SEEPO είναι εντελώς άδικος, αφού εξαφανίζει τους ενεργούς «κοντινούς» χρήστες από το θάλαμο εξυπηρέτησης. Αν εξεταστεί, όμως, μακροπρόθεσμα θα δούμε ότι προσφέρει και δικαιοσύνη και υψηλή επίδοση. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος είναι άλλη μια λαμπρή επιβεβαίωση του γεγονότος ότι οι αλγόριθμοι δέσμευσης πόρων πρέπει να εξετάζονται σε συνθήκες μεταβαλλόμενου πληθυσμού ενεργών χρηστών.

4.3 Μοντελοποίηση Αλγορίθμου σε συνθήκες μεταβαλλόμενου πληθυσμού ενεργών χρηστών

Κάτω από την πολιτική επιλογής του SEEPO ο κοινός θάλαμος εξυπηρέτησης του ΑΔ χωρίζεται αυτόματα σε δυο θαλάμους εξυπηρέτησης, οδηγώντας σε δυο εύρωστα συστήματα εξυπηρέτησης, ένα καθεστώς «χαμηλού ρυθμού εξυπηρέτησης» για τους «απομακρυσμένους» χρήστες, πλήρως απομονωμένο από τη συμπεριφορά των «κοντινών» χρηστών και ένα καθεστώς «υψηλού ρυθμού εξυπηρέτησης» για τους «κοντινούς χρήστες» που εξαρτάται από τη δυναμική εξυπηρέτησης στο χαμηλό καθεστώς εξυπηρέτησης (Σχήμα 4.1).

Υπενθυμίζουμε ότι έχουμε ορίσει το φορτίο της κλάσης- i στη περίπτωση ενός θαλάμου εξυπηρέτησης ως το λόγο $\rho_i = (\lambda \sigma p_i) / \bar{r}_i(1)$. Το συνολικό φορτίο της κυψέλης ισούται με $\rho = \rho_1 + \rho_2$. Στην περίπτωση του SEEPO το χαμηλό καθεστώς εξυπηρέτησης έχει φορτίο $\rho_L = \rho_1$. Η επίδοση του χαμηλού καθεστώτος βρίσκεται εύκολα, αντικαθιστώντας το συνολικό φορτίο ρ με το $\rho_L = \rho_1$ σε όλες τις αναλυτικές σχέσεις του ΑΔ αλγορίθμου. Η συνθήκη ευστάθειας του χαμηλού καθεστώτος είναι $\rho_L < g_{PF}$.



Σχήμα 4.1: Αυτόματος διαχωρισμός του κοινού θαλάμου εξυπηρέτησης του ΑΓ αλγορίθμου σε δυο του SEEPO.

Στο υψηλό καθεστώς εξυπηρέτησης ο ρυθμός εξυπηρέτησης στη (4.4) πολλαπλασιάζεται με την πιθανότητα ο θάλαμος εξυπηρέτησης του χαμηλού

καθεστώς να είναι άδειος. Η πιθανότητα αυτή είναι $\pi(n_L=0)=1-\rho_1/g_{PF}$. Επομένως, ο ρυθμός απομάκρυνσης ροών του υψηλού καθεστώτος είναι $\mu_H = \frac{\pi(n_L=0)g_{PF}\bar{r}_2(1)}{\sigma}$. Τώρα, το φορτίο του υψηλού καθεστώτος προκύπτει ως $\rho_H = \rho_2/\pi(n_L=0)$ και η συνθήκη ευστάθειας του υψηλού καθεστώτος είναι $\rho_H < g_{PF}$. Η επίδοση του χαμηλού καθεστώτος υπολογίζεται αντικαθιστώντας το συνολικό φορτίο ρ με το $\rho_H = \rho_2/\pi(n_L=0)$ σε όλες τις αναλυτικές σχέσεις του ΑΔ αλγορίθμου.

Στο χαμηλό καθεστώς ισχύει πάντα $\rho_L < \rho$. Επομένως, λόγω της μείωσης του φορτίου στο θάλαμο εξυπηρέτησης του χαμηλού καθεστώτος, τόσο η ρυθμαπόδοση, όσο και η ενεργειακή επίδοση των «απομακρυσμένων» χρηστών αυξάνονται σε σύγκριση με τον Αναλογικά Δίκαιο Αλγόριθμο, ακριβώς λόγω των **Παρατηρήσεων 4 και 5** στο Κεφάλαιο 3. Στο υψηλό καθεστώς η ρυθμαπόδοση και η ενεργειακή επίδοση των «κοντινών» χρηστών αυξάνεται σε σύγκριση με τον Αναλογικά Δίκαιο Αλγόριθμο αν και μόνο αν $\rho_H < \rho$. Η παρατήρηση αυτή οδηγεί στο παρακάτω Θεώρημα και στο **Λήμμα 1**. Η απόδειξη για το θεώρημα δίδεται στο Παράρτημα Β.2 και για το **Λήμμα 1** στο Παράρτημα Β.3.

Θεώρημα 2: Αν θέσουμε $\bar{r}_2(1) = e\bar{r}_1(1)$ με $e > 1$ τότε $\rho_H < \rho$ και ο SEEPO υπερσχύει του ΑΔ αλγορίθμου αν $e > e_0 = \frac{\rho_2}{\rho_1} \frac{E(n_L)}{g_{PF}}$.

Λήμμα 1: Σύμφωνα με το **Θεώρημα 2** αν η απόλυτη προτεραιότητα δινόταν στους κοντινούς χρήστες, τότε οι πολύ περισσότεροι απομακρυσμένοι χρήστες θα αντιμετώπιζαν μείωση της επίδοσής τους σε υψηλές τιμές φορτίου. Επομένως η βέλτιστη στρατηγική είναι να δοθεί η απόλυτη προτεραιότητα του SEEPO στους απομακρυσμένους χρήστες.

Η παρακάτω Πρόταση παρέχει τη μέγιστη τιμή της ζήτησης σε κίνηση δεδομένων ορισμένη ως το γινόμενο $\lambda\sigma$, που μπορεί να εξυπηρετήσει ο SEEPO. Η απόδειξη δίνεται στο Παράρτημα Β.3.

Πρόταση 4: Ο SEEPO έχει μικρότερη χωρητικότητα από τον Αναλογικά Δίκαιο Αλγόριθμο. Ο λόγος της χωρητικότητας του SEEPO έναντι του Αναλογικά Δίκαιου Αλγορίθμου είναι:

$$\frac{C_{SEEPO}}{C_{\Delta\Delta}} = p_2/e + p_1. \quad (4.5)$$

Η χωρητικότητα του SEEPO είναι ίση με την χωρητικότητα του χαμηλού συστήματος εξυπηρέτησης:

$$C_{SEEPO} = g_{PF} \bar{r}_1(1) \quad (4.6)$$

Σύμφωνα με την **Πρόταση 4** ο SEEPO υπερισχύει στην επίδοση όλων των χρηστών, τόσο των απομακρυσμένων, όσο και κοντινών έναντι του $\Delta\Delta$, υστερώντας στο μέγιστο όγκο ροών το δευτερόλεπτο που μπορεί να εξυπηρετήσει έναντι του $\Delta\Delta$. Με άλλα λόγια ο SEEPO αξιοποιεί τους διαφορετικούς ρυθμούς εξυπηρέτησης κοντινών και απομακρυσμένων χρηστών, προκειμένου να ενισχύσει την μακροπρόθεσμη ρυθμαπόδοση όλων των χρηστών, θυσιάζοντας τμήμα της χωρητικότητας του συνολικού θαλάμου εξυπηρέτησης του $\Delta\Delta$ αλγορίθμου.

4.4 Αξιολόγηση της Επίδοσης

Θεωρούμε μια OFDMA LTE μικρο-κυψέλη με ακτίνα $D = 400m$, με εύρος ζώνης συστήματος $W = 10MHz$. Οι σταθερές του ντετερμινιστικού μοντέλου είναι $A = 0.0017$ (διάδοση φέροντος σε 2GHz) και $a = 3.8$ (πυκνό αστικό περιβάλλον διάδοσης). Η μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύς στην ανερχόμενη ζεύξη είναι $P_{MAX} = 0.4W$ και η σταθερά καταναλισκόμενη ισχύς είναι $P_c = 0.2W$. Το μέσο μέγεθος της ροής είναι $\sigma = 2Mbits$. Οι χρήστες συνδέονται με δυο κλάσεις με αποστάσεις $\{l_k\}_{k=1}^2 = \{400, 222\}m$. Η πιθανότητα να εμφανίζεται ένας χρήστης στην κλάση-2 είναι $p_2 = l_2^2/D^2$ δίνοντας $\{p_k\}_{k=1}^2 = \{0.7, 0.3\}$. Τα αποτελέσματα που ακολουθούν είναι

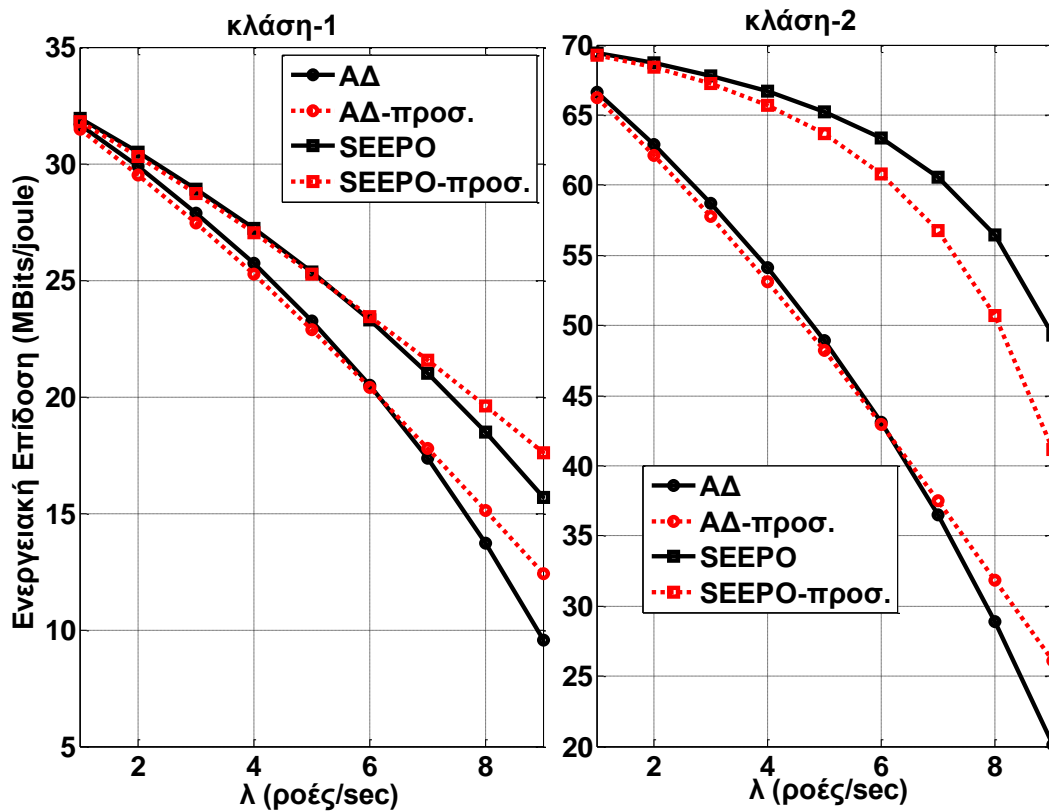
συντηρητικές εκτιμήσεις των αποτελεσμάτων στην περίπτωση που οι χρήστες βρίσκονται στην κυψέλη με ομοιόμορφη κατανομή. Όπως και προηγούμενα θεωρούμε ότι το στιγμιαίο SNR ακολουθεί κατανομή Erlang- $m=2$, με παράμετρο $f_1 = 0.27$, and $g_{PF} = 1.37$. Επιλέγουμε ρυθμούς εξυπηρέτησης (και αντίστοιχες τιμές για την ισχύ μετάδοσης) $\bar{r}_1^*(1) = 13.3 \text{ Mbps}$ ($P(l_1) = 0.37 \text{ Watt}$) and $\bar{r}_2^*(1) = 28 \text{ Mbps}$ ($P(l_2) = 0.15 \text{ W}$), τιμές που προκύπτουν από το Καταστασιακά Ανεξάρτητο αλγόριθμο προσαρμογής ζεύξης στην (2.16) για $n=1$. Παράλληλα πραγματοποιήσαμε εκτεταμένες προσομοιώσεις. Ο μέγιστος επιτρεπόμενος αριθμός ροών στο σύστημα είναι 20. Επιπλέον, οι παράμετροι του SEEPO είναι $e = \bar{r}_2^*(1)/\bar{r}_1^*(1) = 2.1$ και η χωρητικότητα του SEEPO αντιστοιχεί σύμφωνα με την (4.6) σε $\lambda_0 = 9$ ροές το δευτερόλεπτο.

Σύμφωνα με την (4.5) η χωρητικότητα του SEEPO είναι 0.84 της χωρητικότητας του Αναλογικά Δίκαιου αλγορίθμου. Η χωρητικότητα του συστήματος στην περίπτωση του RR αλγορίθμου είναι σύμφωνα με την εξίσωση (3.20)

$$\left(\frac{P_1}{\bar{r}_1(1)} + \frac{P_2}{\bar{r}_2(1)} \right)^{-1} = 15.78 \text{ Mbps} .$$

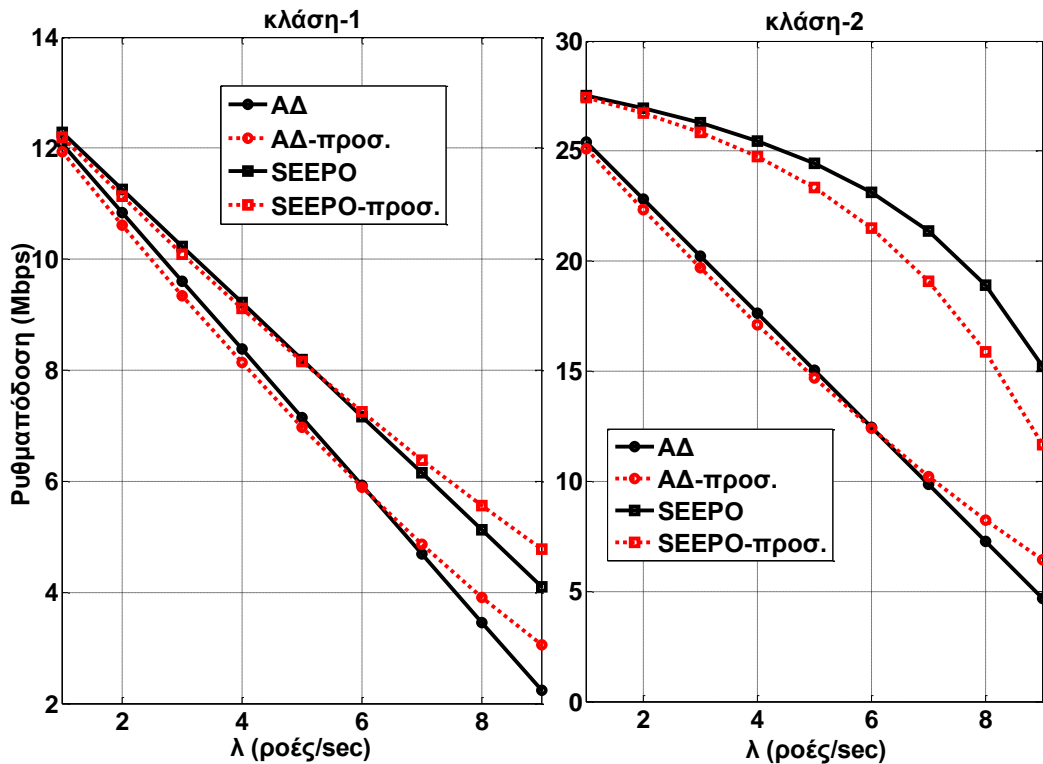
Η χωρητικότητα του SEEPO είναι 1.15 φορές τη

χωρητικότητα του RR. Παρά τη μείωση της χωρητικότητας του SEEPO έναντι του PF, η τιμή της παραμένει αρκετά μεγάλη για ικανοποιητική λειτουργία του συστήματος στην ανερχόμενη ζεύξη.



Σχήμα 4.2: Ενεργειακή Επίδοση χρήστη κλάσης- i για AD και SEEPO. Οι κόκκινες διακεκομμένες γραμμές είναι αποτελέσματα προσομοίωσης.

Στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζονται αναλυτικά αποτελέσματα και αποτελέσματα προσομοίωσης για την ενεργειακή επίδοση χρήστη της κλάσης- i για τον AD και τον SEEPO. Σε χαμηλές τιμές ρυθμού αφίξεων ροών λ ο SEEPO υπερισχύει σημαντικά έναντι του AD όσον αφορά την επίδοση των κοντινών χρηστών και παρουσιάζει ένα μη αμελητέο κέρδος έναντι του AD όσον αφορά τους απομακρυσμένους χρήστες. Σε υψηλές τιμές ρυθμού αφίξεων ροών λ , συγκεκριμένα για $\lambda=9$ το κέρδος του SEEPO έναντι του AD είναι 40% για την κλάση-1 και 57% για τη κλάση-2.



Σχήμα 4.3: Ρυθμαπόδοση χρήστη κλάσης- i για ΑΔ και SEEPO. Οι κόκκινες διακεκομμένες γραμμές είναι αποτελέσματα προσομοίωσης.

Στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζονται αναλυτικά αποτελέσματα και αποτελέσματα προσομοίωσης για τη ρυθμαπόδοση χρήστη της κλάσης- i για τον ΑΔ και τον SEEPO. Η ρυθμαπόδοση αυξάνεται και στους κοντινούς και στους απομακρυσμένους χρήστες. Συγκεκριμένα, για τιμή ρυθμού αφίξεων ροών $\lambda=9$ για τους απομακρυσμένους η αύξηση είναι 57% και για τους κοντινούς 82% για τιμή ρυθμού αφίξεων ροών $\lambda=9$. Επομένως, ο SEEPO υπερिशύει έναντι του ΑΔ αλγορίθμου και στη ρυθμαπόδοση..

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι πολύ κοντά στα αναλυτικά αποτελέσματα πλην των πολύ υψηλών τιμών ρυθμών αφίξεων που πλησιάζουν στη χωρητικότητα του SEEPO, όπου η διαφορά είναι αναμενόμενη επειδή οι αναλυτικές σχέσεις για την επίδοση βασίζονται σε μοντέλα με μη πεπερασμένο μέγιστο επιτρεπόμενο αριθμό ροών στο σύστημα. Τα αριθμητικά αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την αξία και τη χρησιμότητα των απλών προσεγγιστικών σχέσεων για τη ρυθμαπόδοση και την ενεργειακή επίδοση του προτεινόμενου αναλυτικού μοντέλου.

4.5 Συμπεράσματα

Στο Κεφάλαιο αυτό διερευνήσαμε πρόσθετες ευκαιρίες μετάδοσης που προκύπτουν από συστήματα χρονοπρογραμματισμού με απόλυτη προτεραιότητα εξυπηρέτησης μιας κλάσης χρηστών. Ο αυτόματος διαχωρισμός του κοινού θαλάμου εξυπηρέτησης σε δυο ξεχωριστούς θαλάμους εξυπηρέτησης, έναν για τους «απομακρυσμένους» και έναν για τους «κοντινούς» χρήστες μειώνει το φορτίο ανά κλάση και ενισχύει τη ρυθμαπόδοση και την ενεργειακή επίδοση όλων των χρηστών του συστήματος σε πρακτικές συνθήκες λειτουργίας του δικτύου, όπου το πλήθος των απομακρυσμένων ενεργών χρηστών είναι πολύ μεγαλύτερο από το πλήθος των κοντινών ενεργών χρηστών.

Η βελτίωση αυτή των μετρικών επίδοσης πραγματοποιείται ταυτόχρονα με την μείωση της συνολικής χωρητικότητας του συστήματος. Παρόλα αυτά η αντισταθμιστική σχέση είναι επωφελής για το σύστημα, αφού ο προτεινόμενος αλγόριθμος επιφέρει ικανοποιητική τιμή χωρητικότητας καθώς και μη σημαντική μείωση έναντι της χωρητικότητας του κοινού θαλάμου του Αναλογικά Δίκαιου Αλγορίθμου με πολύ σημαντική αύξηση της ρυθμαπόδοσης καθώς και της ενεργειακής επίδοσης των χρηστών.

Το γεγονός της μείωσης του φορτίου μέσω του αυτόματου διαχωρισμού του κοινού θαλάμου εξυπηρέτησης σε δυο ξεχωριστούς θαλάμους εξυπηρέτησης, έναν για τους «απομακρυσμένους» και έναν για τους «κοντινούς» χρήστες επιβεβαιώνει ότι εμφανίζεται ένας πρόσθετο κέρδος διαφορισμού των χρηστών στα ανώτερα επίπεδα της στοίβας των πρωτοκόλλων λόγω ακριβώς της διαφορετικής δυναμικής εξυπηρέτησης των χρηστών στα ανώτερα επίπεδα της στοίβας των πρωτοκόλλων, λόγω των διαφορετικών ρυθμών απομάκρυνσης των ροών στους δυο ξεχωριστούς θαλάμους εξυπηρέτησης. Το κέρδος αυτός προκύπτει και στη περίπτωση που οι ενεργοί χρήστες εμφανίζονται στο κυψελωτό σύστημα με διαφορετικά μεγέθη ροών.

Το νέο αυτό κέρδος διαφορισμού χρηστών στα ανώτερα επίπεδα της στοίβας των πρωτοκόλλων μπορεί να έχει πληθώρα νέων εφαρμογών στις τεχνικές διαστασιοποίησης των σύγχρονων δικτύων και σχεδιασμού νέων πρωτοκόλλων χρονοπρογραμματισμού.

