



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ &
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΔΙΚΩΝ

Μηχανισμοί Διαχείρισης Ραδιοπόρων για Σύγχρονα
Δίκτυα Κινητών Επικοινωνιών πέραν της 3^{ης} γενιάς

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

του

ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ Ι. ΚΟΜΝΑΚΟΥ

Διπλωματούχου Ηλεκτρολόγου Μηχανικού &
Μηχανικού Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2010



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ &

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Μηχανισμοί Διαχείρισης Ραδιοπόρων για Σύγχρονα Δίκτυα Κινητών Επικοινωνιών πέραν της 3^{ης} γενιάς

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

του

ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ Ι. ΚΟΜΝΑΚΟΥ

Διπλωματούχου Ηλεκτρολόγου Μηχανικού &
Μηχανικού Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Συμβουλευτική Επιτροπή: Φίλιππος Κωνσταντίνου
Μιχαήλ Θεολόγου
Ευστάθιος Συκάς

.....
Φ. Κωνσταντίνου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Μ. Θεολόγου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ε. Συκάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ι. Κανελλόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Α. Παναγόπουλος
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

.....
Α. Κανάτας
Αναπλ. Καθηγητής
Πανεπιστημίου Πειραιώς

.....
Α. Ρούσкас
Επίκ. Καθηγητής
Πανεπιστημίου Πειραιώς

Αθήνα, Οκτώβριος 2010

.....
Δημήτριος Ι. Κομνάκος

Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Δημήτριος Ι. Κομνάκος, 2010

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

Το ερευνητικό αντικείμενο της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι η μελέτη μηχανισμών για τη βέλτιστη διαχείριση πόρων σε σύγχρονα δίκτυα κινητών επικοινωνιών πέραν της 3^{ης} γενιάς. Η ερευνητική αυτή προσπάθεια στηρίζεται σε μία αρθρωτή κλιμακούμενη δομή τεσσάρων αξόνων. Πρώτον, προσεγγίζονται τα εν λόγω δίκτυα μέσω προσομοιώσεων, με σκοπό την εις βάθος κατανόηση των χαρακτηριστικών τους και την εξαγωγή συμπερασμάτων ως προς τη λειτουργία τους, τα οποία αποτελούν τη βάση για τη συνέχιση της εργασίας. Δεύτερον, μελετώνται δίκτυα απλωμένου φάσματος μονής φέρουσας με έμφαση στο πρόβλημα της ταυτόχρονης εξυπηρέτησης πολλαπλών υπηρεσιών πραγματικού χρόνου για τους χρήστες της άνω ζεύξης. Ως επιστέγασμα της μελέτης αυτής, εισάγεται μία νέα οικογένεια αλγορίθμων δρομολόγησης δεδομένων, η οποία ανταποκρίνεται στις προαναφερθείσες απαιτήσεις. Τρίτον, ερευνώνται δίκτυα πολλαπλών φερόντων, στα οποία είναι απαραίτητη η βελτιστοποίηση της διαχείρισης των υπάρχοντων ραδιοπόρων τόσο στο πεδίο του χρόνου, όσο και στο πεδίο της συχνότητας. Στα πλαίσια αυτής της δραστηριότητας παρουσιάζονται νέοι μηχανισμοί διαχείρισης ραδιοπόρων που υποστηρίζουν προφίλ δίκαιης απόδοσης πόρων, συνυπάρχουσες ετερογενείς τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες καθώς και διαφορετικά σχήματα μετάδοσης και προσαρμογής της ισχύος. Τέλος, αναλύεται θεωρητικά η συνολική διαστρωματική και διασυστημική βελτιστοποίηση των ασυρμάτων δικτύων, με έμφαση στο φυσικό στρώμα, στο στρώμα ζεύξης και στο στρώμα μεταφοράς. Αποτέλεσμα αυτής της ανάλυσης είναι η δημιουργία ενός αναλυτικού μοντέλου που εκφράζει τις παραμετρικές σχέσεις οι οποίες διασυνδέουν τη λειτουργία και επίδοση των επί μέρους στρωμάτων της στοίβας. Τα σημαντικότερα ευρήματα της διατριβής αφορούν σε μηχανισμούς και αλγορίθμους για την αποδοτική ανάθεση των διαθέσιμων πόρων σε σύγχρονα δίκτυα κινητών επικοινωνιών πέραν της 3^{ης} και 4^{ης} γενιάς.

Abstract

This doctoral thesis deals with mechanisms for optimal resource management in modern beyond 3G wireless networks. This research effort is based on a scalable modular structure of four axes. First, the aforementioned networks are approached through simulations in order to acquire a deep insight about their characteristics and draw valuable conclusions concerning their operation, which form the basis for further work. Second, single-carrier spread-spectrum networks are studied, focusing on the problem of serving uplink users having multiple simultaneous real-time services. As a corollary of this study, a new family of algorithms for scheduling data is introduced which meets the above requirements. Thirdly, multiple-carrier networks are investigated, which pose the demand of optimizing the management of existing resources both in the time, as well as in the frequency domain. In the context of this study, new management mechanisms that support fairness among users, coexisting heterogeneous services and various transmission and power schemes are presented. Finally, a theoretical analysis is conducted regarding the cross-layer and cross-system optimization of wireless networks, with emphasis on the physical, the link and the transport layer. The result of this analysis is the formulation of an analytical model that expresses the relations that bind the operation and performance of the individual layers of the stack. The major findings of this work are related to mechanisms and algorithms for the effective allocation of available resources in modern beyond the 3rd and 4rd generation mobile networks.

στους γονείς μου και τον αδερφό μου

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	1
1.1	Θεματολογία της Διατριβής	1
1.2	Δομή του Κειμένου της Διατριβής	3
2	Ασύρματα Ευρυζωνικά Δίκτυα Ραδιοπρόσβασης Νέας Γενιάς	7
2.1	Ανασκόπηση Μητροπολιτικών Συστημάτων Ασύρματων Επικοινωνιών	7
2.2	Απαιτήσεις Μελλοντικών Ασύρματων Δικτύων Ραδιοπρόσβασης	10
2.3	Τεχνολογίες του Φυσικού Στρώματος	11
2.3.1	Προσαρμοστικές Τεχνικές Μετάδοσης	12
2.3.2	Διαμόρφωση Πολλαπλών Φερόντων	16
2.3.3	Τεχνικές Πολλαπλών Κεραιών	18
2.4	Τεχνολογίες του Στρώματος Ελέγχου Πρόσβασης στο Μέσο	19
2.4.1	Πολλαπλή πρόσβαση/Πολυπλεξία χρηστών στο Ασύρματο Μέσο και Ανάθεση Ραδιοπόρων	20
2.4.2	Υποστήριξη Ποιότητας Υπηρεσίας και Σχήματα Χρονοπρογραμματισμού Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης	23
2.4.3	Διαστρωματικές Τεχνικές Διαχείρισης Ραδιοπόρων	26
2.5	Σύνοψη	27
3	Διαχείριση Πόρων Σε Μελλοντικά Ασύρματα Ευρυζωνικά Δίκτυα Ραδιοπρόσβασης	29
3.1	Ορισμός του Πλαισίου Εργασίας	29
3.1.1	Μεθοδολογία	29
3.1.2	Επίπεδο Συστήματος	30
3.1.3	Τηλεπικοινωνιακές Υπηρεσίες και Δείκτες QoS	31
3.1.4	Ευρυζωνικός Ασύρματος Κινητός Δίαυλος	32
3.1.5	Πολυπλεξία Ροών Δεδομένων σε Συστήματα Μονής Φέρουσας και Πολλαπλών Χρηστών	33
3.1.6	Πολυπλεξία Ροών Δεδομένων σε Συστήματα Πολλαπλών Φερόντων και Χρηστών	34
3.2	Επισκόπηση της Βιβλιογραφίας	36

3.2.1	Χρονοπρογραμματισμός Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης σε Συστήματα Μονής Φέρουσας	37
3.2.2	Βελτιστοποίηση του Φυσικού Στρώματος: Δυναμική Ανάθεση Ραδιοπόρων σε Συστήματα Πολλαπλών Φερόντων και Χρηστών	46
3.2.3	Συνδυαστική Ανάθεση Ραδιοπόρων και Χρονοπρογραμματισμού Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης σε Συστήματα Πολλαπλών Φερόντων OFDMA	55
3.3	Σύνοψη.....	59
4	Εκτίμηση Επίδοσης Ασυρμάτων Τηλεπικοινωνιακών Συστημάτων	61
4.1	Εισαγωγή	61
4.2	Εκτίμηση Επίδοσης Μονοκυψελωτού Δικτύου HSPA με Έμφαση στην Κάτω Ζεύξη	61
4.2.1	Περιγραφή του Προσομοιωτικού Μοντέλου.....	62
4.2.2	Περιγραφή Υπηρεσιών Υγείας	64
4.2.3	Αποτελέσματα Προσομοίωσης	67
4.2.4	Συμπεράσματα	75
4.3	Εκτίμηση Επίδοσης Μονοκυψελωτού Δικτύου HSPA με Έμφαση στην Άνω Ζεύξη	77
4.3.1	Σύντομη Περιγραφή Άνω Ζεύξης HSPA	77
4.3.2	Περιγραφή του Προσομοιωτικού Μοντέλου.....	78
4.3.3	Περιγραφή Υπηρεσιών Υγείας	78
4.3.4	Αποτελέσματα Προσομοίωσης	80
4.3.5	Συμπεράσματα	88
4.4	Σύνοψη.....	89
5	Διαχείριση Ραδιοπόρων σε Δίκτυα Φασματικής Εξάπλωσης WCDMA	91
5.1	Εισαγωγή	91
5.2	Επισκόπηση της Βιβλιογραφίας	92
5.3	Μοντελοποίηση του Συστήματος και Διατύπωση του Προβλήματος	93
5.3.1	Δρομολόγηση στο Node B	93
5.3.2	Διατύπωση του Προβλήματος	95
5.4	Ο Δρομολογητής Δυναμικής Προτεραιότητας – DPS.....	95
5.4.1	Προτεινόμενες Τροποποιήσεις στο Πρότυπο	96
5.4.2	Ανάλυση του DPS	97
5.4.3	Εκτίμηση Επίδοσης Αλγορίθμου	98
5.4.4	Συμπεράσματα	101
5.5	Ο Δρομολογητής Δυναμικής Προτεραιότητας Μέσης προτεραιότητας λογικού καναλιού – MDPS	102
5.5.1	Προτεινόμενες Τροποποιήσεις στο Πρότυπο	103

5.5.2	Ανάλυση του MDPS	105
5.5.3	Εκτίμηση Επίδοσης Αλγορίθμου	105
5.5.4	Συμπεράσματα	108
5.6	Ο Δρομολογητής Προτεραιότητας Καναλιού με Γνώση της Καθυστέρησης – DACP-S	109
5.6.1	Προτεινόμενες Τροποποιήσεις στο Πρότυπο	109
5.6.2	Ανάλυση του DACP-S	111
5.6.3	Εκτίμηση Επίδοσης Αλγορίθμου	113
5.6.4	Συμπεράσματα	116
5.7	Σύνοψη.....	116
6	Διαχείριση Ραδιοπόρων σε Δίκτυα Ορθογωνικής Πρόσβασης Πολ- λαπλών Φερόντων OFDMA	119
6.1	Εισαγωγή	119
6.2	Επισκόπηση της Βιβλιογραφίας	120
6.3	Μοντελοποίηση του Συστήματος	122
6.4	Ένας Ιδεατός Δρομολογητής Πακέτων για Δίκτυα OFDMA που Υποστηρίζει Δίκαιη Απόδοση Πόρων	125
6.4.1	Περιγραφή του Δρομολογητή	125
6.4.2	Αξιολόγηση της Επίδοσης	129
6.5	Ένας Δυναμικός Αλγόριθμος Δρομολόγησης Πακέτων για Δίκτυα OFDMA που Υποστηρίζει Πολλαπλές Υπηρεσίες	132
6.5.1	Εισαγωγή και Ακριβής Ορισμός του Προβλήματος	132
6.5.2	Αναλυτική Περιγραφή του Αλγορίθμου	133
6.5.3	Υπολογιστική Πολυπλοκότητα του Αλγορίθμου	137
6.5.4	Αξιολόγηση της Επίδοσης	139
6.6	Σύνοψη.....	145
7	Διαστρωματική και Διασυστημική Βελτιστοποίηση Επίδοσης Δικτύ- ων	147
7.1	Εισαγωγή	147
7.2	Η Αναγκαιότητα για τη Διαστρωματική Αρχιτεκτονική Σχεδίασης	148
7.3	Επίπεδα Συντονισμού κατά τη Διαστρωματική Τεχνική.....	150
7.3.1	Επίπεδο Συντονισμού Ασφαλείας	151
7.3.2	Επίπεδο Συντονισμού Ποιότητας Υπηρεσίας	151
7.3.3	Επίπεδο Συντονισμού της Κινητικότητας των Χρηστών	152
7.3.4	Επίπεδο Συντονισμού Προσαρμογής Ασύρματης Ζεύξης	153
7.4	Διαστρωματική και Διασυστημική Βελτιστοποίηση Ασυρμάτων Δικτύων	153
7.4.1	Εισαγωγή και Συνοπτική Παρουσίαση του Αναλυτικού Μοντέλου	154
7.4.2	Εκτενής Παρουσίαση του Αναλυτικού Μοντέλου	155
7.5	Σύνοψη.....	168

8 Συμπεράσματα και Προοπτικές	169
8.1 Σύνοψη της Διατριβής	169
8.2 Ευρήματα και Συμβολή της Διατριβής	170
8.3 Προτάσεις για Συνέχιση της Έρευνας	174
Βιβλιογραφία	177
Κατάλογος Δημοσιεύσεων του Συγγραφέα	191
Βιογραφικό Σημείωμα	193

Κατάλογος Σχημάτων

3.1	Δρομολόγηση σε HSPA δίκτυα	34
3.2	Τυπική δομή ενός πλαισίου OFDMA	35
3.3	Τυπική μοντελοποίηση κάτω ζεύξης μονοκυψελωτού δικτύου OFDMA	36
3.4	Ένα τυπικό σχήμα μετάδοσης OFDM πολλαπλών χρηστών	37
3.5	Τυπική δομή ενός ασύρματου χρονοπρογραμματιστή τηλεπικοινωνιακής κίνησης	39
3.6	Τυχαίο στιγμιότυπο κατάστασης διαύλων σε σύστημα 4 χρηστών	56
3.7	Τα αποτελέσματα της αντίστοιχης ανάθεσης ραδιοπόρων	56
4.1	Αρχιτεκτονική δικτύου HSPA	62
4.2	Καθυστέρηση ανά εφαρμογή για τις υπηρεσίες υγείας στην κάτω ζεύξη	69
4.3	Καθυστέρηση ανά εφαρμογή για τις υπηρεσίες υγείας στην άνω ζεύξη	69
4.4	Ρυθμός διέλευσης δεδομένων για τις υπηρεσίες υγείας (στην περίπτωση που η σύνοδος συνήφθη)	70
4.5	Σύγκριση φραγμένων κλήσεων στις περιπτώσεις που η σύνοδος υπηρεσιών υγείας έγινε / δεν έγινε αποδεκτή	70
4.6	Σύγκριση μέσης καθυστέρησης στις περιπτώσεις που η σύνοδος υπηρεσιών υγείας έγινε / δεν έγινε αποδεκτή	71
4.7	Ρυθμός διέλευσης δεδομένων για τις υπηρεσίες υγείας υπό την παρουσία ελέγχου συμφόρησης	72
4.8	Σύγκριση φραγμένων κλήσεων υπό την παρουσία / απουσία ελέγχου συμφόρησης	72
4.9	Σύγκριση μέσης καθυστέρησης υπό την παρουσία / απουσία ελέγχου συμφόρησης	73
4.10	Συνολική μέση καθυστέρηση πακέτων στην κάτω ζεύξη	74
4.11	Καθυστέρηση ανά εφαρμογή για τις υπηρεσίες υγείας με προτεραιότητα στην κάτω ζεύξη	74
4.12	Συνολική μέση καθυστέρηση πακέτων στην άνω ζεύξη	76
4.13	Καθυστέρηση ανά εφαρμογή για τις υπηρεσίες υγείας με προτεραιότητα στην άνω ζεύξη	76
4.14	Δρομολόγηση στον Node B και επίπεδο ανύψωσης θορύβου	78
4.15	Καθυστέρηση βίντεο MPEG για την πρώτη περίπτωση του σεναρίου	83
4.16	Καθυστέρηση υπηρεσιών για τη δεύτερη περίπτωση του σεναρίου	84

4.17	Καθυστερήση υπηρεσιών για το δεύτερο σενάριο	86
4.18	Όγκος ληφθέντων δεδομένων από βάση δεδομένων προς χρόνο	86
4.19	Καθυστερήση FTP υπηρεσίας για το τρίτο σενάριο	88
4.20	Όγκος ληφθέντων δεδομένων από βάση δεδομένων προς χρόνο	88
5.1	Διαδικασία δρομολόγησης στο Node B	94
5.2	Διάγραμμα ροής αλγορίθμου DPS	98
5.3	Η δομή του προσομοιωτή και η αντιστοιχία με τις οντότητες του δικτύου	99
5.4	Μέση καθυστέρηση πακέτων VoIP	101
5.5	Μέση καθυστέρηση πακέτων video	102
5.6	95% καθυστέρηση πακέτων VoIP	102
5.7	95% καθυστέρηση πακέτων video	103
5.8	Μέση ρυθμοαπόδοση κυψέλης	103
5.9	Διάγραμμα ροής αλγορίθμου MDPS	106
5.10	Μέση καθυστέρηση πακέτων VoIP	107
5.11	Μέση καθυστέρηση πακέτων video	107
5.12	90% καθυστέρηση πακέτων VoIP	108
5.13	90% καθυστέρηση πακέτων video	108
5.14	Μέση ρυθμοαπόδοση κυψέλης	109
5.15	Διάγραμμα ροής αλγορίθμου DACP-S	112
5.16	Σύγκριση DACP-S με δρομολογητή που βασίζεται στο ρυθμό μετάδοσης	114
5.17	Σύγκριση DACP-S με το δρομολογητή M-LWDF	114
5.18	Διαφοροποίηση ποιότητας υπηρεσίας με μεταβολή της παραμέτρου k	116
6.1	Τυπικό σχηματικό διάγραμμα μοντελοποίησης δικτύου και δρομολόγησης OFDMA	124
6.2	Αποτελέσματα επίδοσης ιδεατών δρομολογητών OFDMA για διάφορα σενάρια λειτουργίας	131
6.3	Διάγραμμα ροής αλγορίθμου	134
6.4	Αναπαράσταση του σταδίου απόδοσης υποκαναλιών στους χρήστες CBR για τον προτεινόμενο αλγόριθμο δρομολόγησης OFDMA	138
6.5	Αναπαράσταση του σταδίου απόδοσης υποκαναλιών στους χρήστες BE για τον προτεινόμενο αλγόριθμο δρομολόγησης OFDMA	138
6.6	Επίδοση ιδεατών δρομολογητών ομοιόμορφης κατανομής ισχύος για σενάρια ομογενούς και ετερογενούς τηλεπικοινωνιακής κίνησης ($T = 50 \cdot T_f$)	141
6.7	Συγκριτική επίδοση των όλων των σχημάτων δρομολόγησης για το ετερογενές σενάριο τηλεπικοινωνιακής κίνησης και τον ευρύτερο χρονικό ορίζοντα 50 χρονοθυρίδων	142
6.8	Επίδραση του εύρους του χρονικού ορίζοντα στην απόδοση των ιδεατών δρομολογητών (IDEAL,OPT-FRAME)	143

6.9	Επίδραση του εύρους του χρονικού ορίζοντα στην απόδοση των ευριστικών αλγορίθμων δρομολόγησης (HEUR,MAXMIN-FRAME)	144
6.10	Επίδραση του εύρους του χρονικού ορίζοντα σε όλα τα σχήματα δρομολόγησης	144
7.1	Μοντέλο OSI και στρώματα ενδιαφέροντος	148
7.2	Επίπεδα συντονισμού στις διαστρωματικές αρχιτεκτονικές	150
7.3	Γενική τοπολογία του υπό μελέτη δικτύου	155
7.4	Διάγραμμα ροής προτεινόμενης διαστρωματικής τεχνικής και αντιστοιχία με τα βήματα κατά την εκτενή παρουσίαση του μοντέλου	158
7.5	Προσεγγιστικές καμπύλες αντιστοίχισης σχημάτων μετάδοσης με BER	161
7.6	Προσεγγιστικές καμπύλη αντιστοίχισης BER με SNR	166

Κατάλογος Πινάκων

3.1	Τυπικές Παράμετροι Τηλεπ. Κίνησης Ευρυζωνικών Δικτύων Ραδιοπρόσβασης .	32
3.2	Ορολογία – Συμβολισμοί	47
4.1	Ρυθμός μετάδοσης ανά υπηρεσία στην προσομοίωση	64
4.2	Ρυθμοί μετάδοσης τυπικών συσκευών στην τηλεϊατρική	65
4.3	Κατηγοριοποίηση των QoS απαιτήσεων των υπηρεσιών υγείας	66
4.4	Παράμετροι προσομοίωσης	68
4.5	Παράμετροι προσομοίωσης	79
4.6	Επείγουσες υπηρεσίες σε περίπτωση ατυχήματος	80
4.7	Συνεργατικές σύνοδοι τηλεδιάσκεψης	81
4.8	Υπηρεσίες διαχείρισης ιατρικών δεδομένων	82
4.9	Παράμετροι προσομοίωσης πρώτης περίπτωσης σεναρίου	82
4.10	Παράμετροι προσομοίωσης δεύτερης περίπτωσης σεναρίου	84
4.11	Παράμετροι προσομοίωσης δεύτερου σεναρίου	85
4.12	Παράμετροι προσομοίωσης τρίτου σεναρίου	87
5.1	Αντιστοιχία HLCP	96
5.2	Παράμετροι προσομοίωσης	100
5.3	Αντιστοιχία MLCP	104
5.4	Παράμετροι προσομοίωσης	113
6.1	Βασικές παράμετροι πειραματικών προσομοιώσεων για τις μελέτες των ιδεατών δρομολογητών OFDMA	130
6.2	Βασικές παράμετροι πειραματικών προσομοιώσεων για τις μελέτες επίδοσης του προτεινόμενου αλγορίθμου δρομολόγησης OFDMA	140
7.1	Βασικές παράμετροι αναλυτικού μοντέλου	156
7.2	Παράμετρος α για συχνούς συνδυασμούς δικτύων και αλγορίθμων δρομολόγησης	164

Κατάλογος Συντμήσεων

3G-LTE	:	3rd Generation Long Term Evolution
3GPP	:	3rd Generation Partnership Project
AMC	:	Adaptive Modulation & Coding
BER	:	Bit Error Rate
BS	:	Base Station
BWA	:	Broadband Wireless Access
CBR	:	Constant Bit Rate
CDMA	:	Code Division Multiple Access
CQI	:	Channel Quality Indicator
COST	:	European COoperation in the field of Scientific and Technical Research
CSI	:	Channel State Information
DACP-S	:	Delay Aware Channel Prioritization - based packet Scheduler
DPS	:	Dynamic Priority Scheduler
EPA	:	Equal Power Allocation
FDMA	:	Frequency Division Multiple Access
FER	:	Frame Error Rate
GSM	:	Global System for Mobile communications
HOL	:	Head Of Line
HSxPA	:	High Speed Downlink/Uplink Packet Access
HSPA	:	High Speed Packet Access
IEEE	:	Institute of Electrical and Electronics Engineering
ITU	:	International Telecommunications Union
LOS	:	Line Of Sight
LTE	:	Long Term Evolution
MA/RA	:	Margin Adaptive/Rate Adaptive
MAC	:	Medium Access Control Layer
MC-CDMA	:	Multi-Carrier Code Division Multiple Access
MDPS	:	Mean logical channel priority Dynamic Priority Scheduler
MIMO	:	Multiple Input Multiple Output
NLOS	:	Non Line Of Sight

NRT	:	Non Real Time
OFDM	:	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	:	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OSI	:	Open Systems Interconnection
PF	:	Proportional Fair
PHY	:	Physical Layer
PS	:	Packet Scheduling
QoS	:	Quality of Service
RAN	:	Radio Access Network
RNC	:	Radio Network Controller
RRA	:	Radio Resource Allocation
RRM	:	Radio Resource Management
RT	:	Real Time
RTT	:	Round Trip Time
SNR	:	Signal to Noise Ratio
TCP	:	Transmission Control Protocol
TDMA	:	Time Division Multiple Access
TTI	:	Transmission Time Interval
UMTS	:	Universal Mobile Telecommunication System
VBR	:	Variable Bit Rate
WCDMA	:	Wideband Code Division Multiple Access
WLAN	:	Wireless Local Area Network
WMAN	:	Wireless Metropolitan Area Network

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Θεματολογία της Διατριβής

Το ερευνητικό αντικείμενο που πραγματεύεται η εκπονούμενη διατριβή είναι η διαχείριση των διαθέσιμων ραδιοπόρων στα σύγχρονα και μελλοντικά ασύρματα δίκτυα κινητών επικοινωνιών. Τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί ραγδαία αύξηση της ζήτησης τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών μέσω δύο ανεξάρτητων μορφών. Αναφερόμαστε αφενός στις σταθερές ευρυζωνικές υπηρεσίες διαδικτύου (fixed broadband internet services), με την τεχνολογία ADSL να καλύπτει σήμερα τη ζήτηση αυτή, αφετέρου στις ασύρματες κινητές υπηρεσίες φωνής (voice mobile communications) που εξυπηρετούνται από τα ευρέως ανεπτυγμένα δίκτυα κινητών επικοινωνιών 2ης και 3ης γενιάς (GSM, UMTS). Η πρώτη κατηγορία τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών χαρακτηρίζεται από τους ιδιαίτερα υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, οι οποίοι με την υπάρχουσα τεχνική υποδομή φτάνουν έως και τα δεκάδες Mbps ανά χρήστη και πρόκειται να αυξηθούν ακόμη περισσότερο. Βασικός περιορισμός είναι η αδυναμία υποστήριξης κινητικότητας, καθώς τα σημεία πρόσβασης στις υπηρεσίες αυτές είναι σταθερά και ενσύρματα. Από την άλλη πλευρά, τα ασύρματα συστήματα κινητών επικοινωνιών αναπτύχθηκαν με γνώμονα την υποστήριξη φωνής και υπηρεσιών δεδομένων χαμηλών απαιτήσεων (της τάξης μερικών kbps), καλύπτοντας σταθερούς και κινητούς χρήστες σε όσο το δυνατόν ευρύτερη γεωγραφική επιφάνεια. Ωστόσο, η ολοένα αυξανόμενη ζήτηση ευρυζωνικών διαδικτυακών υπηρεσιών, κατέστησε αναγκαία την εξέλιξη των κλασικών συστημάτων κινητών επικοινωνιών 2G και 3G προκειμένου να υποστηρίξουν υπηρεσίες δεδομένων υψηλής ταχύτητας μετάδοσης (high speed packet data), διατηρώντας φυσικά τα χαρακτηριστικά της κάλυψης και της κινητικότητας. Τα δίκτυα που καλούνται να παρέχουν τις παραπάνω προηγμένες επικοινωνιακές υπηρεσίες, ονομάζονται *Ευρυζωνικά Ασύρματα Δίκτυα Πρόσβασης (Broadband Wireless Access Networks)* και θα αποτελέσουν αντικείμενο έρευνας στα πλαίσια της παρούσας διατριβής.

Με τον όρο δίκτυο ραδιοπρόσβασης εννοούμε το τμήμα ενός επικοινωνιακού συστήματος που είναι επιφορτισμένο με τη διασύνδεση των ασύρματων χρηστών ή τερματικών με το δίκτυο κορμού. Οι απαραίτητες διεργασίες για την εγκατάσταση σύνδεσης συνήθως υλοποιούνται σε μία οντότητα που καλείται σταθμός βάσης και καλύπτει μία γεωγραφική επιφάνεια μεταβλητού μεγέθους. Το δίκτυο κορμού εκτός από τη διασύνδεση των επιμέρους σταθμών βάσης,

υλοποιεί και τη σύνδεση του εκάστοτε τηλεπικοινωνιακού δικτύου με τα εξωτερικά συστήματα (π.χ. σταθερά επίγεια τηλεφωνικά δίκτυα, Internet). Η τελική σύνδεση με τα εξωτερικά δίκτυα γίνεται με χρήση ενσύρματων μέσων υψηλής χωρητικότητας, ικανών να μεταφέρουν ιδιαίτερα απαιτητικά φορτία κίνησης. Είναι επομένως προφανές ότι η ασύρματη διεπαφή (air interface) μεταξύ του κάθε σταθμού βάσης και των χρηστών που εξυπηρετεί αποτελεί τον ουσιαστικό περιοριστικό παράγοντα όσον αφορά στο προσφερόμενο τηλεπικοινωνιακό φορτίο. Επίσης, ο συνολικός υποστηριζόμενος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων εξαρτάται άμεσα από τους διαθέσιμους ραδιοπόρους του συστήματος, δηλαδή το διαθέσιμο ραδιοφάσμα (RF spectrum), την ισχύ, τους κώδικες (αν μιλάμε για CDMA σύστημα), τα υποκανάλια (για OFDM σύστημα), κ.ο.κ. Επειδή το πλήθος των ραδιοπόρων είναι ιδιαίτερα περιορισμένο, ο ορθολογικός τρόπος διαχείρισης και ανάθεσής τους στους χρήστες είναι ιδιαίτερα κρίσιμο στοιχείο για την αποδοτική λειτουργία ενός συστήματος. Για παράδειγμα το φάσμα είναι ιδιαίτερα ακριβό και περιορισμένο αγαθό και η διεύρυνσή του απαιτεί συνήθως τεράστια επενδυτικά ποσά από την πλευρά του παρόχου υπηρεσιών. Επίσης, η ισχύς μετάδοσης δεν μπορεί να αυξάνεται δραματικά, καθώς προκαλείται παρεμβολή είτε στο ίδιο, είτε σε άλλα συστήματα που λειτουργούν σε κοινές φασματικές ζώνες. Τα αποτελέσματα της έρευνας στο συγκεκριμένο πεδίο οδηγούν στην ανάπτυξη ευφυών μηχανισμών διαχείρισης ραδιοπόρων (Radio Resource Management - RRM) και αφορούν τόσο στο σταθμό βάσης όσο και στα τεμαχικά των χρηστών. Οι κυριότεροι μηχανισμοί RRM είναι ο έλεγχος ισχύος, ο χρονοπρογραμματισμός (δρομολόγηση) της τηλεπικοινωνιακής κίνησης ή πακέτων δεδομένων (Packet Scheduling), ο έλεγχος διατομής (Handover Control), ο έλεγχος αποδοχής κλήσης (Admission Control) και ο έλεγχος συμφόρησης (Congestion Control). Οι τρεις πρώτοι εφαρμόζονται σε επίπεδο πακέτου (packet-level) ενώ οι υπόλοιποι δύο σε επίπεδο κλήσης/σύνδεσης (call/session-level). Γι' αυτούς ακριβώς τους λόγους η διαχείριση των ασυρμάτων ραδιοπόρων είναι ένα εξαιρετικά αναπτυσσόμενο πεδίο έρευνας που θα μας απασχολήσει στα πλαίσια της διατριβής.