Κεφάλαιο 5

Βέλτιστη Διαμέριση Κυψέλης σε συστήματα Κλασματικής Επαναχρησιμοποίησης Συχνότητας

5.1 Εισαγωγή

Στο Κεφάλαιο αυτό εξετάζουμε μια σύγχρονη τεχνική καταστολής των παρεμβολών που συνδέεται με τη χρήση της τεχνικής πολυπλεξίας και διαμόρφωσης του OFDMA στα σύγχρονα κυψελωτά συστήματα: την κλασματική επαναχρησιμοποίηση συχνότητας. Αυτή η τεχνική επιτρέπει την εξασφάλιση μιας επωφελούς αντισταθμιστικής σχέσης ανάμεσα στην αύξηση της ρυθμαπόδοσης των «απομακρυσμένων» χρηστών που πλήττονται καίρια από τις παρεμβολές και στη μη σημαντική μείωση της συνολικής χωρητικότητας του συστήματος.

Συγκεκριμένα εξετάζονται δυο προβλήματα βέλτιστης διαμέρισης του εύρους ζώνης σε «απομακρυσμένους» και «κοντινούς» χρήστες, που μεγιστοποιούν τη χωρητικότητα του συστήματος και ελαχιστοποιούν τη συνολική κατανάλωση σε ισχύ στο Σταθμό Βάσης. Αλγοριθμικά η εξυπηρέτηση χρηστών της κυψέλης σε σύστημα κλασματικής επαναχρησιμοποίησης συχνότητας πραγματοποιείται με τη χρήση δυο ξεχωριστών θαλάμων εξυπηρέτησης. Επιπλέον, αποδεικνύεται ότι το πρόβλημα της βέλτιστης διαμέρισης του εύρους ζώνης, μεγιστοποιώντας τη συνολική χωρητικότητα του συστήματος, είναι πρόβλημα μεγίστου-ελαχίστου.

Στη συνέχεια διατυπώνεται το πρωτότυπο πρόβλημα της συνολικής κατανάλωσης ισχύος στους δυο ανεξάρτητους θαλάμους εξυπηρέτησης, υπολογίζοντας κατάλληλα την αντικειμενική συνάρτηση. Λαμβάνεται υπόψη ένα σύγχρονο μοντέλο κατανάλωσης ισχύος στο Σταθμό Βάσης που ελαχιστοποιεί την κατανάλωση ισχύος όταν δεν υπάρχει ενεργός χρήστης στο σύστημα. Ακολουθεί η μελέτη της βέλτιστης διαμέρισης του εύρους ζώνης ανάμεσα σε «απομακρυσμένους» και «κοντινούς» χρήστες για την ελαχιστοποίηση της συγκεκριμένης αντικειμενικής συνάρτησης.

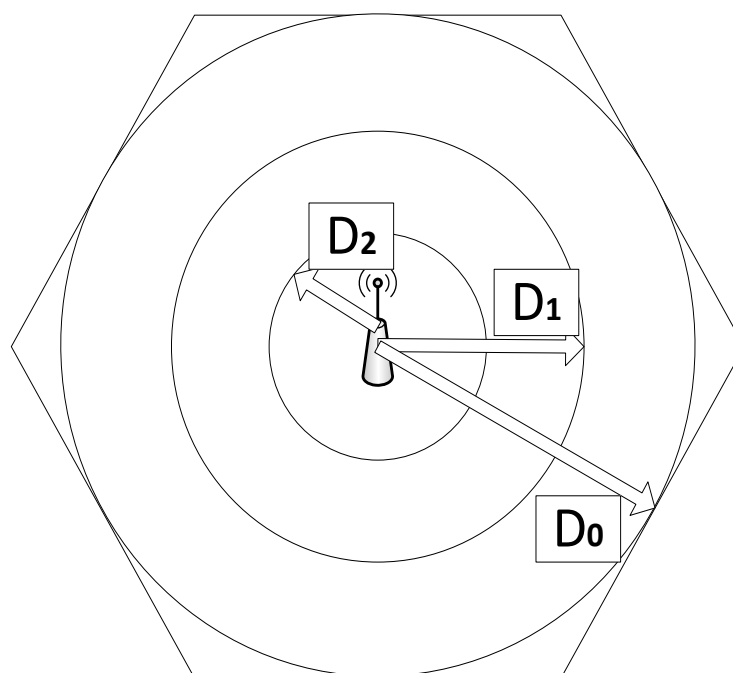
Η ανάλυση της επίδοσης της βέλτιστης κλασματικής επαναχρησιμοποίησης συχνότητας επεκτείνεται σε σύστημα χρονοπρογραμματισμού Αναλογικά Δίκαιου Αλγορίθμου. Σε αυτή την κατεύθυνση, παρουσιάζουμε μια πρωτότυπη σχέση για τη

κατανομή του συνόλου των ενεργών χρηστών σε συνθήκες Ευκαιριακού Χρονοπρογραμματισμού, αξιοποιώντας τη προσέγγιση του κέρδους χρονοπρογραμματισμού στην Ενότητα (§2.4.1). Η κατανομή βοηθά στην επίλυση του προβλήματος της συνολικής κατανάλωσης ισχύος στο Σταθμό Βάσης, όταν σε κάθε θάλαμο εξυπηρέτησης που αντιστοιχεί είτε στους «απομακρυσμένους», είτε στους «κοντινούς» χρήστες εφαρμόζεται σύστημα χρονοπρογραμματισμού Αναλογικά Δίκαιου Αλγορίθμου.

Στην Ενότητα (§5.2) παρουσιάζεται η βασική μοντελοποίηση των παραμέτρων του συστήματος κλασματικής επαναχρησιμοποίησης συχνότητας σε ένα δίκτυο από μακρο-κυψέλες OFDMA. Οι χρήστες «απομακρυσμένοι» και «κοντινοί» χωρίζονται σε δυο δακτυλίους και δυο θαλάμους εξυπηρέτησης. Η διαμέριση του χώρου της κυψέλης και του εύρους ζώνης συνδέεται με την κατανομή των χρηστών στο χώρο. Στην Ενότητα (§5.3) παρουσιάζεται η αντικειμενική συνάρτηση της συνολικής χωρητικότητας του συστήματος και το πρόβλημα της βελτιστοποίησης της διαμέρισης των δυο δακτυλίων που μεγιστοποιούν την αντικειμενική συνάρτηση της χωρητικότητας. Στην Ενότητα (§5.4) παρουσιάζεται το πρόβλημα της συνολικής κατανάλωσης ισχύος στο Σταθμό Βάσης της κυψέλης. Παρουσιάζεται η κατανομή του συνόλου των ενεργών χρηστών για σύστημα ευκαιριακού χρονοπρογραμματισμού Αναλογικά Δίκαιου αλγορίθμου με πολλαπλές κλάσεις. Στην Ενότητα (§5.5) αξιολογείται η επίδοση των προτεινόμενων πολιτικών βέλτιστης κλασματικής επαναχρησιμοποίησης συχνότητας με αριθμητικά αποτελέσματα και εκτεταμένες προσομοιώσεις.

5.2 Γενικές Υποθέσεις Συστήματος

Εξετάζουμε την κατερχόμενη ζεύξη μιας κυψέλης αναφοράς ενός δικτύου κυψελών OFDMA. Εντός της κυψέλης αναφοράς οι χρήστες κατανέμονται ομοιόμορφα. Οι χρήστες της κυψέλης γίνονται ενεργοί, όταν ετοιμάζονται να δεχτούν μια ελαστική ροή. Οι αφίξεις των ροών εμφανίζονται με κατανομή Poisson με ρυθμό αφίξεων λ ροές το δευτερόλεπτο. Το μέσο μέγεθος κάθε ροής είναι σ . Όλη η επιφάνεια της κυψέλης χωρίζεται σε δυο δακτυλίους. Ο πρώτος δακτύλιος σχετίζεται με τους «απομακρυσμένους» χρήστες που επηρεάζονται κατά κύριο λόγο από τις παρεμβολές των ομοκαναλικών κυψελών. Η μέγιστη απόσταση του πρώτου δακτυλίου είναι ίση με την ακτίνα της κυψέλης D_0 και η μικρότερή του απόσταση, η αποκαλούμενη στη βιβλιογραφία και εσωτερική απόσταση (interior distance) της Κλασματικής Επαναχρησιμοποίησης Συχνότητας [NGG⁺11], είναι ίση με D_1 (Σχήμα 5.1). Ο δεύτερος δακτύλιος σχετίζεται με τους «κοντινούς» χρήστες της κυψέλης που επηρεάζονται συνήθως πολύ λιγότερο από ότι οι «απομακρυσμένοι» χρήστες από τις παρεμβολές των ομοοκαναλικών κυψελών. Η μέγιστη απόσταση του δεύτερου δακτυλίου είναι D_1 και η ελάχιστη απόστασή του, είναι η ελάχιστη απόσταση που ο κάθε χρήστης μπορεί να έχει από το Σταθμό Βάσης, ίση με D_2 .



Σχήμα 5.1: Η διαμέριση της κυψέλης αναφοράς με την εφαρμογή της κλασματικής επαναχρησιμοποίησης συχνότητας.

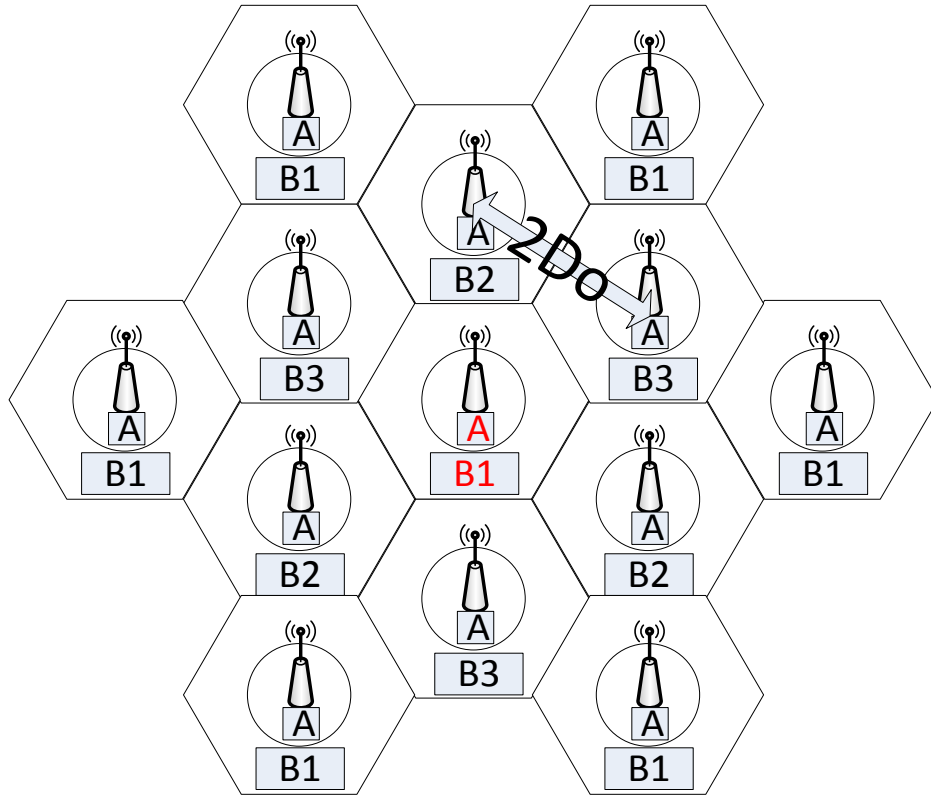
Το συνολικό εύρος ζώνης του συστήματος μέσα στη κυψέλη αναφοράς μοιράζεται σε cWu και $(1-c)W$ για την εξυπηρέτηση των «απομακρυσμένων» και των «κοντινών» χρηστών αντίστοιχα, όπου $0 < c < 1$ η παράμετρος διαμέρισης του εύρους ζώνης και αντιστοίχισης στους δυο δακτυλίους, W είναι το εύρος ζώνης του συστήματος και $u < 1$ είναι ο συντελεστής επαναχρησιμοποίησης συχνότητας. Από τη στιγμή που θεωρούμε ότι οι χρήστες κατανέμονται ομοιόμορφα στην επιφάνεια της κυψέλης, η παράμετρος διαμέρισης του εμβαδού της κυψέλης θα πρέπει να είναι ανάλογη του εμβαδού ενός από τους δακτυλίους, επιλέγουμε του πρώτου. Θεωρούμε, λοιπόν, ότι η παράμετρος διαμέρισης c συνδέεται με την επιφάνεια της κυψέλης ως εξής:

$$c = \frac{D_0^2 - D_1^2}{D_0^2 - D_2^2}, \quad D_1 = q(c) \quad (5.1)$$

$$q(0) = D_0, \quad q(1) = D_2,$$

όπου $q(c)$ είναι μια φθίνουσα συνάρτηση της παραμέτρου διαμέρισης c .

Στην Κλασματική Επαναχρησιμοποίηση Συχνότητας, οι «κοντινοί» χρήστες επηρεάζονται από το πρώτο επίπεδο των V_A παρεμβολών (6 γειτονικές κυψέλες) και το δεύτερο επίπεδο των V_B παρεμβολών (6 «απομακρυσμένες» κυψέλες) (Σχήμα 5.2). Οι «απομακρυσμένοι» χρήστες επηρεάζονται μόνο από τις V_B παρεμβολές. Στο Σχήμα 5.2 το άθροισμα $B1+B2+B3=cW$ και $A=(1-c)W$.



Σχήμα 5.2: Το δίκτυο κυψελών OFDMA με την εφαρμογή της κλασματικής επαναχρησιμοποίησης συχνότητας. Η κυψέλη αναφοράς είναι στο κέντρο με τα κόκκινα γράμματα.

Ένας χρήστης που βρίσκεται σε απόσταση L από το Σταθμό Βάσης της κυψέλης αναφοράς, βρίσκεται σε απόσταση $l_j(L)$ από το j Σταθμό Βάσης των V_A, V_B ομοκαναλικών κυψελών. Με την εφαρμογή της κλασματικής επαναχρησιμοποίησης συχνότητας η μέση τιμή του SINR χρήστη βρισκόμενου σε απόσταση L από το Σταθμό Βάσης καταλήγει σε

$$\bar{x}(L; c) = \begin{cases} \frac{P_2 A L^{-\alpha}}{(1-c)N_0 W + \sum_{j=1}^{V_A+V_B} P_2 A l_j^{-\alpha}(L)}, & L < D_1 \\ \frac{P_1 A L^{-\alpha}}{c u N_0 W + \sum_{j=1}^{V_B} P_1 A l_j^{-\alpha}(L)}, & L \geq D_1, \end{cases} \quad (5.2)$$

όπου οι παράμετροι A, a είναι κατάλληλες σταθερές του ντετερμινιστικού μοντέλου απωλειών, και P_1, P_2 είναι τιμές μεταδιδόμενης ισχύος σχετιζόμενες με το δακτύλιο-1 και το δακτύλιο-2 αντίστοιχα.

Ο άξονας του χρόνου χωρίζεται σε χρονοθυρίδες μετάδοσης (Transmission Time Intervals ή TTI) με σταθερή διάρκεια. Κάθε TTI αντιστοιχεί σε ένα πλαίσιο OFDMA. Κάθε πλαίσιο του OFDMA χωρίζεται σε δυο φασματικές περιοχές, για τους «απομακρυσμένους» και τους «κοντινούς» χρήστες αντίστοιχα. Κάθε φασματική περιοχή αποτελείται από ανεξάρτητα Resource Blocks (RBs) που υφίστανται την ίδια κατανομή ταχέων διαλείψεων. Σε κάθε RB ένας χρονοπρογραμματιστής εκτελείται ανεξάρτητα και επιλέγει ένα χρήστη για εξυπηρέτηση.

Εξαιτίας της ανεξαρτησίας των RB και της ανεξάρτητης εκτέλεσης του χρονοπρογραμματιστή σε κάθε RB, μπορούμε να εξετάσουμε τη τιμή του στιγμιαίου SNR x σε ένα RB. Αυτό παραμένει σταθερό για τη διάρκεια ενός TTI, σε μια τυχαία τιμή που ακολουθεί τα χαρακτηριστικά των ταχέων διαλείψεων.

Επιπλέον, ο στιγμιαίος ρυθμός μετάδοσης ενός χρήστη που βρίσκεται μόνος του στο δακτύλιό του, ισούται με το ρυθμό μετάδοσης που αντιστοιχεί σε ένα RB πολλαπλασιασμένο από τον αριθμό των RB σε κάθε φασματική περιοχή του TTI του αντίστοιχου δακτυλίου. Έτσι υιοθετούμε τον παρακάτω τύπο του Shannon ως συνάρτηση στιγμιαίου ρυθμού ζεύξης Προσαρμοσμένης Κωδικοποίησης και Διαμόρφωσης (Adaptive Modulation and Coding):

$$h(x;c) = R(L;c) \log_2(1+x),$$

$$R(L;c) = \begin{cases} (1-c)W, & L \leq D_1 \\ cWu, & L > D_1. \end{cases} \quad (5.3)$$

Υποθέτουμε ότι οι δυο δακτύλιοι έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά ταχέων διαλείψεων. Συγκεκριμένα, ορίζουμε ως “κανονικοποιημένο SINR” τη μεταβλητή $y = x/\bar{x}$ και θεωρούμε ότι οι τιμές y είναι ανεξάρτητες και όμοια κατανεμημένες για όλη τη κυψέλη με CDF $\hat{F}(y)$. Με δεδομένο το $\hat{F}(\cdot)$, το CDF του SINR μπορεί να γραφεί ως $F(x) = \hat{F}(x/\bar{x})$. Υποθέτουμε ότι αν το εύρος ζώνης κάθε RB (B_s) είναι μικρότερο ή ίσο από το εύρος ζώνης συνοχής (B_c) τότε το y ακολουθεί εκθετική κατανομή και $\hat{F}(y) = 1 - e^{-y}$. Αλλιώς το y ακολουθεί κανονικοποιημένη m-Erlang κατανομή με $m = \lceil B_s/B_c \rceil$ και $\hat{F}(y) = (\Gamma(m))^{-1} \int_0^{my} t^{m-1} e^{-t} dt$, όπου $\Gamma(m)$ είναι η συνάρτηση Γάμμα.

Ορίζουμε ως μέσο ρυθμό μετάδοσης ζεύξης του χρήστη που βρίσκεται σε απόσταση L από το Σταθμό Βάσης, το μέσο ρυθμό μετάδοσης που θα έχει αν είναι μόνος του στη κυψέλη. Τότε ο μέσος ρυθμός μετάδοσης ζεύξης του χρήστη ισούται με:

$$\bar{r}(L;c) = \int_0^\infty h(\bar{x}(L;c)y)d\hat{F}(y). \quad (5.4)$$

Θεωρούμε ένα μοντέλο δυναμικής κατανάλωσης στο Σταθμό Βάσης επηρεασμένο από τις δημοσιεύσεις [HAH11], [WWZ⁺12], [WZN13] και το επεκτείνουμε στη περίπτωση των δυο θαλάμων εξυπηρέτησης της Κλασματικής Επαναχρησιμοποίησης Συχνότητας. Ο Σταθμός Βάσης εκπέμπει τιμές μεταδιδόμενης ισχύος P_1 ή P_2 σε κάθε δακτύλιο και καταναλώνει σταθερή ισχύ P_C στο κύκλωμα σε κατάσταση μετάδοσης, όταν υπάρχει ένας τουλάχιστον ενεργός χρήστης σε έναν από τους δυο δακτυλίους. Σε κατάσταση αδράνειας, όταν δεν υπάρχει κανένας ενεργός χρήστης σε κανέναν από τους δυο δακτυλίους ο Σταθμός Βάσης καταναλώνει ισχύ P_S στο κύκλωμά του, πολύ μικρότερη από P_C .