Εν γένει οι τεχνικές ανάθεσης πόρων σε επίπεδο πακέτου, καλούνται να κατανεύουν τους συνολικούς πόρους του συστήματος σε ένα πλήθος χρηστών, απαντώντας στα ανεξάρτητα αιτήματά τους που αφορούν σε φορτία τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών (traffic requirements). Τα κριτήρια απόφασης ανάθεσης των πόρων ποικίλουν και καθορίζονται από τον πάροχο. Ενδεικτικά αναφέρουμε την ικανοποίηση συγκεκριμένων επιπέδων ποιότητας υπηρεσίας των χρηστών (user-centric approach), όπως καθορισμένους ρυθμούς διέλευσης δεδομένων ή ελάχιστες χρονικές διάρκειες ολοκλήρωσης υπηρεσιών. Μία διαφορετική πολιτική βασίζεται στη μεγιστοποίηση της συνολικής απόδοσης του συστήματος (network-centric approach). Όσον αφορά στα στρώματα της στοίβας του OSI, οι τεχνικές αυτές σχετίζονται με το φυσικό στρώμα (PHY/L1) και το στρώμα ελέγχου πρόσβασης στο μέσο (MAC/L2). Όπως θα περιγραφεί αναλυτικά και στο κύριο κείμενο της αναφοράς, η επίδοση ενός μηχανισμού ανάθεσης πόρων μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά εφόσον αξιοποιηθεί η γνώση της κατάστασης του ραδιοδιαύλου για κάθε χρήστη καθώς και η συνολική γνώση της συμφόρησης του δικτύου. Καθώς οι πληροφορίες αυτές αφορούν σε διαφορετικά στρώματα της στοίβας του OSI και οι αποφάσεις επηρεάζουν πέραν του ενός στρώματος, οι αναπτυσσόμενες τεχνικές καλούνται διαστρωματικές (cross-layer) σε αντίθεση με τις παραδοσιακές τεχνικές στις οποίες βασίζονται τα σημερινά

δίκτυα. Ένας διαφορετικός ορισμός του προβλήματος που μας απασχολεί συνίσταται στην αναζήτηση βέλτιστων μηχανισμών μετάδοσης δεδομένων σε ένα σύστημα πολλαπλών χρηστών και ετερογενών απαιτήσεων. Μία ολοκληρωμένη αντιμετώπιση του θέματος απαιτεί την πρόταση τόσο καθαυτών αλγορίθμων διαχείρισης ραδιοπόρων όσο και αρχιτεκτονικών που θα τους υποστηρίξουν, όπως θα φανεί και στη συνέχεια.

Συνοψίζοντας, στα πλαίσια της ερευνητικής εργασίας, θα επικεντρωθούμε στη μελέτη, σχεδίαση, ανάπτυξη και αξιολόγηση τεχνικών διαχείρισης πόρων σε επίπεδο πακέτου για ευρωζωνικά δίκτυα ραδιοπρόσβασης νέας γενιάς, με στόχο την παροχή εγγυημένων και ευέλικτων επιπέδων ποιότητας υπηρεσίας.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στα πλαίσια της ερευνητικής διαδικασίας συνοψίζεται επιγραμματικά στα ακόλουθα σημεία:

- Μελέτη της θεματικής περιοχής, τόσο μέσω της διεθνούς βιβλιογραφίας, όσο και μέσω προσομοιωτικών εργαλείων που αναπτύχθηκαν κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διδακτορικής διατριβής.
- Αναγνώριση των δυσλειτουργικών σημείων και διατύπωση των προβλημάτων που χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης στη διαδικασία της διαχείρισης των ραδιοπόρων.
- Ανάπτυξη επαναληπτικών ευριστικών αλγορίθμων επίλυσης των ανωτέρω προβλημάτων.
- Αξιολόγηση των προτεινόμενων ευριστικών αλγορίθμων μέσω προσομοιωτικών μεθόδων.
- Προσέγγιση με αναλυτικές μεθόδους των ανοιχτών ζητημάτων διαστρωματικής βελτιστοποίησης.

1.2 Δομή του Κειμένου της Διατριβής

Η παρούσα διατριβή είναι δομημένη σε οκτώ διακριτά κεφάλαια:

- Στο 2^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται οι σημαντικότερες τεχνικές προκλήσεις που καλούνται να αντιμετωπιστούν στα πλαίσια της σχεδίασης και ανάπτυξης των δικτύων ραδιοπρόσβασης νέας γενιάς. Μετά από μία περιληπτική ιστορική ανασκόπηση των ασυρμάτων επικοινωνιακών συστημάτων παρατίθενται οι τεχνολογίες εκείνες του φυσικού στρώματος και του στρώματος ελέγχου πρόσβασης στο μέσο που είναι υποψήφιες να εφαρμοστούν στα δίκτυα ραδιοπρόσβασης beyond 3G ή 4G.
- Στο 3^ο Κεφάλαιο παρουσιάζεται εκτενώς το αντικείμενο που πραγματεύεται η εκπονούμενη ερευνητική εργασία, εστιάζοντας στους δύο βασικότερους μηχανισμούς των στρωμάτων PHY και MAC, τη δυναμική ανάθεση ραδιοπόρων και το χρονοπρογραμματισμό της τηλεπικοινωνιακής κίνησης, οι οποίοι αναμένεται να διαδραματίσουν καθοριστικό ρόλο στα νέα αυτά δίκτυα. Μετά την παρουσίαση του γενικότερου πλαισίου εργασίας

και της υιοθετούμενης μεθοδολογίας, ακολουθεί μία αναλυτική επισκόπηση των σημαντικότερων σχετικών ερευνητικών εργασιών, με εξήγηση των πλεονεκτημάτων, των μειονεκτημάτων και των πιθανών περιορισμών τους.

- Στο 4^ο Κεφάλαιο εξετάζονται αναλυτικά μέσω προσομοιώσεων βασικές λειτουργίες των σύγχρονων συστημάτων ασυρμάτων τηλεπικοινωνιών. Σκοπός είναι η απόκτηση βαθύτερης και τεκμηριωμένης γνώσης όσον αφορά στις υπηρεσίες που καλείται ένα τέτοιο δίκτυο να εξυπηρετήσει και στις δομικές μονάδες που ελέγχουν την επίδοσή του. Αυτή η προσέγγιση κρίθηκε απαραίτητη για να επιτευχθεί μία ορθή εκτίμηση του τρόπου λειτουργίας των σύγχρονων ασυρμάτων δικτύων, ώστε να προταθούν στα επόμενα κεφάλαια ουσιαστικές μέθοδοι βελτίωσης της χρήσης των διαθέσιμων ραδιοπόρων. Το σύστημα που μελετάται ως αντιπροσωπευτικός εκπρόσωπος της νέας γενιάς δικτύων είναι το 3GPP HSPA.
- Στο 5^ο Κεφάλαιο μελετάται το πρόβλημα της ταυτόχρονης εξυπηρέτησης πολλαπλών υπηρεσιών πραγματικού χρόνου στους χρήστες της άνω ζεύξης, καθώς και η πολυπλεξία τυπικών υπηρεσιών σε ένα δίκτυο HSPA. Παρ' όλο που έχουν προταθεί αρκετοί αλγόριθμοι δρομολόγησης δεδομένων για τις ασύρματες υπηρεσίες δεδομένων υψηλής ταχύτητας τόσο για την κάτω, όσο και για την άνω ζεύξη, εν τούτοις η αλληλεπίδραση των προτεραιοτήτων ανάμεσα στα δεδομένα των υπηρεσιών του κάθε χρήστη και στα πακέτα που βρίσκονται σε αναμονή στην προσωρινή μνήμη δεν έχει μελετηθεί επαρκώς στη βιβλιογραφία. Προτείνεται επομένως μία νέα οικογένεια αλγορίθμων δρομολόγησης, η οποία λαμβάνει υπόψη την ευαισθησία ως προς την καθυστέρηση της κάθε ροής δεδομένων, καθώς και την πραγματική καθυστέρηση των υπό αναμονή δεδομένων στην ουρά των τερματικών. Η εκτίμηση της επίδοσης των προτεινόμενων αλγορίθμων γίνεται μέσω προσομοιωτικών σεναρίων για διάφορους τύπους υπηρεσιών πραγματικού χρόνου, με κύριο στόχο τη βελτίωση του μέσου και μέγιστου χρόνου καθυστέρησης στη μετάδοση των πακέτων.
- Στο 6^ο Κεφάλαιο επεκτείνεται η προηγούμενη προσέγγιση στη συχνοτική διάσταση και καταγράφεται η ερευνητική εργασία που έχει συντελεστεί όσον αφορά στην ανάπτυξη ενός αλγορίθμου δρομολόγησης κίνησης με εξειδίκευση σε δίκτυα OFDMA, όπως είναι το LTE και το WiMAX. Συγκεκριμένα, ελήφθησαν υπόψη παράγοντες όπως η διαφορικότητα συχνότητας (frequency diversity), η διαφορικότητα χρόνου (time diversity), η δικαιοσύνη μεταξύ των χρηστών κ.τ.λ. Το περιβάλλον για το οποίο αναπτύχθηκε ο δρομολογητής είναι ετερογενές και αποτελείται τόσο από υπηρεσίες πραγματικού, όσο και μη πραγματικού χρόνου. Το κεφάλαιο κλείνει με την εκτίμηση της επίδοσης του προτεινόμενου αλγορίθμου μέσω προσομοιωτικών μεθόδων.
- Στο 7^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα θεωρητικά αποτελέσματα της ερευνητικής εργασίας που έχει συντελεστεί όσον αφορά στη διαστρωματική βελτιστοποίηση της επίδοσης ενός ασυρμάτου τηλεπικοινωνιακού δικτύου. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στα στρώματα 1 (PHY), 2 (MAC) και 4 (μεταφοράς - πρωτόκολλο TCP) της στοίβας του OSI. Πε-

ριγράφεται μέσω αναλυτικών μεθόδων η αλληλεπίδραση των ανωτέρω στρωμάτων, και αναδεικνύονται οι κρίσιμες παράμετροι που συντελούν στην τελική επίδοση ενός ασυρμάτου δικτύου. Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική χαρακτηρίζεται επίσης ως διασυστημική, καθώς μέσω μίας και μόνο παραμέτρου επιτυγχάνεται η ένταξη της λειτουργίας του MAC υποστρώματος του εκάστοτε δικτύου στο σύστημα των σχέσεων του αναλυτικού μοντέλου.

- Στο 8^ο Κεφάλαιο συνοψίζονται τα κυριότερα ευρήματα της διδακτορικής διατριβής και προτείνονται διάφορα θέματα προς μελλοντική διερεύνηση.

□

Κεφάλαιο 2

Ασύρματα Ευρυζωνικά Δίκτυα Ραδιοπρόσβασης Νέας Γενιάς

2.1 Ανασκόπηση Μητροπολιτικών Συστημάτων Ασύρματων Επικοινωνιών

Πριν προχωρήσουμε στην ανάλυση των επιμέρους αντικειμένων που πραγματεύεται η παρούσα ερευνητική εργασία, θα παρουσιάσουμε μία σύντομη ιστορική ανασκόπηση των συστημάτων ασυρμάτων επικοινωνιών και συγκεκριμένα την πορεία εξέλιξής τους μέχρι και σήμερα δίνοντας έμφαση στα δίκτυα ραδιοπρόσβασης. Έτσι θα καταστήσουμε σαφέστερες τις προκλήσεις που καλούνται να αντιμετωπιστούν στα πλαίσια της σχεδίασης και λειτουργίας ενός μελλοντικού δικτύου. Θα μας απασχολήσουν ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα (Wireless Metropolitan Area Networks - WMAN), στα οποία κάθε σταθμός βάσης εξυπηρετεί μία ευρεία γεωγραφική περιοχή ακτίνας μερικών εκατοντάδων μέτρων έως λίγων χιλιομέτρων.

Στις αρχές της δεκαετίας του '80 αναπτύχθηκαν και λειτούργησαν τα πρώτα αναλογικά κυψελωτά συστήματα επικοινωνιών στην Ευρώπη, στην Αμερική και την Ιαπωνία, όπως το NMT (Nordic Mobile Telephone), το AMPS (Advanced Mobile Phone Systems) και το TACS (Total Access Communication Systems) αντίστοιχα [1]. Τα συστήματα αυτά που συνθέτουν την 1η γενιά κυψελωτών τηλεπικοινωνιών (1G) περιορίζονταν από τη χαμηλή χωρητικότητα, το περιορισμένο φάσμα και ουσιαστικά τη μη υποστήριξη υπηρεσιών δεδομένων. Η μετάβαση στα κυψελωτά δίκτυα 2ης γενιάς πραγματοποιήθηκε στις αρχές της δεκαετίας του '90 μέσω του συστήματος GSM στην Ευρώπη και του cdmaOne στη Βόρεια Αμερική [1]. Η διεξόδυση των συστημάτων αυτών ήταν και παραμένει τεράστια, αρκεί να αναφέρουμε ότι στο 2ο εξάμηνο του 2009 ο αριθμός των συνδρομητών GSM έχει ξεπεράσει τα 3,5 δισεκατομμύρια [2]. Τα δίκτυα GSM είναι πλήρως ψηφιακά συνδυάζοντας τις τεχνολογίες πρόσβασης FDMA και TDMA. Η χρήση ιεραρχικής κυψελωτής αρχιτεκτονικής επέτρεψε την υποστήριξη μεγάλου αριθμού χρηστών φωνής ικανοποιώντας την ολοένα και αυξανόμενη ζήτηση τέτοιων υπηρεσιών. Ωστόσο, αρχικά δε δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στις υπηρεσίες δεδομένων. Παρόμοια λογική ακολουθήθηκε και στα δίκτυα cdmaOne, με κύρια διαφορά τη χρήση της τεχνολογίας CDMA για την

υλοποίηση της ασύρματης διεπαφής. Προς τα τέλη της δεκαετίας, εμφανίστηκαν οι πρώτες ανανεωμένες εκδόσεις των συστημάτων (GPRS, EDGE), οι οποίες υποστήριζαν επιπλέον μετάδοση δεδομένων με ρυθμούς παραπλήσιους με ένα ενσύρματο modem της εποχής (30-40 kbps).

Το 1998 δημιουργήθηκε ο οργανισμός προτυποποίησης 3GPP (3rd Generation Partnership Program) με σκοπό την ανάπτυξη ενός νέου προτύπου για τα κυψελωτά συστήματα. Η πρώτη σειρά προτύπων ολοκληρώθηκε και έγινε αποδεκτή προς δημοσίευση το πρώτο τρίμηνο του 2000, με την ονομασία UMTS-Release 99, υιοθετώντας την τεχνολογία WCDMA για την υλοποίηση της ασύρματης διεπιφάνειας. Σε πρώτη φάση οι υπηρεσίες φωνής αποτέλεσαν το κύριο πεδίο εφαρμογής των δικτύων όπως και στα δίκτυα 2G. Αρχικά ορίστηκαν διάφορες κλάσεις υπηρεσιών δεδομένων με πολλαπλούς ρυθμούς μετάδοσης 32, 64, 128, 384, 768 kbps και 2 Mbps ανά κυψέλη [3]. Όλοι οι χρήστες χρησιμοποιούν ολόκληρο το διαθέσιμο εύρος ζώνης του συστήματος (5 MHz) ανά κατεύθυνση επικοινωνίας (downlink/uplink) και διαχωρίζονται μέσω της χρήσης ορθογωνικών ψευδοτυχαίων ακολουθιών (κωδικών). Με αυτόν τον τρόπο σε κάθε χρήστη μπορεί να ανατεθεί ένας από τους διαθέσιμους ρυθμούς μετάδοσης, απλώς μεταβάλλοντας τον παράγοντα διασποράς (Spreading Factor). Για την επικοινωνία κάθε χρήστη δεσμεύεται ένας διάυλος (που καθορίζεται ουσιαστικά από τον κώδικα) ο οποίος δε μπορεί ταυτόχρονα να χρησιμοποιηθεί από άλλον χρήστη. Ο συγκεκριμένος τρόπος σύνδεσης (dedicated channel) διασφαλίζει την επιθυμητή ποιότητα υπηρεσίας αλλά ταυτόχρονα είναι ανελαστικός, καθώς δεσμεύει τους πόρους σε όλη τη διάρκεια μίας κλήσης/συνόδου. Είναι σαφώς κατάλληλος για υπηρεσίες φωνής, καθώς αυτές διαθέτουν προβλέψιμο και σταθερό προφίλ απαιτούμενου ρυθμού μετάδοσης (CBR traffic demand profile). Από την άλλη πλευρά, η χρήση δεσμευμένων διαύλων για εκρηκτικού τύπου κίνηση (bursty/VBR traffic) θα οδηγούσε σε κατασπατάληση των πόρων του συστήματος. Με εκμετάλλευση της εγγενούς δυνατότητας για πολυπλεξία του συγκεκριμένου τύπου κίνησης, ο καταλληλότερος τρόπος συνίσταται στη χρήση ενός κοινού διαύλου (shared channel), ο οποίος θα ανατίθεται με κάποιο αλγόριθμο στους χρήστες. Πρόκειται ουσιαστικά για ένα συνδυασμό CDMA-TDMA πολυπλεξίας. Ο μέγιστος υποστηριζόμενος ρυθμός διέλευσης δεδομένων ανά κυψέλη (cell data throughput) κυμαίνεται στο 1 Mbps. Μέχρι και το τέλος του 2004, δημοσιεύθηκαν τρεις ακόμη εκδόσεις του του 3G προτύπου (Releases 4,5,6), με κύρια προσθήκη την υποστήριξη υπηρεσιών δεδομένων διαδικτύου μέσω της εισαγωγής της τεχνολογίας High Speed Packet Access - HSPA [4]. Οι ρυθμοί μετάδοσης για το downlink πλέον φθάνουν πρακτικά στα 7.2 Mbps για την κάτω ζεύξη και στο 1.8 Mbps για την άνω (θεωρητικά η αναμενόμενη επίδοση είναι αρκετά τουλάχιστον διπλάσια), με πρόβλεψη για διπλασιασμό (για το uplink είναι σχεδόν τριπλασιασμός). Η συγκεκριμένη τεχνολογία ραδιοδικτύων κάνει χρήση προηγμένων τεχνικών του φυσικού στρώματος (σχήματα προσαρμοστικής διαμόρφωσης και κωδικοποίησης) και του στρώματος πρόσβασης στο μέσο (υβριδική επανεκπομπή πακέτων, ταχεία δρομολόγηση). Η πολυπλεξία βασίζεται στο σχήμα CDMA-TDMA. Σήμερα, ο αριθμός των συνδρομητών σε WCDMA δίκτυα ανέρχεται στα 400 εκατομμύρια, με τους συνδρομητές HSPA να αντιστοιχούν στο 35% αυτών [5]. Στις μέρες μας υπάρχουν ήδη κάποια εμπορικά δίκτυα HSPA βασισμένα στην έκδοση 7 (γνωστή και ως HSPA Evolved), που επιτυγχάνουν περίπου τρι-

πλασιασμό των υπάρχουσών ταχυτήτων και ενσωματώνουν τεχνολογία πολλαπλών κεραιών MIMO στον πομπό και στο δέκτη. Ιδιαίτερα σημαντική υπήρξε και η έκδοση 8 (γνωστή και ως 3GPP LTE [6]) που παραπέμπει σε 4G ραδιοδίκτυα. Η συγκεκριμένη έκδοση κάνοντας χρήση OFDM τεχνικών, υπόσχεται θεωρητικές ταχύτητες της τάξης των 100 Mbps ανά 20 MHz φάσματος. Αυτήν τη στιγμή υπάρχει ένα εμπορικό δίκτυο 4G στον κόσμο, το οποίο διαχειρίζεται η σκανδιναβική εταιρία TeliaSonera [7]. Σε θεωρητικό επίπεδο, η 3GPP βρίσκεται σε προχωρημένο στάδιο προτυποποίησης για την έκδοση 10 (γνωστή και ως 3GPP LTE Advanced). Επίσης, πρέπει να σημειώσουμε ότι στη Βόρεια Αμερική λειτουργεί το σύστημα 1xEVDO, παρόμοιων αρχών και δυνατοτήτων με το HSPA. Συνοψίζοντας, αν και τα κυψελωτά τηλεπικοινωνιακά δίκτυα σχεδιάστηκαν και αναπτύχθηκαν αρχικά με αποκλειστικό σκοπό την παροχή υπηρεσιών φωνής στο ευρύ κοινό, τα τελευταία χρόνια προσαρμόζονται έτσι ώστε να υποστηρίζουν ευρυζωνικές υπηρεσίες δεδομένων ανταγωνιστικές προς αυτές που παρέχουν οι σταθεροί πάροχοι Internet.

Από την άλλη πλευρά, τα κριτήρια δημιουργίας και εξέλιξης των πρώτων ασύρματων ευρυζωνικών δικτύων δεδομένων εκ μέρους του Ινστιτούτου Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (IEEE) ήταν εντελώς διαφορετικά. Αρχικά, σκοπός ήταν η παροχή επικοινωνιών υψηλών ρυθμών μετάδοσης σε επιχειρήσεις (καθαρά στατικό περιβάλλον οπτικής επαφής) ως εναλλακτική λύση στα μισθωμένα ενσύρματα κυκλώματα ή τις οπτικές ίνες [8]. Το 1998 η IEEE σχημάτισε μία ομάδα εργασίας με την ονομασία IEEE 802.16, με σκοπό την ανάπτυξη ενός προτύπου για ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα. Το πρώτο πρότυπο δημοσιεύθηκε το Δεκέμβριο του 2001 και αφορούσε σε στατικά περιβάλλοντα με οπτική επαφή (LOS), για συχνότητες μεγαλύτερες των 10 GHz. Η πρώτη τροποποίηση ολοκληρώθηκε το 2003 (IEEE 802.16a) με αρκετές αλλαγές τόσο στο φυσικό στρώμα όσο και στρώμα πρόσβασης. Πλέον υποστηριζόταν μετάδοση σε περιβάλλοντα μη οπτικής επαφής (NLOS) και σε χαμηλότερες συχνότητες (από 2 έως 11 GHz). Στη συνέχεια η ομάδα εργασίας ασχολήθηκε με την επέκταση του προτύπου ώστε να υποστηρίζει κινητούς χρήστες, αποτέλεσμα της οποίας ήταν η δημοσίευση της έκδοσης IEEE 802.16e [9] στα τέλη του 2005. Τα συστήματα που στηρίζονται στα πρότυπα αυτά καλούνται Fixed WiMax όταν πρόκειται για σταθερούς χρήστες και Mobile WiMax όταν αφορούν σε κινητούς χρήστες. Παρ'ότι το πεδίο εφαρμογής τους είναι οι υπηρεσίες δεδομένων, προκειμένου να ανταγωνιστούν τους παρόχους κινητής τηλεφωνίας, σκοπεύουν να προσφέρουν και υπηρεσίες φωνής μέσω του πρωτοκόλλου IP (Voice Over IP - VoIP).

Σε αντιστοιχία με την εκκίνηση των δραστηριοτήτων που αφορούν στην ανάπτυξη της IMT-advanced ραδιοτεχνολογίας από τον 3GPP (LTE-advanced), η IEEE συνέστησε την υποομάδα εργασίας 802.16 Task group m ή 802.16m στις αρχές του 2007 για τη μετεξέλιξη των υπάρχοντων ραδιοδικτύων Mobile WiMAX [10]. Κύριοι στόχοι του υπό σχεδίαση προτύπου είναι η βελτίωση των ρυθμών μετάδοσης δεδομένων των κινητών χρηστών με χρήση προηγμένων τεχνολογιών κεραιοσυστημάτων και η υποστήριξη υπηρεσιών φωνής μέσω του πρωτοκόλλου IP (VoIP). Οι προδιαγραφές αναμένεται να ολοκληρωθούν μέσα στο 2011 ή 2012 συνιστώντας την Release 2.0 έκδοση, και στη συνέχεια θα υποβληθούν προς αξιολόγηση στην ITU προκειμένου τα ραδιοδίκτυα 802.16m να συμπεριληφθούν στις τεχνολογίες 4^{ης}

γενιάς.

Παρατηρούμε, ότι η τάση εξέλιξης τόσο των ασύρματων συστημάτων κινητής τηλεφωνίας όσο και των ευρυζωνικών δικτύων πρόσβασης είναι η παροχή υπηρεσιών φωνής και δεδομένων υψηλών ρυθμών μετάδοσης μέσω ενός κοινού στρώματος μεταφοράς (Transport Layer) βασισμένο στο διαδεδομένο πρωτόκολλο του διαδικτύου, IP. Μπορούμε μάλιστα να φανταστούμε τις τεχνολογίες αυτές σαν εναλλακτικά δίκτυα ραδιοπρόσβασης που συνδέονται σε μία πλατφόρμα IP. Προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η μετάδοση δεδομένων, απαιτείται ουσιαστικά η μετακίνηση των πρωτοκόλλων των ραδιοδικτύων προς την πλευρά της ασύρματης διεπιφάνειας και η απομάκρυνση τους από την πλευρά του δικτύου κορμού. Καθ'όλη την πορεία της ερευνητικής μας εργασίας, θα επικεντρωθούμε σε τεχνικές διαχείρισης ραδιοπόρων που θα αφορούν δίκτυα ραδιοπρόσβασης παρόμοια με τα προαναφερθέντα. Για το σκοπό αυτό θα μοντελοποιήσουμε τη συμπεριφορά μόνο των δύο πρώτων στρωμάτων της στοίβας OSI (PHY, MAC) και θα θεωρήσουμε ότι τα ανώτερα στρώματα (Network, Transport, ...) δεν επηρεάζουν τη μελέτη μας.

2.2 Απαιτήσεις Μελλοντικών Ασύρματων Δικτύων Ραδιοπρόσβασης

Καθώς τα δίκτυα κινητών επικοινωνιών 3G κερδίζουν έδαφος αποκτώντας όλο και περισσότερους χρήστες και τα πρώτα WiMax συστήματα εγκαθίστανται, έχει ξεκινήσει συζήτηση για την πορεία εξέλιξης των υπάρχουσών τεχνολογιών που θα οδηγήσει στα μελλοντικά συστήματα ραδιοπρόσβασης. Οι τεχνολογίες εκείνες που θα αναπτυχθούν και θα γίνουν αποδεκτές από τους φορείς προτυποποίησης θα συνιστούν ουσιαστικά την τέταρτη γενιά ραδιοπρόσβασης (4G radio-access) [11, 12]. Παρουσιάζουμε αρχικά τις κυριότερες δραστηριότητες των οργανισμών τυποποίησης προς την κατεύθυνση αυτή:

- Μακροπρόθεσμη Εξέλιξη των δικτύων 3G (3G-LTE Study Item): Πρόκειται για ειδική ομάδα μελέτης που συστάθηκε από τον οργανισμό 3GPP το Σεπτέμβριο του 2004, ενώ ήδη έχουν κυκλοφορήσει η πρώτη σειρά προτύπων (3GPP Release 8) και τεχνικές αναφορές που συνοψίζουν τις βασικές απαιτήσεις και τις πιθανές τεχνολογίες που θα χρησιμοποιηθούν στα νέα δίκτυα ραδιοπρόσβασης. Σε θεωρητικό επίπεδο, η 3GPP βρίσκεται σε προχωρημένο στάδιο προτυποποίησης για το Release 10 (γνωστό και ως 3GPP LTE Advanced).
- Κινητή Ευρυζωνική Ασύρματη Πρόσβαση (IEEE 802.20 MBWA Working Group): Αποτυπώνει τις εργασίες μίας ομάδας που δημιουργήθηκε από την IEEE με σκοπό την προδιαγραφή μίας νέας ασύρματης διεπιφάνειας βελτιστοποιημένης για μετάδοση υπηρεσιών IP σε σταθερούς και κινητούς χρήστες. Δημιουργήθηκε το Δεκέμβριο του 2002 και αρχικά προτάθηκαν οι υποψήφιες τεχνολογίες και η μεθοδολογία αξιολόγησής τους. Το τελικό πρότυπο επικυρώθηκε τον Ιούνιο του 2008 και καθορίζει τα πλήρη χαρακτηριστικά του φυσικού στρώματος και του στρώματος πρόσβασης στο μέσο [13].

- Εξέλιξη των δικτύων 802.16 IEEE 802.16 Working Group): Όπως προαναφέρθηκε, στόχος είναι η ολοκλήρωση των προδιαγραφών μέσα στο 2011 ή 2012 για την Release 2.0 έκδοση, και στη συνέχεια η υποβολή προς αξιολόγηση στην ITU προκειμένου τα ραδιοδίκτυα 802.16m να συμπεριληφθούν στις τεχνολογίες 4^{ης} γενιάς.

Οι κυριότεροι στόχοι για τη νέα γενιά δικτύων κινητών επικοινωνιών σε επίπεδο ραδιοδικτύου συνοψίζονται στα ακόλουθα σημεία:

- Εξαιρετικά αυξημένοι μέγιστοι ρυθμοί μετάδοσης (peak data rates), της τάξης των 300 Mbps για το downlink και 150 Mbps για το uplink, δηλαδή τουλάχιστον μία τάξη μεγέθους παραπάνω σε σχέση με τα υπάρχοντα συστήματα.
- Αυξημένη φασματική απόδοση (Spectrum Efficiency in bits/sec/Hz/site).
- Μέσος ρυθμός μετάδοσης ανά χρήστη (average user throughput) προσαυξημένος κατά 4 φορές τουλάχιστον
- Μέγιστη Καθυστέρηση (latency) στο δίκτυο ραδιοπρόσβασης μικρότερη από 10 ms.
- Κλιμακωτό Εύρος Ζώνης (π.χ. 1.25, 2.5, 5, 10, 20 MHz), προκειμένου να υποστηρίζεται μεγάλο εύρος εφαρμογών, από ιδιαίτερα χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης (της τάξης των kbps) μέχρι και πολύ υψηλούς ρυθμούς (δεκάδων Mbps).
- Βελτιστοποίηση του συστήματος για χαμηλές (0-15 km/hr) και μεσαίες ταχύτητες, αλλά και υποστήριξη χρηστών υψηλών ταχυτήτων (120-350 km/hr).
- Παροχή εξασφαλισμένων επιπέδων ποιότητας υπηρεσίας (Quality of Service - QoS) για πληθώρα υπηρεσιών με διαφορετικά χαρακτηριστικά, όπως VoIP, WWW browsing, FTP downloading, e-mail, Video Streaming. Αναφερόμαστε σε υπηρεσίες πραγματικού χρόνου ή ελαστικές, διαφορετικών απαιτήσεων ρυθμών διέλευσης (από μερικά kbps (VoIP) μέχρι μερικά Mbps (Video)), ανοχών ως προς την καθυστέρηση (delay), τη μεταβολή της καθυστέρησης (delay jitter) και την απώλεια πακέτων (packet loss rate).

Στη συνέχεια θα αναφερθούμε στις πιθανές τεχνολογίες των δύο πρώτων στρωμάτων δικτύου που θα κληθούν να ικανοποιήσουν τις αυξημένες απαιτήσεις των νέων ραδιοδικτύων.

2.3 Τεχνολογίες του Φυσικού Στρώματος

Σκοπός του φυσικού στρώματος είναι η αξιόπιστη μετάδοση και λήψη δεδομένων μέσω του ασύρματου διαύλου, επιτυγχάνοντας υψηλή φασματική απόδοση. Οι τεχνικές αυτές αφορούν στην επικοινωνία από ένα σημείο σε ένα άλλο (point-to-point communication). Για παράδειγμα σε ένα κυψελωτό σύστημα καθορίζουν τον τρόπο επικοινωνίας ενός τερματικού με το σταθμό βάσης (single-user communication scenario).