Υποθέτουμε ότι ο Σταθμός Βάσης είναι σε κατάσταση μετάδοσης στο δακτύλιο-1 και στο δακτύλιο-2 με πιθανότητες p_{ON1} και p_{ON2} αντίστοιχα. Εξαιτίας της ανεξαρτησίας των δυο θαλάμων εξυπηρέτησης, ο Σταθμός Βάσης είναι σε κατάσταση μετάδοσης με πιθανότητα $p_{ON} = p_{ON1} + p_{ON2} - p_{ON1}p_{ON2}$ και σε κατάσταση αδράνειας με πιθανότητα $p_{OFF} = 1 - p_{ON}$. Συνεπώς η συνολική κατανάλωση ενέργειας στο Σταθμό Βάσης μειώνεται σημαντικά ειδικά αν η πιθανότητα p_{OFF} λαμβάνει υψηλές τιμές. Τελικά, η μέση κατανάλωση ισχύος στο Σταθμό Βάσης P_{TOT} δίνεται από τη κάτωθι σχέση:

$$P_{TOT} = p_{ON1}(1 - p_{ON2})(P_1 + P_C) + p_{ON2}(1 - p_{ON1})(P_2 + P_C) + p_{ON1}p_{ON2}(P_1 + P_2 + P_C) + p_{OFF}P_S. \quad (5.5)$$

5.3 Βέλτιστη διαμέριση για την μεγιστοποίηση της χωρητικότητας

Στην Κλασματική Επαναχρησιμοποίησης Συχνότητας οι πόροι του συστήματος μοιράζονται σε δυο ξεχωριστούς και ανεξάρτητους θαλάμους εξυπηρέτησης, με κάθε θάλαμο να σχετίζεται με ένα δακτύλιο. Σε κάθε φασματική περιοχή σχετιζόμενη με ένα συγκεκριμένο δακτύλιο ένας Αναλογικά Δίκαιος αλγόριθμος που σχετίζεται με το συγκεκριμένο δακτύλιο επιλέγει μια ελαστική ροή για μετάδοση, σύμφωνα με την πολιτική $i = \arg \max_j x_j / \bar{x}_j$, όπου ο δείκτης j σαρώνει όλους τους ενεργούς χρήστες του συγκεκριμένου δακτυλίου. Για σταθερό αριθμό ενεργών ροών N_i στο δακτύλιο- i , ο ρυθμός εξυπηρέτησης της κλάσης χρηστών που βρίσκονται σε απόσταση L από το Σταθμό Βάσης δίνεται από τη κάτωθι σχέση:

$$\bar{r}(L; N_i) = \int_0^{\infty} h(\bar{x}(L; c)y) \hat{F}(y)^{N_i} d\hat{F}(y). \quad (5.6)$$

Η σχέση (5.6) απλοποιείται χρησιμοποιώντας την προσέγγιση του κέρδους χρονοπρογραμματισμού στην εξίσωση (2.8). Συγκεκριμένα,

$$\bar{r}(L; N_i) \approx \bar{r}(L; c) g_{PF}, \quad (5.7)$$

όπου $g_{PF} = 1/(1 - f_1) > 1$

Το σύστημα εξυπηρέτησης σε κάθε δακτύλιο μπορεί να μοντελοποιηθεί σαν ένα σύστημα Μερισμού του Εξυπηρετητή Πολλαπλών Κλάσεων. Το φορτίο του δακτυλίου- i ορίζεται ως εξής:

$$\rho_i = \lambda \sigma \int_{D_i}^{D_{i-1}} \frac{\eta(L)}{g_{PF} \bar{r}(L; c)} dL, \quad (5.8)$$

όπου η συνάρτηση $\eta(L) = \frac{2L}{D_0^2 - D_2^2}$ και αφορά την ομοιόμορφη κατανομή των χρηστών στη κυψέλη. Λόγω της ανεξαρτησίας των δυο θαλάμων εξυπηρέτησης, η χωρητικότητα του δακτυλίου- i ορίζεται ως το ελάχιστο άνω φράγμα της ζήτησης σε κίνηση $\lambda \sigma$ που μεγιστοποιεί το φορτίο του δακτυλίου- i , δηλαδή, $\rho_1 \rightarrow 1$ and $\rho_2 \rightarrow 1$. Τότε με τη βοήθεια της (5.8) και της (3.22), οι χωρητικότητες των δακτυλίων είναι ίσες με,

$$C_1(c) = \left(\int_{q(c)}^{D_0} \frac{\eta(L)}{g_{PF} \bar{r}(L;c)} dL \right)^{-1},$$

$$C_2(c) = \left(\int_{D_2}^{q(c)} \frac{\eta(L)}{g_{PF} \bar{r}(L;c)} dL \right)^{-1}. \quad (5.9)$$

Η συνολική χωρητικότητα της κυψέλης με Κλασματική Επαναχρησιμοποίηση Συχνότητα είναι ίση με τη μέγιστη ζήτηση σε κίνηση που μπορεί να εξυπηρετήσει συνολικά η κυψέλη. Με τη βοήθεια των (5.8)-(5.9) η χωρητικότητα της κυψέλης είναι: $C_T(c) = \min(C_1(c), C_2(c))$. Οι τιμές $C_1(1)$ and $C_2(0)$ αντιστοιχούν σε χωρητικότητες κυψέλης με σχήμα επαναχρησιμοποίησης συχνότητας-3 και επαναχρησιμοποίησης συχνότητας-1, χρησιμοποιώντας αποκλειστικά μεταδιδόμενη ισχύ P_1 και P_2 αντίστοιχα. Στην Ενότητα (§5.5) υπολογίζουμε αριθμητικά τις χωρητικότητες των στατικών σχημάτων επαναχρησιμοποίησης συχνότητας θεωρώντας ότι η ισχύς μεταβάλλεται, όπως μεταβάλλεται στη Κλασματική Επαναχρησιμοποίηση Συχνότητας. Το παρακάτω πρόβλημα βελτιστοποίησης μεγίστου-ελαχίστου παρέχει τη βέλτιστη παράμετρο διαμέρισης της Κλασματικής Επαναχρησιμοποίησης Συχνότητας:

$$c^* = \arg \max_c \left(\min(C_1(c), C_2(c)) \right). \quad (5.10)$$

Απόδειξη: Για σχετικά μικρή τιμή της παραμέτρου διαμέρισης c , η χωρητικότητα $C_1(c)$ είναι αύξουσα συνάρτηση της παραμέτρου διαμέρισης c και η $C_2(c)$ είναι φθίνουσα συνάρτηση της παραμέτρου διαμέρισης c . Επιπρόσθετα, $C_2(1) = 0$ και $C_1(0) = 0$. Επομένως θα υπάρχει ένα σημείο τομής των δυο συναρτήσεων που θα αντιστοιχεί στη τιμή διαμέρισης c^* όπου $C_1(c^*) = C_2(c^*)$. Επιπλέον για τη βέλτιστη τιμή της παραμέτρου διαμέρισης c^* , με τη βοήθεια της (5.8) ισχύει ότι οι τιμές του φορτίου σε κάθε δακτύλιο είναι ίσες $\rho_1^* = \lambda \sigma / C_1(c^*) = \lambda \sigma / C_2(c^*) = \rho_2^*$.

Η ρυθμαπόδοση χρήστη που βρίσκεται σε απόσταση L από το Σταθμό Βάσης είναι σύμφωνα με την εξίσωση (3.33) ίση με:

$$\gamma(L) = \bar{r}(L;c)(1 - \rho_i). \quad (5.11)$$

5.4 Βέλτιστη διαμέριση για την ελαχιστοποίηση της συνολικής κατανάλωσης ισχύος στο Σταθμό Βάσης

Η ακόλουθη Πρόταση παρουσιάζει αναλυτική σχέση για τη κατανομή των ενεργών χρηστών σε θάλαμο εξυπηρέτησης Αναλογικά Δίκαιου Αλγορίθμου, αξιοποιώντας τη προσέγγιση του κέρδους χρονοπρογραμματισμού στη (2.8). Η απόδειξη δίδεται στο Παράρτημα Γ.1.

Πρόταση 5: Η κατανομή των N_i ενεργών χρηστών στο δακτύλιο- i είναι ίση με:

$$\pi(N_i = n) = \frac{1 - \rho_i}{1 + \rho_i g_{PF} - \rho_i} g_{PF}(\rho_i)^n. \quad (5.12)$$

Η σχέση (5.12) είναι πρωτότυπη, εκπεφρασμένη με απλούς όρους συναρτήσεως του φορτίου ρ_i και του κέρδους χρονοπρογραμματισμού g_{PF} και παρέχει σημαντική διαίσθηση για την αλληλεπίδραση των χαμηλότερων επιπέδων της στοίβας των πρωτοκόλλων με τα ανώτερα επίπεδα. Σε αντίθεση με την αναλυτική σχέση της κατανομής των ενεργών χρηστών για μια κλάση που δίδεται στη θεμελιώδη δημοσίευση [SB05, Πρόταση 3.1], η κατανομή των ενεργών χρηστών στη (5.12) προσεγγίζει τη δραστηριότητα όλων των ενεργών χρηστών που εξυπηρετούνται με σύστημα χρονοπρογραμματισμού Αναλογικά Δίκαιου αλγορίθμου και βρίσκονται με τυχαία κατανομή σε όλο το δακτύλιο της κυψέλης και όχι μόνο σε σταθερή απόσταση L από το Σταθμό Βάσης.

Σύμφωνα με την (5.12), η πιθανότητα $\pi(N_i = n)$ μειώνεται πολύ γρήγορα συναρτήσεως του πλήθους των ενεργών χρηστών $N_i = n$ στο δακτύλιο- i για σταθερή τιμή φορτίου δακτυλίου ρ_i . Επομένως, ο αριθμός των ενεργών χρηστών και των δυο δακτυλίων κυμαίνεται σε πολύ χαμηλές τιμές. Αυτό σημαίνει ότι όπως και στην περίπτωση της γεωμετρικής κατανομής των ενεργών χρηστών του Round Robin, η πιθανότητα p_{OFF} θα παίρνει σημαντικές τιμές και το μοντέλο δυναμικής κατανάλωσης θα εξοικονομεί ενέργεια στο Σταθμό Βάσης σε σύστημα Κλασματικής Επαναχρησιμοποίησης Συχνότητας.

Στο ακόλουθο Λήμμα, δίδεται η αναλυτική σχέση της πιθανότητας ο Σταθμός Βάσης να είναι σε φάση μετάδοσης σε έναν από τους δυο δακτυλίους. Η απόδειξη δίδεται στο Παράρτημα Γ.2.

Λήμμα 2: Η πιθανότητα ο Σταθμός Βάσης να είναι σε φάση μετάδοσης στο δακτύλιο- i p_{ON_i} είναι ίση με

$$p_{ON_i} = \pi(N_i > 0) = \frac{\rho_i g_{PF}}{1 + \rho_i g_{PF} - \rho_i}. \quad (5.13)$$

Σύμφωνα με την (5.13), η μέση συνολική καταναλισκόμενη ισχύς στο Σταθμό Βάσης στην σχέση (5.5) P_{TOT} μετατρέπεται σε συνάρτηση της παραμέτρου διαμέρισης c για μια σταθερή τιμή ρυθμού αφίξεων ροών λ , δηλαδή $P_{TOT} = P_{TOT}(c; \lambda)$. Τότε, το κάτωθι πρόβλημα βελτιστοποίησης παρέχει την βέλτιστη παράμετρο διαμέρισης που ελαχιστοποιεί την συνολική καταναλισκόμενη ισχύ στο Σταθμό Βάσης:

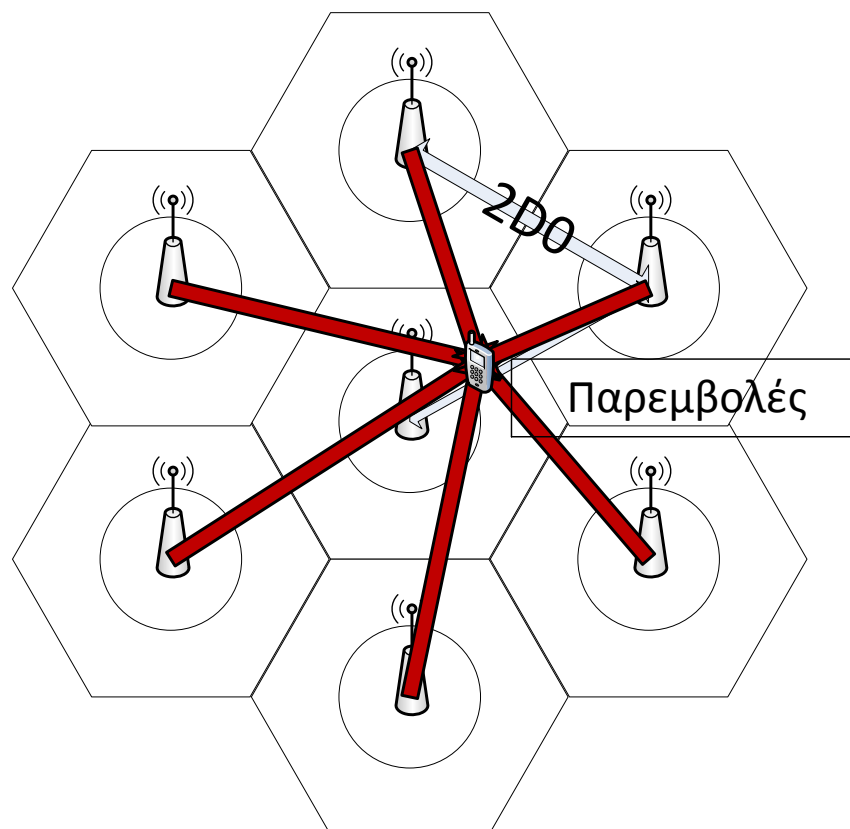
$$c^{**} = \arg \min_c (P_{TOT}(c; \lambda)). \quad (5.14)$$

Αναμένουμε ότι η συνολική καταναλισκόμενη ισχύς $P_{TOT}(c; \lambda)$ ελαχιστοποιείται στην ελάχιστη τιμή που λαμβάνει η πιθανότητα p_{ON_i} και για τους δυο δακτυλίους. Ο παρονομαστής της πιθανότητας p_{ON_i} στη (5.13), $1 + \rho_i g_{PF} - \rho_i$, λαμβάνει τιμές μεταξύ 1 και του κέρδους χρονοπρογραμματισμού του Αναλογικά Δίκαιου Αλγορίθμου g_{PF} .

Επειδή το φορτίο του δακτυλίου- i $\rho_i^* = \lambda \sigma / C_i(c^*)$ και $g_{PF} \leq 1.58$ (η ισότητα ισχύει για $m=1$), τότε ο παρονομαστής της πιθανότητας p_{ON_i} προσεγγίζεται με τη μονάδα, $p_{ON_i} \approx \rho_i g_{PF}$ και η ελάχιστη τιμή της πιθανότητας p_{ON_i} σχετίζεται μέσω της (5.10) με τη μέγιστη συνολική χωρητικότητα του συστήματος $C_T(c)$, πράγμα που σημαίνει ότι οι παράμετροι c^{**} , c^* αναμένεται να λάβουν που κοντινές τιμές.

5.5 Αξιολόγηση της Επίδοσης

Θεωρούμε ένα δίκτυο εξαγωνικών κυψελών που αποτελείται από 13 μακροκυψέλες OFDMA με την ίδια ακτίνα ίση με $D_0 = 2000\text{m}$ και ελάχιστη απόστασης με $D_2 = 20\text{m}$ (Σχήμα 5.2). Η απόσταση ανάμεσα σε Σταθμούς Βάσης γειτονικών κυψελών είναι ίση με $2D_0$. Εφαρμόζουμε την παρακάτω συντηρητική προσέγγιση (έχει προταθεί στην [BP03]) για τις παρεμβολές που υφίσταται στο δέκτη του ένας χρήστης που βρίσκεται σε απόσταση L από το Σταθμό Βάσης της κυψέλης αναφοράς. Υποθέτουμε ότι ο χρήστης είναι πάντα σε ένα ευθύγραμμο τμήμα που ενώνει το Σταθμό Βάσης της κυψέλης αναφοράς και το Σταθμό Βάσης μιας από τις γειτονικές κυψέλες (Σχήμα 5.3). Για τις $V_A = 6$ παρεμβολές $l_1(L) = 2D_0 - L$, $l_{2/3}(L) = \sqrt{(D_0 - L)^2 + 3D_0^2}$, $l_4(L) = 2D_0 + L$ και $l_{5/6}(L) = \sqrt{(D_0 + L)^2 + 3D_0^2}$. Όλες οι $V_B = 6$ παρεμβολές βρίσκονται προσεγγιστικά σε απόσταση $2\sqrt{3}D_0$ από το χρήστη της κυψέλης αναφοράς.



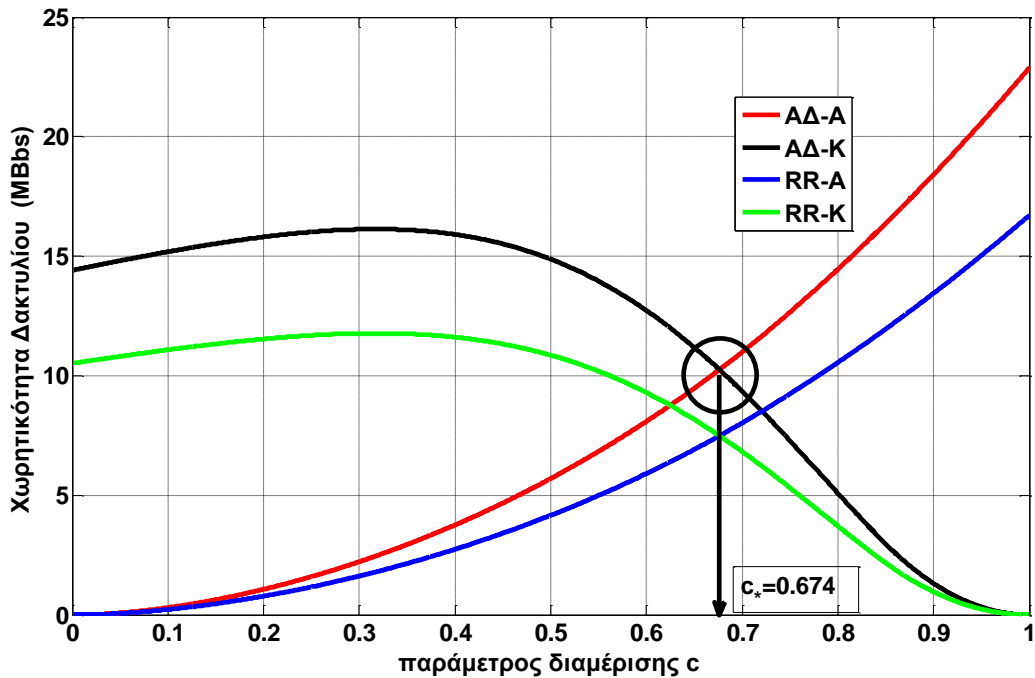
Σχήμα 5.3: Συντηρητική προσέγγιση για τις παρεμβολές

Κάθε κυψέλη έχει συχνότητα φέροντος 900 MHz με εύρος ζώνης συστήματος $W = 20\text{MHz}$. Οι σταθερές του ντετερμινιστικού μοντέλου απωλειών στη (5.2) είναι $A = 0.16$, σχετιζόμενη με την συχνότητα φέροντος στα 900 MHz και $a = 4$, υποθέτοντας ένα πυκνό αστικό περιβάλλον διάδοσης. Οι σταθερές τιμές μεταδιδόμενης ισχύος είναι $P_1 = 6\text{Watt}$ για το δακτύλιο-1, και $P_2 = 2\text{Watt}$ για το δακτύλιο-2. Η φασματική πυκνότητα ισχύος του AWGN θορύβου είναι $N_0 = -174\text{dbm/Hz}$. Το RB στο LTE αντιστοιχεί σε εύρος ζώνης $B_s = 180\text{kHz}$. Το εύρος ζώνης συνοχής που αντιστοιχεί στη διάδοση σε εσωτερικό περιβάλλον για διαλείψεις Rayleigh υπολογίζεται σε $B_c = 100\text{kHz}$ [ZS07]. Τότε, το στιγμιαίο κανονικοποιημένο SINR γ έχει κατανομή Erlang- $m=2$, με παράμετρο $f_1 = 0.27$ και το κέρδος χρονοπρογραμματισμού του ΑΔ αλγορίθμου είναι $g_{PF} = 1.37$. Το μέσο μέγεθος κάθε ροής είναι $\sigma = 1\text{Mbit}$.

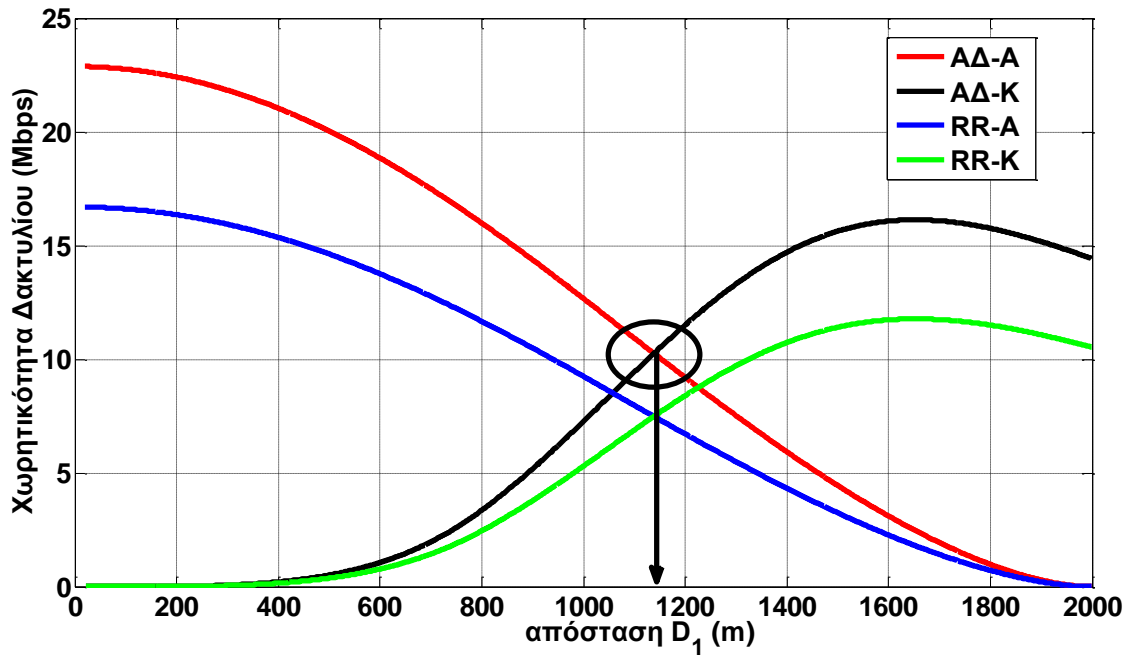
Πρώτα εξετάζουμε τη βέλτιστη διαμέριση της Κλασματικής Επαναχρησιμοποίησης Συχνότητας που μεγιστοποιεί τη συνολική χωρητικότητα της κυψέλης για τους αλγορίθμους ΑΔ και RR. Στο Σχήμα 5.4 παρουσιάζονται αναλυτικά αποτελέσματα για τις χωρητικότητες των δυο δακτυλίων και για τους δυο αλγορίθμους συναρτήσει της παραμέτρου διαμέρισης c και στο Σχήμα 5.5 συναρτήσει της εσωτερικής απόστασης D_1 . Στο Σχήμα 5.6 παρουσιάζονται αναλυτικά αποτελέσματα για τη συνολική χωρητικότητα της κυψέλης συναρτήσει της παραμέτρου διαμέρισης c και για τους δυο αλγορίθμους. Η βέλτιστη τιμή της παραμέτρου διαμέρισης είναι $c^* = 0.674$ και αντιστοιχεί στην εσωτερική απόσταση $D_1 = q(c^*) = 1137\text{m}$ και τη χωρητικότητα κυψέλης $C_T(0.674) = 10.25\text{Mbps}$. Στη βέλτιστη διαμέριση της κυψέλης το 67,4% των χρηστών της κυψέλης είναι στο πρώτο δακτύλιο. Στην περίπτωση του RR ($g_{PF} = 1$), η χωρητικότητα της κυψέλης $C_T(0.674) = 7.47\text{Mbps}$.