2.3.1 Προσαρμοστικές Τεχνικές Μετάδοσης

Η αύξηση της φασματικής απόδοσης (spectral efficiency) των ευρυζωνικών δικτύων ραδιοπρόσβασης νέας γενιάς είναι απολύτως αναγκαία προκειμένου να ικανοποιηθούν οι υψηλές απαιτήσεις σε μέγιστους και μέσους ρυθμούς μετάδοσης (peak and average data rates) από την πλευρά των χρηστών. Με τον όρο φασματική απόδοση εννοούμε το μέγιστο ρυθμό bits/sec που μπορεί να υποστηριχθεί για μία ζεύξη για μοναδιαίο εύρος ζώνης μετάδοσης (bps/Hz) και συγκεκριμένη πιθανότητα σφάλματος ανά bit (bit error rate - BER). Για την αξιόπιστη μετάδοση πληροφορίας από έναν πομπό σε έναν δέκτη απαιτείται η εξασφάλιση ενός ελάχιστου επιπέδου BER ή ισοδύναμα ενός ελάχιστου σηματοθορυβικού λόγου (SNR) στον δέκτη, μέσω της ρύθμισης της ισχύος του πομπού. Σύμφωνα με τη θεωρία πληροφορίας (information theory) που θεμελιώθηκε από τον Shannon το 1948, η φύση υπαγορεύει ότι υπάρχει ένα άνω όριο ρυθμού μετάδοσης πάνω από έναν ασύρματο διάυλο, κάτω από το οποίο είναι δυνατή η μετάδοση πληροφορίας με απείρως μικρή πιθανότητα σφάλματος [14]. Το όριο αυτό ονομάζεται χωρητικότητα του διαύλου (Channel Capacity - C) και σχετίζεται με την ισχύ μετάδοσης \bar{P} , το εύρος ζώνης που καταλαμβάνει η πληροφορία W , το κέρδος του διαύλου h , και τη φασματική πυκνότητα ισχύος του θορύβου N_0 . Για έναν χρονικά αμετάβλητο και συχνοτικά επίπεδο (μη επηρεαζόμενο από την ενδοσυμβολική παρεμβολή) διάυλο, λευκού προσθετικού θορύβου (AWGN) η χωρητικότητα δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$C_{awgn} \text{ (bps)} = W \cdot \log \left(1 + \frac{\bar{P}|h|^2}{N_0W} \right) \quad (2.1)$$

Ισοδύναμα, η φασματική απόδοση η οποία αντιστοιχεί στη χωρητικότητα του διαύλου για μοναδιαίο εύρος ζώνης εκφράζεται ως εξής:

$$S_{awgn} \text{ (bps/Hz)} = \frac{C_{awgn}}{W} = \log \left(1 + \frac{\bar{P}|h|^2}{N_0W} \right) = \log(1 + SNR) \quad (2.2)$$

Για την επίτευξη της φασματικής απόδοσης που προβλέπει ο Shannon απαιτείται η χρήση εξαιρετικά ισχυρής κωδικοποίησης διαύλου, η οποία πρακτικά ενδέχεται να μην είναι υλοποιήσιμη. Τα τελευταία χρόνια βέβαια η έρευνα στο χώρο της κωδικοποίησης έχει οδηγήσει στη δημιουργία πρακτικών τεχνικών που προσεγγίζουν το συγκεκριμένο άνω όριο. Σύμφωνα με την εργασία του Cioffi που δημοσιεύεται στο [15], προτείνεται η ενσωμάτωση ενός παράγοντα που ονομάζεται “SNR gap” και συμβολίζεται με Γ ($\Gamma < 1$), στις παραπάνω μαθηματικές σχέσεις, προκειμένου να μοντελοποιηθεί η απόκλιση της υποστηριζόμενης φασματικής απόδοσης σε πραγματικές συνθήκες από την ιδανική απόδοση κατά Shannon. Όσο η παράμετρος αυτή προσεγγίζει τη μονάδα (ή τα 0 dB), τότε ο ρυθμός μετάδοσης προσεγγίζει τη χωρητικότητα του διαύλου. Η σχέση (2.2) μετασχηματίζεται στη σχέση (2.3), η οποία αντιστοιχεί στη χωρητικότητα κατά Shannon, για SNR όμως υποβαθμισμένο κατά μία ποσότητα που καθορίζεται από το “χάσμα” Γ .

$$S_{awgn} \text{ (bps/Hz)} = \log \left(1 + \frac{SNR}{\Gamma} \right) \quad (2.3)$$

Αναφέρουμε τυπικές τιμές για το χάσμα [16]: (α) 9.5 dB για σχήμα τετραγωνικής QAM διαμόρφωσης χωρίς κωδικοποίηση και $BER = 10^{-7}$, (β) 8.8 dB για το ίδιο σχήμα αλλά για $BER = 10^{-6}$ και (γ) περίπου 1 dB για σχήμα κωδικοποίησης τύπου Turbo. Επίσης, αντιστρέφοντας τις δύο αυτές αναλυτικές εκφράσεις, είναι δυνατόν να υπολογιστεί ο ελάχιστος απαιτούμενος σηματοθορυβικός λόγος στο δέκτη προκειμένου να υποστηρίξονται συγκεκριμένοι ρυθμοί μετάδοσης ή φασματικές αποδόσεις. Ας εξετάσουμε το σενάριο μίας δυναμικά μεταβαλλόμενης ζεύξης, για την οποία το κέρδος h δεν είναι σταθερό (π.χ. γιατί η απόσταση πομπού - δέκτη αυξομειώνεται). Σε πρώτη φάση, η σχεδίαση μίας τέτοιας ζεύξης μπορεί να γίνει θεωρώντας το χειρότερο δυνατό σενάριο διάδοσης (worst-case scenario), οπότε ο πομπός εκπέμπει με ισχύ τέτοια που να διατηρεί τον ελάχιστο απαιτούμενο σηματοθορυβικό λόγο στη μεγαλύτερη απόσταση πομπού - δέκτη. Η ισχύς εκπομπής παραμένει σταθερή ακόμη και αν οι συνθήκες διάδοσης κάποια στιγμή βελτιωθούν (π.χ. αν πλησιάσει ο δέκτης τον πομπό) [17]. Σε κάθε περίπτωση, ο σηματοθορυβικός λόγος στο δέκτη θα είναι μεγαλύτερος ή ίσος με τον ελάχιστο απαιτούμενο. Με βάση αυτή την αρχή είχαν σχεδιαστεί τα κυψελωτά συστήματα δεύτερης γενιάς, καθώς καλούνταν να εξασφαλίσουν ελάχιστα επίπεδα SNR ή σταθερούς ρυθμούς μετάδοσης (bit rates) σε μία ευρεία περιοχή κάλυψης, με το χειρότερο σενάριο διάδοσης να εμφανίζεται στα άκρα της κυψέλης (cell-edge). Αυτή η σχεδίαση δεν επιτρέπει την αξιοποίηση πιθανών καλύτερων SNR και άρα υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης που εμφανίζονται σε κοντινούς σε σχέση με το σταθμό βάσης χρήστες, κάτι που δε χρειαζόταν καθώς οι φωνητικές υπηρεσίες απαιτούσαν σταθερό προφίλ ρυθμού μετάδοσης [18]. Στα νέα δίκτυα όμως η υποστήριξη υπηρεσιών πακέτων επιτρέπει την αλλαγή των υποστηριζόμενων ρυθμών κατά τη διάρκεια της μετάδοσης, κάτι που μπορεί να επιτευχθεί μέσω των λεγόμενων προσαρμοστικών τεχνικών μετάδοσης ή ζεύξης (Adaptive Transmission/Link Adaptation Techniques). Ενδεικτικά σημειώνουμε ότι η χρήση τέτοιων μηχανισμών οδηγεί στο διπλασιασμό κατ' ελάχιστον της φασματικής απόδοσης ανά κυψέλη (βλ. [18] για περισσότερες λεπτομέρειες).

Περιγράφουμε αρχικά τα κυριότερα προσαρμοστικά σχήματα μετάδοσης, τα οποία κατηγοριοποιούνται βάσει της παραμέτρου που δύναται να μεταβληθεί.

- **Ισχύς μετάδοσης (Power Control)**: Είναι το απλούστερο προσαρμοστικό σχήμα, καθώς σύμφωνα με αυτό αυξομειώνεται η ισχύς του πομπού ώστε να διατηρείται ο ελάχιστος απαιτούμενος σηματοθορυβικός λόγος. Καλείται και σχήμα “αντιστροφής διαύλου” (channel inversion scheme), καθώς προσαρμόζει την ισχύ μετάδοσης αντιστρόφως ανάλογα με τη κατάσταση του διαύλου. Χρησιμοποιείται ευρέως στα συστήματα WCDMA-UMTS [3].
- **Διαμόρφωση (Adaptive Modulation)**: Στο συγκεκριμένο σχήμα, η ισχύς διατηρείται σταθερή και ανάλογα με την ποιότητα του διαύλου, ανατίθεται για τη μετάδοση των δεδομένων διαφορετικής τάξης διαμόρφωση (modulation order). Η τάξη μίας ψηφιακής διαμόρφωσης εκφράζει τον αριθμό των bits ανά σύμβολο που υποστηρίζει, και δεδομένου ότι ο ρυθμός μετάδοσης συμβόλων (symbol-rate) είναι σταθερός και εξαρτώμενος άμεσα από το εύρος ζώνης, μια αλλαγή της τάξης σηματοδοτεί και την αλλαγή του ρυθμού μετάδοσης (bit-rate). Εν γένει, είναι δυνατό να μεταβάλλεται τόσο το είδος

της διαμόρφωσης (π.χ. PSK, QAM) όσο και η τάξη (π.χ. M-QAM, $M=2,4,8,16,64,\dots$). Κάθε χρονική στιγμή επιλέγεται η υψηλότερης τάξης (άρα και μεγαλύτερου bit-rate) διαμόρφωση που ικανοποιεί την απαίτηση ως προς το επίπεδο BER. Το κέρδος από τη χρήση του σχήματος αυτού είναι προφανές: για ένα δεδομένο επιθυμητό μέσο επίπεδο BER (target BER requirement), ο μέσος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων είναι μεγαλύτερος από αυτόν ενός στατικού σχήματος οποιασδήποτε τάξης. Ήδη, η τεχνική προσαρμοστικής διαμόρφωσης χρησιμοποιείται στα συστήματα HSDPA-UMTS, στα οποία υποστηρίζονται τα σχήματα QPSK, 16-QAM και 64-QAM [4].

- Κωδικοποίηση Καναλιού (Adaptive Channel Coding):** Η λογική είναι παρόμοια με το σχήμα προσαρμοστικής διαμόρφωσης. Σε χρονικά παράθυρα, κατά τη διάρκεια των οποίων ο δίαυλος αναμένεται να προκαλέσει ιδιαίτερη υποβάθμιση του σήματος, επιλέγονται χαμηλοί ρυθμοί κωδικοποίησης (coding rates) ενώ σε αντίθετη περίπτωση επιλέγονται υψηλοί ρυθμοί κωδικοποίησης ή ακόμη και καθόλου κωδικοποίηση. Όσο μικρότερος είναι ο ρυθμός κωδικοποίησης τόσο πιο ισχυρός είναι ο κώδικας, καθώς αυξάνει το κέρδος κωδικοποίησης (coding gain), όμως ταυτόχρονα μειώνεται ο ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων πληροφορίας με δεδομένο το εύρος ζώνης και την ισχύ μετάδοσης (bandwidth efficiency/robustness trade-off). Συνήθως η επιλογή κωδικοποίησης συνδυάζεται με την επιλογή διαμόρφωσης και το σχήμα που προκύπτει καλείται AMC (adaptive modulation & coding scheme). Ένα παράδειγμα εφαρμογής της προσαρμοστικής κωδικοποίησης είναι στα δίκτυα HSDPA-UMTS όπου υποστηρίζεται η συνελικτική κωδικοποίηση Convolutional Coding) και η κωδικοποίηση τύπου Turbo (Turbo Coding) με ρυθμούς από $1/4$ έως $3/4$ [3]. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην επιλογή των δυνατών σχημάτων και των ρυθμών διαμόρφωσης/κωδικοποίησης καθώς και στην απόφαση μετάβασης από ένα σχήμα σε ένα άλλο (modulation and coding mode switching decision) [19].
- Παράγοντας Εξάπλωσης (Variable Spreading Factor):** Αφορά μόνο σε συστήματα CDMA [3]. Η μεταβολή του οδηγεί ουσιαστικά στην αλλαγή του ρυθμού μετάδοσης (όπως και στα δύο προηγούμενα σχήματα), καθώς για δεδομένο chip rate, μεταβάλλεται ουσιαστικά το symbol rate. Αύξηση του παράγοντα αυτού οδηγεί σε μείωση του ρυθμού μετάδοσης, αλλά και σε αύξηση της ανθεκτικότητας της ζεύξης σε φαινόμενα θορύβου και παρεμβολών.

Συμπερασματικά τα βασικά προσαρμοστικά σχήματα μετάδοσης που περιγράψαμε μεταβάλουν την ισχύ ή/και το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων προκειμένου να πετύχουν

- αύξηση του μέσου ρυθμού μετάδοσης δεδομένων για δεδομένο στιγμιαίο ή μέσο επίπεδο BER και δεδομένη στιγμιαία ή μέση ισχύ ή*
- μείωση της ισχύος μετάδοσης για δεδομένο ρυθμό μετάδοσης και απαιτούμενο BER ή*
- μείωση του BER για δεδομένη ισχύ και απαιτούμενο ρυθμό μετάδοσης.*

Σε ένα δυναμικό σύστημα, απαιτείται η αναπροσαρμογή των παραμέτρων μετάδοσης, όποτε παρατηρείται κάποια αλλαγή της κατάστασης του διαύλου. Ο ρυθμός προσαρμογής των παραμέτρων κατέχει εξίσου σημαντικό ρόλο με την απόφαση για την τιμή που θα λάβει η εκάστοτε παράμετρος. Σε όλα τα προαναφερθέντα σχήματα οι παράμετροι μετάδοσης ρυθμίζονται με βάση την εκτιμώμενη ποιότητα του διαύλου πομπού - δέκτη από την πλευρά του πομπού. Εν γένει ο κινητός ασύρματος διάυλος (mobile radio channel) είναι ένα χρονικά μεταβαλλόμενο μέσο διάδοσης κάτι που οφείλεται στην πιθανή κίνηση του πομπού ή/και του δέκτη ή/και του περιβάλλοντος [20]. Η ταχύτητα μεταβολής του διαύλου περιγράφεται από το μέγεθος της διασποράς Doppler (Doppler Spread) στο πεδίο της συχνότητας ή της χρονικής διάρκειας συνοχής (Coherence Time) στο πεδίο του χρόνου. Ο χρόνος συνοχής ποιοτικά εκφράζει το χρονικό διάστημα στο οποίο η κατάσταση του διαύλου δεν έχει μεταβληθεί ιδιαίτερα, δηλ. μπορούμε να ισχυριστούμε ότι ο διάυλος παραμένει σχετικά σταθερός. Συμπεραίνουμε ότι υπάρχει άμεση εξάρτηση του χρόνου συνοχής του διαύλου με το ρυθμό προσαρμογής των παραμέτρων. Σε συστήματα μετάδοσης δεδομένων, όπου η μετάδοση γίνεται υπό μορφή πλαισίων (frames) που περιέχουν πλήθος συμβόλων, το μέγεθος του πλαισίου επιλέγεται ώστε να είναι μικρότερο του αναμενόμενου χρόνου συνοχής προκειμένου ο διάυλος να εμφανίζει σταθερή συμπεριφορά κατά τη διάρκεια εκπομπής του. Ο έλεγχος για αλλαγή των παραμέτρων πραγματοποιείται τότε ανά πλαίσιο ή ανά μερικά πλαίσια. Για παράδειγμα, στα συστήματα HSPA-UMTS το μήκος του πλαισίου είναι 2 ms, ο χρόνος συνοχής για ταχύτητες του κινητού μέχρι 30 km/hr και για συχνότητα λειτουργίας στα 2 GHz είναι περίπου 8 ms, ίσως προς 4 πλαίσια. Επομένως για χαμηλές ταχύτητες του κινητού δέκτη, ο διάυλος μεταβάλλεται αρκετά αργά και η εφαρμογή προσαρμοστικής διαμόρφωσης και κωδικοποίησης αναμένεται να ωφελήσει το σύστημα.

Ωστόσο η εισαγωγή των προσαρμοστικών τεχνικών απαιτεί δύο σημαντικές τροποποιήσεις σε σχέση με τα στατικά σχήματα, οι οποίες αυξάνουν την πολυπλοκότητα των πομποδεκτών και δεν είναι πάντα τεχνικά εφικτές να υλοποιηθούν. Η πρώτη αφορά στην **εκτίμηση της ποιότητας του διαύλου** πομπού - δέκτη από τον πομπό. Συνήθως η εκτίμηση πραγματοποιείται στο δέκτη και στη συνέχεια κωδικοποιείται και μεταδίδεται στον πομπό μέσω ενός διαύλου σηματοδοσίας (feedback signaling channel). Διάφορα μετρικά έχουν προταθεί κατά καιρούς και παρουσιάζουμε τα σημαντικότερα: λαμβανόμενη ισχύς σήματος (received signal strength - RSS) μετρούμενη πριν τον αποδιαμορφωτή, λαμβανόμενος σηματοθορυβικός λόγος (SNR) (ή σηματοπαρεμβολικός λόγος - SIR ή λόγος σήματος προς θόρυβο και παρεμβολή - SINR) μετά τον αποδιαμορφωτή, ρυθμός εσφαλμένων bits (BER) ή πλαισίων (FER) ή ένδειξη CRC μετρούμενα μετά τον αποκωδικοποιητή καναλιού. Τα μετρικά αυτά διαφέρουν ανάλογα με το σημείο λήψης τους στην αλυσίδα του δέκτη. Αν και οι ρυθμοί σφαλμάτων είναι πιο αξιόπιστα μετρικά σε σχέση με τα υπόλοιπα, εντούτοις απαιτούν τη λήψη μεγάλου αριθμού δειγμάτων bits ή πλαισίων προκειμένου να εκτιμηθούν με ασφάλεια. Παρότι η εκτίμηση του διαύλου μπορεί να είναι ακριβής, ενδέχεται η πληροφορία αυτή που αποστέλλεται στον πομπό να μην είναι ορθή, εξαιτίας της χρονικής μεταβολής του. Έτσι είναι πιθανό να υποεκτιμηθεί ή να υπερεκτιμηθεί η ποιότητα του διαύλου και η απόφαση για τις παραμέτρους μετάδοσης να μην είναι η βέλτιστη δυνατή.

Επιπλέον, ιδιαίτερη μέριμνα πρέπει να ληφθεί στην απαιτούμενη **σηματοδοσία**. Αφενός

πρέπει να οριστεί ένα κανάλι που θα μεταφέρει τις εκτιμήσεις της ποιότητας του διαύλου από το δέκτη στον πομπό με απόλυτη αξιοπιστία, αφετέρου καθώς ο πομπός μεταβάλλει τα χαρακτηριστικά της μετάδοσης, θα πρέπει να ενημερώνει και το δέκτη μέσω ενός άλλου καναλιού για τις παραμέτρους που τελικά επέλεξε (π.χ. είδος διαμόρφωσης/κωδικοποίησης, κώδικας CDMA), προκειμένου να πραγματοποιηθεί η αποδιαμόρφωση και η αποκωδικοποίηση του σήματος. Για την ενημέρωση του δέκτη, εναλλακτικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέθοδοι τυφλής αναγνώρισης (blind recognition techniques), οι οποίες όμως είναι ιδιαίτερα σύνθετες και ευαίσθητες. Οι δύο δίαυλοι σηματοδοσίας επιβαρύνουν προφανώς τη φασματική απόδοση του συστήματος και για τις δύο ζεύξεις.

Σχόλιο: Οι προσαρμοστικές τεχνικές που περιγράφηκαν στην ενότητα αυτή αφορούσαν συστήματα μονής φέρουσας. Ωστόσο μπορούν κάλλιστα να εφαρμοστούν και σε συστήματα πολλαπλών φερόντων, μεταβάλλοντας την ισχύ και το ρυθμό μετάδοσης κάθε υποφέροντος. Η πολυπλοκότητα και η σηματοδοσία αυξάνει σημαντικά καθώς απαιτείται εκτίμηση της ποιότητας του διαύλου και ενημέρωση του πομπού για όλα τα υποφέροντα. Θα αναφερθούμε διεξοδικά στο θέμα αυτό σε επόμενη ενότητα. Για τον υπολογισμό της χωρητικότητας ενός συστήματος OFDM, χρησιμοποιείται η έννοια του “παράλληλου διαύλου” (ή *parallel channel*) [14]: ένας δίαυλος ο οποίος αποτελείται από ένα πλήθος μη παρεμβαλλόντων υποδιαύλων, οι οποίοι επηρεάζονται ανεξάρτητα από το θόρυβο, μπορεί να μετασχηματιστεί σε έναν παράλληλο χρονικά αμετάβλητο AWGN δίαυλο, με την ισχύ και το εύρος ζώνης να μοιράζονται στους επιμέρους διαύλους. Όσον αφορά ένα σύστημα που χρησιμοποιεί διαμόρφωση OFDM η χωρητικότητα δίνεται από τη μαθηματική σχέση (2.4). Παρατηρούμε την εξάρτηση της χωρητικότητας από την κατανομή της ενέργειας (ή της ισχύος) στα υποφέροντα και από το κέρδος κάθε υποφέροντος. Η κατανομή της ισχύος που οδηγεί στην μεγιστοποίηση του συνολικού ρυθμού μετάδοσης είναι η λύση του προβλήματος (2.5). Η λύση αυτή απαντάται στη βιβλιογραφία με το όνομα “waterfilling power allocation” [14, 16].

$$C_{awgn}^{OFDM} (\text{bits/OFDM symbol}) = \sum_{n=0}^{N_C-1} \log \left(1 + \frac{E_n |h_n|^2}{N_0} \right) \quad (2.4)$$

$$C_{awgn}^{OFDM} := \max_{E_0, E_1, \dots, E_{N_C-1}} \sum_{n=0}^{N_C-1} \log \left(1 + \frac{E_n |h_n|^2}{N_0} \right) \quad \text{s.t.} \quad \sum_{n=0}^{N_C-1} E_n = N_C E = N_C \left(\bar{P}/W \right) \quad (2.5)$$

2.3.2 Διαμόρφωση Πολλαπλών Φερόντων

Η απαίτηση για υψηλούς ρυθμούς επικοινωνίας οδηγεί στην αύξηση του εύρους ζώνης μετάδοσης, από τα 5 MHz των WCDMA-3G συστημάτων στα 20 έως 100 MHz. Ένα τόσο ευρυζωνικό περιβάλλον όμως παραμορφώνει το μεταδιδόμενο σήμα, με αποτέλεσμα να μην αποδιαμορφώνεται ικανοποιητικά στο δέκτη. Εν γένει ένας ασύρματος δίαυλος είναι ένα πολυδιαδρομικό μέσο διάδοσης (multipath propagation environment), εξαιτίας των ανακλάσεων,

διαθλάσεων και περιθλάσεων των ακτίνων σε πολλαπλά εμπόδια [20]. Στο δέκτη φτάνουν διάφορες εκδοχές του αρχικού σήματος με διαφορετικές τυχαίες καθυστερήσεις και αποσβέσεις. Το σήμα λοιπόν υφίσταται χρονική διασπορά (time dispersion) προκαλώντας διασυμβολική παρεμβολή (Intersymbol Interference - ISI), καθώς εκδοχές προηγούμενων συμβόλων παρεμβάλλουν με επόμενα σύμβολα. Το φαινόμενο είναι ιδιαίτερα έντονο όταν η καθυστέρηση της τελευταίας χρονικά και αξιόλογου πλάτους συνιστώσας (max delay spread) είναι μεγαλύτερη (ή και γενικότερα συγκρίσιμου μεγέθους) από τη διάρκεια του συμβόλου. Αυξάνοντας το εύρος ζώνης ενός συστήματος, ουσιαστικά μειώνουμε τη διάρκεια του συμβόλου και για ένα δεδομένο περιβάλλον διάδοσης, το πρόβλημα γίνεται εντονότερο. Επομένως το φαινόμενο αυτό θέτει ένα άνω όριο στο μέγιστο ρυθμό μετάδοσης ενός συστήματος. Μία ισοδύναμη περιγραφή του προβλήματος δίνεται και στο πεδίο της συχνότητας. Η χρονική διασπορά του διαύλου περιγράφεται στο πεδίο της συχνότητας από το Εύρος Ζώνης Συνοχής (Coherence Bandwidth), το οποίο συνδέεται με αντίστροφη σχέση με την εξάπλωση καθυστέρησης delay spread. Όταν το εύρος ζώνης ενός συστήματος είναι μεγαλύτερο από το εύρος ζώνης συνοχής του διαύλου, το σήμα υφίσταται συχνοεπιλεκτική διάλειψη (Frequency Selective Fading) που το υποβαθμίζει. Για την ομαλή λειτουργία των δεκτών θα πρέπει το σύστημα να λειτουργεί σε εύρος ζώνης στενότερο από αυτό του διαύλου. Αναφέρουμε ότι για τυπικά μετρηθέντα περιβάλλοντα διάδοσης γύρω από τα 900 MHz το εύρος ζώνης συνοχής κυμαίνεται από τα 150 έως τα 700 KHz [20]. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού μπορούν να χρησιμοποιηθούν τεχνικές ισοστάθμισης (equalization), διαφορικής λήψης μέσω πολλαπλών κεραιών (receive diversity), κωδικοποίησης (channel coding), ή προηγμένων δεκτών τύπου RAKE. Πολλές από αυτές εφαρμόζονται στα συστήματα δεύτερης και τρίτης γενιάς.

Ωστόσο, για την υποστήριξη εύρους ζώνης δεκάδων MHz - όπως θα απαιτηθεί στα μελλοντικά ραδιοδίκτυα - οι τεχνικές διαμόρφωσης πολλαπλών φερόντων (Multicarrier modulation) όπως η OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) είναι οι πλέον κατάλληλες για την αντιμετώπιση του φαινομένου ISI. Η αρχή λειτουργίας της διαμόρφωσης OFDM είναι η ακόλουθη: Το συνολικό εύρος ζώνης μετάδοσης διαχωρίζεται σε μικρότερες φασματικές ζώνες, οι οποίες είναι ορθογωνικές μεταξύ τους, και καλούνται υποφέροντα (subcarriers). Η προς μετάδοση συμβολοακολουθία μοιράζεται στα υποφέροντα, με αποτέλεσμα ο ρυθμός μετάδοσης σε κάθε υποφέρον να είναι σαφώς μικρότερος από το συνολικό επιθυμητό ρυθμό. Αν ο αριθμός των υποφερόντων είναι αρκετά μεγάλος, κάθε ένα από αυτά δε θα αντιμετωπίζει πρόβλημα διασυμβολικής παρεμβολής καθώς πλέον το εύρος ζώνης θα είναι μικρότερο από το εύρος ζώνης συνοχής του διαύλου. Στη συνέχεια τα διαμορφωμένα σήματα από τα ανεξάρτητα υποφέροντα προστίθενται και το τελικό σήμα εκπέμπεται από την κεραία στο πεδίο του χρόνου. Στην πλευρά του δέκτη τα υποφέροντα αποδιαμορφώνονται σειριακά και ανασυντίθεται η αρχική συμβολοακολουθία. Ισοδύναμα στο πεδίο του χρόνου, η αρχική συμβολοσειρά ιδιαίτερα μικρής διάρκειας συμβόλου και άρα ευαίσθητης στη διασυμβολική παρεμβολή, σπάει σε επιμέρους συμβολοσειρές μεγαλύτερης διάρκειας συμβόλου ικανές να αντιμετωπίσουν το πρόβλημα απορροφώντας τις καθυστερημένες συνιστώσες του σήματος. Εκ πρώτης όψης, η πολυπλοκότητα ενός πομποδέκτη OFDM σε σχέση με έναν πομποδέκτη μονής φέρουσας (single carrier - SC) είναι εξαιρετικά υψηλή, καθώς απαιτείται πλήθος διαμορφωτών/αποδιαμορφωτών (radio

modems) ίσως προς τον αριθμό των υποφερόντων, που κυμαίνεται από μερικές δεκάδες έως και χιλιάδες. Η εφαρμογή προηγμένων υπολογιστικών τεχνικών απλοποίησε ιδιαίτερα την υλοποίηση. Ενώ η ιδέα της διαμόρφωσης πολλαπλών φερόντων υπήρχε από τη δεκαετία του 1950, μόνο μετά τη σύλληψη της ιδέας της υλοποίησης μέσω τεχνικών ψηφιακής επεξεργασίας σήματος (digital signal processing techniques) εμφανίστηκαν τα πρώτα πρωτότυπα [21]. Έτσι, ένα σήμα OFDM μπορεί να παραχθεί μέσω αλγορίθμων διακριτού μετασχηματισμού Fourier DFT, που είναι ιδιαίτερα απλοί και υπολογιστικά αποδοτικοί. Στον πομπό απαιτείται ένα μπλοκ που υλοποιεί τον αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier (π.χ. IFFT) και στο δέκτη ένα αντίστοιχο μπλοκ FFT [22].

2.3.3 Τεχνικές Πολλαπλών Κεραίων

Αν και η ιδέα της χρήσης πολλαπλών κεραιοσυστημάτων (multiple antenna systems ή Multiple Input Multiple Output systems - MIMO) στον πομπό ή/και στο δέκτη ενός συστήματος με σκοπό τη βελτίωση της επίδοσής του δεν είναι νέα, μετά το 2000 έχει παρατηρηθεί μεγάλη αναθέρμανση στο συγκεκριμένο ερευνητικό αντικείμενο. Τα οφέλη από τη χρήση πολλαπλών κεραιών συνοψίζονται στα ακόλουθα σημεία [8], ορισμένα από τα οποία βέβαια είναι αλληλοσυγκρουόμενα:

- Μείωση των σφαλμάτων σε επίπεδο bit ή frame (BER/FER) χωρίς αύξηση της ισχύος για έναν δίαυλο με διαλείψεις (fading channel)
- Αύξηση του υποστηριζόμενου ρυθμού μετάδοσης λόγω αύξησης του σηματοθορυβικού λόγου
- Μείωση της εκπεμπόμενης ισχύος

Σε κάθε περίπτωση επιτυγχάνεται αύξηση της φασματικής απόδοσης καθώς αποφεύγεται η αύξηση του εύρους ζώνης ή της ισχύος μετάδοσης προκειμένου να βελτιωθεί η συμπεριφορά της ζεύξης. Η χρήση τέτοιων τεχνικών απαιτεί μία επιπλέον αλυσίδα RF και ένα μπλοκ επεξεργασίας σήματος (Signal Processing Block) για κάθε επιπλέον κεραία, κάτι που αυξάνει το μέγεθος, την πολυπλοκότητα και την κατανάλωση ενέργειας των συστημάτων. Η εφαρμογή τους σε επικοινωνίες σταθμού βάσης - κινητού τερματικού περιορίζεται από το φυσικό μέγεθος και τη διάρκεια της μπαταρίας των τερματικών. Γι' αυτό το λόγο τα πολλαπλά κεραιοσυστήματα αρχικά βρήκαν εφαρμογή μόνο στους σταθμούς βάσης.

Η αρχική εφαρμογή συνίστατο στη βελτίωση της αξιοπιστίας μίας ζεύξης με χρήση δύο ή και περισσότερων κεραιών στο δέκτη. Τα συστήματα που χρησιμοποιούν την τεχνική αυτή καλούνται συστήματα διαφορικής λήψης (receive diversity) και ανήκουν στη γενική κατηγορία των συστημάτων χωρικής διαφορικότητας (**spatial diversity**). Στόχος της τεχνικής αυτής είναι η μείωση του επιπέδου BER/FER. Αυτό επιτυγχάνεται μεταδίδοντας την πληροφορία μέσω παράλληλων ασυσχέτιστων διαύλων που δημιουργούνται από τη χρήση πολλαπλών κεραιών και συνδυάζοντας τα λαμβανόμενα σήματα στο δέκτη κατάλληλα (selection/maximum ratio/equal gain combining). Χαρακτηριστικά αναφέρουμε ένα κέρδος της τάξης των 10 dB για $BER = 10^{-4}$, με χρήση της τεχνικής MRC [23]. Μία νεότερη τεχνική που είναι γνωστή

ως σχήμα Alamouti μεταφέρει ουσιαστικά τις κεραιές και την επεξεργασία του σήματος από το δέκτη στον πομπό.

Η δεύτερη κατηγορία εφαρμογών σχετίζεται με τη δυναμική μεταβολή του διαγράμματος ακτινοβολίας του πομπού ή/και του δέκτη. Αναφερόμαστε στα προσαρμοστικά ή “έξυπνα” κεραιοσυστήματα (**adaptive/smart antenna systems**), τα οποία βελτιώνουν τη ζεύξη, ελαχιστοποιώντας πιθανές παρεμβολές. Ουσιαστικά, μεταβάλλουν το διάγραμμα ακτινοβολίας του ενός σημείου δημιουργώντας μέγιστα προς την κατεύθυνση του έτερου σημείου και μηδενισμούς (nulls) προς κατευθύνσεις παρεμβαλλόντων πομπών. Η διαδικασία αυτή είναι γνωστή στη βιβλιογραφία και ως “beamforming” και ο βασικός τεχνικός περιορισμός της έγκειται στην αναγνώριση των κατευθύνσεων των πιθανών παρεμβολών.

Η τελευταία και πιο σύγχρονη κατηγορία στοχεύει στη δραματική αύξηση της φασματικής απόδοσης ή του ρυθμού μετάδοσης πάνω από μία ζεύξη, τοποθετώντας περισσότερες από μία κεραιές τόσο στον πομπό όσο και στο δέκτη. Αυτό επιτυγχάνεται μεταδίδοντας διαφορετική πληροφορία σε κάθε κεραιά, μία τεχνική που καλείται χωρική πολυπλεξία (**spatial multiplexing**). Καθώς οι ροές πληροφορίας διέρχονται από ένα ιδιαίτερα διασκορπιστικό περιβάλλον, είναι δυνατόν να διαχωριστούν στο δέκτη εφαρμόζοντας προηγμένες τεχνικές επεξεργασίας σημάτων, εκμεταλλευόμενοι τη λεγόμενη χωρική υπογραφή που διαθέτει η κάθε μία. Η μέγιστη χωρητικότητα της ζεύξης αυξάνεται γραμμικά με τον αριθμό των χρησιμοποιούμενων κεραιών, για δεδομένο εύρος ζώνης μετάδοσης ενώ ταυτόχρονα δεν αυξάνεται η παρεμβολή στο ίδιο ή σε γειτονικά συστήματα [24, 25, 26]. Οι σημαντικότερες μέθοδοι επεξεργασίας σήματος στα συγκεκριμένα συστήματα είναι οι MLD, V-BLAST, και SVD [23].

Η εισαγωγή των τεχνικών spatial multiplexing MIMO στα συστήματα νέας γενιάς θεωρείται απαραίτητη για την υποστήριξη των αναμενόμενων υψηλών απαιτήσεων σε ρυθμούς μετάδοσης. Η τεχνική αναφορά [27] ήταν η πρώτη που έθεσε τις απαραίτητες προϋποθέσεις για την υποστήριξη τεχνικών MIMO δύο ή τεσσάρων κεραιών και πρότεινε πιθανές αρχιτεκτονικές υλοποίησης. Οι τεχνικές αυτές υιοθετήθηκαν στην αμέσως επόμενη έκδοση του προτύπου, τον Οκτώβριο του 2007 (3GPP-Release 7 [28]). Παράλληλα, στο πρότυπο για δίκτυα WMAN της IEEE (802.16e-Mobile WiMax) που εκδόθηκε στα τέλη του 2005 [9], συμπεριλήφθησαν και σχήματα MIMO .

2.4 Τεχνολογίες του Στρώματος Ελέγχου Πρόσβασης στο Μέσο

Το στρώμα ελέγχου πρόσβασης στο μέσο (MAC layer) έχει την ευθύνη της εξυπηρέτησης πλήθους χρηστών (multi-user communication) και για τις δύο κατευθύνσεις επικοινωνίας (downlink, uplink), διαχειριζόμενο τους διαθέσιμους ραδιοπόρους του συστήματος. Η λειτουργία του δεν είναι αποκομμένη από αυτή του φυσικού στρώματος, καθώς για την αποδοτική αξιοποίηση των ραδιοπόρων απαιτείται η γνώση πληροφοριών από το φυσικό στρώμα, όπως η κατάσταση του ασύρματου διαύλου και το κόστος από την ανάθεση συγκεκριμένων πόρων στους χρήστες. Παράλληλα, συνδέεται άμεσα και με το στρώμα δικτύου (Network Layer)

καθώς από αυτό δέχεται τα αιτήματα των χρηστών για συγκεκριμένα προφίλ κίνησης και ποιότητας υπηρεσίας. Μάλιστα σε καταστάσεις υπερφόρτωσης του δικτύου, το στρώμα αυτό καλείται να επιλέξει ποιο ή ποια από τα αιτήματα τελικά θα εξυπηρετήσει, καθώς ενδέχεται να μην είναι δυνατή η ικανοποίηση όλων. Οι βασικές λειτουργίες συνοψίζονται στα ακόλουθα σημεία και αναλύονται διεξοδικά στη συνέχεια:

- Ανάθεση των ραδιοπόρων του δικτύου πρόσβασης στους διάφορους χρήστες (Radio Resource Allocation - RRA) με σκοπό τη βέλτιστη χρησιμοποίησή (utilization) και την ικανοποίηση επιπέδων ποιότητας υπηρεσίας του φυσικού στρώματος (BER/FER). Οι τεχνικές αυτές καλούνται και σχήματα πολλαπλής πρόσβασης ή πολυπλεξίας χρηστών (multiple access/user multiplexing)
- Εξυπηρέτηση των διαφορετικών αιτημάτων των χρηστών για μετάδοση δεδομένων, εξασφαλίζοντας προκαθορισμένα μακροπρόθεσμα ή βραχυπρόθεσμα επίπεδα ποιότητας υπηρεσίας (long- or short-term QoS) όπως συγκεκριμένο ρυθμό διέλευσης ή/και μέγιστη καθυστέρηση (throughput, delay). Οι τεχνικές που προκύπτουν καλούνται να ικανοποιήσουν τα αιτήματα αυτά καλούνται σχήματα χρονοπρογραμματισμού κίνησης ή πακέτων (Traffic/Packet Scheduling - PS)

2.4.1 Πολλαπλή πρόσβαση/Πολυπλεξία χρηστών στο Ασύρματο Μέσο και Ανάθεση Ραδιοπόρων

Το διαθέσιμο εύρος ζώνης και η μέγιστη ισχύς μετάδοσης αποτελούν τους βασικούς ραδιοπόρους. Όπως έχουμε αναφέρει και σε προηγούμενο σημείο, το διαθέσιμο φάσμα είναι ένα αγαθό ιδιαίτερα ακριβό και συνεπώς κάθε πάροχος οφείλει να το αξιοποιεί στο μέγιστο δυνατό βαθμό. Η απόκτηση άδειας λειτουργίας σε μία φασματική ζώνη κοστίζει τεράστια ποσά και η δυνατότητα επέκτασής της είναι εξαιρετικά περιορισμένη. Συνήθως το διαθέσιμο εύρος ζώνης διαιρείται σε επιμέρους διαύλους ή κανάλια μικρότερου εύρους, που αποτελούν ουσιαστικά τους πόρους συχνότητας (frequency resources). Όσον αφορά στην ισχύ μετάδοσης από την άλλη πλευρά, η αύξηση της μπορεί μεν να βελτιώνει την επίδοση μίας επικοινωνίας, ωστόσο αυξάνει τα επίπεδα παρεμβολών στο ίδιο ή σε άλλα φασματικά γειτονικά συστήματα, υποβαθμίζοντας τη λειτουργία τους και ταυτόχρονα αυξάνει την κατανάλωση ενέργειας, κάτι που είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τα κινητά τερματικά. Γι αυτό το λόγο τίθεται ένα όριο στη μέγιστη ισχύ μετάδοσης του σταθμού βάσης και των κινητών τερματικών. Επίσης, στα συστήματα που χρησιμοποιούν διαμόρφωση CDMA στο φυσικό στρώμα (π.χ. UMTS), οι ψευδοτυχαίες ακολουθίες ή κώδικες (codes) χαρακτηρίζονται ως πόροι του δικτύου, καθώς το πλήθος τους είναι πεπερασμένο αν επιθυμούμε τη διατήρηση της μηδενικής ετεροσυσχέτισής τους. Τέλος, και οι χρονοθυρίδες (time slots) στις οποίες μεταδίδονται τα πλαίσια δεδομένων (frames) των χρηστών εντάσσονται στους ραδιοπόρους. Οι τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης και οι αντίστοιχοι μηχανισμοί ανάθεσης πόρων μπορούν να κατηγοριοποιηθούν βασιζόμενοι σε διαφορετικά κριτήρια και χαρακτηριστικά. Τρεις είναι οι βασικές κατηγοριοποιήσεις που περιγράφονται αναλυτικά στη συνέχεια.

Η πρώτη κατηγοριοποίηση διακρίνει τις τεχνικές σε “τυχαίας” ή “ανταγωνιστικής” πρόσβασης (random/contention-based access) και κεντρικά διαχειριζόμενης πρόσβασης (centrally controlled access) [8]. Στην πρώτη κατηγορία, δε δεσμεύονται εξαρχής πόροι για να εξυπηρετηθούν τα αιτήματα των χρηστών, αλλά κάθε χρήστης ανταγωνίζεται με τους άλλους, ζητώντας πρόσβαση στο ασύρματο μέσο όποτε διαθέτει δεδομένα προς μετάδοση ή λήψη. Αν υπάρξει “σύγκρουση” δύο ή περισσότερων πλαισίων, τότε αυτά καταστρέφονται. Οι πιο γνωστές τεχνικές που εφαρμόζονται κυρίως στα ασύρματα τοπικά δίκτυα υπολογιστικών συστημάτων WLAN, είναι οι ALOHA, Slotted-ALOHA και CSMA. Στη δεύτερη κατηγορία, υπάρχει μία κεντρική οντότητα (που συνήθως βρίσκεται στο σταθμό βάσης) η οποία συγκεντρώνει τα αιτήματα των χρηστών είτε πρόκειται για το uplink είτε για το downlink και αποφασίζει ποια από αυτά και μέσω ποιων πόρων θα εξυπηρετηθούν κάθε χρονική στιγμή. Η συγκεκριμένη κεντρική διαχείριση ευνοείται στην περίπτωση του downlink, καθώς τα δεδομένα ήδη υπάρχουν στο σταθμό βάσης. Για το uplink, κάθε χρήστης πρέπει να ενημερώνει σε συνεχή βάση τον σταθμό βάσης μέσω ενός διαύλου σηματοδότησης για τα πιθανά αιτήματά του. Παρ’οτι η δεύτερη κατηγορία είναι σαφώς πιο πολύπλοκη από την πρώτη, προτιμάται καθώς η φασματική απόδοση των τεχνικών αυτών είναι πολύ υψηλότερη, ιδιαίτερα σε δίκτυα υπερφορτωμένα. *Στα πλαίσια της διατριβής, δε θα μας απασχολήσουν συνεπώς μηχανισμοί τυχαίας πρόσβασης και από εδώ και στο εξής θα αναφερόμαστε μόνο σε τεχνικές κεντρικά ελεγχόμενες.*

Μία διαφορετική κατηγοριοποίηση διακρίνει τις τεχνικές σε ορθογωνικού τύπου (orthogonal multiple access) και μη ορθογωνικού τύπου (non-orthogonal multiple access) [29]. Στην πρώτη κατηγορία απαγορεύεται η ταυτόχρονη ανάθεση ενός ραδιοπόρου (χρονοθυρίδας, καναλιού, κώδικα ή συνδυασμός των παραπάνω) σε περισσότερους από έναν χρήστες. Η ορθογωνικότητα συνίσταται στην ανάθεση διαφορετικών χρονοθυρίδων, διαφορετικών καναλιών και ασυσχέτιστων κωδίκων. Με αυτό τον τρόπο, απλοποιείται αρκετά η σχεδίαση και λειτουργία των δεκτών καθώς δεν εμφανίζεται το πρόβλημα της ενδοκυψελικής παρεμβολής μεταξύ των χρηστών (intra-cell interference). Βέβαια η φασματική απόδοση μειώνεται καθώς οι πόροι εξαντλούνται και για το λόγο αυτό τα συστήματα που χρησιμοποιούν ορθογωνικές τεχνικές λέμε ότι είναι “hard-capacity constrained”. Αντιθέτως τεχνικές οι οποίες επιτρέπουν την ταυτόχρονη ανάθεση ενός ραδιοπόρου σε πολλούς χρήστες, καλούνται μη ορθογωνικές και πλεονεκτούν σε σχέση με τις προηγούμενες στο γεγονός ότι υποστηρίζουν την αναχρησιμοποίηση των πόρων, κάτι που οδηγεί στην αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου. Αποτέλεσμα είναι να εμφανίζεται ενδοκυψελική παρεμβολή μεταξύ των χρηστών, η οποία υποβαθμίζει την ποιότητα των ζεύξεων. Για την αντιμετώπιση του φαινομένου αυτού επιστρατεύονται προηγμένες τεχνικές των δεκτών (interference-cancellation techniques/multi-user detectors) και τεχνικές ταχέως ελέγχου της ισχύος (fast power control schemes), αυξάνοντας την πολυπλοκότητα. Η υπερφόρτωση των δικτύων αυτών δεν αντικατοπτρίζεται στην εξάντληση των φυσικών ραδιοπόρων αλλά στην αύξηση της ισχύος μετάδοσης, της παραγόμενης παρεμβολής και τελικά στην υποβάθμιση της ποιότητας των ζεύξεων. Γι’αυτό δίκτυα που χρησιμοποιούν μη ορθογωνικές τεχνικές πρόσβασης λέμε ότι είναι “soft-capacity constrained”.

Τέλος, εξαιτίας της χρήσης διαφορετικών ασύρματων διεπαφών στα διάφορα δίκτυα επικοινωνίας

ωνιών, ορισμένοι μόνο τύποι ραδιοπόρων από όσους έχουν αναφερθεί ως τώρα εμφανίζονται σε κάθε δίκτυο και όχι όλοι ταυτόχρονα. Κάθε τύπος ραδιοπόρου ονομάζεται και διάσταση (dimension) ή βαθμός ελευθερίας (degree-of-freedom) του δικτύου πρόσβασης. Παρουσιάζουμε συνοπτικά τις διάφορες υποκατηγορίες της τρίτης βασικής κατηγοριοποίησης [14, 30]:

- *Πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση χρόνου (TDMA)*: Είναι η απλούστερη τεχνική, σύμφωνα με την οποία ο χρόνος διαιρείται σε χρονοθυρίδες που ανατίθενται στους χρήστες με κυκλική εναλλαγή. Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται στα συστήματα GSM [20], όπου κάθε διάυλος μοιράζεται σε 8 χρήστες, καθώς απαρτίζεται από αντίστοιχο αριθμό χρονοθυρίδων. Η ανάθεση των πόρων στην περίπτωση αυτή είναι στατική και κατάλληλη για επικοινωνίες φωνής όπου το προφίλ κίνησης είναι σταθερό.
- *Πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση συχνότητας (FDMA)*: Είναι παρόμοια με την TDMA τεχνική, καθώς το φάσμα διαιρείται σε διαύλους που δεν παρεμβάλλουν μεταξύ τους και ανατίθενται στους χρήστες. Επιπλέον, στα κυψελωτά συστήματα GSM [20] οι διαύλοι ομαδοποιούνται συγκροτώντας group συχνοτήτων. Κάθε κυψέλη έχει πρόσβαση σε μια ομάδα διαύλων, προκειμένου οι γειτονικές να μην παρεμβάλλουν και να μην παρεμβάλλονται από τη χρήση κοινών διαύλων. Έτσι, στην πράξη το σχήμα πολλαπλής πρόσβασης που εφαρμόζεται είναι ένας συνδυασμός FDMA-TDMA, με στατική ανάθεση ραδιοπόρων. Με την είσοδο ενός χρήστη στο δίκτυο ανατίθενται συγκεκριμένα ζεύγη (καναλιού, χρονοθυρίδας) για την εξυπηρέτησή του.
- *Πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση κώδικα (CDMA)*: Διαφέρει σημαντικά από τις δύο προηγούμενες, καθώς όλοι οι χρήστες μεταδίδουν ταυτόχρονα, καταλαμβάνοντας όλο το διαθέσιμο φάσμα. Ο διαχωρισμός γίνεται μέσω του πολλαπλασιασμού του σήματος κάθε χρήστη με μια ψευδοτυχαία ακολουθία που καλείται κώδικας. Εμφανίζεται με δύο μορφές, τη μη ορθογωνική και την ορθογωνική. Στην πρώτη περίπτωση, η οποία εφαρμόζεται στο uplink των WCDMA συστημάτων [3], οι κώδικες δεν είναι ορθογωνικοί και η αποδιαμόρφωση των πληροφοριών στο σταθμό βάσης επικουρείται από την εφαρμογή ελέγχου ισχύος και προηγμένων τεχνικών λήψης. Στη δεύτερη περίπτωση, που βρίσκει εφαρμογή στο downlink των δικτύων HSPA [4], σε κάθε χρήστη ανατίθεται δυναμικά μέρος των συνολικών χρονοθυρίδων και των ορθογωνικών κωδίκων (συνδυασμός CDMA-TDMA), με τη δυνατότητα εξυπηρέτησης πολλών χρηστών σε μία χρονοθυρίδα.
- *Πολλαπλή πρόσβαση με ορθογωνική διαίρεση συχνότητας (OFDMA)*: Εφαρμόζεται σε συστήματα που υποστηρίζουν τη διαμόρφωση OFDM στο φυσικό στρώμα. Κάθε πλαίσιο OFDM, αποτελείται ουσιαστικά από ένα πλήθος υποφερόντων και συμβόλων OFDM, που σχηματίζουν ένα δισδιάστατο “πλέγμα”. Ο συνδυασμός υποφερόντος - συμβόλου συνθέτει την ελάχιστη μονάδα ραδιοπόρου του πλαισίου (radio resource units). Οι μονάδες αυτές ανατίθενται δυναμικά στους χρήστες, παρέχοντας μεγάλη ευελιξία στο σύστημα. Ουσιαστικά αναφερόμαστε σε ένα δυναμικό FDMA-TDMA σχήμα πρόσβασης. Η OFDMA τεχνική βρίσκει εφαρμογή στα συστήματα Mobile WiMax [9]. Δύο

απλούστερες εκδοχές της τεχνικής αυτής, είναι οι OFDM-FDMA και OFDM-TDMA. Στην πρώτη πραγματοποιείται στατική ανάθεση μόνο των υποφερόντων στους χρήστες (ουσιαστικά μιλάμε για δυναμικό σχήμα FDMA), ενώ στη δεύτερη σε κάθε χρονοθυρίδα ανατίθεται ένας χρήστης μόνο, καταλαμβάνοντας όλα τα υποφέροντα (δυναμικό TDMA σχήμα). Τα απλούστερα σχήματα βρίσκουν εφαρμογή στα σταθερά WiMax δίκτυα [31].

- **Πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση χώρου (SDMA):** Η τεχνική αυτή συνδέεται άμεσα με την τεχνολογία πολλαπλών κεραιών που αναφέρθηκε στην ενότητα 2.3.3 και υποστηρίζει την αναχρησιμοποίηση όλων των ραδιοπόρων σε επίπεδο χρήστη, διαμορφώνοντας τα διαγράμματα ακτινοβολίας των κεραιών του σταθμού βάσης και των χρηστών. Ουσιαστικά δημιουργούνται μέγιστα στις κατευθύνσεις των επιθυμητών σημάτων και ελάχιστα στις κατευθύνσεις των πιθανών παρεμβολών. Ωστόσο η πρακτική εφαρμογή τέτοιων μηχανισμών είναι ιδιαίτερα δύσκολη, καθώς απαιτείται η συνεχής παρακολούθηση της θέσης των κινητών τερματικών και η δυναμική μεταβολή των παραμέτρων των κεραιών. Οι SDMA μηχανισμοί δε θα μας απασχολήσουν στα πλαίσια της παρούσας ερευνητικής εργασίας.

Στο σημείο αυτό πρέπει να προσθέσουμε ότι είναι πάγια τακτική των οργανισμών προτυποποίησης να μην προτυποποιούν τους μηχανισμούς ανάθεσης πόρων, αφήνοντας τεράστια περιθώρια στους παρόχους να αξιοποιήσουν όσο πιο αποδοτικά γίνεται το δίκτυό τους.

2.4.2 Υποστήριξη Ποιότητας Υπηρεσίας και Σχήματα Χρονοπρογραμματισμού Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης

Αναγκαιότητα Χρονοπρογραμματισμού Κίνησης – Μέχρι το σημείο αυτό έχουμε ασχοληθεί με τη βελτιστοποίηση της μετάδοσης δεδομένων όσον αφορά στο φυσικό στρώμα ενός δικτύου. Σε πρώτη φάση, παρατηρήσαμε ότι η εφαρμογή προηγμένων τεχνικών διαμόρφωσης πολλαπλών φερόντων, προσαρμοστικών σχημάτων διαμόρφωσης και κωδικοποίησης διαύλου, πολλαπλών κεραιών κ.α. (βλ. ενότητα 2.3) βελτιώνει την επίδοση του φυσικού στρώματος μέσω ενός από τους ακόλουθους τρόπους: αυξάνοντας τη φασματική απόδοση (ή το μέγιστο δυνατό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων), μειώνοντας την ελάχιστη απαιτούμενη εκπεμπόμενη ισχύ, μειώνοντας την πιθανότητα σφάλματος μετάδοσης για συγκεκριμένο εύρος ζώνης. Στη συνέχεια αναλύσαμε την επέκταση των τεχνικών αυτών σε ένα σύστημα πολλαπλών χρηστών, όπου σκοπός είναι η συνολική αύξηση της φασματικής απόδοσης ή η μείωση της συνολικά εκπεμπόμενης ισχύος με σκοπό την εξασφάλιση των ελαχίστων επιπέδων BER/FER για κάθε χρήστη. Οι ρυθμοί σφαλμάτων σε επίπεδο bit ή frame καλούνται και παράγοντες ή δείκτες ποιότητας υπηρεσίας του φυσικού στρώματος (physical layer or bit-level QoS performance indicators) [32], ενώ οι τεχνικές ανάθεσης ραδιοπόρων συνιστούν τους μηχανισμούς που στοχεύουν στην εξασφάλισή τους. Ωστόσο οι δείκτες αυτοί δεν αντανακλούν άμεσα το επίπεδο “ικανοποίησης” των χρηστών για τις προσφερόμενες υπηρεσίες. Οι χρήστες ενδιαφέρονται για εξασφαλισμένα επίπεδα QoS σε επίπεδο εφαρμογής (application layer), π.χ. ελάχιστο χρόνο λήψης ιστοσελίδων, e-mail, αρχείων από το διαδίκτυο και ποιοτική προβολή υπηρεσιών πραγματικού χρόνου (video/audio streaming, video conferencing). Οι παράγοντες αυτοί

συνδέονται άμεσα με τους παρεχόμενους από το δίκτυο μέσους ή ελάχιστους ρυθμούς διέλευσης (minimum/average throughputs) και την ελάχιστη καθυστέρηση μετάδοσης πακέτων δεδομένων (delay, delay-jitter bounds). Τα μεγέθη αυτά ονομάζονται δείκτες QoS σε επίπεδο πακέτου και αφορούν στα στρώματα MAC και NET (packet-level QoS measures) [32]. Επομένως, το στρώμα ελέγχου πρόσβασης (MAC) καλείται να υλοποιήσει μηχανισμούς υποστήριξης των συγκεκριμένων δεικτών QoS. Η σημαντικότερη από αυτές είναι η αποκαλούμενη τεχνική χρονοπρογραμματισμού της κίνησης ή των πακέτων δεδομένων (Traffic/Packet Scheduling) η οποία θα αποτελέσει κύριο αντικείμενο έρευνας της παρούσας εργασίας. Σκοπός του χρονοπρογραμματισμού τηλ. κίνησης είναι η επιλογή των πακέτων προς μετάδοση κάθε χρονική στιγμή προκειμένου να εξασφαλιστούν τα απαιτούμενα επίπεδα ποιότητας υπηρεσίας για κάθε χρήστη και ταυτόχρονα να βελτιστοποιηθεί η επίδοση του δικτύου συνολικότερα. Σε καταστάσεις υπερφόρτωσης του δικτύου, η λειτουργία του χρονοπρογραμματισμού είναι αποφασιστική. Η επιλογή των πακέτων προς μετάδοση πραγματοποιείται λαμβάνοντας υπόψη την κατάσταση των ουρών των χρηστών (queue state information - QSI). Τέλος, πρέπει να αναφέρουμε ότι κάθε δίκτυο οφείλει να διαθέτει και τους απαραίτητους μηχανισμούς σε επίπεδο σύνδεσης/συνόδου/κλήσης (call-level), όπως ο έλεγχος αποδοχής σύνδεσης (admission control), ο έλεγχος διαπομπής (handover control) και ο έλεγχος συμφόρησης (congestion control), οι οποίοι λειτουργούν σε πιο μακροσκοπική χρονική κλίμακα. Για την αποδοτική λειτουργία τους απαιτείται σαφής κατανόηση των χαρακτηριστικών συμπεριφοράς του δικτύου σε επίπεδο πακέτου, η οποία αποκτάται μέσω της εφαρμογής και της μελέτης των τεχνικών χρονοπρογραμματισμού. Η σπουδαιότητα λοιπόν των μηχανισμών αυτών είναι πλέον εμφανής.

Χαρακτηρισμός Κίνησης/Παραμέτρων QoS – Η ύπαρξη πληθώρας υπηρεσιών διαφορετικών χαρακτηριστικών και απαιτήσεων καθιστά απαγορευτική την υιοθέτηση ενός μόνο δείκτη QoS, κάτι που δε συνέβαινε στα παραδοσιακά κυψελωτά δίκτυα 2^{ης} γενιάς. Στα συστήματα GSM, κυριαρχούσε η φωνή και σκοπός κάθε παρόχου ήταν η εξυπηρέτηση όσο το δυνατόν περισσότερων χρηστών με την ίδια ακριβώς ποιότητα. Αντιθέτως στα συστήματα νέας γενιάς, οι υπηρεσίες δεδομένων διαδικτύου θα αποτελέσουν τον κύριο στόχο. Από τη φύση τους, οι υπηρεσίες αυτές παρουσιάζουν μεταβλητούς ρυθμούς μετάδοσης (variable bit rate - VBR services), ενώ μέρος αυτών επιτρέπει την καθυστέρηση μετάδοσης ως ένα βαθμό. Δύο είναι οι κύριες κατηγορίες: Οι υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου (non-real-time ή NRT services) στις οποίες συγκαταλέγονται η πλοήγηση στο διαδίκτυο (WWW browsing), η αποστολή και λήψη e-mail, η αποστολή και λήψη αρχείων μέσω του πρωτοκόλλου FTP, και οι υπηρεσίες πραγματικού χρόνου (RT services), όπως η αναπαραγωγή εικόνας και ήχου (video/audio streaming) και η επικοινωνία μέσω εικόνας ή ήχου (video conference, VoIP). Οι υπηρεσίες που ανήκουν στην 1^η κατηγορία ονομάζονται και ελαστικές (elastic traffic/best effort data) καθώς επιτρέπουν την καθυστέρηση στη μετάδοσή τους, ενώ οι υπηρεσίες της 2^{ης} κατηγορίας θέτουν αυστηρά όρια στους χρόνους μετάδοσης (non-elastic traffic). Ανάλογα λοιπόν με τον τύπο της υπηρεσίας που ζητά ο χρήστης, το δίκτυο πρέπει να αντιστοιχίσει έναν ή περισσότερους δείκτες QoS, τους οποίους θα πρέπει να καλύψει κατά τη διάρκεια της σύνδεσης. Ο τρόπος αντιστοίχισης δεν είναι αυστηρός, αλλά διαδραματίζει σπουδαίο ρόλο στην

τελική επίδοση. Ενδεικτικά αναφέρουμε πιθανούς δείκτες: ελάχιστο εγγυημένο ρυθμό διέλευσης δεδομένων (guaranteed bit rate/minimum average throughput), ελάχιστο στιγμιαίο ρυθμό διέλευσης δεδομένων, ελάχιστη καθυστέρηση μετάδοσης ανά πακέτο, μέγιστη μέση πιθανότητα υπέρβασης της καθυστέρησης ανά πακέτο. Εκτός από τους παραπάνω παράγοντες υπάρχουν και δύο ακόμη σημαντικά σημεία που πρέπει να λάβει υπόψη του το δίκτυο: (α) την εξυπηρέτηση των χρηστών με όσο το δυνατόν πιο δίκαιο τρόπο (fairness) και (β) τη διατήρηση της σταθερότητας των ουρών των χρηστών στις οποίες συγκεντρώνονται τα δεδομένα πριν τη μετάδοσή τους (queues stability).

Προσεγγίσεις – Αρχικά οι τεχνικές χρονοπρογραμματισμού κίνησης εφαρμόστηκαν στα ασύρματα δίκτυα και σκοπό είχαν τη μέγιστη χρησιμοποίηση των ζεύξεων σε περιόδους υπερφόρτωσης, υποστηρίζοντας ντετερμινιστικούς ή στοχαστικούς δείκτες QoS σε βραχυπρόθεσμη ή μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα (short-term or long-term time-scale). Η απευθείας εφαρμογή τους ωστόσο στα ασύρματα δίκτυα δεν ήταν εφικτή εξαιτίας δύο βασικών χαρακτηριστικών των τελευταίων: (α) οι χρήστες δεν υποστηρίζουν τους ίδιους μέγιστους ρυθμούς μετάδοσης, καθώς ενδέχεται να βρίσκονται σε αρκετά διαφορετική θέση ως προς το σταθμό βάσης, με αποτέλεσμα οι ασύρματοι δίαυλοι τερματικών-σταθμού βάσης να παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές, και (β) ο υποστηριζόμενος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων κάθε χρήστη μεταβάλλεται στη διάρκεια της σύνδεσης καθώς μεταβάλλεται και ο ασύρματος δίαυλος λόγω διαλείψεων και κίνησης. Επιπλέον, σε βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα είναι αδύνατο να εγγυηθεί ένα συγκεκριμένο επίπεδο QoS, καθώς ο ασύρματος δίαυλος ενδέχεται να βρίσκεται σε κατάσταση βαθιάς διάλειψης (deep fading), κάτι που ουσιαστικά καθιστά αδύνατη την επικοινωνία. Η πρώτη προσέγγιση για την ανάπτυξη τεχνικών χρονοπρογραμματισμού σε ασύρματα δίκτυα βασίστηκε στην εξής ιδέα: η αρχική απόφαση για το ποιο πλαίσιο θα μεταδοθεί συμπίπτει με την απόφαση που θα λαμβανόταν εάν οι δίαυλοι δεν εισήγαγαν σφάλματα στη μετάδοση. Εφόσον όμως ο επιλεγμένος χρήστης αδυνατεί να μεταδώσει το πλαίσιο του αξιόπιστα δίνει τη θέση του στον επόμενο, και αποκτά προτεραιότητα σε επόμενη μετάδοση. Με βάση αυτήν την ιδέα αναπτύχθηκαν διάφορες εκδοχές αλγορίθμων χρονοπρογραμματισμού [33, 34]. Το βασικό τους μειονέκτημα ήταν ότι μοντελοποιούσαν τη συμπεριφορά του διαύλου απλοϊκά, καθώς είτε ήταν δυνατή η μετάδοση δεδομένων με μηδενική πιθανότητα σφάλματος είτε το πλαίσιο χανόταν με μοναδιαία πιθανότητα. Έτσι, η ερευνητική κοινότητα στράφηκε στην ανάπτυξη νέων τεχνικών, στηριζόμενη στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των δικτύων αυτών, φτάνοντας στο σημείο να εκμεταλλευθεί χαρακτηριστικά που αρχικά φαινόταν ως πηγές προβλημάτων [35, 36]. Θα αναφερθούμε διεξοδικά σε αυτές τις τεχνικές σε επόμενη ενότητα. Στα συστήματα HSDPA-UMTS [4] ήδη εφαρμόζονται τεχνικές χρονοπρογραμματισμού, ενώ πρόκληση αποτελεί η εφαρμογή παρόμοιων μηχανισμών για συστήματα πολλαπλών διαύλων (MIMO/OFDM).