Επιπλέον, υπολογίζουμε αριθμητικά τη χωρητικότητα της κυψέλης για τον ΑΔ αλγόριθμο, σε στατικά σχήματα επαναχρησιμοποίησης-1 και -3, θεωρώντας ότι η μεταδιδόμενη ισχύς προσαρμόζεται με τον ίδιο τρόπο όπως στην περίπτωση της βέλτιστης Κλασματικής Επαναχρησιμοποίησης Συχνότητας στην επιφάνεια κάθε δακτυλίου. Οι τιμές της χωρητικότητας της κυψέλης είναι 10.87Mbps και 13.14Mbps αντίστοιχα για τον ΑΔ αλγόριθμο.

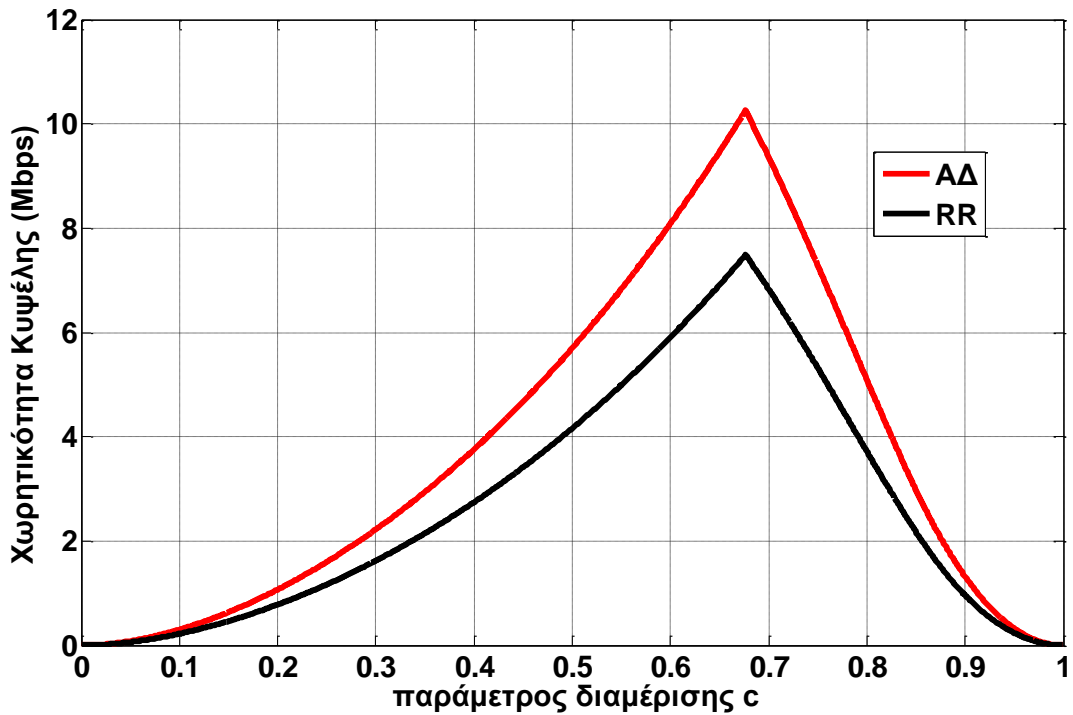
Η βέλτιστη διαμέριση της Κλασματικής Επαναχρησιμοποίησης Συχνότητας για τον Αναλογικά Δίκαιο Αλγόριθμο προσφέρει τιμή χωρητικότητα κυψέλης ίση με 94% της χωρητικότητας κυψέλης του σχήματος επαναχρησιμοποίησης-1 (FR1) και 78% της χωρητικότητας κυψέλης του σχήματος επαναχρησιμοποίησης-3 (FR3). Και οι δυο τιμές είναι ικανοποιητικές για την για επίδοση του συστήματος, σύμφωνα με την ανάλυση στην δημοσίευση [BPN⁺09], κατά την οποία η χωρητικότητα της κυψέλης κατά την εφαρμογή της Κλασματικής Επαναχρησιμοποίησης Συχνότητας πρέπει να κυμαίνεται ανάμεσα στο 75%-80% της χωρητικότητας της κυψέλης με στατικό σχήμα επαναχρησιμοποίησης-1.



Σχήμα 5.4: Χωρητικότητα δακτυλίων, «Α»-απομακρυσμένων χρηστών, «Κ»-κοντινών χρηστών για τους αλγορίθμους RR και AΔ, συναρτήσει της παραμέτρου διαμέρισης c .



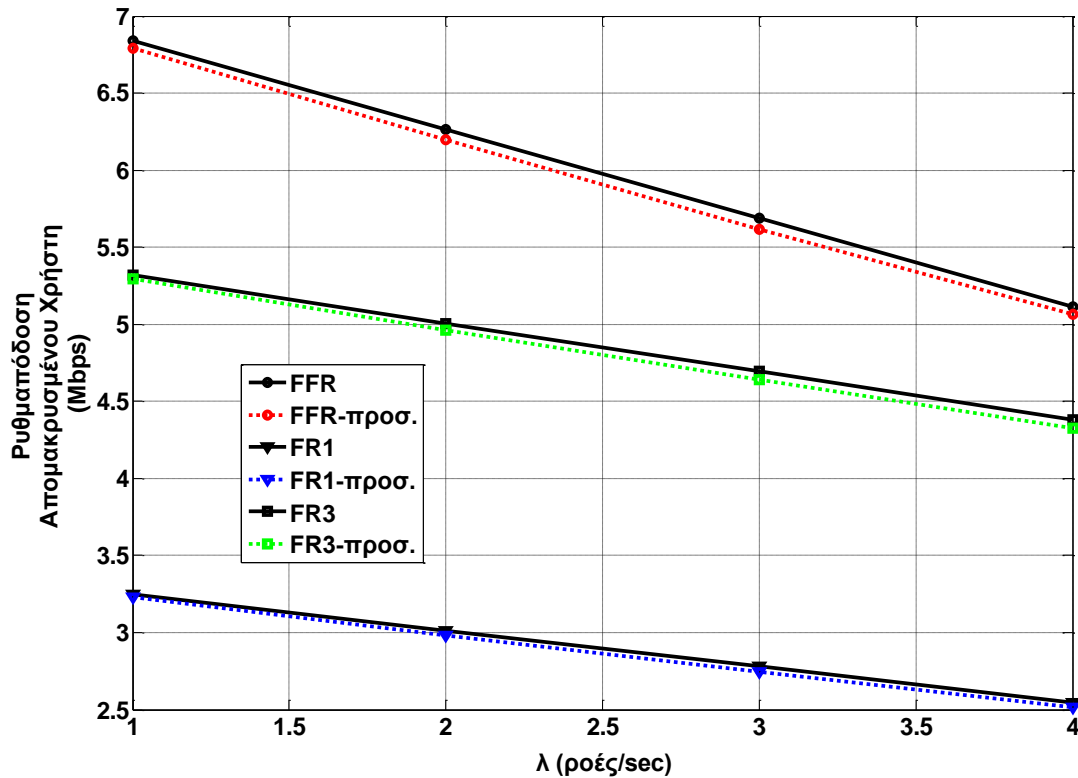
Σχήμα 5.5: Χωρητικότητα δακτυλίου, «Α»-απομακρυσμένων χρηστών, «Κ»-κοντινών χρηστών για τους αλγορίθμους RR και ΑΔ, συναρτήσει της απόστασης D_1 .



Σχήμα 5.6: Χωρητικότητα κυψέλης για τους αλγορίθμους RR, ΑΔ, συναρτήσει της παραμέτρου διαμέρισης c .

Στο Σχήμα 5.7 παρουσιάζονται αναλυτικά αποτελέσματα και αποτελέσματα προσομοίωσης για τη ρυθμαπόδοση $\gamma(D_0)$ του «απομακρυσμένου» χρήστη που βρίσκεται σε απόσταση $D_0 = 2000\text{m}$ από το Σταθμό Βάσης συναρτήσεως του ρυθμού αφίξεων των ροών λ για τα τρία σχήματα επαναχρησιμοποίησης συχνότητας. Η ρυθμαπόδοση του «απομακρυσμένου» χρήστη αυξάνεται σημαντικά σε αντίθεση με τα στατικά σχήματα επαναχρησιμοποίησης συχνότητας. Συγκεκριμένα για $\lambda = 1$ το κέρδος της Κλασματικής Επαναχρησιμοποίησης συχνότητας είναι 28% έναντι του FR3 και 110% έναντι του FR1. Για $\lambda = 4$ το κέρδος της Κλασματικής Επαναχρησιμοποίησης συχνότητας είναι 19% έναντι του FR3 και 108% έναντι του FR1. Και σε χαμηλές και υψηλές τιμές φορτίου η Κλασματική Επαναχρησιμοποίηση Συχνότητας προσφέρει σημαντικό κέρδος στη ρυθμαπόδοση των απομακρυσμένων χρηστών έναντι των άλλων σχημάτων επαναχρησιμοποίησης συχνότητας.

Λαμβάνοντας υπόψη τα προηγούμενα αποτελέσματα που αφορούν την χωρητικότητα της κυψέλης, παρατηρούμε ότι η αντισταθμιστική σχέση ανάμεσα στη μείωση της χωρητικότητας λόγω της κλασματικής επαναχρησιμοποίησης συχνότητας και στην αύξηση της ρυθμαπόδοσης των «απομακρυσμένων» χρηστών που επιβαρύνονται σημαντικά από τις παρεμβολές είναι επωφελής για τη γενική επίδοση του συστήματος.

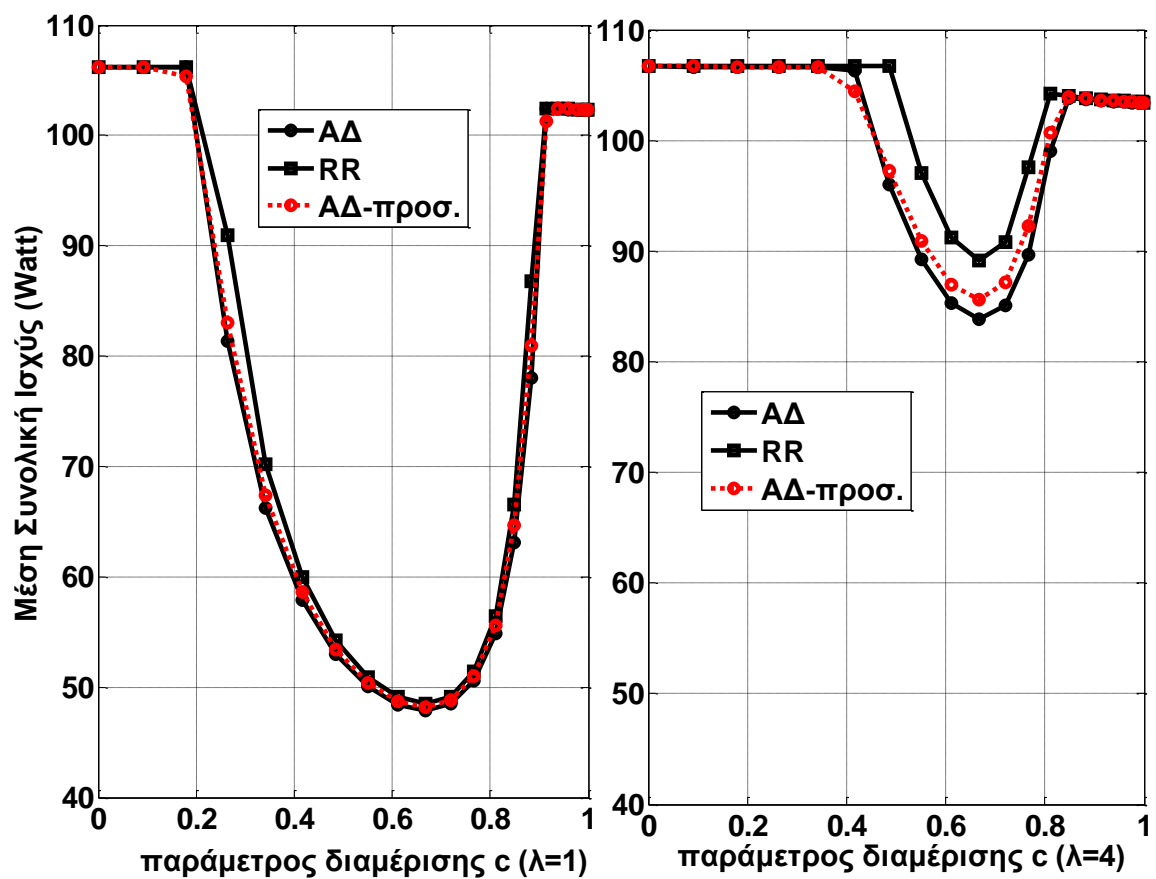


Σχήμα 5.7: Ρυθμαπόδοση απομακρυσμένου χρήστη σε σχήματα FFR, FR1, FR3. Οι χρωματιστές διακεκομμένες γραμμές είναι αποτελέσματα προσομοίωσης.

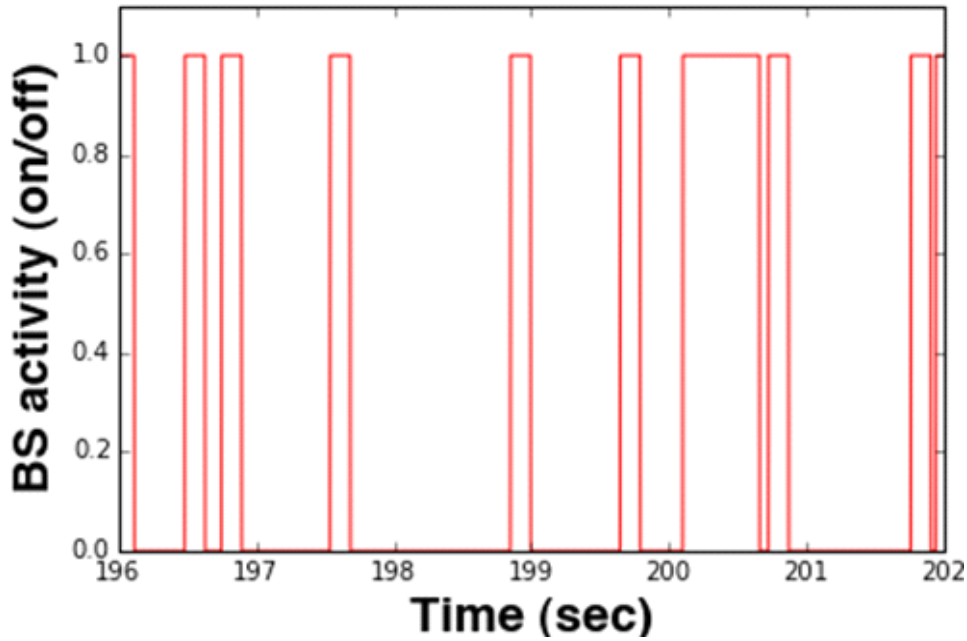
Δεύτερον, εξετάζουμε την βέλτιστη διαμέριση της Κλασματικής Επαναχρησιμοποίησης Συχνότητας, ελαχιστοποιώντας τη συνολική μέση ισχύ κατανάλωσης στο Σταθμό Βάσης που δίνεται από τη (5.5). Η ισχύς κατανάλωσης στο κύκλωμα του ΣΒ είναι ίση με $P_c = 100\text{Watt}$ στη φάση μετάδοσης και $P_s = 30\text{Watt}$ στη φάση αδράνειας, όμοια με την δημοσίευση [WWZ⁺12].

Στο Σχήμα 5.8 παρουσιάζονται αποτελέσματα για τη μέση συνολική καταναλισκόμενη ισχύ συναρτήσει της παραμέτρου διαμέρισης c για τον ΑΔ και τον RR αλγόριθμο, για τιμές $\lambda = 1, 4$. Πραγματοποιήσαμε προσομοίωση για την περίπτωση του ΑΔ αλγορίθμου, θεωρώντας ότι οι χρήστες κατανέμονται ομοιόμορφα σε όλη τη κυψέλη και ότι η επιλογή του χρήστη σε κάθε RB βασίζεται στο λόγο του στιγμιαίου ρυθμού μετάδοσης προς το ρυθμό εξυπηρέτησής του για ένα χρονικό παράθυρο με άπειρο ορίζοντα. Η βέλτιστη τιμή διαμέρισης είναι $c^{**} = 0.658$ για τον ΑΔ, και η ελάχιστη μέση συνολική ισχύς λαμβάνει τιμή $P_{TOT}(0.658; 1) = 48.2\text{Watt}$ και $P_{TOT}(0.658; 4) = 85.6\text{Watt}$. Παρατηρούμε ότι $c^* = 0.674 \approx c^{**} = 0.658$ όπως αναμενόταν από την ανάλυση. Για $\lambda = 1$ η μείωση της κατανάλωσης ισχύος από

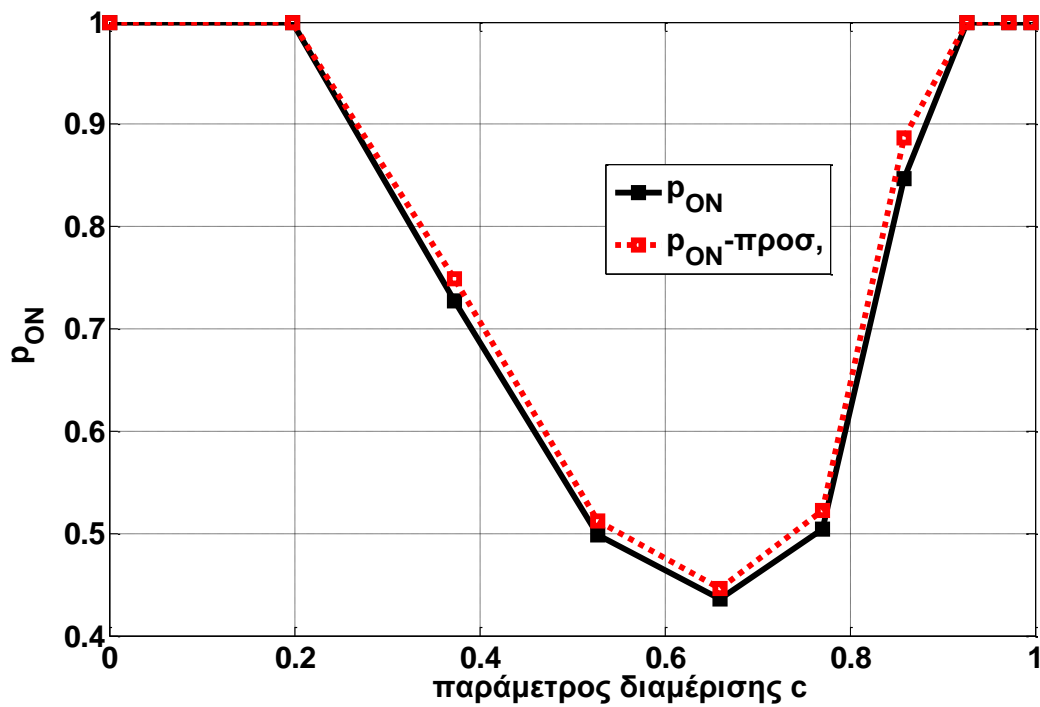
$P_{TOT}(1;1)=102\text{Watt}$ είναι 52%. Για $\lambda=4$ η μείωση από $P_{TOT}(1;4)=102\text{Watt}$ είναι 16.25%. Το δυναμικό μοντέλο κατανάλωσης προσφέρει σημαντική μείωση στη κατανάλωση ισχύος.



Σχήμα 5.8: Μέση συνολική ισχύς συναρτήσει της παραμέτρου διαμέρισης c , για $\lambda=1$ και $\lambda=4$. Οι κόκκινες διακεκομμένες γραμμές είναι αποτελέσματα προσομοίωσης.



Σχήμα 5.9: Η δραστηριότητα του Σταθμού Βάσης σε στιγμιότυπο της προσομοίωσης του συστήματος των δυο δακτυλίων για $\lambda=2$.



Σχήμα 5.10: Η πιθανότητα ο Σταθμός Βάσης να είναι σε φάση μετάδοσης συναρτήσει της παραμέτρου διαμέρισης c , για $\lambda=2$. Οι κόκκινες διακεκομμένες γραμμές είναι αποτελέσματα προσομοίωσης.

Στο Σχήμα 5.9 παρουσιάζεται στιγμιότυπο της προσομοίωσης του συστήματος για την δραστηριότητα του Σταθμού Βάσης κάτω από τη ενεργειακά βέλτιστη εφαρμογή της Κλασματικής Επαναχρησιμοποίησης Συχνότητας για $\lambda = 2$ και $c^{**} = 0.658$.

Στο Σχήμα 5.10 παρουσιάζεται η πιθανότητα p_{ON} ο Σταθμός Βάσης να είναι σε φάση μετάδοσης συναρτήσει της παραμέτρου διαμέρισης c για $\lambda = 2$. Η πιθανότητα ο Σταθμός Βάσης να είναι σε φάση αδράνειας είναι $p_{OFF} = 0.57$ στη βέλτιστη τιμή $c^{**} = 0.658$, μια πολύ σημαντική τιμή. Το γεγονός αυτό προκύπτει ακριβώς από την αναλυτική μορφή της κατανομής των ενεργών χρηστών στην (5.12).

Τα αριθμητικά αποτελέσματα στα Σχήματα 5.7, 5.8, και 5.10 για τα αντίστοιχα μεγέθη με χρήση του Αναλογικά Δίκαιου Αλγορίθμου είναι πολύ κοντά στα αποτελέσματα της προσομοίωσης, επιβεβαιώνοντας την χρησιμότητα της προσεγγιστικής αναλυτικής σχέσης για την κατανομή των ενεργών χρηστών (5.12) σε συστήματα χρονοπρογραμματισμού ΑΔ αλγορίθμου, όσο την και την σχέση της ρυθμαπόδοσης (5.11).