Οι τεχνικές χρονοπρογραμματισμού κίνησης μέχρι σήμερα καλούνταν να εφαρμοστούν σε συστήματα πολλαπλής πρόσβασης τύπου TDMA, στα οποία σε κάθε χρονοθυρίδα επιλεγόταν ένας χρήστης για να μεταδώσει. Ακόμη και στα υβριδικά συστήματα CDMA-TDMA, το πολύ ένας χρήστης επιλεγόταν με τη διαφορά ότι ήταν δυνατή η ανάθεσή περισσότερων του

ενός κωδίκων προκειμένου να επιτευχθούν υψηλότεροι ρυθμοί μετάδοσης. Στα νέα δίκτυα ραδιοπρόσβασης όμως, εξαιτίας της χρήσης της OFDMA ως τεχνικής πολυπλεξίας, σε κάθε χρονοθυρίδα είναι δυνατή η μετάδοση πλαισίων από πολλούς χρήστες. Παρόμοια λογική ισχύει και στο HSPA, όπου η αναζήτηση για ολοένα αποδοτικότερους αλγόριθμους συνεχίζεται αδιάκοπα. Τα γεγονότα αυτά σηματοδοτούν την ανάγκη σχεδίασης εκ νέου αλγορίθμων χρονοπρογραμματισμού, κάτι που θα μας απασχολήσει στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

2.4.3 Διαστρωματικές Τεχνικές Διαχείρισης Ραδιοπόρων

Η παροχή ποιότητας υπηρεσίας σε ασύρματα δίκτυα ραδιοπρόσβασης εξαρτάται άμεσα από το φυσικό στρώμα και το στρώμα ελέγχου πρόσβασης στο μέσο όπως αναπτύχθηκε στις προηγούμενες ενότητες. Παρατηρήσαμε ότι καθοριστικό ρόλο στην επίδοση του φυσικού στρώματος (spectral efficiency/transmission power) διαδραματίζει ο ασύρματος διάυλος, ενώ όσον αφορά στην επίδοση του MAC (throughput, delay), τα χαρακτηριστικά της κίνησης. Παρ' όλα αυτά, ο διαχωρισμός που παρουσιάσαμε για τις δύο βασικές λειτουργίες της ανάθεσης ραδιοπόρων και του χρονοπρογραμματισμού της κίνησης δεν είναι απαραίτητα η ορθότερη ή αποδοτικότερη αντιμετώπιση του προβλήματός μας. Καταρχάς, σύμφωνα με την παραπάνω προσέγγιση η ανάθεση των ραδιοπόρων πραγματοποιείται ανεξάρτητα από την κατάσταση των ουρών στις οποίες συσσωρεύονται τα δεδομένα των χρηστών προς μετάδοση. Εν γένει, σκοπός των τεχνικών αυτών είναι η μεγιστοποίηση της φασματικής απόδοσης ή η ελαχιστοποίηση της ισχύος μετάδοσης, λαμβάνοντας υπόψη σταθερά προφίλ απαίτησης κίνησης τα οποία δεν αντικατοπτρίζουν ρεαλιστικά μοντέλα προσφερόμενου φορτίου, όπως η κίνηση τύπου διαδικτύου. Από την άλλη πλευρά πρέπει να σημειώσουμε ότι εξαιτίας της διαφορετικής ποιότητας του διαύλου κάθε χρήστη (channel state/quality) η ανάθεση των ραδιοπόρων στους διάφορους χρήστες δεν “κοστίζει” το ίδιο στο δίκτυο, καθώς ένας χρήστης πλησίον στο σταθμό βάσης απαιτεί σαφώς λιγότερους πόρους (π.χ. ισχύ) σε σχέση με έναν που είναι στο άκρο της κυψέλης ή ισοδύναμα με τους ίδιους ακριβώς ραδιοπόρους ο πλησιέστερος χρήστης επιτυγχάνει υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης στο φυσικό στρώμα. Συνεπώς, η απόφαση του χρονοπρογραμματιστή για το χρήστη που πρόκειται να μεταδώσει στην επόμενη χρονοθυρίδα, θα πρέπει να στηρίζεται και στην κατάσταση των διαύλων του συνόλου των χρηστών. Συμπερασματικά, κάθε χρονική στιγμή η επίδοση του δικτύου συνολικά δύναται να βελτιστοποιηθεί μέσω της από κοινού χρησιμοποίησης της κατάστασης των διαύλων και των ουρών των χρηστών [37]. Η συγκεκριμένη προσέγγιση ανήκει στην κατηγορία των λεγόμενων “διαστρωματικών τεχνικών” (cross-layer techniques) με την έννοια του συνδυασμού πληροφοριών ή/και λειτουργιών από περισσότερα του ενός στρώματα του δικτύου [38].

Η χρήση διαστρωματικών τεχνικών παρουσιάζει ένα πλήθος πλεονεκτημάτων σε σχέση με την παραδοσιακή προσέγγιση της αντιμετώπισης των στρωμάτων ανεξάρτητα το ένα από το άλλο (layered approach). Καταρχάς, η εν λόγω προσέγγιση αντιμετωπίζει το πρόβλημα της βελτιστοποίησης ενός δικτύου συνολικά, προσφέροντας στο σχεδιαστή βαθύτερη γνώση (deep insight) του τρόπου που επηρεάζουν την τελική επίδοση οι διάφορες παράμετροι. Ορισμένες λειτουργίες που υπάρχουν σε όλα τα στρώματα ενός δικτύου (όπως για παράδειγμα η

προστασία των δεδομένων με χρήση πλεονάζουσας πληροφορίας) είναι δυνατό πλέον να παραμετροποιηθούν με το βέλτιστο δυνατό τρόπο. Ακόμη και νέες αποδοτικότερες αρχιτεκτονικές δικτύων μπορούν να προταθούν μέσω της διεξοδικής μελέτης διαστρωματικών τεχνικών. Οι αρχιτεκτονικές διασύνδεσης των επιμέρους στρωμάτων διακρίνονται στις ισχυρά διασυνδεόμενες (tight coupling) και στις ασθενώς διασυνδεόμενες (loose coupling), ανάλογα με το βαθμό ολοκλήρωσης. Όσο σαφέστερη είναι η διάκριση των λειτουργιών στα διάφορα στρώματα τόσο πιο ασθενής είναι μία διασύνδεση. Σε δεύτερη φάση, νέοι διαστρωματικοί αλγόριθμοι μπορούν να σχεδιαστούν και να αναπτυχθούν με σκοπό την άμεση βελτίωση της απόδοσης του δικτύου. Το γεγονός της εκμετάλλευσης πληροφοριών από διάφορα στρώματα και της άμεσης επικοινωνίας των στρωμάτων, φανερώνει το κέρδος που προκύπτει. Ωστόσο, η αντιμετώπιση και η απόπειρα συνολικής βελτιστοποίησης του δικτύου παρουσιάζει συνήθως υψηλή πολυπλοκότητα, σε αντίθεση με την κλασική προσέγγιση. Οι προτεινόμενες τεχνικές δεν είναι πάντα εφαρμόσιμες και υποβέλτιστες (suboptimum) λύσεις πρέπει να αναζητηθούν. Ίσως η μεγαλύτερη δυσκολία, έγκειται στην αποσύνθεση του συνολικού προβλήματος σε επιμέρους άρα και απλούστερα δίχως επιδείνωση της συνολικής επίδοσης. Επιπλέον, καθώς τα διάφορα στρώματα ή τα νέα λειτουργικά “μπλοκ” θα πρέπει να ανταλλάσσουν πληροφορίες μεταξύ τους, επιβάλλεται ο ορισμός νέων διαύλων σηματοδοσίας και ενδέχεται ο όγκος της σηματοδοσίας τελικά να είναι απαγορευτικός. Καταλήγοντας, οι προοπτικές από την εφαρμογή διαστρωματικών τεχνικών στα δίκτυα ραδιοπρόσβασης είναι αρκετά ελπιδοφόρες, εντούτοις, παραμένουν αρκετά ανοιχτά ζητήματα προς διερεύνηση. Τέλος να σημειώσουμε ότι οι πρώτες εφαρμογές διαστρωματικών μηχανισμών διαχείρισης ραδιοπόρων και συγκεκριμένα αλγορίθμων χρονοπρογραμματισμού κίνησης, απαντώνται στα δίκτυα HSPA-UMTS [4] και cdma2000 EV-DO [36].

2.5 Σύνοψη

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάσαμε τις σημαντικότερες τεχνικές προκλήσεις που καλούνται να αντιμετωπιστούν στα πλαίσια της σχεδίασης και ανάπτυξης των δικτύων ραδιοπρόσβασης νέας γενιάς. Μετά από μία σύντομη ιστορική αναδρομή στα συστήματα κινητών επικοινωνιών 1^{ης} έως και 3^{ης} γενιάς, παρουσιάσαμε τις απαιτήσεις για τα σύγχρονα και μελλοντικά συστήματα όπως αυτές καθορίζονται από τους οργανισμούς προτυποποίησης και την ερευνητική κοινότητα. Στη συνέχεια παραθέσαμε τις τεχνολογίες εκείνες του φυσικού στρώματος και του στρώματος ελέγχου πρόσβασης στο μέσο που είναι υποψήφιες να εφαρμοστούν στα δίκτυα ραδιοπρόσβασης beyond 3G ή 4G. Τέλος, αναφερθήκαμε στους δύο βασικότερους μηχανισμούς των στρωμάτων αυτών, τη δυναμική ανάθεση ραδιοπόρων και τον χρονοπρογραμματισμό της τηλεπικοινωνιακής κίνησης, οι οποίοι αναμένεται να διαδραματίσουν καθοριστικό ρόλο στα νέα αυτά δίκτυα.

□

Κεφάλαιο 3

Διαχείριση Πόρων Σε Μελλοντικά Ασύρματα Ευρυζωνικά Δίκτυα Ραδιοπρόσβασης

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε τα πλέον εξειδικευμένα ζητήματα που μας απασχολούν στην ερευνητική μας εργασία, εμβαθύνοντας ουσιαστικά στα σημεία που περιγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Σε πρώτη φάση θα ορίσουμε το γενικό πλαίσιο εργασίας και τη συναφή μεθοδολογία, ενώ στη συνέχεια θα παραθέσουμε τις πιο αξιόλογες εργασίες που έχουν ήδη εκπονηθεί και απαντώνται στη διεθνή βιβλιογραφία και αφορούν στα ζητήματα που μας απασχολούν. Κατά την παρουσίαση αυτή θα προσπαθήσουμε να ακολουθήσουμε το πλαίσιο που έχουμε ορίσει, ώστε να υπάρχει όσο το δυνατόν μεγαλύτερη συνοχή μεταξύ τους.

3.1 Ορισμός του Πλαισίου Εργασίας

3.1.1 Μεθοδολογία

Το γενικό πλαίσιο της παρούσας ερευνητικής εργασίας συνίσταται στην παροχή ποιότητας υπηρεσίας σε ένα σύστημα πολλαπλών χρηστών σε ασύρματο περιβάλλον διάδοσης. Θα μελετηθούν διάφορες διαστρωματικές αρχιτεκτονικές του φυσικού στρώματος και του στρώματος ελέγχου πρόσβασης στο μέσο, θα εκτιμηθούν υπάρχουσες τεχνικές διαχείρισης ραδιοπόρων από τη βιβλιογραφία και θα αναπτυχθούν νέοι συνδυαστικοί μηχανισμοί και αλγόριθμοι προσαρμοσμένοι στις νέες προτεινόμενες τεχνολογίες των δύο στρωμάτων με στόχο την ικανοποίηση των αυξανόμενων απαιτήσεων των μελλοντικών δικτύων. Αρχικά λοιπόν, απαιτείται η μοντελοποίηση των βασικών λειτουργικών μπλοκ του φυσικού στρώματος και του στρώματος πρόσβασης στο μέσο. Στη συνέχεια πρέπει να εξεταστεί η επίδραση των επιμέρους λειτουργιών στη συνολική επίδοση του συστήματος και να εξαχθούν οι καταλληλότερες τεχνικές όσον αφορά στην απόδοση και την πολυπλοκότητα υλοποίησής τους. Μία πρώτη αντιμετώπι-

ση του ζητήματος αυτού είναι η μαθηματική ανάλυση του προβλήματος, δηλαδή η κατάστρωση κλειστών αναλυτικών μαθηματικών εξισώσεων για κάθε μπλοκ και η σύνθεση του συνολικού προβλήματος [39]. Η εφαρμογή της μεθόδου αυτής όμως σε ένα τόσο πολύπλοκο σύστημα είναι πρακτικά αδύνατη. Χαρακτηριστικά αναφέρουμε το υποπρόβλημα της επίδρασης του ασύρματου μέσου διάδοσης στο σήμα. Η πλέον αρμόζουσα τεχνική αντιμετώπισης ενός τόσο πολύπλοκου συστήματος είναι η μέθοδος στοχαστικής προσομοίωσης (stochastic/Monte Carlo simulation methodology) [39]. Σύμφωνα με την παραπάνω τεχνική εκτελείται ένα πλήθος επαναλήψεων (simulation runs) της συνολικής λειτουργίας και εξάγονται στατιστικά μεγέθη εκτίμησης της συμπεριφοράς του συστήματος. Η έννοια της στοχαστικότητας υπεισέρχεται εξαιτίας της αδυναμίας μοντελοποίησης της συμπεριφοράς των υποσυστημάτων του υπό μελέτη συστήματος με ντετερμινιστικούς όρους. Για παράδειγμα, η συμπεριφορά του ασύρματου διαύλου και η ζήτηση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης περιγράφονται ικανοποιητικά μέσω στατιστικών μεγεθών. Ακόμη και σε επίπεδο συστήματος, οι θέσεις των κινητών τερματικών ως προς το σταθμό βάσης είναι τυχαίες. Ωστόσο, όσο πιο ακριβή περιγραφή κάθε υποσυστήματος μέσω στατιστικού μοντέλου επιθυμούμε, τόσο πιο πολύπλοκο θα προκύψει το τελικό μοντέλο. Επομένως, κατά την ανάπτυξη του μοντέλου προσομοίωσης θα πρέπει να γίνουν ορισμένες απλουστευτικές παραδοχές, λαμβάνοντας υπόψη το ισοζύγιο ακρίβειας - πολυπλοκότητας (accuracy - complexity trade-off). Στα πλαίσια της διατριβής υιοθετούμε τη μεθοδολογία της προσομοίωσης, δίνοντας όμως μεγάλο βάρος στην επιλογή ή την ανάπτυξη των καταλληλότερων δυνατών μοντέλων περιγραφής.

3.1.2 Επίπεδο Συστήματος

Αρχικά επικεντρωνόμαστε σε ένα μονοκυψελωτό μοντέλο δικτύου (single-cell network model), το οποίο εξυπηρετείται από έναν σταθμό βάσης που βρίσκεται στο κέντρο και οι χρήστες κινούνται εντός των ορίων της γεωγραφικής περιοχής που καλύπτει η κυψέλη (δεν πραγματοποιούνται διαπομπές σε άλλες κυψέλες). Η επίδοση της μετάδοσης είτε για το downlink είτε για το uplink συνεπώς περιορίζεται από τον ασύρματο δίαυλο, το θερμικό θόρυβο και την ενδοκυψελική παρεμβολή εφόσον δε διατηρείται η ορθογωνικότητα των ραδιοπόρων των χρηστών. Τη διακυψελική παρεμβολή την λαμβάνουμε υπόψιν μέσω των γειτονικών κυψελών της κεντρικής κυψέλης, που είναι ημιενεργές (δεν αλληλεπιδρούν με την κεντρική κυψέλη όσον αφορά στις διαπομπές, ωστόσο εξυπηρετούν εικονικά το δικό τους φορτίο και προκαλούν την αντίστοιχη διακυψελική παρεμβολή). Ο σταθμός βάσης και τα κινητά τερματικά διαθέτουν μία κεραία (μιλάμε για κεραιοσυστήματα SISO δηλαδή). Τα αιτήματα τηλεπικοινωνιακής κίνησης των χρηστών καταφθάνουν στο σταθμό βάσης ή στα κινητά τερματικά και αποθηκεύονται προσωρινά σε αντίστοιχες ουρές άπειρης χωρητικότητας (infinite queues). Το συγκεκριμένο μοντέλο είναι παρόμοιο με αυτό των κυψελωτών συστημάτων 3G, όπου ο σταθμός βάσης επιτελεί τις λειτουργίες του Node B [4]. Στα πολυκυψελωτά συστήματα, οι σταθμοί βάσης διασυνδέονται με την οντότητα RNC (Radio Network Controller), ωστόσο πλην μεμονωμένων εξαιρέσεων δε θα μας απασχολήσουν τέτοιου είδους συστήματα στη μελέτη μας (αυτό δεν σημαίνει βέβαια ότι οι αλγόριθμοι που θα αναπτυχθούν δε θα λειτουργούν σε αυτά τα συστή-

ματα). Οι αλγόριθμοι χρονοπρογραμματισμού και ανάθεσης πόρων τερματίζουν ωστόσο στο σταθμό βάσης, ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι καθυστερήσεις και να υποστηριχθούν οι ταχείες προσαρμοστικές τεχνικές που μελετήσαμε σε προηγούμενη ενότητα. Στη συνέχεια περιγράφουμε αναλυτικά τα βασικά χαρακτηριστικά των μοντέλων τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών και ασύρματου διαύλου που απαντώνται στη βιβλιογραφία και υιοθετούμε για τη μελέτη μας.

3.1.3 Τηλεπικοινωνιακές Υπηρεσίες και Δείκτες QoS

Το συνολικό προσφερόμενο φορτίο τηλεπικοινωνιακής κίνησης (offered load) στα δίκτυα νέας γενιάς αναμένεται να είναι ιδιαίτερα υψηλό και να αποτελείται από πλήθος υπηρεσιών IP. Ο περιοριστικός παράγοντας (bottleneck) στην εξυπηρέτηση του φορτίου αυτού θα είναι η ασύρματη διεπιφάνεια, επομένως εξασφαλίζοντας καθορισμένα επίπεδα ποιότητας υπηρεσίας στο συγκεκριμένο τμήμα του δικτύου (over the air QoS), καλύπτουμε ουσιαστικά το ζητούμενο επίπεδο QoS συνολικά στο δίκτυο (end-to-end QoS). Ενδεικτικά αναφέρουμε τις υπηρεσίες πλοήγησης στο διαδίκτυο, μετάδοσης και λήψης e-mail και αρχείων μέσω εξυπηρετητών FTP, αναπαραγωγής εικόνας και ήχου (video/audio streaming), και επικοινωνίας με χρήση εικόνας και φωνής πάνω από το πρωτόκολλο IP (Voice over IP, Video Conference). Είναι φυσικό ότι δεν μπορεί να προβλεφθεί με απόλυτη ακρίβεια η σύσταση του μελλοντικά ζητούμενου φορτίου, δηλαδή το ποσοστό ζήτησης της κάθε υπηρεσίας και το ζητούμενο φορτίο ανά χρήστη. Ωστόσο, ήδη έχουν εκπονηθεί σχετικές μελέτες για την πρόβλεψη των παραπάνω στοιχείων. Μία αντιπροσωπευτική μελέτη έχει δημοσιευτεί από τον οργανισμό προτυποποίησης ETSI υπό τη μορφή τεχνικής αναφοράς και αφορά στα δίκτυα 3G, ωστόσο μπορεί κάλλιστα να εφαρμοστεί και στα μελλοντικά δίκτυα [40].

Το επόμενο βήμα είναι η εκτίμηση των χαρακτηριστικών της τηλεπικοινωνιακής κίνησης ανά υπηρεσία. Για το σκοπό αυτό γίνεται χρήση διάφορων μοντέλων γεννητριών κίνησης, τα οποία προσομοιώνουν το ζητούμενο φορτίο. Στη βιβλιογραφία απαντώνται τα εξής μοντέλα [35]:

- *Απλουστευτικά μοντέλα σταθερού προσφερόμενου ρυθμού bits ή πακέτων (constant bit rate - CBR models), συνεχούς ή διακριτού χρόνου.* Στη δεύτερη περίπτωση κάθε υπηρεσία αντιστοιχεί στη γέννηση πακέτων δεδομένων σταθερού μήκους με σταθερή περίοδο.
- *Σύνθετα μοντέλα που βασίζονται σε στατιστικές κατανομές (stochastic models).* Τόσο οι χρόνοι άφιξης των πακέτων όσο και το μήκος τους γεννιούνται με τέτοιο τρόπο ώστε να υπακούουν σε προκαθορισμένες στατιστικές κατανομές.
- *Μοντέλο άπειρα κατηλλειμμένων ουρών.* Είναι ένα ακόμη απλουστευτικό μοντέλο, το οποίο συνίσταται στη θεώρηση ότι όλες οι ουρές των χρηστών είναι κάθε στιγμή γεμάτες, με άλλα λόγια, πάντα υπάρχει ζήτηση για εξυπηρέτηση κίνησης στο δίκτυο (infinitely backlogged queue model) [41]

Η πρώτη κατηγορία είναι ιδιαίτερα απλή στην υλοποίηση και δίνει μια πρώτη αλλά χονδρική εκτίμηση για τα μεγέθη που επιθυμούμε να μελετήσουμε. Η δεύτερη κατηγορία είναι σαφώς πιο πολύπλοκη όσον αφορά στην υλοποίηση, ωστόσο είναι ρεαλιστικότερη. Όσον αφορά

στην τελευταία κατηγορία, μεγέθη όπως η καθυστέρηση πακέτων στις ουρές ή το μέγεθος (ή ισοδύναμα η σταθερότητα) των ουρών είναι εξαιρετικά δύσκολο να μελετηθούν. Ουσιαστικά παρέχεται συνήθως ένα άνω όριο ως προς το μέγιστο ρυθμό διέλευσης δεδομένων που μπορεί να υποστηρίξει το υπό μελέτη δίκτυο.

Ο χαρακτηρισμός και η μοντελοποίηση των τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών συνδέεται άμεσα και με την επιλογή των δεικτών QoS. Ανάλογα με το είδος της υπηρεσίας, δηλαδή αν πρόκειται για υπηρεσία πραγματικού χρόνου ή όχι, αν επιτρέπεται η μερική απώλεια πλαισίων δεδομένων ή όχι, καθορίζονται και τα μεγέθη που αντικατοπτρίζουν την τελική ικανοποίηση των χρηστών από την προσφερόμενη υπηρεσία και συνεπώς τα επίπεδα QoS. Τα κυριότερα μεγέθη είναι τα εξής [8]: ρυθμός διέλευσης δεδομένων (throughput/data rate), ρυθμός σφαλμάτων πλαισίων δεδομένων (packet loss rate), καθυστέρηση μετάδοσης (delay) οριζόμενη ως το χρονικό διάστημα από τη στιγμή που εισέρχεται ένα πακέτο στην ουρά μέχρι τη στιγμή αναχώρησής του για μετάδοση, μεταβολή στην καθυστέρηση μετάδοσης (delay variation/jitter). Στον πίνακα 3.1 συνοψίζονται οι κυριότερες τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες και οι αντίστοιχες απαιτήσεις QoS, που θα μας απασχολήσουν στα πλαίσια της διατριβής [42].

Πίνακας 3.1: Τυπικές Παράμετροι Τηλεπ. Κίνησης Ευρυζωνικών Δικτύων Ραδιοπρόσβασης

Παράμετρος/Υπηρεσία	Φωνή	Ροή εικόνας/ήχου	Δεδομένα	Βίντεο
Ρυθμός Δεδομένων	4 – 64 kbps	5 kbps – λίγα Mbps	0.01 – 100 Mbps	> 1Mbps
Εφαρμογές	VoIP	Music, Speech, VideoClips	WWW, FTP, e-mail	IP TV
Ροή Κίνησης	Continuous, RT	Continuous, bursty	NRT, bursty	Continuous
Απώλεια Πακέτων	< 1%	< 1, 2%	0	< 10 ⁻⁸
Καθυστέρηση	< 100ms	< 250ms	Flexible	< 200ms
Μεταβολή Καθυστέρησης	< 20ms	< 2s	-	< 2s

3.1.4 Ευρυζωνικός Ασύρματος Κινητός Δίαυλος

Η επιλογή του μοντέλου που θα περιγράφει την επίδραση του κινητού ασύρματου διαύλου (mobile wireless channel) είναι εξαιρετικά σημαντική για δύο λόγους: αφενός καθορίζει τη συμπεριφορά των μεταδιδόμενων πλαισίων δεδομένων όσον αφορά στο φυσικό στρώμα (BER/FER) αφετέρου επηρεάζει την επίδοση και σε επίπεδο MAC, καθώς οι αλγόριθμοι χρονοπρογραμματισμού και ανάθεσης πόρων λαμβάνουν υπόψη τους και την κατάσταση του διαύλου σε κάθε χρονική στιγμή. Στην παρούσα ενότητα θα περιγράψουμε τις γενικές αρχές που ακολουθούμε.

Η επίδραση του διαύλου μεταξύ του σταθμού βάσης και κάθε κινητού τερματικού μοντελοποιείται κάθε χρονική στιγμή μέσω ενός παράγοντα κέρδους που εν γένει είναι μιγαδικός

αριθμός. Λαμβάνοντας το πλάτος του αριθμού αυτού και πολλαπλασιάζοντας το με την εκπεμπόμενη ισχύ του σήματος, λαμβάνουμε την ισχύ λήψης στο δέκτη. Επίσης λαμβάνοντας υπόψη και την επίδραση του θερμικού θορύβου συγκεκριμένης πυκνότητας ισχύος για ένα μονοκυψελωτό σύστημα, υπολογίζεται και ο σηματοθορυβικός λόγος στο δέκτη, ένα μετρικό που μας πληροφορεί για την επιτυχία ή την αποτυχία της μετάδοσης. Το κέρδος ισχύος ή ο σηματοθορυβικός λόγος στο δέκτη αποτελούν ταυτόχρονα ένδειξη για την κατάσταση του διαύλου, πληροφορία που χρειάζεται το στρώμα MAC όπως προαναφέραμε.

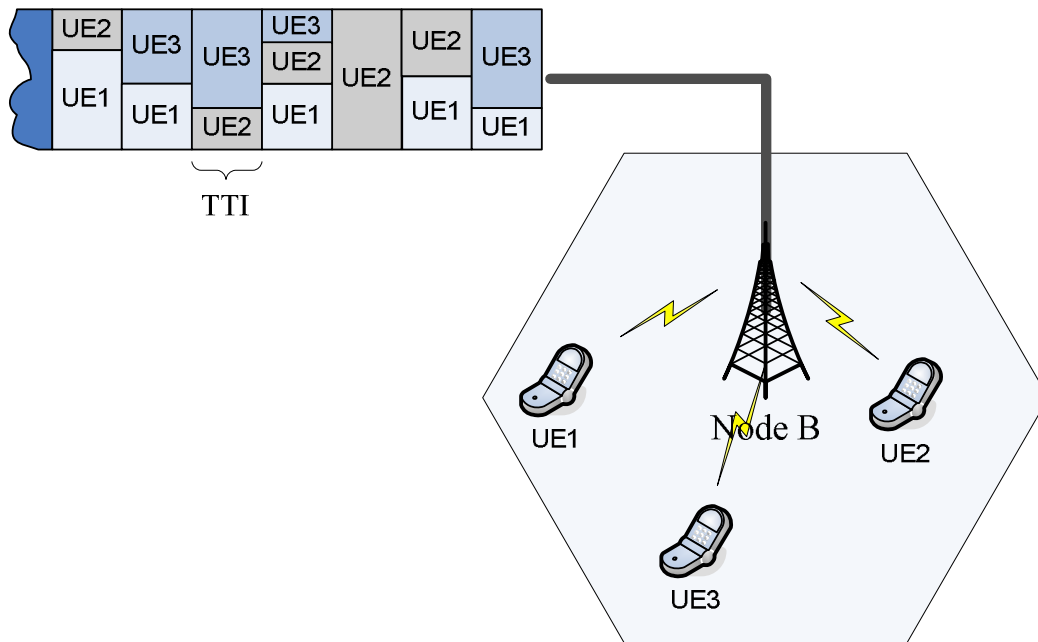
Ο παράγοντας κέρδους περιλαμβάνει τις εξής επιδράσεις [20]:

- Απώλειες διάδοσης ευρείας κλίμακας (large-scale path loss) οι οποίες εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από την απόσταση του σταθμού βάσης από το τερματικό
- Διαλείψεις λόγω σκίασης (shadowing) που οφείλονται στη διαφορά των εμποδίων στις διάφορες κατευθύνσεις, οι οποίες μεταβάλλονται με αρκετά αργό ρυθμό (slow large-scale fading) και
- Διαλείψεις μικρής κλίμακας λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης (small-scale fading) οι οποίες γενικά είναι πολύ πιο ταχείες σε σχέση με τις διαλείψεις σκίασης

Επιπλέον, επειδή αναφερόμαστε εκτός των άλλων και σε ευρυζωνικά συστήματα πολλαπλών φερόντων OFDM, αναγκαία είναι σε αυτήν την περίπτωση και η συχνοτική μοντελοποίηση του διαύλου. Θεωρούμε ότι κάθε υποφέρον είναι αρκετά στενό ώστε ο δίαυλος να παραμένει επίπεδος στο εύρος του και έτσι σε κάθε υποφέρον αντιστοιχεί και ένας διαφορετικός παράγοντας κέρδους. Η συσχέτιση των παραγόντων στο πεδίο της συχνότητας εξαρτάται από την ευρύτητα της εξάπλωσης των πολυδιαδρομικών συνιστωσών. Μέχρι στιγμής περιγράψαμε ένα μοντέλο υπολογισμού του κέρδους που εισάγει ο δίαυλος σε μία χρονική στιγμή ή σε μία χρονοθυρίδα μετάδοσης. Όσον αφορά στη χρονική εξέλιξη του κέρδους αυτή εξαρτάται άμεσα από την ταχύτητα κίνησης του χρήστη ή αλλαγής του περιβάλλοντος. Η συσχέτιση των παραγόντων κέρδους στο πεδίο του χρόνου εξαρτάται από τη διασπορά Doppler. Πάγια είναι η τακτική της θεώρησης της σταθερότητας του διαύλου κατά τη διάρκεια της μετάδοσης ενός πλαισίου ώστε τα σύμβολα να επηρεάζονται με τον ίδιο στατιστικά τρόπο. Για κάθε έναν από τους παράγοντες που αναφέρθηκαν στην ενότητα αυτή, έχουν αναπτυχθεί διάφορα στατιστικά μοντέλα που αποπειρώνται να τους περιγράψουν με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη πιστότητα. Στις αναφορές [20, 43, 44, 45] μπορούν να βρεθούν τα αντιπροσωπευτικότερα μοντέλα, όπως τα ITU-R, COST 207, COST 231 κ.α.

3.1.5 Πολυπλεξία Ροών Δεδομένων σε Συστήματα Μονής Φέρουσας και Πολλαπλών Χρηστών

Σε αυτήν την παράγραφο θα περιγράψουμε συνοπτικά την πολυπλεξία ροών δεδομένων που εφαρμόζεται σε συστήματα CDMA και συγκεκριμένα στην HSPA έκδοση του 3GPP προτύπου. Ο χρόνος διαιρείται σε υποδιαστήματα διάρκειας 2 ms που ονομάζονται TTI και σε κάθε ένα από αυτά πολυπλέκονται και τελικά μεταδίδονται πακέτα δεδομένων (packets) των

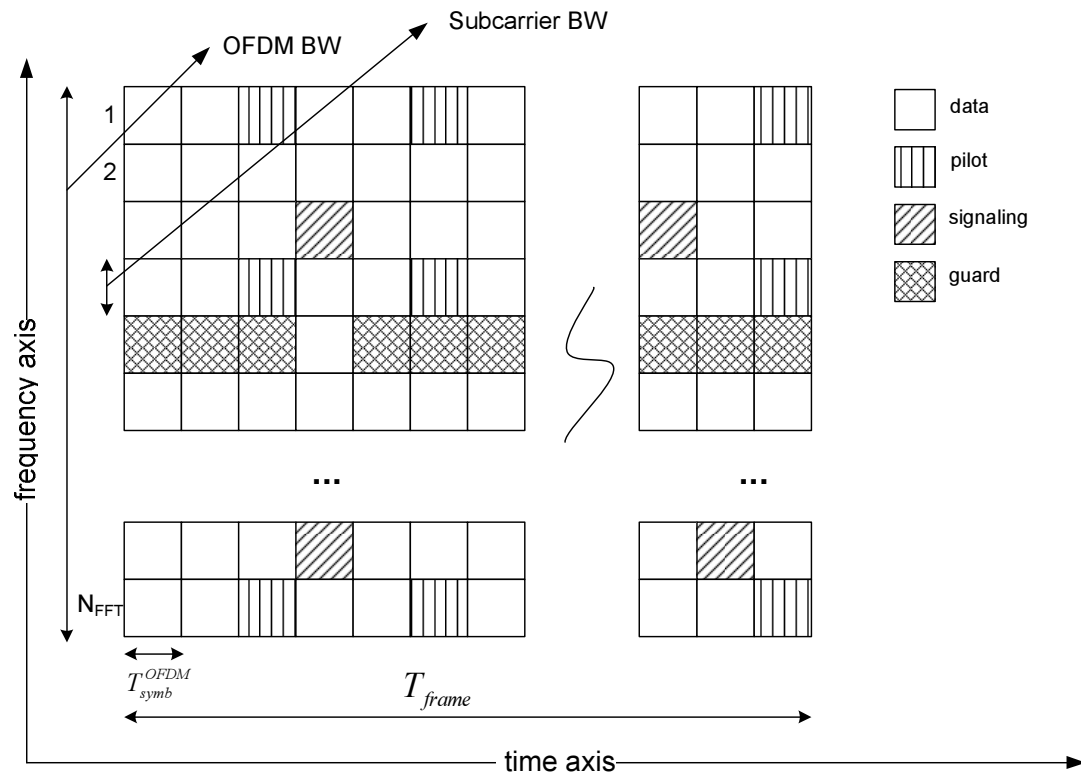


Σχήμα 3.1: Δρομολόγηση σε HSPA δίκτυα

χρηστών. Σε κάθε χρονοθυρίδα μπορούν να μεταδίδονται πακέτα προς έναν ή περισσότερους χρήστες, ανάλογα με τους διαθέσιμους κώδικες και τις ανάγκες των χρηστών σε κάθε χρονοθυρίδα. Αυτό το σχήμα μετάδοσης είναι σχετικά απλό και για αυτόν το λόγο δεν κρίνεται σκόπιμη η περαιτέρω ανάλυσή του. Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται ενδεικτικά η δρομολόγηση των δεδομένων από το σταθμό βάσης (Node B) προς τους τελικούς χρήστες στη διάρκεια κάποιων TTI.

3.1.6 Πολυπλεξία Ροών Δεδομένων σε Συστήματα Πολλαπλών Φερρόντων και Χρηστών

Ο χρόνος διαιρείται σε υποδιαστήματα διάρκειας λίγων ms που ονομάζονται πλαίσια (frames) και σε κάθε ένα από αυτά πολυπλέκονται και τελικά μεταδίδονται πακέτα δεδομένων (packets) των χρηστών. Τον όρο πακέτο συνήθως τον χρησιμοποιούμε για τα δεδομένα που προέρχονται απευθείας από το στρώμα MAC, ενώ τον όρο πλαίσιο για την ακολουθία συμβόλων που τελικά διαμορφώνεται και φιλτράρεται πριν την αποστολή της από τον πομπό προς το δέκτη. Ένα πλαίσιο μπορεί να περιέχει τμήματα (segments) από περισσότερα του ενός πακέτα, από έναν ή περισσότερους χρήστες. Το μήκος του πλαισίου μπορεί εν γένει να μεταβάλλεται, συνήθως όμως είναι σταθερό και ικανά μικρό ώστε ο δίαυλος να μεταβάλλεται αρκετά αργά στη διάρκειά του. Ενδεικτικά μεγέθη είναι 2, 2.5, 4, 5, 8, 10, 12.5 ή 20 ms [46]. Θεωρώντας ότι ο η διάρκεια ενός OFDM συμβόλου δεν είναι κλιμακούμενη, ο αριθμός των OFDM συμβόλων που περιέχονται σε κάθε πλαίσιο δεδομένων εξαρτάται από το μήκος του και κυμαίνεται από 20 - 200 περίπου [46]. Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζουμε τη συνηθέστερη απεικόνιση του πλαισίου ως διαδιάστατου πλέγματος χρόνου - συχνότητας (time - frequency grid) και εξηγούμε αναλυτικά τη δομή αυτή.

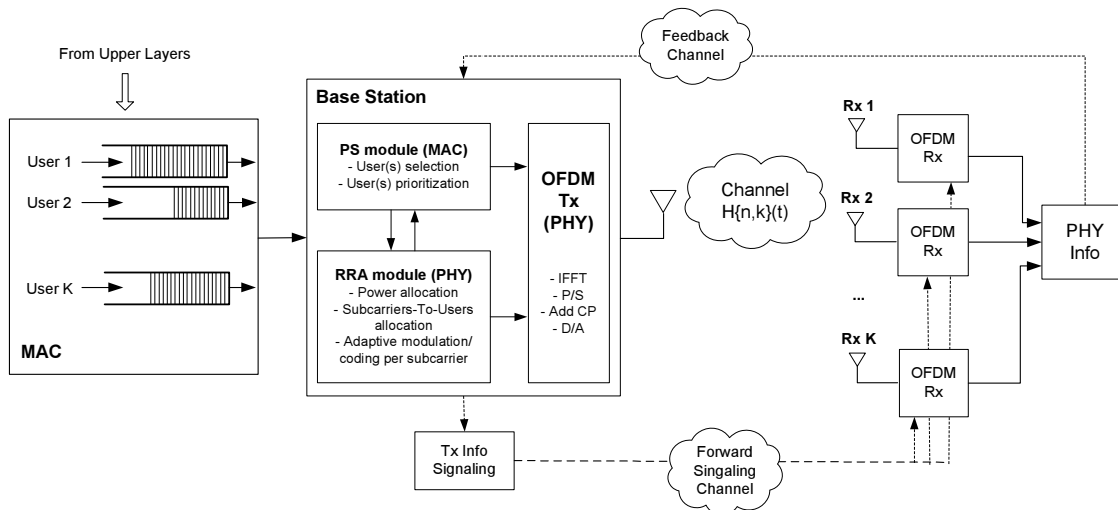


Σχήμα 3.2: Τυπική δομή ενός πλαισίου OFDMA

Κάθε πλαίσιο αποτελείται από έναν ακέραιο αριθμό υποφερόντων ή καναλιών και συμβόλων OFDM. Οποιοσδήποτε συνδυασμός καναλιού - συμβόλου συνιστά την ελάχιστη δυνατή μονάδα ραδιοπόρου (radio resource unit - RRU), η οποία υποστηρίζει έναν συγκεκριμένο ρυθμό μετάδοσης συμβόλων (symbol-rate) και ανάλογα με το σχήμα διαμόρφωσης/κωδικοποίησης και ένα ρυθμό μετάδοσης bit-rate. Το σύνολο των μονάδων αυτών καθορίζει τη συνολική χωρητικότητα του πλαισίου. Οι μονάδες χρησιμοποιούνται: (α) για τη μετάδοση των δεδομένων των χρηστών που βρίσκονται στις ουρές αναμονής (data units/bands), (β) για τη μετάδοση πιλοτικών σημάτων (pilot units/bands) που συνεισφέρουν στην εκτίμηση του διαύλου από το δέκτη (channel estimation) καθώς και το συγχρονισμό πομπού και δέκτη (synchronization), (γ) για τη μεταφορά της απαραίτητης σηματοδότησης από τον πομπό στο δέκτη (signaling units), όπως για παράδειγμα την ανάθεση υποφερόντων και σχημάτων διαμόρφωσης/κωδικοποίησης στους διάφορους χρήστες, και (δ) για την προστασία από παρεμβολές, οπότε δεσμεύονται και δε μεταδίδουν δεδομένα (guard units/bands). Συμπεραίνουμε, λοιπόν ότι μόνο ένα μέρος της χωρητικότητας του πλαισίου αφιερώνεται στη μετάδοση χρήσιμων δεδομένων, άρα και ο αντίστοιχος μέγιστος ρυθμός μετάδοσης (information bit rate) είναι σαφώς μειωμένος από αυτόν που καθορίζει σε γενικές γραμμές το συνολικό εύρος ζώνης μετάδοσης ενός συστήματος OFDM. Βέβαια, στις περισσότερες βασικές μελέτες χωρητικότητας και ανάθεσης ραδιοπόρων είθισται η χρήση ενός απλουστευτικού μοντέλου, σύμφωνα με το οποίο το πλαίσιο OFDM μεταφέρει μόνο χρήσιμα δεδομένα. Οι μελέτες αυτές ουσιαστικά δίνουν ένα άνω όριο εκτίμησης της επίδοσης ενός πραγματικού δικτύου.

Ολοκληρώνοντας, θα αναφερθούμε σε μία διαφορετική εκδοχή του μοντέλου του πλαι-

σίου. Στα μελλοντικά συστήματα ευρείας ζώνης, ο αριθμός των υποφερόντων μπορεί να φτάνει και μερικές χιλιάδες. Ο χειρισμός κάθε υποφέροντος ως ανεξάρτητη μονάδα ραδιοπόρων συνεπάγεται εξαιρετικά μεγάλο κόστος σηματοδότησης. Ένα πρακτικότερο σχήμα στις περιπτώσεις αυτές είναι η ομαδοποίηση (grouping) των υποφερόντων ώστε να συγκροτούν τα λεγόμενα υποκανάλια (subchannels). Η ομαδοποίηση μπορεί να γίνεται είτε σειριακά συνδυάζοντας γειτονικά υποφέροντα είτε με κάποιο τυχαίο τρόπο, οπότε συνδυάζονται και μη γειτονικά υποφέροντα σε μία ομάδα. Η μέθοδος υλοποίησης ονομάζεται υποδιαυλοποίηση (subchannelization). Όσο περισσότερα υποφέροντα συσχετίζονται σε ένα υποκανάλι, τόσο μειώνεται η πολυπλοκότητα του συστήματος, όμως ταυτόχρονα ελαχιστοποιείται και η ευελιξία. Επομένως, παίζει ιδιαίτερο ρόλο η επιτυχημένη επιλογή του αριθμού των υποκαναλιών ανά υποομάδα (subchannel/subband), και καθοριστικός παράγοντας είναι η συχνοτική επιλεκτικότητα του ασύρματου διαύλου στον οποίο αναμένεται να λειτουργήσει το υπό μελέτη σύστημα. Όπως θα εξηγηθεί αναλυτικά σε επόμενη ενότητα, μέσω της χρήσης προσαρμοστικών τεχνικών ανάθεσης ραδιοπόρων και χρονοπρογραμματισμού πακέτων, μπορούμε να εκμεταλλευθούμε την επιλεκτικότητα αυτή. Με την ομαδοποίηση των υποφερόντων το φαινόμενο αυτό ουσιαστικά καταπιέζεται (averaged out) και δεν μπορεί να αξιοποιηθεί. Τέλος, στο Σχήμα 3.3, παρουσιάζουμε μία τυπική αναπαράσταση του downlink ενός μονοκυψελωτού συστήματος OFDM και στο Σχήμα 3.4 [47] ένα τυπικό σχήμα μετάδοσης OFDM πολλαπλών χρηστών. Όσον αφορά στο uplink η αναπαράσταση απαιτεί ελάχιστες αλλαγές.

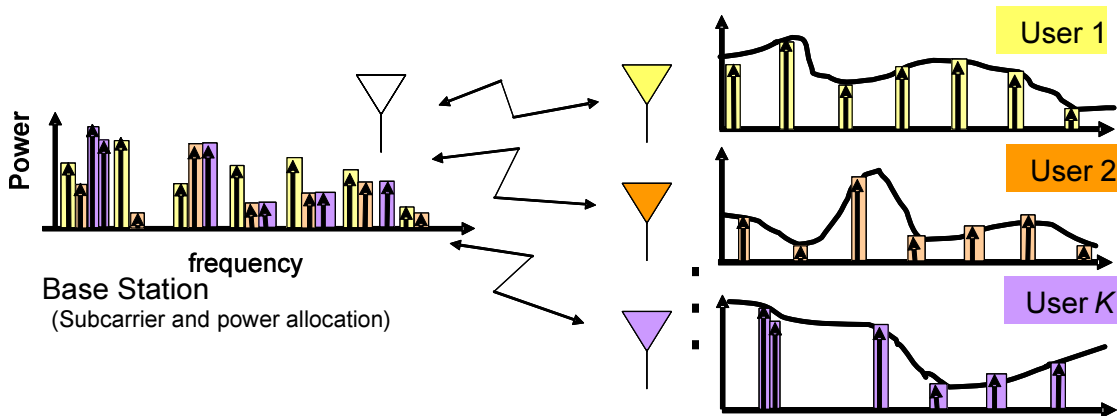


Σχήμα 3.3: Τυπική μοντελοποίηση κάτω ζεύξης μονοκυψελωτού δικτύου OFDMA

3.2 Επισκόπηση της Βιβλιογραφίας

Το κεντρικό θέμα της παρούσας ερευνητικής εργασίας είναι η από κοινού βελτιστοποίηση των στρωμάτων PHY και MAC προκειμένου να παρέχονται υψηλής ποιότητας και ευέλικτες υπηρεσίες σε πλήθος ετερογενών χρηστών. Για το σκοπό αυτό μελετάμε και προτείνουμε πιθανές αρχιτεκτονικές και αλγορίθμους που θα διαχειρίζονται και θα κατανέμουν τους βαθμούς ελευ-

A basic Multiuser OFDMA system



Σχήμα 3.4: Ένα τυπικό σχήμα μετάδοσης OFDM πολλαπλών χρηστών

θερίας του συστήματος, με τον αποδοτικότερο δυνατό τρόπο, προς όφελος τόσο των χρηστών όσο και του δικτύου. Όπως αναπτύχθηκε διεξοδικά στο Κεφάλαιο 2, η δυναμική ανάθεση των ραδιοπόρων στο PHY και ο χρονοπρογραμματισμός της κίνησης στο MAC αποτελούν τα βασικά εργαλεία του σχεδιαστή και παρόχου ενός δικτύου για τη διαχείριση των επιπέδων QoS. Επαναλαμβάνουμε στο σημείο αυτό ότι ο συγκεκριμένος διαχωρισμός είναι σχετικά αυθαίρετος. Πολλοί ερευνητές εντάσσουν τις λειτουργίες της ανάθεσης των ραδιοπόρων στο χρονοπρογραμματισμό της κίνησης, ωστόσο επιλέξαμε το συγκεκριμένο διαχωρισμό καθώς αφενός μας επιτρέπει να ορίσουμε και να αξιολογήσουμε διαφορετικές αρχιτεκτονικές αφετέρου συμβαδίζει με την παραδοσιακή αρχιτεκτονική των ανεξάρτητων στρωμάτων (isolated layered approach). Όπως θα φανεί και στις εργασίες που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια, υπάρχει εξαιρετικά μεγάλη ευρύτητα στον τρόπο θεώρησης και αντιμετώπισης του προβλήματος, κάτι που βέβαια δυσχεραίνει την άμεση σύγκριση των προτάσεων αυτών. Γενικά μπορούμε να πούμε ότι οι προσεγγίσεις διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: (α) σε αυτές που αποπειρώνται να βελτιστοποιήσουν από κοινού τα δύο στρώματα, και οι προτεινόμενοι μηχανισμοί είναι αρκετά έως εξαιρετικά πολύπλοκοι και (β) σε αυτές που αντιμετωπίζουν τα δύο υποπροβλήματα ανεξάρτητα και προσπαθούν να ορίσουν κατάλληλες διεπαφές, καταλήγοντας συνήθως σε λιγότερο πολύπλοκους μηχανισμούς. Μέρος των προσεγγίσεων βέβαια είναι δύσκολο να καταταχθεί σε κάποια από τις δύο κατηγορίες καθώς δανείζονται στοιχεία και από τις δύο. Η κατηγοριοποίηση που προτείνουμε βοηθάει στη βαθύτερη κατανόηση των προτάσεων.

3.2.1 Χρονοπρογραμματισμός Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης σε Συστήματα Μονής Φέρουσας

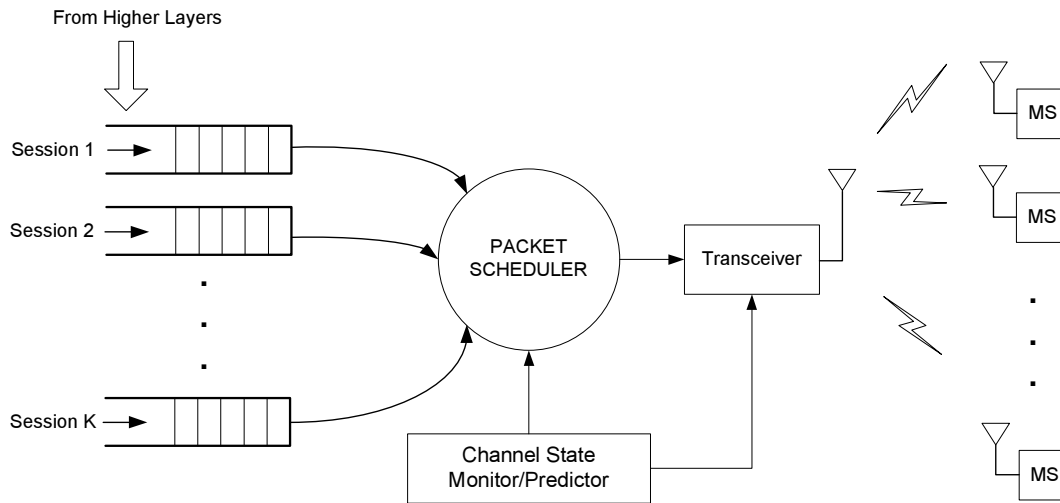
Η βελτιστοποίηση του στρώματος MAC μέσω του χρονοπρογραμματισμού της κίνησης συνίσταται στην ταυτόχρονη μεγιστοποίηση της επίδοσης του δικτύου και την ικανοποίηση των επιπέδων QoS των χρηστών. Οι δύο αυτοί στόχοι ενδέχεται να συγκρούονται, με αποτέλεσμα την μη ύπαρξη μοναδικής βέλτιστης απόφασης για την πολυπλεξία της εισερχόμενης από τα ανώτερα στρώματα τηλεπικοινωνιακής κίνησης, κάτι που καθιστά αναγκαία τη διεξοδική μελέτη

των σχετικών ισοζυγίων (trade-offs). Στη δεκαετία του '90 αναπτύχθηκε πλήθος τεχνικών χρονοπρογραμματισμού για ενσύρματα δίκτυα που αντιμετώπισαν επιτυχώς το πρόβλημα της παροχής QoS για υπηρεσίες σταθερού και μεταβλητού ρυθμού δεδομένων [48]. Ωστόσο, η απευθείας εφαρμογή των τεχνικών αυτών στα ασύρματα δίκτυα δεν ήταν δυνατή εξαιτίας δύο φαινομένων που απαντώνται μόνο στα ασύρματα συστήματα: (α) της μεταβλητής χωρητικότητας των διαύλων των χρηστών εξαιτίας των φαινομένων της σκίασης και της πολυδιαδρομικής διάδοσης, και (β) της διαφορετικής ποιότητας του διαύλου των χρηστών άρα και της χωρητικότητάς τους, που οφείλεται στη διαφορετική θέση τους ως προς το σταθμό βάσης [33]. Για την ανάπτυξη μηχανισμών χρονοπρογραμματισμού για ασύρματα δίκτυα ακολουθήθηκαν δύο πολιτικές:

- Τροποποίηση των τεχνικών των ενσύρματων δικτύων [34], και
- Εχμετάλλευση των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του ασύρματου διαύλου για τη δημιουργία νέων μηχανισμών [49]

Στην ενότητα 3.2.2 είδαμε ότι για τη βελτιστοποίηση της μετάδοσης όσον αφορά στο στρώμα PHY απαιτείται η εχμετάλλευση της διαφορικότητας στο πεδίο της συχνότητας και της διαφορικότητας πολλαπλών χρηστών. Όσον αφορά στο στρώμα MAC και στην εξυπηρέτηση της κίνησης μέσω ενός κοινού διαύλου (shared channel) εμφανίζεται ένα ακόμη είδος διαφορικότητας που καλείται διαφορικότητα πηγής (source multiuser diversity), η οποία οφείλεται στη διαφορετική χρονική εξέλιξη της ζήτησης υπηρεσίας από κάθε χρήστη εξαιτίας της εκρηκτικής συμπεριφοράς της κίνησης τύπου διαδικτύου. Εχμεταλλεούμενοι στο πεδίο του χρόνου το φαινόμενο αυτό είναι δυνατή η εξυπηρέτηση μεγαλύτερου αριθμού χρηστών από το δίκτυο και το όφελος που προκύπτει καλείται κέρδος στατιστικής πολυπλεξίας (statistical multiplexing gain) [35]. Στην ενότητα αυτή θα παρουσιάσουμε αρχικά τις βασικές κατηγοριοποιήσεις των τεχνικών χρονοπρογραμματισμού και στη συνέχεια τους πιο αντιπροσωπευτικούς μηχανισμούς για ασύρματα δίκτυα CDMA μονής φέρουσας.

Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί διάφορες κατηγοριοποιήσεις των τεχνικών χρονοπρογραμματισμού, ανάλογα με το σκοπό που καλούνται να επιτελέσουν. Είναι γενικά αποδεκτό ότι δεν υπάρχει ένας μοναδικός βέλτιστος μηχανισμός, καθώς ένα ασύρματο δίκτυο πρέπει να υποστηρίζει πλήθος διαφορετικών υπηρεσιών με ετερογενή χαρακτηριστικά. Ένας αλγόριθμος που είναι βέλτιστος για μία κατηγορία υπηρεσιών ενδέχεται να είναι ακατάλληλος για μία άλλη κατηγορία. Παρουσιάζουμε συνοπτικά τις βασικότερες κατηγοριοποιήσεις και τα αντίστοιχα κριτήρια: (α) ανάλογα με την υπηρεσία που καλούνται να υποστηρίξουν, πραγματικού ή μη πραγματικού χρόνου (RT/NRT), ευαίσθητη ή ανεκτική ως προς την καθυστέρηση μετάδοσης (delay sensitive/insensitive), ελάχιστου εγγυημένου ρυθμού διέλευσης ή ελαστική (guaranteed bit rate/best-effort), σταθερού ή μεταβλητού ρυθμού διέλευσης bits ή πλαισίων (CBR/VBR) [50], (β) ανάλογα με τον υιοθετούμενο τρόπο μοντελοποίησης της τηλεπικοινωνιακής κίνησης, δηλαδή σύμφωνα με το μοντέλο απείρως κατειλημμένων ουρών (infinitely backlogged queue model) ή το μοντέλο γέννησης κίνησης σύμφωνα με συγκεκριμένες στοχαστικές διαδικασίες (external arrival stochastic process model) [41]. Το πρώτο μοντέλο εφαρμόζεται στη μελέτη μηχανισμών χρονοπρογραμματισμού για υπηρεσίες best-effort, ενώ



Σχήμα 3.5: Τυπική δομή ενός ασύρματου χρονοπρογραμματιστή τηλεπικοινωνιακής κίνησης

το δεύτερο για υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, εξαρτώμενες από την καθυστέρηση μετάδοσης, (γ) ανάλογα με το αν και με ποιο τρόπο λαμβάνουν υπόψη τους κατά τη λήψη της απόφασης την κατάσταση του διαύλου των χρηστών. Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούν τέτοιου είδους πληροφορία ονομάζονται channel-aware και στην περίπτωση που δίνουν προτεραιότητα στους χρήστες που διαθέτουν ποιοτικότερο δίαυλο καλούνται opportunistic [49], (δ) ανάλογα με τον υιοθετούμενο τρόπο μοντελοποίησης του ασύρματου διαύλου, ως στατικής και εργοδικής διαδικασίας ή τυχαίας διαδικασίας [41], και (ϵ) ανάλογα με το αν υποστηρίζουν τη μετάδοση πακέτων σε κάθε χρονική θυρίδα εφόσον υπάρχουν δεδομένα στις ουρές των χρηστών (work-conserving scheduling) ή αν επιτρέπουν την παύση μετάδοσης για ορισμένο χρονικό διάστημα παρ'ότι υπάρχουν δεδομένα στις ουρές, προκειμένου τα δεδομένα αυτά να μεταδοθούν σε μελλοντικές χρονοθυρίδες αποδοτικότερα (non work-conserving scheduling) [33]. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειώσουμε ότι οι παραπάνω κατηγορίες είναι επικαλυπτόμενες και επομένως υπάρχουν αλγόριθμοι που μπορεί να συνδυάζουν στοιχεία και να ανήκουν σε πολλαπλές βασικές κατηγορίες, κάτι που θα φανεί στην αναλυτική περιγραφή των σημαντικότερων αλγορίθμων.

Προτού προχωρήσουμε στην αναλυτική περιγραφή των σημαντικότερων μηχανισμών αναφέρουμε σε γενικές γραμμές τα επιθυμητά χαρακτηριστικά που οφείλει να διαθέτει κάθε αξιόπιστος χρονοπρογραμματιστής τηλεπικοινωνιακής κίνησης [33], ενώ στο σχήμα 3.5 [33] παραθέτουμε το μπλοκ διάγραμμα ενός τυπικού ασύρματου χρονοπρογραμματιστή τηλ. κίνησης.

- Αποδοτική αξιοποίηση της φυσικής ζεύξης δεδομένων ώστε σε κάθε χρονοθυρίδα να μην επιλέγεται κάποιος χρήστης του οποίου ο δίαυλος να είναι υποβαθμισμένος
- Δίκαιη κατανομή των διαθέσιμων ραδιοπόρων μεταξύ των χρηστών, ώστε να εξασφαλίζεται βραχυπρόθεσμη δικαιοσύνη (short-term fairness) για ροές που μεταδίδονται δίχως σφάλμα και μακροπρόθεσμη δικαιοσύνη (long-term fairness) για ροές για τις οποίες ορισμένα πακέτα ενδέχεται να καταστραφούν πριν αποκωδικοποιηθούν.

- Εξασφάλιση ελάχιστων ορίων ως προς το ρυθμό διέλευσης δεδομένων ή/και των επιπέδων καθυστέρησης μετάδοσης (throughput/delay bounds) για τις ροές εκείνες που το απαιτούν.
- Αποσύνδεση των δεικτών QoS throughput και delay, καθώς είναι πιθανό να ζητούνται υπηρεσίες με εξαιρετικά χαμηλό ρυθμό μετάδοσης και ταυτόχρονα αυστηρές απαιτήσεις ως προς τη μέγιστη επιτρεπτή καθυστέρηση στις ουρές.
- Χαμηλή πολυπλοκότητα υλοποίησης, καθώς οι αποφάσεις πολυπλεξίας θα πρέπει να λαμβάνονται σε εξαιρετικά μικρή χρονική κλίμακα, της τάξης των msec.
- Εξασφάλιση απομόνωσης μεταξύ των ανεξάρτητων ροών, δηλαδή η πιθανή χειροτέρευση της συμπεριφοράς μίας ροής δε θα πρέπει να επηρεάζει τα επίπεδα παρεχόμενης υπηρεσίας των υπολοίπων.

3.2.1.1 Ελαστικές Υπηρεσίες

Αρχικά θα αναφερθούμε σε αλγορίθμους χρονοπρογραμματισμού για ελαστικές υπηρεσίες, όπως η πλοήγηση στο διαδίκτυο (WWW browsing), η αποστολή και λήψη e-mail και αρχείων μέσω FTP servers. Το μοντέλο τηλ. κίνησης απείρως κατειλημμένων ουρών χρησιμοποιείται στην περίπτωση αυτή. Υποθέτοντας αρχικά ότι δεν απαιτείται κάποιος ελάχιστος ρυθμός διέλευσης δεδομένων ανά χρήστη (user QoS), στόχος είναι η μεγιστοποίηση της επίδοσης του δικτύου, δηλ. του συνολικού ρυθμού διέλευσης δεδομένων που μεταφέρεται επιτυχώς από αυτό (sum throughput). Όπως έδειξαν πρώτοι οι ερευνητές Tse και Knopp, Humblet στις εργασίες [51] και [52], αυτό επιτυγχάνεται αν σε κάθε χρονοθυρίδα μεταδίδει ο χρήστης εκείνος που διαθέτει τον “καλύτερο” δίαυλο, από πλευράς μέγιστου ρυθμού μετάδοσης δεδομένων. Το σχήμα αυτό απαντάται στη βιβλιογραφία με διάφορες ονομασίες: best channel, max SNR, max C/I, max throughput, opportunistic κ.α. και ανήκει σαφώς στην κατηγορία των channel-aware τεχνικών. Αν με $R_k(t)$ συμβολίσουμε το ρυθμό μετάδοσης που υποστηρίζει ο χρήστης k στην τυχαία χρονοθυρίδα t , τότε ο αλγόριθμος επιλέγει το χρήστη k^* σύμφωνα με τη σχέση:

Best-Channel/Max-Rate Packet Scheduling

$$k^* = \arg \max_k \{R_k(t)\} \quad (3.1)$$

Για την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτού απαιτείται κάθε χρονική στιγμή η γνώση της ποιότητας των διαύλων όλων των χρηστών. Πιθανά μετρικά εκτίμησης της ποιότητας του διαύλου εξηγήθηκαν στην ενότητα 2.3.1. Η επίδοση της συγκεκριμένης τεχνικής ως προς το συνολικό throughput αποτελεί και το άνω όριο για κάθε αλγόριθμο. Το σημαντικότερο πρόβλημα που αντιμετωπίζει η τεχνική αυτή είναι η έλλειψη δικαιοσύνης ανάμεσα στους χρήστες, καθώς χρήστες που είναι εγγύτερα του σταθμού βάσης αναμένεται να μεταδίδουν συχνότερα και με υψηλότερους ρυθμούς σε σχέση με χρήστες που βρίσκονται προς το άκρο της κυψέλης. Μάλιστα ένας χρήστης που διαθέτει δίαυλο εξαιρετικής ποιότητας δύναται να μπλοκάρει όλους τους υπόλοιπους (starvation phenomenon) με αποτέλεσμα οι καθυστερήσεις των πακέτων στις ουρές να αυξάνονται με δραματικό ρυθμό. Για τους παραπάνω λόγους αποφεύγεται η εφαρμογή

του best-channel αλγορίθμου σε πραγματικά δίκτυα. Καθώς δεν υφίστανται ελάχιστες απαιτήσεις QoS για κάθε τερματικό, η όσο το δυνατόν δικαιότερη κατανομή των χρονοθυρίδων και των ραδιοπόρων, άρα και των επιτεύξιμων ρυθμών διέλευσης, αντικατοπτρίζει και τα επίπεδα ικανοποίησης των χρηστών και τελικά την επίδοση του δικτύου από την πλευρά του τελικού χρήστη.