5.6 Συμπεράσματα

Είδαμε ότι η αλγοριθμικά η εξυπηρέτηση των χρηστών κατά την εφαρμογή της Κλασματικής Επαναχρησιμοποίησης Συχνότητας πραγματοποιείται με τη χρήση δυο ξεχωριστών θαλάμων εξυπηρέτησης. Η συνολική χωρητικότητα της κυψέλης είναι η ελάχιστη των τιμών της χωρητικότητας κάθε δακτυλίου. Η βέλτιστη εφαρμογή Κλασματικής Επαναχρησιμοποίησης Συχνότητας που μεγιστοποιεί τη συνολική χωρητικότητα του συστήματος υπερσχύει έναντι των στατικών σχημάτων επαναχρησιμοποίησης -1 και -2 όσον αφορά τη ρυθμαπόδοση των «απομακρυσμένων» χρηστών με τίμημα μια ανεκτή μείωση της συνολικής χωρητικότητας της κυψέλης.

Επιπλέον, η βέλτιστη εφαρμογή της Κλασματικής Επαναχρησιμοποίησης Συχνότητας που ελαχιστοποιεί τη συνολική κατανάλωση ισχύος της κυψέλης στο Σταθμό Βάσης μειώνει σημαντικά τη μέση συνολική κατανάλωση ισχύος, εφόσον εφαρμοστεί ένα σχήμα δυναμικής κατανάλωσης ισχύος. Επιπλέον, σε συνθήκες διαλείψεων Rayleigh και για μετάδοση σε εξωτερικό, πυκνό αστικό περιβάλλον οι παράμετροι διαμέρισης της κυψέλης είναι πρακτικά ίδιοι στα δυο προβλήματα βελτιστοποίησης.

Τέλος, η πρωτότυπη προσεγγιστική αναλυτική σχέση για την κατανομή του συνόλου των ενεργών χρηστών κατά την εφαρμογή του Αναλογικά Δίκαιου αλγορίθμου αναπαριστά με μεγάλη ακρίβεια τη δραστηριότητα των ενεργών χρηστών σε όλη τη κυψέλη και επομένως μπορεί να αποτελέσει ένα αποτελεσματικό και σημαντικό αναλυτικό εργαλείο για αρκετές εφαρμογές στα ασύρματα δίκτυα.

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα Διατριβής και Μελλοντικές Κατευθύνσεις Έρευνας

6.1 Γενικά Συμπεράσματα

Η βασική συνεισφορά αυτής της διατριβής είναι η επανεξέταση του γενικού προβλήματος της δέσμευσης πόρων στην Νέα Γενιά Κυψελωτών Δικτύων, τόσο μεσοπρόθεσμα σε συνθήκες σταθερού πληθυσμού ενεργών χρηστών, όσο και μακροπρόθεσμα, όταν ο πληθυσμός των ενεργών χρηστών μεταβάλλεται, λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση των ανώτερων επιπέδων της στοίβας των πρωτοκόλλων της ασύρματης δικτύωσης. Παρουσιάζονται πρωτότυπες, απλές, αναλυτικές προσεγγιστικές σχέσεις για βασικές μετρικές επίδοσης τόσο του συστήματος, όσο και των χρηστών, που αφενός επιτρέπουν την διασύνδεση της σύνθετης λειτουργίας βασικών πρωτοκόλλων του ασύρματου συστήματος με παραμέτρους που μπορούν να προσαρμοστούν κατάλληλα και βέλτιστα, και αφετέρου ανοίγουν νέους ορίζοντες για τη δημιουργία δυναμικών πρωτοκόλλων δέσμευσης πόρων στις νέες αρχιτεκτονικές ασύρματης δικτύωσης που προτείνονται για τα Δίκτυα πέραν της 3^{ης} Γενιάς.

Η αλληλεπίδραση των Επιπέδων της στοίβας των πρωτοκόλλων εμφανίζεται με απλότητα μέσω της γενικευμένης παραμέτρου $f_1 = \int_1^{\infty} (1 - \hat{F}(y)) dy$ που συγκεντρώνει τα βασικά χαρακτηριστικά των χαμηλότερων πρωτοκόλλων του Φυσικού Επιπέδου (κατανομή διαλείψεων) και του Επιπέδου Ζεύξης (στιγμιαίος ρυθμός ζεύξης, δομή OFDMA, παραμετροποίηση Erlang-m) και οδηγεί σε απλές σχέσεις για βασικές μετρικές αξιολόγησης, τόσο μεσοπρόθεσμα σε συνθήκες σταθερού πληθυσμού ενεργών χρηστών, όσο και μακροπρόθεσμα όταν ο πληθυσμός των ενεργών χρηστών μεταβάλλεται σε στατιστική ισοροπία.

Στην περίπτωση του σταθερού πληθυσμού των ενεργών χρηστών αντιστοιχεί η εύρεση των προσεγγιστικών σχέσεων: α) για το κέρδος χρονοπρογραμματισμού σε σύστημα χρονοπρογραμματισμού Αναλογικά Δίκαιου αλγορίθμου, β) για το μέσο ρυθμό μετάδοσης ζεύξης (το γινόμενο των δυο αυτών σχέσεων μας παρέχει το ρυθμό εξυπηρέτησης μιας κλάσης χρηστών) γ) για το βέλτιστο μέσο ρυθμό μετάδοσης ζεύξης στο προτεινόμενο καταστασιακά εξαρτημένο αλγόριθμο προσαρμογής ζεύξης,

που μεγιστοποιεί την ενεργειακή επίδοση χρήστη. Ένα άμεσο αποτέλεσμα των δυο πρώτων προσεγγιστικών σχέσεων (α και β) είναι ότι ο ρυθμός εξυπηρέτησης κάθε χρήστη σε σύστημα χρονοπρογραμματισμού Αναλογικά Δίκαιου αλγορίθμου μεγιστοποιείται όταν ελαχιστοποιείται το εύρος ζώνης της ελάχιστης δομικής μονάδας δέσμευσης εύρους ζώνης στο πλαίσιο OFDMA. Ένα άλλο άμεσο αποτέλεσμα της τρίτης προσεγγιστικής σχέσης είναι ότι τα περιθώρια για ενεργειακή επίδοση μέσω της προσαρμογής ζεύξης είναι περιορισμένα για τους «απομακρυσμένους» χρήστες. Χρειάζονται λοιπόν νέα πρωτόκολλα που αξιοποιούν τις διαφορετικές δυναμικές εξυπηρέτησης στα ανώτερα στρώματα της στοίβας των πρωτοκόλλων, προκειμένου να βελτιωθεί η ενεργειακή επίδοση.

Σε συνθήκες μεταβαλλόμενου πληθυσμού των ενεργών χρηστών αντιστοιχούν οι αναλυτικές προσεγγιστικές σχέσεις: α) για τη ρυθμαπόδοση χρήστη, β) για την ενεργειακή επίδοση χρήστη λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά των ευκαιριακών χρονοπρογραμματιστών στο Επίπεδο Πρόσβασης στο Μέσο και την δυναμική της αναμονής και εξυπηρέτησης στα ανώτερα στρώματα της στοίβας των πρωτοκόλλων. Ένα πολύ σημαντικό και πρωτότυπο αποτέλεσμα της διατριβής που προκύπτει από τη δεύτερη σχέση είναι ότι η ενεργειακή επίδοση μακροπρόθεσμα σε σύστημα εξυπηρέτησης Αναλογικά Δίκαιου αλγορίθμου αυξάνεται πολύ περισσότερο από το κέρδος χρονοπρογραμματισμού, καθιστώντας απαραίτητη τη ξεχωριστή εξέταση του Αναλογικά Δίκαιου Αλγορίθμου στη δημιουργία ενεργειακά αποδοτικών αλγορίθμων και στην διαστασιοποίηση των ασύρματων δικτύων με γνώμονα την βελτίωση της ενεργειακής επίδοσης των χρηστών.

Συνολικά το αναλυτικό αυτό πλαίσιο παρουσιάζει εύρωστα χαρακτηριστικά, αναλλοίωτα στη κατανομή της κίνησης των δεδομένων σε ανώτερα επίπεδα της στοίβας των πρωτοκόλλων, παρουσιάζοντας τη δυνατότητα αξιολόγησης της επίδοσης συστημάτων χρονοπρογραμματισμού (Αναλογικά Δίκαιος αλγόριθμος) και προσαρμογής ζεύξης (Καταστασιακά Εξαρτημένος αλγόριθμος) και διατύπωσης νέων αλγορίθμων εξυπηρέτησης όπως ο SEEPO, που υπερέχει σημαντικά σε επίδοση έναντι του Αναλογικά Δίκαιου αλγορίθμου με αντίτιμο μια μικρή μείωση στη χωρητικότητα του συστήματος.

Επιπλέον, παρουσιάζεται μια πρωτότυπη σχέση για την κατανομή των ενεργών χρηστών σε σύστημα χρονοπρογραμματισμού Αναλογικά Δίκαιου Αλγορίθμου με πολλαπλές κλάσεις. Η σχέση αυτή αξιοποιήθηκε στη διαστριβή στα πλαίσια της δυναμικής κατανάλωσης ισχύος σε συστήματα Κλασματικής Επαναχρησιμοποίησης

Συχνότητας με ξεχωριστούς θαλάμους εξυπηρέτησης Αναλογικά Δίκαιου Αλγορίθμου. Η σχέση αυτή μπορεί να αξιοποιηθεί σε πληθώρα προβλημάτων που ο ρυθμός εξυπηρέτησης της κλάσης εξαρτάται από τον αριθμό των ενεργών χρηστών.

Σε συγκεκριμένες περιπτώσεις, όπου η κίνηση των δεδομένων δεν είναι αναλλοίωτη στη κατανομή της κίνησης των δεδομένων, όπως π.χ. στον Καταστασιακά Εξαρτημένο αλγόριθμο προσαρμογής ζεύξης για πολλαπλές κλάσεις, η διατριβή καταλήγει σε ικανοποιητικά φράγματα επίδοσης, τόσο για τη ρυθμαπόδοση, όσο και για την ενεργειακή επίδοση.

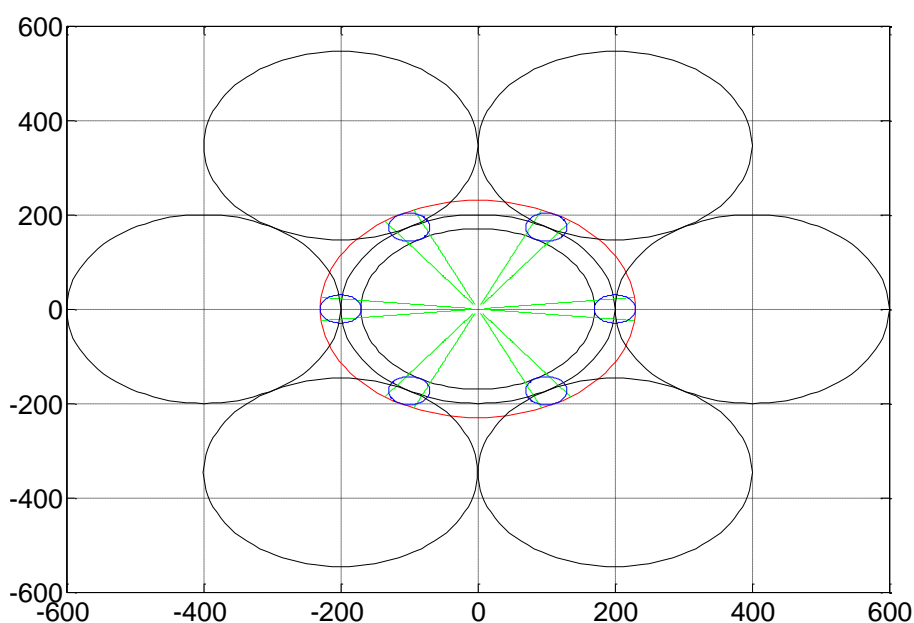
Η μεθοδολογία και το αναλυτικό μοντέλο που αναπτύσσεται στη διατριβή αποτελεί στέρεο έδαφος για την μελέτη νέων προβλημάτων. Σταχυολογούμε παρακάτω κάποια από τα βασικά προβλήματα που προσελκύουν την προσοχή της έρευνας στη σύγχρονη βιβλιογραφία.

6.2 Ετερογενή Ραδιοδίκτυα και τεχνικές εκφόρτωσης

Τα ετερογενή ραδιοδίκτυα αποτελούνται από ξεχωριστά ασύρματα συστήματα πρόσβασης που καλύπτουν την επιφάνεια μιας κυψέλης. Από τη σκοπιά του δικτύου, η διόγκωση των δεδομένων και αύξηση του ρυθμού μετάδοσης οδηγεί σε σημαντικές ανακατατάξεις στο θέμα της κάλυψης. Στο βαθμό που η αρχή της ανοιχτής πρόσβασης (open access) γίνεται δεκτή από τους παρόχους, ο κινητός χρήστης μπορεί να συνδεθεί με οποιονδήποτε διάλο διαφορετικής αρχιτεκτονικής ασύρματης δικτύωσης επιθυμεί, ικανοποιώντας ορισμένα ή συνδυασμό από τα συγκεκριμένα κριτήρια: μέγιστο SINR, μέγιστο μέσο ρυθμό μετάδοσης, μέγιστο ρυθμό εξυπηρέτησης χρήστη. Οι πιο συνηθισμένες αρχιτεκτονικές ασύρματης δικτύωσης που συνιστούν τα ετερογενή ραδιοδίκτυα είναι τα κυψελωτά συστήματα του LTE σε συνδυασμό με τα οικιακά Wi-Fi.

Η διαστασιοποίηση των δικτύων τόσο στη 2η όσο και στη 3η γενικά βασιζόταν κατά κύριο λόγο στην πιθανότητα κάλυψης πάνω από μια ελάχιστη τιμή SINR. Η μετρική αυτή ήταν ικανοποιητική για ομογενή δίκτυα, με υψηλά φορτία (κορεσμός) στις ώρες αιχμής. Η νέα εικόνα του σύνθετου ετερογενούς δικτύου, με σημαντικές διαφορές στα φορτία των επιμέρους δικτύων, επιβάλλει τη μελέτη της κατανομής του ρυθμού μετάδοσης και της ρυθμαπόδοσης, ως μιας νέας ξεχωριστής μετρικής [And07]. Στη βιβλιογραφία έχουν ήδη παρουσιαστεί αναλυτικές προσεγγιστικές σχέσεις για την κατανομή του ρυθμού εξυπηρέτησης σε συστήματα εξυπηρέτησης με

κατανομή Poisson [DA14]. Όπως έχουμε εξηγήσει στην Ενότητα (§3.2.3) η κατανομή Poisson αντιστοιχεί στο εύρωστο μοντέλο εξυπηρέτησης των άπειρων εξυπηρετητών, όπου κάθε ενεργός χρήστης εξυπηρετείται από ένα Σταθμό Βάσης. Η κατανομή Poisson δεν μπορεί να προσεγγίσει με ακρίβεια συστήματα ευκαιριακού χρονοπρογραμματισμού του συστήματος LTE. Όπως είδαμε η κατανομή των ενεργών χρηστών στη περίπτωση του Round Robin είναι γεωμετρική και στην περίπτωση του Αναλογικού Δίκαιου αλγορίθμου «υπερ-γεωμετρική». Η πρωτότυπη κατανομή του συνόλου των ενεργών χρηστών σε σύστημα εξυπηρέτησης Αναλογικά Δίκαιου αλγορίθμου που παρουσιάστηκε στη διατριβή μπορεί να αξιοποιηθεί για την εύρεση αναλυτικής προσεγγιστικής σχέσης της κατανομής του ρυθμού μετάδοσης ζεύξης ή του ρυθμού εξυπηρέτησης στο σύνθετο ετερογενές ραδιοδίκτυο με πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια απ' αυτή που προκύπτει με το μοντέλο Poisson.



Σχήμα 6.1: Προτεινόμενη αρχιτεκτονική ετερογενούς ραδιοδικτύου [SA12]. Μικρές κυψέλες τοποθετούνται στα άκρα της κυψέλης του LTE.

Παράλληλα με την έναρξη μαζικής εφαρμογής της ανοιχτής πρόσβασης από τους παρόχους των ασύρματων επικοινωνιών, ένα από τα βασικά προβλήματα που εμφανίζονται στη σύγχρονη βιβλιογραφία είναι η εξέταση και παρουσίαση βέλτιστων πολιτικών για τη τεχνική της εκφόρτωσης φορτίου (off-loading) από το κυψελωτό σύστημα στα οικιακά Wi-Fi [SDA13]. Η διαδικασία της εκφόρτωσης μπορεί να μοντελοποιηθεί με τα εύρωστα μοντέλα εξυπηρέτησης που αναπτύξαμε στη διατριβή. Το πρόβλημα της εκφόρτωσης μπορεί να μετασχηματιστεί σε πρόβλημα βέλτιστης

πιθανοτικής δρομολόγησης, μεγιστοποιώντας συγκεκριμένες αντικειμενικές συναρτήσεις που περιγράφουν τη συνολική χωρητικότητα του ετερογενούς ραδιοδικτύου και την ενεργειακή κατανάλωση του συνολικού συστήματος.

6.3 Δίκτυα Μηχανών (M2M)

Τα Δίκτυα Μηχανών (Machine-to-Machine, (M2M)) εμφανίζονται ως ένα ξεχωριστό και σημαντικό πρόβλημα της διαστασιοποίησης των δικτύων πέραν της 3^{ης} Γενιάς. Ο αριθμός των συσκευών που αναμένεται να συνδεθεί ασύρματα σε υποδομές του κυψελωτού συστήματος είναι πολύ μεγάλος για τα σημερινά δεδομένα κίνησης των μηχανών [MSP13]. Η πιο απαιτητική πρόβλεψη περιλαμβάνει 30.000 συσκευές ανά κυψέλη, με μέσο χρόνο ενεργοποίησης ένα λεπτό και μέσο μέγεθος ροής 100 bytes [TR10]. Το βασικό πρόβλημα δεν συνίσταται στον όγκο των δεδομένων των ενεργών συσκευών των Δικτύων Μηχανών που μπορεί να διεκπεραιώσει το δίκτυο, αλλά στο ρυθμό αφίξεων των αιτήσεων για κρατήσεις των ενεργών χρηστών που αυξάνεται ραγδαία στη μονάδα του χρόνου.

Σε κάθε σύστημα ασύρματης πρόσβασης πριν το θάλαμο εξυπηρέτησης του χρονοπρογραμματιστή προηγείται ο χρονοπρογραμματισμός των κρατήσεων των ενεργών χρηστών. Κάθε χρήστης που γίνεται ενεργός, ειδοποιεί το Σταθμό Βάσης μέσω ενός πρωτοκόλλου τυχαίας πρόσβασης, μια εκδοχή του σταθεροποιημένου (stabilized) Aloha [LAA14]. Στις περιπτώσεις που εξετάσαμε στη διατριβή θεωρούμε ορθά ότι η καθυστέρηση που επιφέρει η διαδικασία της τυχαίας πρόσβασης είναι αμελητέα. Στη περίπτωση των Δικτύων Μηχανών, όμως, η διαδικασία του χρονοπρογραμματισμού των κρατήσεων επιφέρει σημαντική καθυστέρηση.

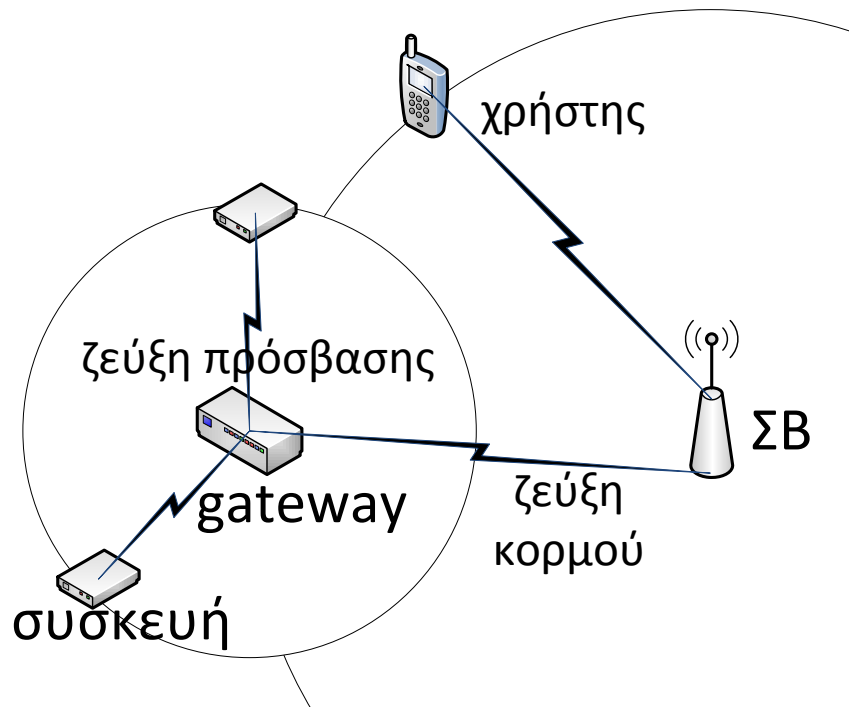
Επομένως, το πρόβλημα διαστασιοποίησης στα Δίκτυα Μηχανών περιλαμβάνει το διαχωρισμό της δέσμευσης πόρων σε δυο στάδια: ένα που αφορά το χρονοπρογραμματισμό των κρατήσεων των ενεργών χρηστών και ένα που αφορά το χρονοπρογραμματισμό μετάδοσης των ροών των ενεργών χρηστών. Το εύρος ζώνης και οι χρονοθυρίδες που θα διατεθούν για την εξυπηρέτηση και των δυο συστημάτων χρονοπρογραμματισμού παίζει σπουδαίο ρόλο για την ορθή διαστασιοποίηση του συνολικού δικτύου.

Οι τεράστιοι ρυθμοί αφίξεων των ροών των Δικτύων Μηχανών απαιτούν μεγάλο εύρος ζώνης για το χρονοπρογραμματισμό των κρατήσεών τους στο Σταθμό Βάσης. Το εύρος ζώνης που διατίθεται στα σύγχρονα κυψελώτα συστήματα για το

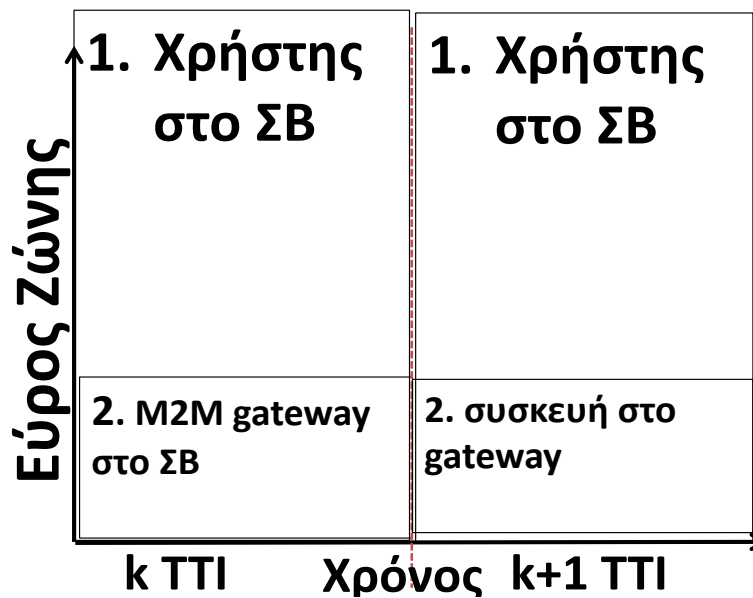
χρονοπρογραμματισμό των κρατήσεων είναι πολύ μικρό. Επιπρόσθετα, οι ρυθμοί αυτοί αφίξεων ενεργών συσκευών επιφέρουν τεράστια επιβάρυνση στο Δίκτυο Κορμού, εφόσον κάθε συσκευή θα προκαλεί ξεχωριστό αίτημα για πρόσβαση σε υπηρεσίες TCP ή άλλων διαδικτυακών πρωτοκόλλων, αυξάνοντας εκθετικά τον αριθμό των χειραψιών (handshakes).

Μια αξιόπιστη λύση για την αντιμετώπιση του προβλήματος είναι η διεκπεραίωση του χρονοπρογραμματισμού των κρατήσεων μέσω ασύρματων πυλών (gateways), π.χ. συστήματα Wi-Fi με διπλή ζώνη συχνοτήτων που επεκτείνονται σε όλο το χώρο της κυψέλης και επαναχρησιμοποιούν την ίδια συχνότητα. Επιπλέον, οι ροές των συσκευών που συνδέονται με τη συγκεκριμένη πύλη συσσωρεύονται σε μια ενιαία ροή στη περίπτωση ενεργοποίησης δικτυακών πρωτοκόλλων, περιορίζοντας σημαντικά τις χειραψίες και την επιβάρυνση στο Δίκτυο Κορμού. Το συνολικό εύρος ζώνης διαμερίζεται για την εξυπηρέτηση των χρηστών και την εξυπηρέτηση των συσκευών (Σχήμα 6.3). Κάθε πύλη σχηματίζει ένα τοπικό δίκτυο δυο βημάτων (Σχήμα 6.2). Το πρώτο βήμα αφορά τη ζεύξη πρόσβασης στη πύλη και το δεύτερο βήμα τη ζεύξη κορμού, την επικοινωνία της πύλης προς το Σταθμό Βάσης [ZHW⁺12].

Τα πρώτα αναλυτικά μοντέλα που έχουν παρουσιαστεί στη βιβλιογραφία για την αξιολόγηση της επίδοσης της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής του Δικτύου Μηχανών με πύλες, βασίζονται στη θεωρία της αποτελεσματικής χωρητικότητας (effective capacity) [ATN⁺14] για την εύρεση φράγματος επίδοσης της κατανομής της καθυστέρησης. Τα εύρωστα μοντέλα εξυπηρέτησης που αναπτύχθηκαν στην διατριβή μπορούν να αξιοποιηθούν για την εξέταση της συγκεκριμένης αρχιτεκτονικής, προσφέροντας σημαντική διαίσθηση και απλές σχέσεις για τη ρυθμαπόδοση και μέση καθυστέρηση στα δύο βήματα του τοπικού δικτύου κάθε πύλης. Επιπλέον, τα εύρωστα μοντέλα μπορούν να αξιοποιηθούν για την εύρεση της επίδρασης των δυναμικών παρεμβολών στη ζεύξη πρόσβασης λόγω της επαναχρησιμοποίησης συχνότητας, κάτι που δεν έχει πραγματοποιηθεί στην βιβλιογραφία λόγω της δυσκολίας των μοντέλων που βασίζονται στη θεωρία της αποτελεσματικής χωρητικότητας. Τέλος η συσσώρευση των μικρών ροών των συσκευών σε μια ροή της πύλης μπορεί να μοντελοποιηθεί με συστήματα μαζικών αφίξεων (bulk arrivals), τροποποιώντας κατάλληλα τις εξισώσεις ισορροπίας.



Σχήμα 6.2: Προτεινόμενη αρχιτεκτονική σύνθετου δικτύου Μηχανών και κυψελωτού συστήματος εξυπηρέτησης.



Σχήμα 6.3: Χρονοσυχνοτική δομή στο σύνθετο δίκτυο Μηχανών και κυψελωτού συστήματος εξυπηρέτησης.

6.4 Δίκτυα Συσκευών (D2D)

Τα Δίκτυα Συσκευών (Device-to-Device, (D2D)) προσφέρουν νέες ευκαιρίες για τη σημαντική βελτίωση της επίδοσης τόσο του συστήματος, όσο και των χρηστών. Η επικοινωνία μικρής εμβέλειας ανάμεσα στα τερματικά των κινητών χρηστών μέσα στη κυψέλη του πρωτεύοντος κυψελωτού Δικτύου μπορεί να αξιοποιηθεί αποδοτικά, παράλληλα με το πρωτεύον Δίκτυο, χρησιμοποιώντας την ίδια συχνότητα, αυξάνοντας τόσο τη συνολική χωρητικότητα του συστήματος, όσο και την ενεργειακή επίδοση των χρηστών [DRW09].

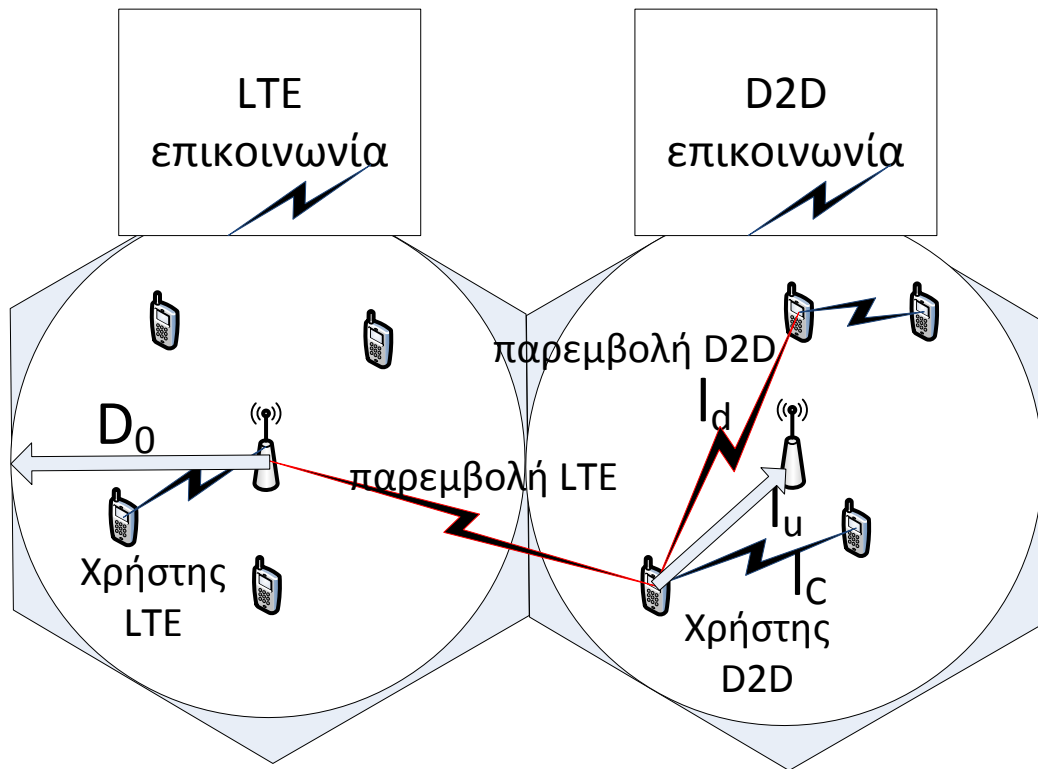
Επιπρόσθετα, οι πομποί των Δικτύων Συσκευών μπορούν να συνεισφέρουν σημαντικά στην βελτίωση της Ποιότητας Υπηρεσιών, λειτουργώντας ως εξυπηρετητές αποθήκευσης (caching servers). Νομαδικοί χρήστες που έχουν ήδη στη κατοχή τους δημοφιλή βίντεο ή διαφημιστικά κλιπ, μπορούν να αναμεταδώσουν το περιεχόμενο στους χρήστες της περιοχής τους, εξαλείφοντας τη σημαντική επιβάρυνση του φορτίου στο Δίκτυο Κορμού.

Ένα από τα βασικά προβλήματα στη διαστασιοποίηση των Δικτύων Συσκευών είναι η αντιμετώπιση των παρεμβολών των πομπών του Δικτύου Συσκευών στους δέκτες του πρωτεύοντος κυψελωτού Δικτύου. Η δραστηριότητα των Δικτύων Συσκευών μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τη λειτουργία πρωτοκόλλων του δικτύου που ασχολούνται με την επίδοση των «απομακρυσμένων» χρηστών, π.χ. πρωτόκολλα οριζόντιων μεταπομπών ή πρωτόκολλα εξουδετέρωσης παρεμβολών [YDR⁺11].

Η ορθή διαστασιοποίηση των Δικτύων Συσκευών απαιτεί την ανάπτυξη ενός γενικού μοντέλου που να συμπεριλαμβάνει την επίδραση τόσο της τυχαίας κατανομής των συσκευών στο χώρο, όσο και των χαρακτηριστικών της κίνησης των Δικτύων Συσκευών στη συνολική επίδοση του συστήματος.

Οι δημοσιεύσεις [EMI⁺12], [NXA⁺15] εξετάζουν την επίδοση του Δικτύου Συσκευών στα πλαίσια της στοχαστικής γεωμετρίας, αξιοποιώντας τις ιδιότητες της τυχαίας κατανομής των πομπών των Δικτύων Συσκευών στο χώρο. Οι ιδιότητες της Σημειακής Διαδικασίας Poisson (Poisson Poisson Point Process (PPP)) χρησιμοποιούνται τόσο για το Δίκτυο Συσκευών, όσο και για το πρωτεύον σύστημα στη [NXA⁺15], εξετάζοντας το μέσο όρο της δυναμικής της επίδοσης των χρηστών όσον αφορά τις διαλείψεις. Η ανάλυση αυτή επιτρέπει την εύρεση εκφράσεων για την κάλυψη με σημαντική διαίσθηση. Όμως, όπως έχει ήδη δειχθεί στη εξίσωση (3.16), η τυχαία κατανομή των ενεργών χρηστών του πρωτεύοντος συστήματος που

εξυπηρετούνται από ένα σύστημα χρονοπρογραμματισμού Round Robin είναι γεωμετρική κατανομή και δεν μπορεί να προσεγγιστεί από την Σημειακή Διαδικασία Poisson. Στη δημοσίευση [EMI⁺12] τόσο το πρωτεύον όσο και το Δίκτυο Συσκευών έχουν διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας.



Σχήμα 6.4: Αρχιτεκτονική συνύπαρξης LTE και D2D με αξιοποίηση κενών μετάδοσης

Στο παρελθόν, οι δημοσιεύσεις [GTS07] και [LZX⁺11] πρότειναν την αξιοποίηση των κενών μετάδοσης του πρωτεύοντος Δικτύου στο χρόνο στη κατεύθυνση διαστασιοποίησης ενός γνωστικού (cognitive) δικτύου, όταν το δευτερεύον γνωστικό δίκτυο δεν έχει καμία επαφή με το πρωτεύον. Η ιδέα αυτή μπορεί να ενσωματωθεί στην αρχιτεκτονική του Δικτύου Συσκευών, εξετάζοντας τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του Δικτύου Συσκευών, ότι ο Σταθμός Βάσης του πρωτεύοντος Δικτύου έχει τον έλεγχο πάνω στις δραστηριότητες των χρηστών του Δικτύου Συσκευών και του γεγονότος ότι οι συσκευές του Δικτύου Συσκευών επικοινωνούν ταυτόχρονα ανά ζεύγη προκαλώντας δυναμικές παρεμβολές αναμεταξύ τους.

Θεωρούμε ένα δίκτυο πρωτεύοντων κυψελών LTE και ζεύγη ενεργών μεταδοτών-δεκτών χρηστών του Δικτύου Συσκευών σε όλη την επιφάνεια κάλυψης του δικτύου

LTE (Σχήμα 6.4). Προτείνουμε μια αρχιτεκτονική συνύπαρξης Δικτύου Συσκευών και κυψελωτού δικτύου που δεν προκαλεί καμία παρεμβολή στο πρωτογενές κυψελωτό σύστημα. Οι χρήστες D2D μεταδίδουν μόνο όταν ο θάλαμος εξυπηρέτησης της κυψέλης του πρωτεύοντος Δικτύου είναι άδειος, εκμεταλλευόμενοι τα κενά της δραστηριότητας στο θάλαμο εξυπηρέτησης του πρωτεύοντος κυψελωτού συστήματος. Αν οι ενεργοί χρήστες της κυψέλης του LTE εξυπηρετούνται από σύστημα χρονοπρογραμματισμού Αναλογικά Δίκαιου αλγορίθμου τότε η κατανομή των ενεργών χρηστών του κυψελωτού θα είναι «υπερ-γεωμετρική» όπως δείξαμε στη διατριβή και η πιθανότητα ο θάλαμος εξυπηρέτησης να είναι κενός θα είναι σημαντική.

Παράρτημα Α

Υπολογισμός προσεγγιστικών σχέσεων για μεγέθη μεσοπρόθεσμης σύγκλισης

A.1 Προσέγγιση κέρδους χρονοπρογραμματισμού

Σύμφωνα με την τμηματικά γραμμική και τμηματικά σταθερή προσέγγιση του στιγμιαίου ρυθμού μετάδοσης ζεύξης στην Ενότητα (§2.4.1), στη (2.7), ο στιγμιαίος ρυθμός μετάδοσης είναι γραμμικός μέχρι $x_i = x_c$, και μετά παραμένει σταθερός.

Τότε ο μέσος ρυθμός μετάδοσης ζεύξης για ένα χρήστη με μέση τιμή SNR $\bar{x}_i = x_c$

προσεγγίζεται ως εξής $\bar{r}_i(1) \approx \int_0^\infty \tilde{h}(\bar{x}_i, y) d\hat{F}(y) = \beta \bar{x}_i \int_0^1 y d\hat{F}(y) + \beta \bar{x}_i (1 - \hat{F}(1))$.

Ακολουθώντας τις ιδιότητες της ολοκλήρωσης κατά μέρη στο πρώτο όρο του

αθροίσματος, $\beta \bar{x}_i \int_0^1 y d\hat{F}(y) = \beta \bar{x}_i \left[y \hat{F}(y) \right]_0^1 - \beta \bar{x}_i \int_0^1 \hat{F}(y) dy = \beta \bar{x}_i \hat{F}(1) - \beta \bar{x}_i \int_0^1 \hat{F}(y) dy$.

$$\begin{aligned} \text{Επιπλέον, } \beta \bar{x}_i \int_0^1 y d\hat{F}(y) + \beta \bar{x}_i (1 - \hat{F}(1)) &= \beta \bar{x}_i - \beta \bar{x}_i \int_0^1 \hat{F}(y) dy = \\ &= \beta \bar{x}_i \int_0^1 (1 - \hat{F}(y)) dy \end{aligned}$$

Καταλήγουμε λοιπόν στην εξής σχέση για το μέσο ρυθμό ζεύξης του χρήστη με μέση τιμή $\bar{x}_i = x_c$:

$$\begin{aligned} \bar{r}_i(1) &\approx \beta \bar{x}_i \int_0^1 (1 - \hat{F}(y)) dy = \beta \bar{x}_i (1 - f_1), \\ \text{όπου } f_1 &= \int_0^1 \hat{F}(y) dy \end{aligned} \tag{A.1}$$

Ο ρυθμός εξυπηρέτησης της κλάσης των χρηστών με μέση τιμή $\bar{x}_i = x_c$, ισοδύναμα ο αριθμητής στο κέρδος χρονοπρογραμματισμού του Αναλογικά Δίκαιου αλγορίθμου στη (2.5) είναι ίσος με:

$$\bar{r}_i(n) = \int_0^\infty h(\bar{x}_i, y) \hat{F}(y)^n d\hat{F}(y).$$

Για $n \geq 2$, ο ρυθμός εξυπηρέτησης της κλάσης προσεγγίζεται ως εξής:

$$\bar{r}_i(n) \approx \beta \bar{x}_i \int_0^1 y \hat{F}(y)^n d\hat{F}(y) + \beta \bar{x}_i (1 - \hat{F}(1)^n) \approx \beta \bar{x}_i$$

Επομένως το κέρδος χρονοπρογραμματισμού του ΑΔ για τη κλάση- i ισούται με τη βοήθεια της (2.5) και της (A.1) με:

$$g_i(n) \approx g_{PF} = \frac{1}{1 - \int_1^\infty (1 - \hat{F}(y)) dy} \quad (\text{A.2})$$

Για όλους τους χρήστες με $\bar{x}_i < x_c$ ο μέσος ρυθμός μετάδοσης της αντίστοιχης κλάσης είναι ίσος με:

$$\bar{r}_i(1) \approx \beta \bar{x}_i \int_0^{x_c/\bar{x}_i} (1 - \hat{F}(y)) dy = \beta \bar{x}_i (1 - f_{x_c/\bar{x}_i}),$$

$$\text{όπου } f_{x_c/\bar{x}_i} = \int_{x_c/\bar{x}_i}^\infty (1 - \hat{F}(y)) dy$$

Για $n \geq 2$, ο ρυθμός εξυπηρέτησης της αντίστοιχης κλάσης, δηλαδή αριθμητής του κέρδους χρονοπρογραμματισμού του ΑΔ στη σχέση (2.5) προσεγγίζεται ως εξής:

$$\bar{r}_i(n) \approx \beta \bar{x}_i \int_0^{x_c/\bar{x}_i} y \hat{F}(y)^n d\hat{F}(y) + \beta \bar{x}_i \frac{x_c}{\bar{x}_i} (1 - \hat{F}(x_c/\bar{x}_i)^n) \approx \beta \bar{x}_i \frac{x_c}{\bar{x}_i}$$

Επομένως το κέρδος χρονοπρογραμματισμού του ΑΔ για τη κλάση- i ισούται με:

$$g_i(n) \approx \frac{\frac{x_c}{\bar{x}_i}}{1 - \int_{x_c/\bar{x}_i}^\infty (1 - \hat{F}(y)) dy}$$

Όμως, για όλους τους χρήστες με $\bar{x}_i < x_c$ παρατηρείται αριθμητικά ότι

$$\frac{\frac{x_c}{\bar{x}_i}}{1 - \int_{x_c/\bar{x}_i}^\infty (1 - \hat{F}(y)) dy} \approx \frac{1}{1 - \int_1^\infty (1 - \hat{F}(y)) dy} = g_{PF}.$$

Η προσέγγιση είναι απροσδόκητα καλή στα αριθμητικά αποτελέσματα για τη κανονικοποιημένη κατανομή Erlang- m για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου m και για αρκετά χαμηλές τιμές του μέσου SNR $\bar{x}_i < x_c$.

A.2 Προσέγγιση μέσου ρυθμού μετάδοσης ζεύξης

Σύμφωνα με την κανονικοποιημένη κατανομή $\check{F}(y)$ που ορίσαμε στην σχέση (2.9) στην Ενότητα (§2.4.2), ο μέσος ρυθμός μετάδοσης προσεγγίζεται εκ κατασκευής της

$\check{F}(y)$, από τα κάτω, ως εξής: $\bar{r}_i(1) = \int_0^{\infty} h(\bar{x}_i, y) d\hat{F}(y) \geq \int_0^{\infty} h(\bar{x}_i, y) d\check{F}(y)$. Αν

εφαρμόσουμε την ανισότητα Jensen στο δεξιό όρο της ανισότητας, τότε προκύπτει

$\int_0^{\infty} h(\bar{x}_i, y) d\check{F}(y) \leq h\left(\int_0^b \bar{x}_i y d\hat{F}(y) + \bar{x}_i b(1 - \hat{F}(b))\right)$. Ο δεξιός όρος της ανισότητας

ενδέχεται να είναι αρκετά κοντά στο $\bar{r}_i(1)$. Εφαρμόζοντας πάλι ολοκλήρωση κατά

μέρη, $\int_0^b \bar{x}_i y d\hat{F}(y) = \bar{x}_i \left[y\hat{F}(y) \right]_0^b - \bar{x}_i \int_0^b \hat{F}(y) dy$. Επομένως, ο μέσος ρυθμός ζεύξης

μπορεί να προσεγγιστεί από τον παρακάτω τύπο.

$$\bar{r}_i(1) \approx h\left(\bar{x}_i \int_0^b (1 - \hat{F}(y)) dy\right). \quad (\text{A.3})$$

Αριθμητικά θα δούμε ότι η προσέγγιση στην (A.3) είναι απροσδόκητα καλή για την κανονικοποιημένη κατανομή Erlang-m, θέτοντας $b=1$.