Προκειμένου να αντιμετωπιστεί η έλλειψη δικαιοσύνης προτάθηκε η προσαρμογή του αρχικού αλγορίθμου, θυσιάζοντας μέρος της αθροιστικής δικτυοκεντρικής επίδοσης προς όφελος της δικαιότερης κατανομής των ραδιοπόρων στους χρήστες. Η βασική ιδέα είναι ότι σε κάθε χρονοθυρίδα μεταδίδει ο χρήστης εκείνος που πετυχαίνει το μέγιστο λόγο του υποστηριζόμενου ρυθμού μετάδοσης προς το μέσο ρυθμό διέλευσης μέχρι και εκείνη τη χρονοθυρίδα. Ουσιαστικά κάθε χρήστης δε μεταδίδει πλέον στις απόλυτα “καλύτερες” χρονοθυρίδες του, αλλά στις “καλύτερες” σε σχέση με τη μέση απόδοσή του. Ισοδύναμα, όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμητής (άρα και ο υποστηριζόμενος ρυθμός μετάδοσης), δίνεται προτεραιότητα στο χρήστη για μετάδοση, όμως ταυτόχρονα μεγαλώνει και ο παρονομαστής, με αποτέλεσμα σε μελλοντική χρονοθυρίδα η προτεραιότητα να υποβιβάζεται προς όφελος κάποιου χρήστη που δεν έχει μεταδώσει. Είναι προφανές ότι η συνολική επίδοση αναμένεται να μειωθεί, όμως και πάλι το κέρδος από την αξιοποίηση των πληροφοριών που σχετίζονται με την κατάσταση των ασύρματων διαύλων αναμένεται να είναι σημαντικό. Στη βιβλιογραφία η τεχνική αυτή απαντάται με την ονομασία Proportional Fair (PF) [51, 14, 4, 53], καθώς κατανέμει τους ραδιοπόρους του συστήματος ισόποσα στους χρήστες, χωρίς αυτό να σημαίνει βέβαια ότι η επίδοση των χρηστών θα είναι ίδια. Χρήστες που βρίσκονται σε εγγύτερη θέση προς το σταθμό βάσης αναμένεται να πετύχουν υψηλότερους ρυθμούς διέλευσης δεδομένων. Στη συνέχεια δίνουμε έναν αυστηρό ορισμό της δικαιοσύνης τύπου “proportional fair” [54].

Ορισμός 1 Ένα διάνυσμα ρυθμών διέλευσης $\underline{T} = (T_k, 1 \leq k \leq K)$ είναι αναλογικά δίκαιο (proportionally fair) αν είναι εφικτό (δηλ. το σύνολο των throughputs των χρηστών είναι μικρότερο ή ίσο προς τη χωρητικότητα του δικτύου) και για κάθε εφικτό διάνυσμα \underline{T}^* το άθροισμα των αναλογικών μεταβολών $\sum_{1 \leq k \leq K} \frac{T^* - T}{T}$ είναι μικρότερο ή ίσο του μηδενός.

Μαθηματικά, σύμφωνα με τον αλγόριθμο χρονοπρογραμματισμού PF επιλέγεται σε κάθε χρονοθυρίδα t ο χρήστης k^* βάσει της ακόλουθης σχέσης:

Proportional Fair Packet Scheduling

$$k^* = \arg \max_k \left\{ \frac{R_k(t)}{T_k(t)} \right\}$$

$$\overline{T_k(t+1)} = \begin{cases} \left(1 - \frac{1}{t_c}\right) \cdot \overline{T_k(t)} + \frac{1}{t_c} \cdot R_k(t), & k = k^* \\ \left(1 - \frac{1}{t_c}\right) \cdot \overline{T_k(t)}, & k \neq k^* \end{cases} \quad (3.2)$$

Το μέγεθος t_c είναι το χρονικό διάστημα στο οποίο λαμβάνονται τα δείγματα του ρυθμού διέλευσης προκειμένου να υπολογιστεί ο μέσος ρυθμός ανά χρήστη $\overline{T_k(t)}$ (η μνήμη του συστήματος δηλαδή) και είναι παράμετρος που καθορίζεται από τον σχεδιαστή. Η διάρκεια αυτή

πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη ώστε να εξουδετερώνονται οι μεταβολές ταχείας διάλειψης (fast fading) αλλά ωστόσο να αξιοποιούνται οι αργές διαλείψεις. Παρατηρούμε ότι ουσιαστικά ο μέσος ρυθμός διέλευσης υπολογίζεται μέσω ενός εκθετικού φίλτρου εξομάλυνσης. Στην εργασία [51] αποδεικνύεται επίσης ότι ο αλγόριθμος PF με χρονική κλίμακα $t_c \rightarrow \infty$, μεγιστοποιεί το άθροισμα $\sum_{k=1}^K \log(\overline{T}_k)$. Τέλος πρέπει να σημειώσουμε ότι ο αλγόριθμος αυτός αποδίδει στους χρήστες ταυτόσημους ρυθμούς διέλευσης όταν και μόνο όταν η συμπεριφορά των ασυρμάτων διαύλων είναι στατιστικά ίδια.

Μία διαφορετική εκδοχή δικαιοσύνης είναι η “max-min”, σύμφωνα με την οποία όλοι οι ρυθμοί διέλευσης δεδομένων των χρηστών είναι ταυτόσημοι (πρέπει να προσέξουμε ότι στην περίπτωση της “proportional fair” δικαιοσύνης δε συμβαίνει απαραίτητα αυτό), γι’ αυτό και οι σχετικοί αλγόριθμοι ονομάζονται δίκαιοι ως προς το throughput (fair/equal throughput). Αρχικά παρουσιάζουμε τον αυστηρό ορισμό του συγκεκριμένου τύπου δικαιοσύνης [54] και στη συνέχεια προτεινόμενες υλοποιήσεις [50].

Ορισμός 2 Ένα διάνυσμα ρυθμών διέλευσης $\underline{T} = (T_k, 1 \leq k \leq K)$ είναι “max-min” δίκαιο αν είναι εφικτό και ο ρυθμός διέλευσης οποιουδήποτε χρήστη k δε μπορεί να αυξηθεί δίχως να παραβιαστεί η εφικτότητα (feasibility) και να μειωθεί ο ρυθμός διέλευσης κάποιου άλλου χρήστη j για τον οποίο ισχύει $T_j < T_k$.

Μία υλοποίηση της πολιτικής max-min ή fair throughput παρουσιάζεται στην αναφορά [50] και βασίζεται στην εργασία [55]. Ουσιαστικά πρόκειται για μία τροποποίηση της πολιτικής PF, καθώς ο όρος $\overline{R}_i(t)$ που εισάγεται στον παρονομαστή ενισχύει την προτεραιότητα χρηστών που δεν παρουσιάζουν τόσο “ποιοτικό” δίαυλο. Ο όρος $\max_j \{\overline{R}_j(t)\}$ που εισάγεται στον αριθμητή, υποδηλώνει το μέγιστο υποστηριζόμενο ρυθμό μετάδοσης του σταθμού βάσης και δεν επηρεάζει την απόφαση.

Max-Min Fair/Fair Throughput Packet Scheduling

$$k^* = \arg \max_k \left\{ \frac{R_k(t)}{T_k(t)} \cdot \frac{\max_j \{\overline{R}_j(t)\}}{R_i(t)} \right\} \quad (3.3)$$

Οι προσεγγίσεις που έχουμε παρουσιάσει ως τώρα δεν μπορούν να εξασφαλίσουν απόλυτα επίπεδα QoS ανά χρήστη, όπως π.χ. ελάχιστους μέσους εγγυημένους ρυθμούς διέλευσης δεδομένων, αλλά προσπαθούν να κατανείμουν τη συνολική χωρητικότητα του δικτύου αναλογικά στους χρήστες. Αυτό όμως που ενδιαφέρει, συνήθως τον χρήστη είναι το απόλυτο επίπεδο υπηρεσίας που λαμβάνει. Είναι ανάγκη λοιπόν να θυσιαστεί μέρος της συνολικής επίδοσης της “καιροσκοπικής (opportunistic)” πολιτικής της ανάθεσης των ραδιοπόρων στους “καλύτερους” χρήστες και να δοθεί προτεραιότητα στην εξυπηρέτηση των ατομικών QoS. Ο Hosein στην εργασία [56], παρουσιάζει ένα πλαίσιο εργασίας για την υλοποίηση της πολιτικής αυτής, το οποίο βασίζεται στη θεωρία πολυαντικειμενικής βελτιστοποίησης (multi-objective optimization), κάνοντας χρήση των συναρτήσεων ωφέλειας (utility functions) (βλ. για παράδειγμα την αναφορά [57] για μια ανάλυση της θεωρίας). Η θεωρία αυτή εφαρμόστηκε για

πρώτη φορά στη μελέτη του χρονοπρογραμματισμού και της ανάθεσης ραδιοπόρων για ασύρματα δίκτυα από τον Kelly και δημοσιεύτηκε στην εργασία [54]. Περιληπτικά, αναφέρουμε ότι σε κάθε χρήστη αντιστοιχεί μία συνάρτηση ωφέλειας ως προς το μέσο ρυθμό διέλευσης, η οποία εκφράζει το ποσοστό ικανοποίησης του εκάστοτε χρήστη και σκοπός είναι η μεγιστοποίηση του αθροίσματος των συναρτήσεων αυτών για όλους τους χρήστες. Σύμφωνα με την εργασία [56] προτείνεται η επιλογή του χρήστη σε κάθε χρονοθυρίδα σύμφωνα με τη σχέση 3.4. Με R_k^{min} συμβολίζεται ο ελάχιστος απαιτούμενος μέσος ρυθμός διέλευσης δεδομένων για το χρήστη k και με β μία παράμετρος που εκφράζει την ταχύτητα με την οποία αυξάνει η ποινή που εισάγεται από το χρονοπρογραμματιστή όταν δεν ικανοποιείται η ελάχιστη απαίτηση ανά χρήστη (τυπική τιμή του β είναι 0.5).

Minimum Bit-Rate (min-GBR) Packet Scheduling

$$k^* = \arg \max_k \left\{ R_k(t) \cdot \left(1 + \beta \cdot e^{-\beta(\overline{T_k(t)} - T_k^{min})} \right) \right\} \quad (3.4)$$

Οι τεχνικές που παρουσιάστηκαν στην υποενότητα αυτή σχεδιάστηκαν με σκοπό την αξιοποίηση των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του ασύρματου διαύλου μετάδοσης προς όφελος της συνολικής επίδοσης από τη σκοπιά του συστήματος και των τελικών χρηστών. Η δεύτερη μεγάλη κατηγορία τεχνικών, ακολουθεί μία διαφορετική πολιτική καθώς η σχεδιάσή τους στηρίζεται στην τροποποίηση των σχετικών ενσύρματων τεχνικών, προκειμένου να αντιμετωπίσουν (και όχι να εκμεταλλευθούν) τα φαινόμενα διάλειψης και χωροχρονικής μεταβλητότητας που εισάγονται από τους διαύλους. Στην εργασία [58] προτείνεται ένα ενοποιημένο πλαίσιο για τη σχεδίαση και αξιολόγηση μηχανισμών δίκαιου χρονοπρογραμματισμού για ασύρματα δίκτυα (Wireless Fair Queueing). Στο πλαίσιο αυτό που καλείται από τους συγγραφείς “WFQ service model” εντάσσεται πλήθος αλγορίθμων όπως οι CSDPS, IWFQ, CIF-Q, SBFA, WFS, WPS, CBQ-CSDPS κ.α. (βλ. στις αναφορές της εργασίας [58] για αναλυτική περιγραφή των επιμέρους αλγορίθμων). Τα βασικά λειτουργικά υποσυστήματα του μοντέλου WFQ είναι τα ακόλουθα: (α) **error-free service**, το οποίο ορίζει ένα ιδανικό μοντέλο δίκαιης χρονοδρομολόγησης υποθέτοντας ότι ο δίαυλος δεν εισάγει σφάλματα στη μετάδοση (όπως συμβαίνει στα ενσύρματα δίκτυα), (β) **lead and lag model**, σύμφωνα με το οποίο καθορίζεται ποιες ροές υπολείπονται ή προηγούνται της αντίστοιχης error-free υπηρεσίας τους, (γ) **compensation model**, μία οντότητα που αποφασίζει ποια υπολειπόμενη ροή θα αντισταθμίσει τα προηγούμενα σφάλματα και μέσω ποιας προηγούμενης ροής. Η λειτουργία του μπλοκ αυτού είναι αποφασιστικής σημασίας, (δ) **slot/packet queues model**, το οποίο απαιτείται για την ταυτόχρονη υποστήριξη ροών ευαίσθητων ως προς την καθυστέρηση και τα σφάλματα μετάδοσης και (ε) **channel monitoring and prediction**, που παρέχει μία αξιόπιστη και όσο το δυνατόν ακριβέστερη εκτίμηση της κατάστασης των διαύλων των ροών σε κάθε χρονική στιγμή. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ανάλυσης και της προσομοίωσης των σημαντικότερων αλγορίθμων, οι συγγραφείς καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι οι τεχνικές CIF-Q και WFS ικανοποιούν όλες τις απαραίτητες προδιαγραφές του ενοποιημένου πλαισίου. Ένα σημαντικό μειονέκτημα της παρούσας μεθοδολογίας είναι ότι ο ασύρματος δίαυλος περιγράφεται μέσω ενός ιδιαίτερα απλουστευτικού μοντέλου 2 καταστάσεων (ικανής ή αδύνατης μετάδοσης), κάτι

που στα σύγχρονα συστήματα μετάδοσης μεταβλητού bit-rate είναι μη αποδεκτό.

3.2.1.2 Υπηρεσίες Πραγματικού Χρόνου

Οι πολιτικές και οι πρακτικοί αλγόριθμοι χρονοπρογραμματισμού για ελαστικές υπηρεσίες που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα δεν μπορούν να εφαρμοστούν αυτούσιοι όταν ενδιαφερόμαστε για υπηρεσίες πραγματικού χρόνου (π.χ. video/audio streaming services). Ο βασικός λόγος είναι ότι δε λαμβάνουν υπόψη τους περιορισμούς των ροών δεδομένων ως προς τη καθυστέρηση μετάδοσης, με αποτέλεσμα ορισμένες ουρές να υπερφορτώνονται. Χαρακτηριστικά αναφέρουμε την εργασία [59] στην οποία δεικνύεται η αστάθεια της τεχνικής proportional fair. Επειδή είναι εξαιρετικά δυσχερές η ικανοποίηση αυστηρών ντετερμινιστικών δεικτών QoS που σχετίζονται με την καθυστέρηση, συνήθως υιοθετούνται στοχαστικοί δείκτες. Μαθηματικά, η απαίτηση QoS για τον τυχαίο χρήστη k εκφράζεται από τη σχέση 3.5, ενώ ενδέχεται να υφίσταται και περιορισμός ως προς το μέσο ελάχιστο ρυθμό διέλευσης δεδομένων (minimum guaranteed bit rate - σχέση 3.6). Ο όρος W_k εκφράζει την καθυστέρηση του Head-Of-Line (HOL) πακέτου και μπορεί άλλοιστα να αντικατασταθεί και με το μέγεθος της ουράς Q_k , ο όρος τ_k τη μέγιστη καθυστέρηση μετάδοσης και ο όρος δ_k την πιθανότητα υπέρβασης της καθυστέρησης αυτής.

$$\Pr \{W_k > \tau_k\} \leq \delta_k \quad (3.5)$$

$$\overline{T}_k \geq T_k^{\min} \quad (3.6)$$

Σε τεχνικές χρονοπρογραμματισμού που αφορούν σε ανελαστικές υπηρεσίες, είναι αναγκαία λοιπόν η εξασφάλιση της σταθερότητας των ουρών. Αλγόριθμοι οι οποίοι αποτρέπουν την υπερφόρτωση των ουρών καλούνται βέλτιστοι ως προς το ρυθμό διέλευσης (throughput optimal scheduling algorithms). Ο αυστηρός ορισμός δίνεται ακολούθως [60]:

Ορισμός 3 *Μία πολιτική χρονοπρογραμματισμού είναι βέλτιστη ως προς το throughput όταν είναι ικανή να διατηρήσει όλες τις ουρές σταθερές εάν υπάρχει έστω και μία πολιτική που το καταφέρνει.*

Ο αλγόριθμος M-LWDF (Modified-Largest Weighted Delay First) (βλ. την αναφορά [36] για μια πρακτική περιγραφή του και τις αναφορές [61, 62, 63] για θεωρητικότερα ζητήματα που σχετίζονται με αυτόν) είναι ίσως ο πλέον διαδεδομένος για την ικανοποίηση των απαιτήσεων QoS που σχετίζονται με την καθυστέρηση. Η επιλογή του χρήστη προς μετάδοση σε κάθε χρονοθυρίδα εξαρτάται τόσο από την κατάσταση του διαύλου, αφού ευνοούνται οι χρήστες που διαθέτουν ποιοτικότερο δίαυλο όσο και από την κατάσταση των ουρών, καθώς δίνεται προτεραιότητα στους χρήστες των οποίων οι ουρές είναι μεγάλες (ισοδύναμα η καθυστέρηση των πακέτων τους είναι μεγάλη). Η τεχνική αυτή ανήκει στην κατηγορία των πολιτικών χρονοπρογραμματισμού “joint channel- and queue-aware” [37]. Η μαθηματική περιγραφή της επιλογής χρήστη διατυπώνεται στη σχέση 3.7. Παρατηρούμε ότι η πιθανότητα μετάδοσης ενός χρήστη σε μια τυχαία χρονοθυρίδα αυξάνεται όσο μεγαλύτερη είναι η καθυστέρηση των πακέτων στην

ουρά του, όσο ποιοτικότερος είναι ο διάυλος του σε σχέση με τη μέση συμπεριφορά του, και όσο αυστηρότεροι είναι οι παράμετροι QoS (πιθανότητα υπέρβασης, καθυστέρηση μετάδοσης). Στην εργασία [64] αποδεικνύεται ότι ο αλγόριθμος είναι throughput optimal.

Modified-Largest Weighted Delay First Packet Scheduling

$$k^* = \arg \max_k \{ \gamma_k \cdot R_k(t) \cdot W_k(t) \} = \arg \max_k \left\{ -\frac{\log(\delta_k)}{\tau_k \cdot \overline{R_k(t)}} \cdot R_k(t) \cdot W_k(t) \right\} \quad (3.7)$$

Μία ελαφρώς διαφορετική εκδοχή του M-LWDF είναι ο αλγόριθμος του “εκθετικού κανόνα” (exponential rule - ER), ο οποίος περιγράφεται μαθηματικά από τη σχέση (3.8) και είναι και αυτός throughput optimal [61, 62]. Η λογική ανάθεσης είναι η εξής: εάν κάποια από τις ουρές παρουσιάζει ζυγισμένη καθυστέρηση $a_k W_k$ που διαφέρει αρκετά ως προς τη μέση (ο αριθμητής δηλ. του εκθετικού όρου είναι αρκετά μεγάλος), τότε ο εκθετικός όρος μεγαλώνει αρκετά ώστε ουσιαστικά ο όρος που εκφράζει την ποιότητα του διαύλου $(R_k(t)/\overline{R_k(t)})$ να μην παίζει ρόλο, και να δίνεται προτεραιότητα στη μεγαλύτερη ζυγισμένη ουρά. Σε διαφορετική περίπτωση ο εκθετικός όρος τείνει στη μονάδα και η συμπεριφορά του αλγορίθμου προσομοιώνει τη συμπεριφορά της proportional fair πολιτικής, δίνοντας έμφαση στην επίδοση ως προς τον αθροιστικό ρυθμό διέλευσης.

Exponential Rule Packet Scheduling

$$k^* = \arg \max_k \left\{ \gamma_k \cdot R_k(t) \cdot e^{\left(\frac{a_k \cdot W_k(t) - a \cdot \overline{W}}{1 + \sqrt{a \cdot \overline{W}}} \right)} \right\} \quad (3.8)$$

$$\gamma_k = \frac{\alpha_k}{R_k(t)} = -\frac{\log(\delta_k)}{\tau_k \cdot \overline{R_k(t)}}, \quad \overline{a \cdot \overline{W}} = \frac{1}{K} \cdot \sum_k (a_k W_k(t))$$

Στην περίπτωση που εκτός των απαιτήσεων QoS ως προς την καθυστέρηση, υφίστανται και απαιτήσεις ελάχιστου μέσου ρυθμού διέλευσης, οι αλγόριθμοι M-WLDF και ER μπορούν να τους υποστηρίξουν με ελάχιστες τροποποιήσεις. Όπως προτείνεται στην εργασία [61], αρκεί σε κάθε χρήστη να αντιστοιχίζεται μία εικονική ουρά από tokens, τα οποία καταφθάνουν με ρυθμό ίσο προς τον ελάχιστο απαιτούμενο ρυθμό διέλευσης δεδομένων T_k^{\min} . Αν αντικατασταθεί ο όρος W_k με τον όρο $Q_k(t)/T_k^{\min}$ στις εξισώσεις (3.7), και (3.8) τότε σε κάθε χρονική στιγμή t μετά την εξυπηρέτηση δεδομένων από μία ουρά, ο αριθμός των tokens που θα αφαιρεθούν θα συμπίπτει με την ποσότητα των δεδομένων.

Ένας απλούστερος αλγόριθμος ως προς την υλοποίηση αλλά και όχι τόσο αποδοτικός σε σχέση με τους προαναφερθέντες προτάθηκε από τους ερευνητές Barriac και Holtzman στην εργασία [55]. Πρόκειται για μία τροποποιημένη εκδοχή του κλασσικού Proportional Fair αλγορίθμου, καθώς λαμβάνεται υπόψη η καθυστέρηση των HOL πακέτων των ουρών, δηλαδή των πακέτων που βρίσκονται στην κεφαλή των ουρών, άρα και των περισσότερο καθυστερημένων. Υιοθετείται μία χρονική “διορία” (συμβολίζεται με $\tau_k^{deadline}$), και όταν η καθυστέρηση σε μία ουρά την ξεπεράσει αυτομάτως ενισχύεται ο βαθμός προτεραιότητάς της. Σε διαφορετική περίπτωση, όταν δηλ. οι καθυστερήσεις κυμαίνονται σε χαμηλά επίπεδα, η ανάθεση των χρονοθυρίδων και των ραδιοπόρων πραγματοποιείται βάσει του κλασσικού σχήματος PF

(βλ. (3.9)).

Modified Proportional Fair (Barriac, Holtzman) Packet Scheduling

$$k^* = \begin{cases} \arg \max_k \left\{ \frac{R_k(t)}{T_k(t)} \right\}, & W_k(t) < \tau_k^{deadline} \\ \arg \max_k \left\{ \frac{R_k(t)}{T_k(t)} \cdot \frac{\max_j \{R_j(t)\}}{R_i(t)} \right\}, & W_k(t) \geq \tau_k^{deadline} \end{cases} \quad (3.9)$$

Σχόλιο 1 Οι μηχανισμοί που παρουσιάστηκαν στην ενότητα αυτή αφορούν σε συστήματα ορθογωνικής πολυπλεξίας χρηστών στο πεδίο του χρόνου και βασίζονται στην υπόθεση ότι σε κάθε χρονοθυρίδα δύναται να μεταδίδει ένας χρήστης, χρησιμοποιώντας όλους τους διαθέσιμους πόρους (ισχύ, φάσμα). Η εφαρμογή των μηχανισμών αυτών σε συστήματα CDMA-TDMA, είναι άμεση εφόσον ανατίθενται ορθογωνικοί κώδικες στους διάφορους χρήστες. Η πρώτη εκδοχή συνίσταται στην ανάθεση όλων των κωδικών σε έναν χρήστη ανά χρονοθυρίδα, ενώ μία άλλη εκδοχή στηρίζεται στην ταυτόχρονη μετάδοση δύο ή περισσότερων χρηστών σε μία χρονοθυρίδα, μέσω ασυσχέτιστων κωδικών. Επομένως τα έως τώρα συμπεράσματα ισχύουν και για τα υβριδικά δίκτυα CDMA-TDMA.

3.2.2 Βελτιστοποίηση του Φυσικού Στρώματος: Δυναμική Ανάθεση Ραδιοπόρων σε Συστήματα Πολλαπλών Φερόντων και Χρηστών

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιάσουμε τις σημαντικότερες εργασίες που απαντώνται στη διεθνή βιβλιογραφία και αφορούν στη βελτιστοποίηση της μετάδοσης πάνω από ένα φυσικό στρώμα που βασίζεται στη τεχνολογία των πολλαπλών φερόντων. Το αντικείμενο της ανάθεσης των ραδιοπόρων διατυπώνεται ως ένα μαθηματικό πρόβλημα βελτιστοποίησης με ποικίλους τρόπους και προτείνονται λύσεις (βέλτιστες και υποβέλτιστες) που δύναται να εφαρμοστούν σε ένα πραγματικό σύστημα. Οι βαθμοί ελευθερίας του φυσικού στρώματος που βασίζεται στη διαμόρφωση OFDM είναι η ισχύς, το διαθέσιμο εύρος ζώνης (ή ισοδύναμα τα υποφέροντα) και ο χρόνος. Στην παρούσα ανάλυση, η ελάχιστη χρονική κλίμακα είναι το ένα OFDM σύμβολο και η χρονική εξέλιξη δε λαμβάνεται υπόψη. Ουσιαστικά ένα “έξυπνο” σχήμα ανάθεσης ραδιοπόρων εκμεταλλεύεται τις δύο εγγενείς μορφές διαφορικότητας που υπάρχουν σε ένα σύστημα πολλαπλών φερόντων και πολλαπλών χρηστών (multiuser OFDM): τη διαφορετική ποιότητα του διαύλου του κάθε υποφέροντος εξαιτίας της συχνοτικής επιλεκτικότητας του συνολικού διαύλου (frequency diversity) και τη διαφορετική ποιότητα του διαύλου του κάθε χρήστη εξαιτίας της διαφορετικής θέσης του σε σχέση με το σταθμό βάσης (multiuser diversity). Επίσης, πρέπει να αναφέρουμε ότι εφεξής θα μας απασχολήσει κυρίως η downlink ζεύξη, καθώς η ζήτηση της κίνησης αναμένεται να είναι πολύ υψηλότερη σε σχέση με τη ζεύξη uplink. Ωστόσο, οι τεχνικές που θα μελετηθούν μπορούν με ορισμένες τροποποιήσεις να εφαρμοστούν και στη ζεύξη uplink. Η ορολογία και οι συμβολισμοί παρουσιάζονται στον πίνακα 3.2.

Η βελτιστοποίηση του φυσικού στρώματος συνίσταται λοιπόν στα εξής σημεία: (α) ανάθε-

Πίνακας 3.2: Ορολογία – Συμβολισμοί

Συμβολισμός	Επεξήγηση
N	Ο αριθμός των υποφερόντων OFDM ($n = 1, 2, \dots, N$)
K	Ο αριθμός των χρηστών ($k = 1, 2, \dots, K$)
W	Το εύρος ζώνης του κάθε υποφέροντος
BW	Το συνολικό εύρος ζώνης μετάδοσης του συστήματος OFDM ($N \cdot W$)
N_0	Πυκνότητα Φάσματος Ισχύος Θορύβου
T_{symb}^{OFDM}	Διάρκεια Συμβόλου OFDM
n_{symb}^{OFDM}	Αριθμός Συμβόλων OFDM που περιέχονται σε ένα πλαίσιο OFDMA
T_{frame}	Διάρκεια Πλαισίου OFDMA ($n_{symb}^{OFDM} \cdot T_{symb}^{OFDM}$)
$\rho_{n,k}$	Μεταβλητή Ανάθεσης Φερόντων: Ισούται με 1 αν το υποφέρον n ανήκει στο χρήστη k , διαφορετικά είναι 0.
$c_{n,k}$	Μεταβλητή Σχήματος Διαμόρφωσης/Κωδικοποίησης: Εκφράζει τον αριθμό των bits που μεταφέρει το υποφέρον n αν έχει ανατεθεί στο χρήστη k .
$P_{n,k}$	Η ισχύς του υποφέροντος n το οποίο έχει ανατεθεί στο χρήστη k .
P_{max}	Μέγιστη Επιτρεπόμενη Ισχύς μετάδοσης (αν υφίσταται)
c_{max}	Μέγιστη αριθμός bits ανά υποφέρον για ένα OFDM σύμβολο (αν υφίσταται). Εξαρτάται από την υψηλότερη τάξη της διαμόρφωσης και το χαμηλότερο ρυθμό κωδικοποίησης
Γ_k	Το χάσμα SNR για το χρήστη k , το οποίο συνδέεται άμεσα με το επιθυμητό επίπεδο BER και τα σχήματα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που εφαρμόζονται. Αν $\Gamma = 1$ τότε καταλήγουμε στην έκφραση του Shannon
$f(c_{n,k}, h_{n,k}, \Gamma_k)$	Η ελάχιστη ισχύς μετάδοσης για να μεταδοθούν $c_{n,k}$ bits σε ένα υποφέρον n που έχει ανατεθεί στο χρήστη k , όταν ο διάυλος έχει κέρδος $h_{n,k}$ και το χάσμα είναι Γ_k
$f^{-1}(P_{n,k}, h_{n,k}, \Gamma_k)$	Ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης που μπορεί να υποστηριχθεί σε ένα υποφέρον n που έχει ανατεθεί στο χρήστη k , όταν η ισχύς του είναι $P_{n,k}$, το κέρδος του διαύλου $h_{n,k}$ και το χάσμα είναι Γ_k
$ h_{n,k} ^2$	Το κέρδος του διαύλου για το συνδυασμό υποφέροντος/χρήστη (n, k)
R_k	Ο συνολικός μεταδιδόμενος αριθμός bits/OFDM symbol για το χρήστη k : $R_k = \sum_{n=1}^N \rho_{n,k} \cdot c_{n,k}$
P_{tot}	Συνολική Ισχύς Μετάδοσης του Σταθμού Βάσης: $P_{tot} = \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \rho_{n,k} \cdot f(c_{n,k}, h_{n,k}, \Gamma_k)$

ση των κατάλληλων υποφερόντων στους χρήστες (subcarrier allocation - εύρεση των όρων $\rho_{n,k}$), (β) βέλτιστη κατανομή της ισχύος στα υποφέροντα (power allocation - $P_{n,k}$), και (γ) βέλτιστη επιλογή διαμόρφωσης και κωδικοποίησης (άρα και ρυθμού μετάδοσης) για κάθε υποφέρον (bit loading - $c_{n,k}$). Πάγια τακτική είναι η εξασφάλιση ενός σταθερού επιπέδου BER ανά χρήστη (ή ισοδύναμα Γ_k), με αποτέλεσμα τα σημεία (β) και (γ) να αλληλοεξαρτώνται μέσω των συναρτήσεων f και f^{-1} . Επομένως, η ανάθεση των ραδιοπόρων τελικά αντιστοιχεί στην εύρεση των ζευγών $(\rho_{n,k}, c_{n,k})$ ή $(\rho_{n,k}, P_{n,k}) \forall n, k$. Η διατύπωση του συγκεκριμένου προβλήματος βελτιστοποίησης απαντάται στη βιβλιογραφία με δύο μορφές [65, 66] οι οποίες όπως σημειώνεται και στην αναφορά [67] είναι δυαδικές και αναλύονται στις ακόλουθες υποενότητες.