A.3 Βέλτιστος ρυθμός εξυπηρέτησης

Ακολουθεί η απόδειξη του **Θεωρήματος 1** στην Ενότητα (§2.5.1). Παίρνοντας την παράγωγο της συνάρτησης $P(\bar{r}_i(n))$ στη (2.12) σε σχέση με το $\bar{r}_i^*(n)$, καταλήγουμε,

$$P'(\bar{r}_i^*(n)) = \frac{\log(2)}{R_0} \frac{\nu(l)}{(1-f_1)} \exp\left(\log(2) \frac{\bar{r}_i^*(n)}{R_0}\right). \quad (\text{A.4})$$

Σύμφωνα με τη (2.14), $\bar{r}_i^*(n)P'(\bar{r}_i^*(n)) = P(\bar{r}_i^*(n)) + P_c n$ και με τη βοήθεια της σχέσης (A.4)

$$\exp\left(\log(2) \frac{\bar{r}_i^*(n)}{R_0} - 1\right) \left(\log(2) \frac{\bar{r}_i^*(n)}{R_0} - 1\right) = \frac{(n(1-f_1)P_c/\nu(l) - 1)}{\exp(1)}.$$

Ισοδύναμα ,

$$W^{-1}\left(\log(2) \frac{\bar{r}_i^*(n)}{R_0} - 1\right) = \frac{(n(1-f_1)P_c/\nu(l) - 1)}{\exp(1)}, \quad (\text{A.5})$$

όπου $W(z)$ είναι η συνάρτηση Lambert που ικανοποιεί τη σχέση $z = W(z)\exp(W(z))$.

A.4 Προσεγγιστικές σχέσεις βέλτιστου ρυθμού εξυπηρέτησης και αντίστοιχης μεταδιδόμενης ισχύος

Ακολουθεί η απόδειξη της **Πρότασης 1** στην Ενότητα (§2.5.1). Στην περίπτωση ενός «κοντινού χρήστη» και $41.19\nu(l) \leq P(l)(1-f_1)$ στη (2.10), τότε μπορούμε να προσεγγίσουμε τη σχέση (2.10) ως εξής: $R_0 \log_2(1+(1-f_1)x(l)) \approx R_0 \log_2((1-f_1)x(l))$ και επιπρόσθετα καταλήγουμε για τη μεταδιδόμενη ισχύ στη (2.12):

$$P(\bar{r}_i(n)) \approx (\exp(\log(2)\bar{r}_i(n)/R_0))\nu(l)/(1-f_1). \quad (\text{A.6})$$

Επειδή $41.19\nu(l) \leq P(l)(1-f_1)$, [H05], $W(z) > \log(z) - \log(\log(z))$ και ο βέλτιστος ρυθμός εξυπηρέτησης στην (A.5) ισούται με:

$$\begin{aligned} \bar{r}_i^*(n) &= R_0 \log_2 \left(\frac{(1-f_1)P_c n}{\nu(l)} \right) - \\ &\frac{R_0}{\log(2)} \log \left(\log \left(\frac{(1-f_1)P_c n}{\nu(l)} \right) \right). \end{aligned} \quad (\text{A.7})$$

Τελικά, αντικαθιστώντας το ρυθμό εξυπηρέτησης στην (A.6) με το βέλτιστο ρυθμό εξυπηρέτησης την (A.7) προκύπτει ότι:

$$P(\bar{r}_i^*(n)) = P_c n / \log \left(\frac{(1-f_1)P_c n}{\nu(l)} \right). \quad (\text{A.8})$$

Στη περίπτωση που $5 \leq \frac{P(l)(1-f_1)}{\nu(l)} < 41.19$, $W(z) < \log(z)$ [H05], και ο βέλτιστος ρυθμός εξυπηρέτησης ισούται με:

$$\bar{r}_i^*(n) \approx R_0 \log_2 \left(\frac{(1-f_1)P_c n}{\nu(l)} \right). \quad (\text{A.9})$$

Τελικά, αντικαθιστώντας το ρυθμό εξυπηρέτησης στην (A.6) με τον βέλτιστο ρυθμό εξυπηρέτησης (A.9) προκύπτει ότι:

$$P(\bar{r}_i^*(n)) = P_c n. \quad (\text{A.10})$$

Στην περίπτωση ενός «απομακρυσμένου» χρήστη, $\frac{P(l)(1-f_1)}{v(l)} \ll 1$ στη (2.10).

Τότε προσεγγίσουμε την στιγμιαία μεταδιδόμενη ισχύ $P(\bar{r}_i(n))$ στη (2.12) με τους δύο πρώτους όρους του αναπτύγματος Taylor. Συγκεκριμένα, η ισχύς $P(\bar{r}_i(n))$ ισούται με:

$$P(\bar{r}_i(n)) = \frac{v(l)}{(1-f_1)} \log(2) \bar{r}_i(n) / R_0 + \frac{v(l)}{(1-f_1)2} (\log(2) \bar{r}_i(n) / R_0)^2. \quad (\text{A.11})$$

Τότε, με τη βοήθεια της (2.14) και της (A.11),

$$\bar{r}_i^*(n) = \frac{R_0}{\log(2)} \sqrt{2 \frac{(1-f_1)}{v(l)} P_c n}. \quad (\text{A.12})$$

Αντικαθιστώντας τον ρυθμό εξυπηρέτησης στην (A.11) με τον βέλτιστο ρυθμό εξυπηρέτησης στην (A.12) έχουμε:

$$P(\bar{r}_i^*(n)) = P_c n + \sqrt{2 \frac{v(l)}{(1-f_1)} P_c n}. \quad (\text{A.13})$$

Παράρτημα Β

Υπολογισμός μεγεθών μακροπρόθεσμης σύγκλισης με χρήση Μερισμού Εξυπηρετητή

Β.1 Κατανομή ενεργών χρηστών για το τροποποιημένο μοντέλο Μερισμού του Εξυπηρετητή με «μόνιμο χρήστη»

Για μια κλάση χρηστών με ρυθμό εξυπηρέτησης $\bar{r}_i(n)$ για κατάσταση συστήματος n η κατανομή του συνόλου των ενεργών χρηστών στο μη τροποποιημένο σύστημα ΜΕ είναι σύμφωνα με την εξίσωση (3.10),

$$\pi(n=k) = \pi(0) \Phi_k (\lambda \sigma)^k,$$

$$\text{όπου } \Phi_k = \frac{1}{\bar{r}_i(1)\bar{r}_i(2)\dots\bar{r}_i(k)}.$$

Εάν θεωρήσουμε ότι υπάρχει πάντα ένας μόνιμος χρήστης, τότε το τροποποιημένο μαρκοβιανό μοντέλο ξεκινάει πάντα από την κατάσταση συστήματος $n=1$. Σύμφωνα με την εξ. (3.10), ο ρυθμός απομάκρυνσης στην κατάσταση $n=k$ είναι ίσος με:

$$\frac{k-1}{k} \frac{\bar{r}_i(k)}{\sigma}$$

Είναι φανερό ότι σε κάθε κατάσταση $n=k$ του τροποποιημένου μοντέλου ΜΕ, ο ρυθμός εξυπηρέτησης είναι $\frac{k-1}{k}$ του ρυθμού εξυπηρέτησης του μη τροποποιημένου μοντέλου, εφόσον ξεκινάμε πάντα με έναν χρήστη παραπάνω. Τότε η κατανομή του συνόλου των ενεργών χρηστών στο τροποποιημένο σύστημα ΜΕ είναι σύμφωνα με την (3.12) ίση με:

$$\pi'(n=k) = k\pi'(n=1)\Phi_k (\lambda \sigma)^{k-1}.$$

Για να βρούμε τη πιθανότητα $\pi(n=1)$, θέτουμε $\sum_{k=1}^{\infty} \pi'(n=k) = 1$.

$$\text{Ισοδύναμα, } \pi'(n=k) = \frac{1}{\sum_{k=1}^{\infty} k \Phi_k (\lambda \sigma)^{k-1}}.$$

Όμως, ο μέσος αριθμός των ενεργών χρηστών του μη τροποποιημένου ΜΕ είναι

$$E[n] = \sum_{k=1}^{\infty} k \pi(0) \Phi_k (\lambda \sigma)^k.$$

Τότε η πιθανότητα $\pi'(n=1) = \frac{\lambda \pi(0)}{E[n]}$ και η κατανομή του τροποποιημένου ΜΕ

$$\text{είναι } \pi'(n=k) = \frac{k}{E[n]} \pi(0) \Phi_k (\lambda \sigma)^k.$$

B.2 Υπεροχή του SEEPO έναντι του ΑΔ αλγορίθμου για το υψηλό καθεστώς εξυπηρέτησης

Ακολουθεί η απόδειξη του **Θεωρήματος 2** στην Ενότητα (§4.3).

Αν $\bar{r}_2(1) = e\bar{r}_1(1)$, με $e > 1$, τότε το συνολικό φορτίο στον Αναλογικά Δίκαιο

Αλγόριθμο ισούται με $\rho = \frac{p_1\lambda\sigma}{\bar{r}_1(1)} + \frac{p_2\lambda\sigma}{e\bar{r}_1(1)} = \frac{\lambda\sigma}{\bar{r}_1(1)} \left(p_1 + \frac{p_2}{e} \right)$.

Τώρα, αν $\rho_H < \rho$, τότε $\rho_H = \frac{p_2\lambda\sigma}{e\bar{r}_1(1)\pi(n_L=0)} < \frac{\lambda\sigma}{\bar{r}_1(1)} \left(p_1 + \frac{p_2}{e} \right)$ και

$e > \frac{p_2}{p_1} \left(\frac{1}{\pi(N_L=0)} - 1 \right) = \frac{p_2}{p_1} \frac{\rho_1/g_{PF}}{1-\rho_1/g_{PF}}$. Όμως, από την εξ. (3.34),

$\frac{\rho_1}{1-\rho_1/g_{PF}} = E(n_L)$. Η ποσότητα αυτή είναι ο μέσος αριθμός των ενεργών χρηστών

στο χαμηλό σύστημα εξυπηρέτησης του SEEPO, άρα $e > \frac{p_2}{p_1} \frac{E(n_L)}{g_{PF}}$.

Λόγω της μορφής της κατανομής των ενεργών χρηστών σε σύστημα χρονοπρογραμματισμού του Αναλογικά Δίκαιου αλγορίθμου, ο μέσος αριθμός των ενεργών χρηστών του χαμηλού συστήματος εξυπηρέτησης $E(n_L)$ κυμαίνεται σε πολύ χαμηλές τιμές κάτω της μονάδας και αυξάνει εκθετικά σε πολύ υψηλές τιμές ρυθμού άφιξης ροών λ . Επιπλέον, $p_2 < p_1$, αφού οι απομακρυσμένοι χρήστες είναι

πολύ περισσότεροι από τους κοντινούς, ισοδύναμα $\frac{p_2}{p_1} < 1$. Επομένως, σχεδόν πάντα

$e > \frac{p_2}{p_1} \frac{E(n_L)}{g_{PF}}$ και άρα $\rho_H < \rho$, εξασφαλίζοντας την αναγκαία συνθήκη, έτσι ώστε οι

κοντινοί χρήστες στο σύστημα εξυπηρέτησης του SEEPO να υπερτερούν σε επίδοση έναντι του ΑΔ αλγορίθμου.

B.3 Η βέλτιστη πολιτική προτεραιότητας εξυπηρέτησης κλάσης είναι αυτή του SEEPO

Ακολουθεί η απόδειξη του **Λήμματος 1** στην Ενότητα (§4.3).

Στην περίπτωση που η απόλυτη προτεραιότητα δίνεται στους κοντινούς χρήστες, τότε το υψηλό καθεστώς εξυπηρέτησης είναι απομονωμένο, με φορτίο $\rho_H = \rho_2$ και ο ρυθμός εξυπηρέτησης του χαμηλού καθεστώτος ισούται με $\rho_L = \rho_1/\pi(n_H = 0)$. Το υψηλό καθεστώς θα υπερέχει πάντα έναντι του Αναλογικά Δίκαιου, αφού πάντα $\rho_H < \rho$.

Στην περίπτωση, όμως, του χαμηλού καθεστώτος, αυτό θα υπερέχει μόνο αν $\rho_L < \rho$. Ισοδύναμα, αν $\rho_L = \frac{p_1 \lambda \sigma}{\bar{r}_1(1) \pi(n_H = 0)} < \frac{\lambda \sigma}{\bar{r}_1(1)} \left(p_1 + \frac{p_2}{e} \right)$ τότε

$$e < \frac{p_2}{p_1} \frac{1}{1/\pi(n_H = 0) - 1} \quad . \quad \text{Επιπλέον,} \quad 1/\pi(n_H = 0) - 1 = \frac{\rho_2/g_{PF}}{1 - \rho_2/g_{PF}} = \frac{E(n_H)}{g_{PF}} \quad \text{και}$$

$$e < \frac{p_2}{p_1} \frac{g_{PF}}{E(n_H)} \quad . \quad \text{Ομως,} \quad \frac{p_2}{p_1} > 1 \quad \text{και για μέτριες τιμές φορτίου} \quad E(n_H) \geq 1, \quad \text{τότε η}$$

αναγκαία συνθήκη $\rho_L < \rho$ δεν ισχύει αφού πάντα $e > 1$.

Σε υψηλές τιμές φορτίου, οι απομακρυσμένοι χρήστες σε σύστημα απόλυτης προτεραιότητας εξυπηρέτησης των κοντινών χρηστών, πάντα θα έχουν χαμηλότερη επίδοση σε σύγκριση με τον Αναλογικά Δίκαιο Αλγόριθμο. Επομένως, η πολιτική επιλογής του SEEPO, που δίνει απόλυτη προτεραιότητα στο χαμηλό σύστημα εξυπηρέτησης είναι η βέλτιστη, προκειμένου να βελτιωθεί η επίδοση και των δυο συστημάτων εξυπηρέτησης έναντι του Αναλογικά Δίκαιου Αλγορίθμου.

B.4 Χωρητικότητα του SEEPO

Ακολουθεί η απόδειξη της **Πρότασης 4** στην Ενότητα (§4.3).

Θεωρούμε ξανά $\bar{r}_2(1) = e\bar{r}_1(1)$. Η συνθήκη ευστάθειας για το σύστημα χρονοπρογραμματισμού του SEEPO στο υψηλό καθεστώς είναι $\rho_H < g_{PF}$.

$$\text{Ισοδύναμα, } \rho_2/\pi(n_L=0) < g_{PF} \text{ ή } \frac{\lambda\sigma p_2}{\bar{r}_1(1)e \left[1 - \frac{\lambda\sigma p_1}{\bar{r}_1(1)g_{PF}} \right]} < g_{PF}.$$

$$\text{Επομένως, } \lambda\sigma < g_{PF} \bar{r}_1(1)/(p_2/e + p_1).$$

Αντίστοιχα, η συνθήκη ευστάθειας για το απομονωμένο χαμηλό καθεστώς είναι $\rho_L < g_{PF}$ και ισοδύναμα $\lambda\sigma < g_{PF} \bar{r}_1(1)$.

Επειδή ο SEEPO αποτελείται από δυο θαλάμους εξυπηρέτησης, τότε η μέγιστη χωρητικότητα του συστήματος, ήτοι το μέγιστο γινόμενο $\lambda\sigma$ που μπορεί να εξυπηρετήσει συνολικά ο SEEPO, είναι το ελάχιστο των μέγιστων χωρητικοτήτων κάθε καθεστώτος ξεχωριστά, δηλαδή, $\min\{g_{PF}\bar{r}_1(1)/(p_2/e + p_1), g_{PF}\bar{r}_1(1)\} = g_{PF}\bar{r}_1(1)$, αφού $(p_2/e + p_1) < 1$ επειδή $e > 1$.

Στην περίπτωση του Αναλογικά Δίκαιου Αλγορίθμου η χωρητικότητα του συστήματος είναι με τη βοήθεια της εξ. (3.20) ίση με:

$$\left(\frac{p_1}{\bar{r}_1(1)g_{PF}} + \frac{p_2}{\bar{r}_2(1)g_{PF}} \right)^{-1}$$

$$\text{Όμως, } \left(\frac{p_1}{\bar{r}_1(1)g_{PF}} + \frac{p_2}{\bar{r}_2(1)g_{PF}} \right)^{-1} = \left(\frac{p_1}{\bar{r}_1(1)g_{PF}} + \frac{p_2}{\bar{r}_1(1)eg_{PF}} \right)^{-1}$$

$$\begin{aligned} \text{και } \left(\frac{p_1}{\bar{r}_1(1)g_{PF}} + \frac{p_2}{\bar{r}_1(1)eg_{PF}} \right)^{-1} &= \left(\frac{1}{\bar{r}_1(1)g_{PF}} \left(p_1 + \frac{p_2}{e} \right) \right)^{-1} = \\ &= \frac{\bar{r}_1(1)g_{PF}}{p_1 + \frac{p_2}{e}}, \text{ μεγαλύτερη από τη χωρητικότητα του SEEPO.} \end{aligned}$$

Παράρτημα Γ

Χαρακτηριστικά του Μοντέλου Μερισμού του Εξυπηρετητή για τον Αναλογικά Δίκαιο Αλγόριθμο

Γ.1 Κατανομή του συνόλου των ενεργών χρηστών σε σύστημα εξυπηρέτησης Αναλογικά Δίκαιου αλγόριθμο

Ακολουθεί η απόδειξη της **Πρότασης 5** στην Ενότητα (§5.4).

Σύμφωνα με την εξίσωση (3.12) η κατανομή των ενεργών χρηστών σε σύστημα χρονοπρογραμματισμού δίδεται από τη σχέση:

$$\pi(n=k) = \pi(0) \Phi_k (\lambda \sigma)^k,$$

$$\text{όπου } \Phi_k = \frac{1}{(\bar{r}_i(1))^k (g_{PF})^{k-1}}$$

$$\text{και } \pi(0) = 1 / \left(1 + \sum_{j=1}^{\infty} \prod_{m=1}^j \left(\frac{\lambda \sigma}{g_s \bar{r}_i(m)} \right) \right).$$

Η παράμετρος g_s δίδεται από την παρακάτω σχέση:

$$g_s = \begin{cases} 1, & n < 2, \\ g_{PF}, & n \geq 2, \end{cases} \quad (\Gamma.1)$$

και εκφράζει το γεγονός ότι για $n=1$ δεν υπάρχει κέρδος χρονοπρογραμματισμού.

Συνεχίζοντας με πράξεις,

$$\begin{aligned} A &= 1 + \sum_{j=1}^{\infty} \prod_{m=1}^j \left(\frac{\lambda \sigma}{g_s \bar{r}_i(m)} \right) = 1 + \frac{\lambda \sigma}{\bar{r}_i(1)} + \sum_{j=2}^{\infty} \left(\frac{\lambda \sigma}{\bar{r}_i(1) g_{PF}} \right)^j = \\ &= 1 + \rho g_{PF} + \sum_{j=2}^{\infty} (\rho)^j, \text{ όπου } \rho = \frac{\lambda \sigma}{\bar{r}_i(1) g_{PF}}. \end{aligned}$$

Αντικαθιστούμε στη σχέση A , τον όρο ρg_{PF} με $\rho + \rho(g_{PF} - 1)$.

Τότε

$$A = 1 + \sum_{j=1}^{\infty} (\rho)^j + \rho(g_{PF} - 1)$$

$$\text{Ακολούθως, } A = \frac{1}{1-\rho} + \rho g_{PF} - \rho$$

$$A = \frac{1 + \rho g_{PF} (1-\rho) - \rho(1-\rho)}{1-\rho}$$

$$A = \frac{1 + \rho g_{PF} - \rho^2 g_{PF} - \rho + \rho^2}{1-\rho}$$

$$\text{και τελικά } A = \frac{1 + \rho g_{PF} - \rho + \rho^2 (1 - g_{PF})}{1-\rho}$$

Το κέρδος χρονοπρογραμματισμού είναι $g_{PF} \leq 1.58$ (η ισότητα σε περίπτωση Rayleigh) και ο όρος $\rho^2 (1 - g_{PF}) \approx 0$. Επομένως,

$$A \approx \frac{1 + \rho g_{PF} - \rho}{1-\rho}$$

Άρα, η πιθανότητα να μην είναι κανένας χρήστης στο θάλαμο εξυπηρέτησης δίδεται από τη σχέση:

$$\pi(0) = \frac{1}{A} = \frac{1-\rho}{1 + \rho g_{PF} - \rho} \quad (\Gamma.2)$$

Τελικά, η κατανομή των ενεργών χρηστών σε σύστημα χρονοπρογραμματισμού Αναλογικά Δίκαιου Αλγορίθμου δίδεται από τη σχέση:

$$\pi(n=k) = \frac{1-\rho}{1 + \rho g_{PF} - \rho} g_{PF} \rho^k \quad (\Gamma.3)$$

Γ.2 Πιθανότητα να υπάρχει τουλάχιστον ένας ενεργός χρήστης στο σύστημα εξυπηρέτησης του Αναλογικά Δίκαιου Αλγορίθμου

Ακολουθεί η απόδειξη του **Λήμματος 2** στην Ενότητα (§5.4).

Σύμφωνα με την (Γ.2) η πιθανότητα να μην υπάρχει κανένας χρήστης στο σύστημα χρονοπρογραμματισμού του Αναλογικά Δίκαιου Αλγορίθμου είναι ίση με

$$\pi(0) = \frac{1 - \rho}{1 + \rho g_{PF} - \rho}.$$

Η πιθανότητα να υπάρχει ένα τουλάχιστον ενεργός χρήστης είναι ίση με:

$$\pi(n > 0) = 1 - \pi(0).$$

Συνεπάγεται, ότι

$$\pi(n > 0) = 1 - \frac{1 - \rho}{1 + \rho g_{PF} - \rho} = \frac{1 + \rho g_{PF} - \rho - 1 + \rho}{1 + \rho g_{PF} - \rho}$$

Επομένως,

$$\pi(n > 0) = \frac{\rho g_{PF}}{1 + \rho g_{PF} - \rho}$$

Βιβλιογραφία

- [AMJ⁺07] A. Anand, C. Manikopoulos, Q. Jones, C. Borcea, “A Quantitative Analysis of Power Consumption for Location-Aware Applications on Smart Phones,” *IEEE ISIE*, pp.1986-1991, Vigo, Spain, 2007.
- [AML⁺04] D. Avidor, S. Mukherjee, J. Ling, and C. Papadias, “On some properties of the proportional fair scheduling policy,” in *Proc. IEEE Symp. on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC’04)*, vol. 2,(Barcelona, Spain), pp. 853–858, Sept. 2004.
- [And07] J.G. Andrews, “Seven ways that HetNets are a cellular paradigm shift,” in *Communications Magazine, IEEE* , vol.51, no.3, pp.136-144, March 2013
- [ATN⁺14] A. Aijaz, M. Tshangini, M. R. Nakhai, Xiaoli Chu and A. H. Aghvami, "Energy-Efficient Uplink Resource Allocation in LTE Networks With M2M/H2H Co-Existence Under Statistical QoS Guarantees," in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 62, no. 7, pp. 2353-2365, July 2014.
- [AV13] A. Asadi and V. Mancuso, “A survey on opportunistic scheduling in wireless communications,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 15, no. 4, pp. 1671–1688, 2013.
- [B04] T. Bonald, “A score-based opportunistic scheduler for fading radio channels,” in *Proc. 5th Eur. Wireless Conf.*, Feb. 2004.
- [B05] T. Bonald, “Flow-Level Performance Analysis of Some Opportunistic Scheduling Algorithms,” *Euro. Trans. Telecommun.*, vol. 16, no. 1, Jan. 2005, pp. 65–75.
- [BBG⁺00] P. Bender, P. Black, M. Grob, R. Padovani, N. Sindhushayana and A. Viterbi, “CDMA/HDR: A bandwidth-efficient high-speed wireless data service for nomadic users”. *IEEE Commun. Magazine*, 70–77, July 2000.
- [BBP04] Bonald T, Borst S, Proutiere A. How mobility impacts the flow-level performance of wireless data systems. In *Proceedings of IEEE INFOCOM*, 2004.
- [BH07] S.C. Borst and N. Hegde, ”Integration of streaming and elastic traffic in wireless networks,” *Proc. IEEE Infocom*, Anchorage, AK, May 2007.
- [BH09] T. Bonald, N. Hegde, “Capacity Gains of Some Frequency Reuse Schemes in OFDMA Networks,” *Global Telecommunications Conference, 2009. GLOBECOM 2009. IEEE* , vol., no., pp.1,6, Nov. 30 2009-Dec. 4 2009
- [BJ04] F. Berggren and R. Jantti, “Asymptotically fair transmission scheduling over fading channels,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 3, no. 1, pp. 326–336, Jan. 2004.
- [BP02] T. Bonald, A. Proutiere: “Insensitivity in processor-sharing networks”, *Perform. Evaluat.* 49 (2002) 193–209.
- [BP03] T. Bonald and A. Proutiere, “Wireless downlink channels: user performance and cell dimensioning”, *Proc. of ACM MOBICOM*, 2003.

- [BP04] T. Bonald and A. Proutiere. 2004. On Stochastic Bounds for Monotonic Processor Sharing Networks. *Queueing Syst. Theory Appl.* 47, 1/2 (May 2004), 81-106.
- [BP06] T. Bonald and A. Proutiere, "A queueing analysis of data networks," in *Queueing Networks: A Fundamental Approach*, Boucherie and Van Dijk, Eds., 2006.
- [BPN⁺09] Boudreau G., Panicker J., Ning Guo, Rui Chang, Neng Wang, Vrzic S., "Interference coordination and cancellation for 4G networks," *Communications Magazine, IEEE*, vol.47, no.4, pp.74, 81, April 2009.
- [C19] Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2015–2020, White paper.
- [C55] D.R. Cox. A use of complex probabilities in the theory of stochastic processes. Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, 51:313{319, 1955.
- [CEG97] M. V. Clark, V. Erceg, and L. J. Greenstein, "Reuse efficiency in urban microcellular networks, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 46, pp. 279-288, May 1994.
- [CB07] J. G. Choi and S. Bahk, "Cell-throughput analysis of the proportional fair scheduler in the single-cell environment," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 56, no. 2, pp. 766–778, Mar. 2007.
- [CH10] A. Carroll and G. Heiser. 2010. An analysis of power consumption in a smartphone. In *Proceedings of the 2010 USENIX conference on USENIX annual technical conference (USENIXATC'10)*. USENIX Association, Berkeley, CA, USA, 21-21.
- [COO81] R. B. Cooper, Introduction to Queuing Theory, 2nd ED. New York: Elsevier North Holland, 1981.
- [CR13] Hung-Bin Chang, Rubin I., "Optimal fair downlink fractional frequency reuse for cellular wireless networks," *Globecom Workshops (GC Wkshps), 2013 IEEE*, vol., no., pp.269,274, 9-13 Dec. 2013.
- [DA14] H. S. Dhillon and J. G. Andrews, "Downlink Rate Distribution in Heterogeneous Cellular Networks under Generalized Cell Selection," in *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 3, no. 1, pp. 42-45, February 2014.
- [DRW09] Doppler, K., Rinne M., Wijting C., Ribeiro C.B., Hugl K., "Device-to-device communication as an underlay to LTE-advanced networks," *Communications Magazine, IEEE*, vol.47, no.12, pp.42,49, Dec. 2009.
- [EL04] T. Edler and S. Lundberg, "Energy Efficiency Enhancements in Radio Access Networks," *Ericsson Review*, 2004, <http://www.ericsson.com/ericsson/corpinfo/publications/review/200401/files/2004015.pdf>
- [EMI⁺12] Erturk, M.C., Mukherjee S., Ishii H., Arslan H., "Distributions of Transmit Power and SINR in Device-to-Device Networks," *Communications Letters, IEEE*, vol.17, no.2, pp.273, 276, February 2013.
- [FB11] M. Feuillet T. Bonald. Network performance analysis. Wiley, 2011.
- [FBP⁺01] S. Ben Fredj, T. Bonald, A. Proutiere, G. R'egni'e, and J.W. Roberts, Statistical bandwidth sharing: A study of congestion at flow level, in: *Proc of ACM SIGCOMM* (2001).
- [FFM⁺11] A. Fehske, G. Fettweis, J. Malmudin, and G. Bicz'ok, "The global footprint of mobile communications: The ecological and economic

- perspective,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 49, no. 8, pp. 55–62, Aug. 2011.
- [FMM⁺11] Frenger, P. Moberg, J. Malmudin, Y. Jading, and I. Godor, “Reducing Energy Consumption in LTE with Cell DTX,” in *Proceedings of the IEEE VTC 2011-Spring*, 2011.
- [GHY⁺09] G. Miao, N. Himayat, Ye (Geoffrey) Li, and A. Swami., “Cross-Layer Optimization for Energy-Efficient Wireless Communications: A Survey”, *Wireless Commun. and Mobile Computing*, vol. 9, 2009, pp. 529–42.
- [GK12] I. Giannoulakis, K. Kontovasilis, and N. Mitrou, “Balancing the performance-fairness tradeoff for wireless network access through channel-aware opportunistic schedulers under heterogeneous radio conditions”, NCSR "Demokritos" Tech. Rep., 2012 (submitted for publication). Accessible at <http://users.iit.demokritos.gr/~giannoul/GKM-opp-sched-ps-2012.pdf>
- [GN67] W.J. Gordon, G.F. Newell, Closed queuing systems with exponential servers, *Oper. Res.* 15 (1967) 254–265.
- [GSM09] GSMA Development Fund, “Green Power for Mobile: Top ten findings,” 2009.
- [GSM15] GSMA, The Mobile Economy 2015. Available at http://gsmamobileeconomy.com/global/GSMA_Global_Mobile_Economy_Report_2015.pdf. Accessed on November 25, 2015.
- [GTS07] Geirhofer S., Lang Tong, Sadler B.M., “COGNITIVE RADIOS FOR DYNAMIC SPECTRUM ACCESS - Dynamic Spectrum Access in the Time Domain: Modeling and Exploiting White Space,” *Communications Magazine, IEEE* , vol.45, no.5, pp.66,72, May 2007.
- [H00] J. M. Holtzman, “CDMA forward link waterfilling power control,” in *Proc. VTC 2000*, vol. 3, pp. 1663-1667, 2000.
- [H05] M. Hassani. Approximation of the Lambert W function. *RGMIA Research Report Collection*, 8, 2005.
- [HAH11] H. Holtkamp, G. Auer and H. Haas, “On Minimizing Base Station Power Consumption,” *Vehicular Technology Conference (VTC Fall), 2011 IEEE* , vol., no., pp. 1-5, Sept. 2011.
- [Jac63] J. Jackson, “Jobshop-like queueing systems”. *Management sci.* 10, 1,1963, 131-142.
- [JC14] J. Choi, “Energy Efficient Power Control in the Low Rate Regime,” *Communications Letters, IEEE* , vol.18, no.2, pp.321,324, February 2014
- [JPP00] A. Jalali, R. Padovani, and R. Pankaj, “Data throughput of CDMA-HDR a high efficiency-high data rate personal communication wireless system,” in *Proc. VTC 2000*, pp. 1854–1858, 2000.
- [K64] L. Kleinrock, L., *Communication Nets; Stochastic Message Flow and Delay*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1964.
- [K67] L. Kleinrock, Time-shared systems: A theoretical treatment. *J. ACM* 14, 2 (April 1967), 242-261.
- [K76] L. Kleinrock, *Queuing Theory – Vol. 1*, Wiley, 1976.
- [L85] Lee, W. C Y, “Estimate of local average power of a mobile radio signal,” *Vehicular Technology, IEEE Transactions on* , vol.34, no.1, pp.22,27, Feb 1985.

- [LAA14] A. Laya, L. Alonso and J. Alonso-Zarate, "Is the Random Access Channel of LTE and LTE-A Suitable for M2M Communications? A Survey of Alternatives," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 16, no. 1, pp. 4-16, First Quarter 2014.
- [LL08] Liu and Kin K. Leung, "Proportional Fair Scheduling: Analytical Insight under Rayleigh Fading Environment," in *Proc. IEEE WCNC*. Las Vegas, March/April 2008.
- [LZX⁺11] Xin Li, Qianchuan Zhao, Xiaohong Guan, Lang Tong, "Optimal Cognitive Access of Markovian Channels under Tight Collision Constraints," *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on* , vol.29, no.4, pp.746,756, April 2011.
- [MHL⁺08] G. Miao, N. Himayat, Y. Li, and D. Bormann, "Energy efficient design in wireless OFDMA", in *Proc. IEEE ICC*, Beijing, China, 2008.
- [MHL10] G. Miao, N. Himayat, Y. Li, "Energy-efficient link adaptation in frequency-selective channels," *IEEE Transactions on Communications*, vol.58, no.2, pp.545, 554, February 2010
- [MJ99] Massoulie, L. and J. Roberts (1999). "Bandwidth sharing: objectives & algorithms", *IEEE Infocom* 1999, pp. 1395-1403.
- [NXA⁺15] Namyoon Lee, Xingqin Lin, Andrews J.G., Heath R.W., "Power Control for D2D Underlaid Cellular Networks: Modeling, Algorithms, and Analysis," *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on* , vol.33, no.1, pp.1, 13, Jan.2015.
- [NGG⁺11] T.D. Novlan, R.K Ganti, A. Ghosh and J.G. Andrews, "Analytical Evaluation of Fractional Frequency Reuse for OFDMA Cellular Networks," *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol.10, no.12, pp. 4294-4305, Dec. 2011.
- [PDF⁺01] S. Parkvall, E. Dahlman, P. Frenger, P. Beming, M. Persson, "The high speed packet data evolution of WCDMA". *Proc. of the 12th IEEE PIMRC*, 2001.
- [R01] Jim W.Roberts: "Traffic Theory and the Internet" *IEEE Communications Magazine*, January 2001, pp. 94-99.
- [SA12] M.Z. Shakir, M.S. Alouini, "On the area spectral efficiency improvement of heterogeneous network by exploiting the integration of macro-femto cellular networks," in *Communications (ICC), 2012 IEEE International Conference on* , vol., no., pp.5695-5700, 10-15 June 2012
- [SaP15] S. Sagkriotis, A. D. Panagopoulos, "Optimal FFR Policies: Maximization of Traffic Capacity and Minimization of Base Station's Power Consumption", *IEEE Wireless Communication Letters*, 2015.
- [SB05] S. C. Borst, "User-level performance of channel-aware scheduling algorithms in wireless data networks," *IEEE Trans. Netw.*, vol. 13, no. 3, pp. 636–647, June 2005.
- [SDA13] S. Singh, H. S. Dhillon and J. G. Andrews, "Offloading in Heterogeneous Networks: Modeling, Analysis, and Design Insights," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 12, no. 5, pp. 2484-2497, May 2013.
- [SGB05] C. Shuguang, A. Goldsmith, A Bahai, "Energy-constrained modulation optimization", *IEEE Trans. On Wireless Commun.*, vol.4, no.5, pp. 2349-2360, Sept.2005.

- [SKP12] S. Sagkriotis, K. Kontovassilis, A. D. Panagopoulos, "Proportional Fair Scheduling Gains for AMC-Aware Systems under Heterogeneous Radio Conditions", *IEEE Communication Letters*, Dec. 2012.
- [SP15] S. Sagkriotis, A. D. Panagopoulos, "Energy Efficiency Improvement of Mobile Terminals exploiting Opportunistic Scheduling and Upper Layers' Queuing Dynamics", *ISWCS'2015*, Brussels, Belgium, 2015.
- [TR10] "Smart grid traffic behaviour discussion," Sophia-Antipolis, France, TR R2-102340, 2010.
- [TSA12] H. Tabassum, M.Z. Shakir, M. Alouini, "Area green efficiency (AGE) of two tier heterogeneous cellular networks," in *Globecom Workshops (GC Wkshps), 2012 IEEE*, vol., no., pp.529-534, 3-7 Dec. 2012.
- [YA06] L. Yang and M.-S. Alouini, "Performance analysis of multiuser selection diversity," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 55, no. 6, pp. 1848-1861, Nov. 2006.
- [YDR⁺11] Chia-Hao Yu, Doppler K., Ribeiro C.B., Tirkkonen O., "Resource Sharing Optimization for Device-to-Device Communication Underlying Cellular Networks," *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol.10, no.8, pp.2752,2763, August 2011.
- [YJB11] Sung-Guk Yoon, Changhee Joo, and Saewoong Bahk. 2011. Energy-efficient opportunistic scheduling schemes in wireless networks. *Comput. Netw.* 55, 9 (June 2011), 2168-2175.
- [YSC⁺04] Seokyun Yoon, Changho Suh, Youngkwon Cho, Park D.S., "Orthogonal frequency division multiple access with an aggregated sub-channel structure and statistical channel quality measurement," *Vehicular Technology Conference, 2004. VTC2004-Fall. 2004 IEEE 60th*, vol.2, no., pp.1023,1027 Vol. 2, 26-29 Sept. 2004.
- [VTL02] P. Viswanath, D. Tse and R. Laroia, "Opportunistic beamforming using dumb antennas". *IEEE Trans. on Information Theory* (48) 1277–1294, 2002.
- [WWZ⁺12] I J. Wu, Y. Wu, S. Zhou, Z. Niu, "Traffic-aware power adaptation and base station sleep control for energy-delay tradeoffs in green cellular networks," *Global Communications Conference (GLOBECOM), 2012 IEEE*, vol., no., pp.3171,3176, 3-7 Dec. 2012
- [WZN13] J. Wu, S. Zhou, Z. Niu, "Traffic-Aware Base Station Sleeping Control and Power Matching for Energy-Delay Tradeoffs in Green Cellular Networks," *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol.12, no.8, pp.4196,4209, August 2013
- [ZCX12] X. Zhikun, G.Y. Li, Chenyang Yang, Zhu Xiaolong, "Throughput and Optimal Threshold for FFR Schemes in OFDMA Cellular Networks," *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol.11, no.8, pp.2776,2785, Aug. 2012.
- [ZHW⁺12] K. Zheng, F. Hu, W. Wang, W. Xiang and M. Dohler, "Radio resource allocation in LTE-advanced cellular networks with M2M communications," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, no. 7, pp. 184-192, July 2012.
- [ZS07] Zhang Q.T., Song S.H., "Exact Expression for the Coherence Bandwidth of Rayleigh Fading Channels," *Communications, IEEE Transactions on*, vol.55, no.7, pp.1296,1299, July 2007.

Βιογραφικό Σημείωμα

Προσωπικά στοιχεία

Όνοματεπώνυμο: Σταύρος Σαγκριώτης

Διεύθυνση Κατοικίας: Παύλου Κουντουριώτη 16

Καισαριανή

16122 Αθήνα

Κινητό Τηλέφωνο: 6972608460

Email: ssagri@mobile.ntua.gr

Ημερομηνία γέννησης: 30 - 12 - 1982

Εκπαίδευση και Κατάρτιση

2000 – Γενικός Βαθμός Απολυτηρίου Ενιαίου Λυκείου, Άριστα, 19

2000 - 2005 – Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, προπτυχιακές σπουδές, βαθμός πτυχίου 7.96

2005 - 2008 – Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, μεταπτυχιακές σπουδές στο Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών «Συστήματα Επικοινωνιών και Δικτύων», βαθμός πτυχίου 7.45

2009 - 2015 - Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Εκπόνηση Διδακτορικής Διατριβής, Επιβλέπων της Διατριβής: Επίκουρος Καθηγητής Αθανάσιος Παναγόπουλος

Τίτλος Διατριβής: «Διαστρωματική Αλληλεπίδραση και Βελτιστοποίηση σε Ευρυζωνικά Ραδιοδίκτυα πέραν της 3^{ης} Γενιάς».

Επιστημονικά Ενδιαφέροντα

Μοντελοποίηση και Ανάλυση Επίδοσης Συστημάτων με Στοχαστικές μεθόδους και Προσομοίωση σε Ασύρματα Δίκτυα Επικοινωνιών, Θεωρία Αναμονής, Εφαρμοσμένες Πιθανότητες και Στατιστική, Διαχείριση Πόρων.

Διακρίσεις

2003 – Για τη φοίτησή μου στο (1^ο Έτος) στο Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών του ΕΚΠΑ, μου απονεμήθηκε Βραβείο και Υποτροφία από το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών (ΙΚΥ).

2009 – Υποτροφία Δημοκρίτου για εκπόνηση Διδακτορικής Διατριβής

2015 –Best Paper Award IEEE ISWCS 2015 στο Συνέδριο IEEE ISWSC για τη δημοσίευση “S. Sagkriotis, A. D. Panagopoulos, “Energy Efficiency Improvement of Mobile Terminals exploiting Opportunistic Scheduling and Upper Layers' Queuing Dynamics”, ISWCS'2015, Brussels, Belgium, 2015”.

<http://www.iswcs2015.org/index.php/program/awards>

<http://www.ece.ntua.gr/el/announcements/60-awards-honours/1160-panagopoulos-awards>

Δημοσιεύσεις

“Proportional Fair Scheduling Gains for AMC-Aware Systems under Heterogeneous Radio Conditions,” *Communications Letters, IEEE*, vol.16, no.12, pp.1984,1987, December 2012.

“Optimal FFR Policies: Maximization of Traffic Capacity and Minimization of Base Station’s Power Consumption” *Wireless Communications Letters, IEEE* , vol. PP, no.99, pp.1-1, October 2015

“Energy Efficiency Improvement of Mobile Terminals exploiting Opportunistic Scheduling and Upper Layers' Queuing Dynamics”, ISWCS'2015, Brussels, Belgium, 2015”.

“An ad-hoc emergency network for crisis events,” *Future Network and Mobile Summit (Future Network Summit)*, 2013, vol., no., pp.1,12, 3-5 July.

“Coverage and outage capacity evaluation in 5G millimeter wave cellular systems: impact of rain attenuation,” in *Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2015 9th European Conference on, vol., no., pp.1-5, 13-17 April 2015.

Book Chapter: On the Design of Energy Efficient Wireless Access Networks: A Cross Layer Approach, Book Chapter in “Green Networking and Communications”, CRC PRESS, January 2014.

Book Chapter: Future M2M Communication Networks: Spectrum Sharing, Random Access and Connectivity, in Next Generation Mobile Communication Systems, IGI, August 2015.

Επαγγελματική εμπειρία

2005 - 2008 – βοηθός εργαστηρίου στο μάθημα «Ηλεκτρονική και εφαρμογές στην Πληροφορική» στο εργαστήριο ηλεκτρονικής του τμήματος Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών.

2009 – 2015 – βοηθός εργαστηρίου στο μάθημα «Εισαγωγή στις Τηλεπικοινωνίες» στο εργαστήριο Κινητών Ραδιοεπικοινωνιών στη Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών.

2012 – 2013 - Συμμετοχή στο Ευρωπαϊκό Πρόγραμμα FP7 E-Sponder. A *holistic* approach towards the development of the first responder of the future.

<http://www.e-sponder.eu/Default.aspx?id=266&nt=19&lang=1>

2014 – 2015- Συμμετοχή στο Πρόγραμμα «FLAME- Flexible Radio Communication Optimization Framework and Applications» στα πλαίσια της χρηματοδότησης του «Αριστεία II»

Γνώσεις προγραμματισμού

Άριστες γνώσεις Προγραμματισμού σε C και ικανοποιητικές σε C++

Ικανοποιητικές γνώσεις Προγραμματισμού Συστήματος σε Linux/Unix. Inter-process communication (IPC) σε C.

Ικανοποιητικές γνώσεις σε σχεδίαση ιστοσελίδων σε PHP-MySQL αλληλεπιδραστικό περιβάλλον

Άριστες γνώσεις Προγραμματισμού σε Matlab. Εφαρμογές τόσο σε Σήμα και Εικόνα στο Matlab toolbox.

Ξένες Γλώσσες

Ιούνιος 98 – Τίτλος διπλώματος στην αγγλική “Certificate of Proficiency in English”, με βαθμό “C”

Ιούνιο 96 – Τίτλος διπλώματος στην αγγλική “First Certificate” (Lower) Cambridge University με βαθμό “B”

Σεπτέμβριος 98 – Τίτλος διπλώματος στη γερμανική “Zentrale Mittelstufenprüfung” (Mittelstufe) με βαθμό “befriedigend“

Μάρτιος 97 – Δίπλωμα στη γερμανική “Zertifikat als Fremdsprache” (Grundstufe), με βαθμό “gut”