- Ελαχιστοποίηση της συνολικής ισχύος μετάδοσης του σταθμού βάσης υπό την προϋπόθεση της ικανοποίησης ελάχιστων σταθερών ρυθμών μετάδοσης και σταθερών επιπέδων BER ανά χρήστη (Margin Adaptive - MA formulation)
- Μεγιστοποίηση του συνολικού ρυθμού μετάδοσης (ή ισοδύναμα της φασματικής απόδοσης) του δικτύου υπό τον περιορισμό μίας μέγιστης διαθέσιμης ισχύος μετάδοσης, και της ικανοποίησης ενός ελάχιστου ρυθμού μετάδοσης για κάθε χρήστη και σταθερών επιπέδων BER ανά χρήστη (Rate Adaptive - RA formulation)

Για ένα σύστημα πολλαπλών χρηστών οι σχεδιαστικές μεταβλητές $\rho_{n,k}$ και $c_{n,k}$ πρέπει να βελτιστοποιηθούν από κοινού για όλους τους χρήστες προκειμένου η ισχύς μετάδοσης ή η φασματική επίδοση να συγκλίνουν στις βέλτιστες δυνατές τιμές. Μία υπολογιστικά απλούστερη αλλά υποβέλτιστη προσέγγιση είναι η διάσπαση της διαδικασίας σε δύο στάδια: (α) στην εύρεση των παραμέτρων $\rho_{n,k}$, δηλ. στην ανάθεση των υποφερόντων στους χρήστες και (β) στην εύρεση των όρων $c_{n,k}$ ή ισοδύναμα $P_{n,k}$ για κάθε χρήστη, μία διαδικασία που καλείται “Bit Loading”. Η συγκεκριμένη προσέγγιση ακολουθείται στη συντριπτική πλειοψηφία των σχετικών εργασιών όπως θα δούμε αναλυτικά στη συνέχεια. Το στάδιο (β) ανάγεται σε K ανεξάρτητα υποπροβλήματα bit loading, ένα για κάθε χρήστη, ενώ θεωρείται γνωστό το σετ υποφερόντων που διαθέτει ο καθένας. Για το λόγο αυτό, πριν παρουσιάσουμε τα προβλήματα πολλαπλών χρηστών θα αναφερθούμε στη βελτιστοποίηση της μετάδοσης OFDM για έναν χρήστη (single-user OFDM transmission optimization). Προφανώς, οι τεχνικές αυτές δεν απαιτούν γνώση του τρόπου κατανομής των υποφερόντων.

3.2.2.1 Βελτιστοποίηση Μετάδοσης OFDM ενός Χρήστη

Η στατική κατανομή της ισχύος ή των bits στα επιμέρους υποφέροντα (fixed loading) σε περιπτώσεις που ο διάυλος μετάδοσης παρουσιάζει σημαντική συχνοεπιλεκτικότητα ενδέχεται να οδηγήσει σε πολύ υψηλά επίπεδα BER λόγω της ύπαρξης υποφερόντων σε κατάσταση βαθιάς διάλειψης. Οι παράμετροι λειτουργίας c_n και P_n (ο δείκτης k εγκαταλείπεται καθώς αναφερόμαστε σε έναν τυχαίο χρήστη) πρέπει να εξασφαλίζουν την ομοιόμορφη κατανομή των επιπέδων BER σε όλο το εύρος ζώνης (όπως αποδεικνύεται στο [21]) και επομένως πρέπει να μεταβάλλονται δυναμικά παρακολουθώντας τις μεταβολές του διαύλου. Οι μηχανισμοί αναζήτησης των βέλτιστων παραμέτρων επικεντρώνονται στην ελαχιστοποίηση της συνολικής

ισχύος για έναν απαιτούμενο ρυθμό εξυπηρέτησης δεδομένων ή στη μεγιστοποίηση του ρυθμού μετάδοσης υπό τον περιορισμό της διαθεσιμότητας της ισχύος. Παραθέτουμε περιληπτικά τους σημαντικότερους αλγόριθμους bit loading από τη βιβλιογραφία:

“Waterfilling Optimization” [16] Η εφαρμογή μεθόδων από τη θεωρία της βελτιστοποίησης (ανάπτυξη πολλαπλασιαστών Lagrange) οδηγεί στη συνθήκη (3.10) που πρέπει να ικανοποιείται προκειμένου να βελτιστοποιείται η εκάστοτε αντικειμενική συνάρτηση, ενώ ο μέγιστος αριθμός των bits/symbol για κάθε υποφέρον n θα δίνεται από την σχέση (3.11).

$$P_n + \frac{\Gamma}{|h_n|^2} = K = \text{σταθ.} \quad \forall n \in \mathbf{N} \quad (3.10)$$

$$R = \sum_{n=1}^N \log \left(1 + \frac{P_n |h_n|^2}{\Gamma} \right) \quad (3.11)$$

Στην αναφορά [16, σελ. 84] δίνεται ένας αναδρομικός αλγόριθμος ο οποίος υπολογίζει τις βέλτιστες επιθυμητές κατανομές. Το πρόβλημα με το συγκεκριμένο αλγόριθμο είναι ότι η λύση που προκύπτει είναι γενικά συνεχής, κάτι που την καθιστά αδύνατη την απευθείας εφαρμογή της. Επίσης, αν στρογγυλοποιηθούν οι συνεχείς κατανομές στους πλησιέστερους ακέραιους υπάρχει μεγάλη πιθανότητα η νέα λύση να είναι μη βέλτιστη και ίσως ανέφικτη. Για το λόγο αυτό η λύση waterfilling χρησιμοποιείται ως άνω όριο για την επίδοση πρακτικών αλγορίθμων.

Αλγόριθμος Levin-Campello [68, 16] Η λύση που εξάγεται από τον αλγόριθμο αυτό είναι ακέραιας μορφής, εμφανίζει πολυπλοκότητα τάξης $O(N)$ και συγκλίνει στη βέλτιστη. Αρχικά επιλέγεται μία τυχαία κατανομή των bits στα υποφέροντα και μέσω ενός επαναληπτικού μηχανισμού ανταλλαγών bits τροποποιείται και εν τέλει καταλήγει στη βέλτιστη. Ο ρυθμός σύγκλισης εξαρτάται από την αρχική κατανομή και έτσι πρέπει να επιλέγεται μία όσο το δυνατόν αποδοτικότερη αρχική λύση. Μία τέτοια είναι η στρογγυλοποιημένη εκδοχή της waterfilling.

Ευριστικός “Greedy” Αλγόριθμος [21, 66] Ο πρώτος και ίσως απλούστερος σχετικός μηχανισμός προτάθηκε στην [69]. Πρόκειται για έναν ευριστικό αλγόριθμο ο οποίος αναθέτει τα bits ένα προς ένα, επιλέγοντας κάθε φορά το υποφέρον εκείνο που θα προκαλέσει την ελάχιστη αύξηση της ισχύος. Η πολυπλοκότητά του είναι τάξης $O(N^2)$ και ένα μεγάλο πλεονέκτημά του είναι η ευκολία υλοποίησης.

Αλγόριθμος “Bit-Swapping” [70] Πρόκειται για έναν πρακτικό αλγόριθμο λογικής παραπλήσιας με τον Levin-Campello. Σε πρώτη φάση (initial bit loading) τα bits κατανέμονται στα φέροντα ομοιόμορφα, ενώ στη συνέχεια εφαρμόζεται μία επαναληπτική διαδικασία σύμφωνα με την οποία μετακινούνται bits από ένα φέρον σε άλλο υπό την προϋπόθεση ότι μειώνεται κάθε φορά η ελάχιστη απαιτούμενη ισχύς.

3.2.2.2 Πλαίσιο Ελαχιστοποίησης της Ισχύος Μετάδοσης

Η αυστηρή μαθηματική διατύπωση της συγκεκριμένης προσέγγισης παρουσιάζεται στη σχέση (3.12) και συνήθως εφαρμόζεται σε προβλήματα εξυπηρέτησης κίνησης τύπου CBR (π.χ. φωνή), στα οποία απαιτείται η διατήρηση ενός σταθερού ρυθμού εξυπηρέτησης. Έτσι, οι περιοριστικές εκφράσεις για το ρυθμό μετάδοσης εκφράζονται υπό μορφή ισότητας, καθώς για τη μετάδοση επιπλέον πληροφορίας απαιτείται αύξηση της ισχύος. Επίσης η εξασφάλιση των επιπέδων BER υπεισέρχεται στο πρόβλημα μέσω των όρων Γ_k .

Margin Adaptive Formulation (MA)

$$\begin{aligned} \min_{\rho_{n,k}, c_{n,k}} P_{tot} \text{ where } P_{tot} &= \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \rho_{n,k} \cdot f(c_{n,k}, h_{n,k}, \Gamma_k) \\ \text{s.t.} \\ R_k &= R_k^{\min} \forall k \text{ where } R_k = \sum_{n=1}^N \rho_{n,k} \cdot c_{n,k} \\ \sum_{k=1}^K \rho_{n,k} &= 1 \forall n \\ \rho_{n,k} &\in \{0, 1\}, c_{n,k} \in \mathbf{D} = \{0, 1, \dots, c_{\max}\}, f(c_{n,k}, h_{n,k}, \Gamma_k) = P_{n,k} = \frac{2^{c_{n,k}} - 1}{N_0 \cdot W \cdot \Gamma_k} \end{aligned} \quad (3.12)$$

Η πρώτη εργασία στην οποία διατυπώθηκε μαθηματικά το πρόβλημα της βέλτιστης εξυπηρέτησης πολλαπλών χρηστών σε ένα σύστημα πολλαπλών φερόντων (multiuser OFDM) δημοσιεύθηκε το 1999 [71]. Οι ερευνητές σημειώνουν την ιδιαίτερα αυξημένη πολυπλοκότητα του προβλήματος, καθώς αυτό εντάσσεται στην κατηγορία των συνδυαστικών, μη γραμμικών και μεικτών ακέραιων προβλημάτων μαθηματικού προγραμματισμού μεγάλης κλίμακας (large scale non linear mixed integer programming) και για το λόγο αυτό αναπτύσσουν μια επαναληπτική υποβέλτιστη μέθοδο επίλυσης μειωμένης (ωστόσο υψηλής) πολυπλοκότητας, βασιζόμενοι σε κλασικές τεχνικές από τη θεωρία βελτιστοποίησης (βλ. για παράδειγμα [72, 73, 74, 75]). Η ίδια ομάδα ερευνητών αναγνωρίζοντας την πολυπλοκότητα του αλγορίθμου ανάθεσης των ραδιοπόρων που πρότειναν στην αρχική εργασία τους ([71]), πρότειναν σε επόμενη εργασία ένα νέο σαφώς απλούστερο ευριστικό αλγόριθμο [76]. Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφέρουμε ότι η εφαρμογή του αλγορίθμου αυτού προϋποθέτει γνώση του βέλτιστου αριθμού των υποφερόντων που ανατίθενται σε κάθε χρήστη, ενώ επίσης υπονοείται ότι η συνολική ισχύς μετάδοσης κατανέμεται ομοιόμορφα στα υποφέροντα (δεν υφίσταται κάποιο προσαρμοστικό σχήμα διαμόρφωσης/κωδικοποίησης).

Μία ακόμη εργασία που δημοσιεύεται στο [77] επικεντρώνεται στην εύρεση πρακτικών αλλά ταυτοχρόνως και αποδοτικών ευριστικών αλγορίθμων ανάθεσης υποφερόντων για συστήματα πολλαπλών χρηστών OFDM. Εν γένει, η βέλτιστη από πλευράς κατανάλωσης ισχύος ή υποστηριζόμενου συνολικού ρυθμού διέλευσης τακτική ανάθεσης των υποφερόντων αποφασίζει από κοινού τον αριθμό των υποφερόντων ανά χρήστη καθώς και το ποια συγκεκριμένα

υποφέροντα θα ανατεθούν σε κάθε χρήστη. Ωστόσο, μία τέτοια προσέγγιση αυξάνει την πολυπλοκότητα του προβλήματος, και γι' αυτό το λόγο η διαδικασία διαχωρίζεται σε δύο ανεξάρτητα βήματα, κάτι που ακολουθείται και από την προτεινόμενη εργασία. Μία σημαντική παρατήρηση για αυτόν τον αλγόριθμο είναι ότι το μέσο κέρδος του διαύλου για κάθε χρήστη είναι κανονικοποιημένο στη μονάδα, ώστε οι χρήστες εγγύτερα του σταθμού βάσης να μη μονοπωλούν τα καλύτερα υποφέροντα. Αυτή είναι και η ειδοποιός διαφορά του συγκεκριμένου αλγορίθμου σε σχέση με τους υπόλοιπους που απαντώνται στη βιβλιογραφία.

Η εφαρμογή μεθόδων γραμμικού προγραμματισμού (linear programming) για την εύρεση βέλτιστων και υποβέλτιστων τεχνικών ανάθεσης υποφερόντων και προσαρμοστικής διαμόρφωσης σε συστήματα OFDM προτείνεται στις εργασίες [78, 79]. Αρχικά το μη γραμμικό πρόβλημα (3.12) μετασχηματίζεται σε γραμμικό μέσω της εισαγωγής ενός νέου τρισδιάστατου διανύσματος σχεδίασης $\gamma_{n,k,c}$ το οποίο ουσιαστικά εμπεριέχει όλους τους βαθμούς ελευθερίας που επιθυμούμε να βελτιστοποιήσουμε. Όταν το τυχαίο στοιχείο είναι 1 σημαίνει ότι το n -οστό υποφέρον έχει ανατεθεί στον k -οστό χρήστη και έχει επιλεγεί το c -οστό σχήμα διαμόρφωσης/κωδικοποίησης. Σε κάθε άλλη περίπτωση είναι μηδέν. Η τροποποιημένη μορφή εντάσσεται στην κατηγορία των δυαδικών προβλημάτων ακέραιου προγραμματισμού (binary integer programming), η επίλυση των οποίων είναι εξαιρετικά δυσχερές και υπολογιστικά πολύπλοκη, καθώς απαιτείται συνολικά η εύρεση $N \times K \times |D|$ δυαδικών μεταβλητών (ενδεικτικά για ένα σύστημα 250 φερόντων, 20 χρηστών και 4 σχημάτων διαμόρφωσης, ο αριθμός αυτός ανέρχεται στις 20,000). Τυπικές αλγόριθμοι επίλυσης είναι οι “Branch and Bound” και “Exhaustive Enumeration” [74]. Εξαιτίας της τεράστιας πολυπλοκότητας, οι συγγραφείς προτείνουν έναν υποβέλτιστο αλγόριθμο ανάθεσης των υποφερόντων και όσον αφορά στην επιλογή διαμόρφωσης χρησιμοποιούν προτάσεις από τη βιβλιογραφία. Η υποβέλτιστη λύση βασίζεται σε δύο παραδοχές οι οποίες εξάχθηκαν έπειτα από την ενδελεχή παρατήρηση της συμπεριφοράς της βέλτιστης λύσης: (α) Για κάθε χρήστη, τα bits διαμοιράζονται στα υποφέροντα που του έχουν ήδη ανατεθεί σχεδόν ομοιόμορφα. Μαθηματικά αυτό εκφράζεται ως εξής: $c_{n,k} = c_k$ if $\rho_{n,k} = 1 \forall k$ και (β) Οι τιμές κέρδους διαύλου των υποφερόντων που ανατίθενται σε έναν χρήστη είναι παραπλήσιες και προσεγγίζουν το μέσο κέρδος. Εφαρμόζοντας τις παραπάνω παραδοχές η πολυπλοκότητα του αρχικού προβλήματος μειώνεται σημαντικά.

3.2.2.3 Πλαίσιο Μεγιστοποίησης της Φασματικής Απόδοσης

Η μαθηματική διατύπωση της εν λόγω προσέγγισης παρουσιάζεται στη σχέση (3.13) και συνήθως εφαρμόζεται σε προβλήματα εξυπηρέτησης εκρηκτικής κίνησης VBR (π.χ. υπηρεσίες διαδικτύου), στα οποία απαιτείται η μεγιστοποίηση του εξυπηρετούμενου φορτίου καθώς συνήθως οι ουρές είναι ιδιαίτερα υπερφορτωμένες.

Rate Adaptive Formulation (RA)

$$\begin{aligned}
 & \max_{\rho_{n,k}, c_{n,k}} R_{tot} \text{ where } R_{tot} = \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \rho_{n,k} \cdot c_{n,k} \\
 & s.t. \\
 & R_k \geq R_k^{\min} \forall k \text{ where } R_k = \sum_{n=1}^N \rho_{n,k} \cdot c_{n,k} \\
 & P_{tot} \leq P_{\max} \text{ where } P_{tot} = \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^k \rho_{n,k} \cdot f(c_{n,k}, h_{n,k}, \Gamma_k) \\
 & \sum_{k=1}^K \rho_{n,k} = 1 \forall n \\
 & \rho_{n,k} \in \{0, 1\}, c_{n,k} \geq 0, f(c_{n,k}, h_{n,k}, \Gamma_k) = P_{n,k} = \frac{2^{c_{n,k}} - 1}{N_0 \cdot W \cdot \Gamma_k}
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

Όσον αφορά στα ζητούμενα επίπεδα QoS των χρηστών αυτά κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες: (α) κάθε χρήστη δεν απαιτεί κάποιο ελάχιστο ρυθμό διέλευσης, οπότε στη σχέση (3.13) οι περιοριστικές εκφράσεις δεν ισχύουν, (β) κάθε χρήστη απαιτεί ένα απόλυτο ελάχιστο ρυθμό διέλευσης δεδομένων, οπότε οι περιοριστικές εκφράσεις ισχύουν υπό μορφή ανισότητας και (γ) εφαρμόζεται κάποιας μορφής δικαιοσύνη στην κατανομή των ρυθμών και όχι απόλυτα επίπεδα QoS π.χ. max-min (fair throughput), proportional fair, weighted fair. Αυτό απαιτεί την τροποποίηση των περιοριστικών εκφράσεων. Στη συνέχεια περιγράφουμε τις πιο αντιπροσωπευτικές προσεγγίσεις που πραγματεύονται και τις τρεις υποπεριπτώσεις.

Οι ερευνητές Jang και Lee [80] μελέτησαν το πρόβλημα της μεγιστοποίησης του συνολικού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων για μία μέγιστη διαθέσιμη ισχύ μετάδοσης αλλά χωρίς την ύπαρξη απαιτήσεων QoS για κάθε χρήστη (υποπερίπτωση α). Η μαθηματική διατύπωση δίνεται στη σχέση (3.14).

$$\max_{\rho_{n,k}, P_{n,k}} \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \rho_{n,k} \cdot f^{-1}(P_{n,k}, h_{n,k}, \Gamma_k) \text{ s.t. } \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^k \rho_{n,k} \cdot P_{n,k} \leq P_{\max} \tag{3.14}$$

Στη συντριπτική πλειοψηφία των σχετικών εργασιών ανάθεσης των ραδιοπόρων, υπονοείται ότι ένα υποφέρον δε δύναται να ανατεθεί σε περισσότερους από έναν χρήστες. Η παραδοχή αυτή είναι λογική υπό την έννοια της εξάλειψης της ενδοκυψελικής παρεμβολής, ωστόσο η συγκεκριμένη μελέτη αποδεικνύει ότι είναι και βέλτιστη όσον αφορά το συνολικό επιτευχθέντα ρυθμό μετάδοσης. Η βέλτιστη λύση του προβλήματος (3.14) λαμβάνεται σε δύο στάδια: (α) ανάθεση κάθε υποφέροντος στο χρήστη εκείνο που παρουσιάζει το μέγιστο κέρδος διαύλου σε αυτό (dynamic subcarrier allocation - DSA), και (β) ανάθεση της ισχύος σε κάθε χρήστη μέσω του βέλτιστου αλγορίθμου waterfilling (WF) [16]. Τα αποτελέσματα της εργασίας αυτής μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως άνω όρια στην επίδοση ενός πρακτικού συστήματος

στο οποίο θα υφίστανται απαιτήσεις QoS.

Η πρώτη χρονικά εργασία που προτείνει έναν αποδοτικό πρακτικό αλγόριθμο επίλυσης του προβλήματος (3.13) (υποπερίπτωση β) εκπονήθηκε από τους Yin και Liu και δημοσιεύτηκε στο [81]. Καθώς η εύρεση της βέλτιστης λύσης όπως και στο αντίστοιχο Margin Adaptive πρόβλημα είναι ιδιαίτερα περίπλοκη διαδικασία προτείνεται ένας αλγόριθμος που εξελίσσεται σε δύο ανεξάρτητα βήματα. Η λογική της τακτικής που υιοθετείται περιγράφεται στη συνέχεια. Σε πρώτη φάση αποφασίζεται η “ποσότητα” των ραδιοπόρων που πρέπει να λάβει κάθε χρήστης για να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις του, δηλ. τον αριθμό των υποφερόντων και το ποσοστό της συνολικής ισχύος. Η απόφαση αυτή στηρίζεται αφενός στο απαιτούμενο QoS αφετέρου στη μέση ποιότητα του διαύλου. Το δεύτερο στάδιο συνίσταται στην ανάθεση των υποφερόντων σε συγκεκριμένους χρήστες και της απαιτούμενης ισχύος σε κάθε ένα από αυτά λαμβάνοντας υπόψη τα κέρδη των επιμέρους διαύλων και όχι μόνο τη μέση στατιστική συμπεριφορά. Το σχήμα διαμόρφωσης επιλέγεται σύμφωνα με την ισχύ που ανατέθηκε σε κάθε υποφέρον. Το κέρδος του αλγορίθμου αυτού όσον αφορά στο συνολικό υποστηριζόμενο throughput σε σχέση με ένα στατικό OFDM-TDMA σχήμα είναι της τάξης του 30-40%, ενώ υπολείπεται από το άνω όριο (όταν δηλ. δεν υφίστανται ελάχιστες απαιτήσεις QoS ανά χρήστη), κατά 5-10%.

Οι επόμενες προσεγγίσεις που θα παρουσιαστούν αποπειρώνται να μεγιστοποιήσουν τη φασματική επίδοση και ταυτόχρονα να συμπεριφερθούν με όσο το δυνατόν πιο δίκαιο τρόπο απέναντι στους χρήστες. Εν γένει οι δύο αυτοί στόχοι είναι αντικρουόμενοι εξαιτίας της διαφορετικής ποιότητας των ανεξάρτητων ασύρματων διαύλων. Όπως περιγράψαμε στην πρώτη εργασία, η μεγιστοποίηση της φασματικής επίδοσης επιτυγχάνεται εφόσον ανατεθούν τα υποφέροντα στους ποιοτικότερους χρήστες. Σε ένα κυψελωτό σύστημα όμως, είναι πολύ πιθανό να υπάρχει ένας ή περισσότεροι χρηστές πλησίον του σταθμού βάσης οι οποίοι να μονοπωλούν κατά αυτόν τον τρόπο τους διαθέσιμους ραδιοπόρους και χρήστες που βρίσκονται προς το άκρο της κυψέλης να εξυπηρετούνται ελάχιστα έως καθόλου. Είναι προφανές ότι η συγκεκριμένη πολιτική είναι η πλέον άδικη. Από την άλλη πλευρά, μία πολιτική που εξασφαλίζει ομοιόμορφα επίπεδα εξυπηρέτησης για όλους τους χρήστες του συστήματος (π.χ. equal throughput) ενδέχεται να έχει σαφώς περιορισμένη συνολική επίδοση, καθώς ουσιαστικά ο λιγότερο ποιοτικός χρήστης καθορίζει τα επίπεδα QoS που θα κινηθεί το σύστημα. Το συγκεκριμένο φαινόμενο απαντάται στη βιβλιογραφία ως “Throughput-Fairness Trade-Off”. Ένα βασικό πρόβλημα λοιπόν είναι η εύρεση μηχανισμών που θα θυσιάζουν όσο το δυνατόν λιγότερο τη συνολική επίδοση του δικτύου προκειμένου να πετυχαίνουν υψηλά επίπεδα ικανοποίησης για κάθε χρήστη ξεχωριστά. Ακολουθώντας, αναφέρουμε τις σημαντικότερες εργασίες για το θέμα αυτό.

Η εργασία [82] στηρίζεται στην πολιτική δικαιοσύνης τύπου max-min, σύμφωνα με την οποία μεγιστοποιείται ο ελάχιστος ρυθμός μετάδοσης ή ισοδύναμα όλοι οι χρήστες μεταδίδουν με το μέγιστο κοινό ρυθμό, για μία μέγιστη διαθέσιμη ισχύ. Η κύρια συμβολή της συγκεκριμένης εργασίας είναι η πρόταση ενός υπολογιστικά απλού ευριστικού αλγορίθμου ανάθεσης υποφερόντων που ικανοποιεί την εν λόγω απαίτηση. Η αντίστοιχη μαθηματική διατύπωση δίνε-

ται στη σχέση (3.15).

$$\max_{\rho_{n,k}, P_{n,k}} \min_k \sum_{n=1}^N \rho_{n,k} \cdot f^{-1}(P_{n,k}, h_{n,k}, \Gamma_k) \text{ s.t. } \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \rho_{n,k} \cdot P_{n,k} \leq P_{\max} \quad (3.15)$$

Η εφαρμογή των τεχνικών γραμμικού προγραμματισμού που προτάθηκαν στην αναφορά [79] (βλ. αναλυτικά στην ενότητα 3.2.2.2) για την επίλυση του προβλήματος ελαχιστοποίησης της ισχύος μπορούν κάλλιστα να εφαρμοστούν και στο max-min πρόβλημα. Μάλιστα οι συγγραφείς αποδεικνύουν ότι το συγκεκριμένο πρόβλημα μπορεί να επιλυθεί μέσω ενός επαναληπτικού τρόπου όπου σε κάθε βήμα θα λύνεται ένα Margin Adaptive πρόβλημα. Σε κάθε κύκλο, επιλέγεται ένας κοινός ρυθμός μετάδοσης, λύνεται το ισοδύναμο MA πρόβλημα και εάν η απαιτούμενη ισχύς που προκύπτει είναι μικρότερη από τη διαθέσιμη, ο κοινός ρυθμός αυξάνεται και το πρόβλημα ξαναλύνεται. Ο αλγόριθμος τερματίζει όταν ξεπεραστεί η διαθέσιμη ισχύς. Οι τεχνικές λοιπόν που περιγράφηκαν για το πρόβλημα της ισχύος (βέλτιστες και υποβέλτιστες) εφαρμόζονται και στην συγκεκριμένη περίπτωση.

Ένα γενικότερο πλαίσιο δικαιοσύνης διατυπώνεται στην εργασία [83], σύμφωνα με το οποίο ορίζονται αναλογικά οι επιθυμητοί ρυθμοί εξυπηρέτησης για όλους τους χρήστες, μέσω σχετικών δεικτών (βλ. σχέση (3.16)).

$$\max_{\rho_{n,k}, P_{n,k}} R_{tot} \text{ s.t. } P_{tot} \leq P_{\max} \text{ and } R_1 \div R_2 \div \dots \div R_k = \gamma_1 \div \gamma_2 \div \dots \div \gamma_k \quad (3.16)$$

Όταν οι δείκτες αυτοί τεθούν ίσοι με τη μονάδα, το πρόβλημα εκφυλίζεται στο προηγούμενο (max-min) καθώς οι επιθυμητοί ρυθμοί μετάδοσης εξισώνονται. Το γενικότερο πρόβλημα είναι μη γραμμικής φύσης και πολυπλοκότητας $O(K^N)$ και έτσι προτείνεται ένας υποβέλτιστος τρόπος απόκτησης της λύσης που μειώνει σημαντικά τον υπολογιστικό φόρτο στο επίπεδο $O(NK)$.

Ολοκληρώνοντας την παρουσίαση των μηχανισμών δυναμικής ανάθεσης ραδιοπόρων, θα αναφερθούμε στις ερευνητικές εργασίες που λαμβάνουν υπόψη τους και την παράμετρο του χρόνου κατά τη λήψη της απόφασης, σε κάθε χρονοθυρίδα ή OFDM σύμβολο. Σκοπός των εργασιών αυτών είναι η επέκταση του αλγορίθμου proportional fair (PF), ο οποίος βρίσκει εφαρμογή στα συστήματα επικοινωνιών 3G μονής φέρουσας, σε συστήματα πολλαπλών φερόντων. Το θεωρητικό υπόβαθρο για τη μετάβαση αυτή περιλαμβάνεται στην αναφορά [84] ενώ πρακτικοί αλγόριθμοι αναπτύσσονται στις εργασίες [85] και [86]. Αν και ο μηχανισμός PF ανήκει ουσιαστικά στις τεχνικές χρονοπρογραμματισμού τηλεπικοινωνιακής καθώς αφορά στο στρώμα MAC, εντούτοις επιλέξαμε να την παρουσιάσουμε στη συγκεκριμένη ενότητα καθώς οι προσεγγίσεις που θα περιγραφούν βασίζονται στην ιδέα της επέκτασης των κλασικών αλγορίθμων ανάθεσης ραδιοπόρων του στρώματος PHY κατά τέτοιο τρόπο ώστε να ικανοποιούν τις απαιτήσεις του MAC. Αναλυτική παρουσίαση της πολιτικής PF καθώς και ο τρόπος που εκείνη υλοποιείται δίνεται σε επόμενη ενότητα (βλ. Ενότητα 3.2.1, Ορισμός 1). Η διατύπωση του προβλήματος όπως τίθεται στην αναφορά [84] είναι η εξής: Μία πολιτική ανάθεσης πόρων P (ή ισοδύναμα χρονοπρογραμματισμού κίνησης) είναι αναλογικά δίκαια σε ένα σύστημα πολ-

λαπλών φερόντων αν μεγιστοποιεί το άθροισμα των λογαριθμικών μέσων ρυθμών μετάδοσης των χρηστών (βλ. σχέση (3.17)).

$$\max_{\rho_{n,k}(t), P_{n,k}(t)} \sum_{k=1}^K \log(\bar{R}_k) \text{ s.t. } P_{tot} \leq P_{max} \quad \forall t \quad (3.17)$$

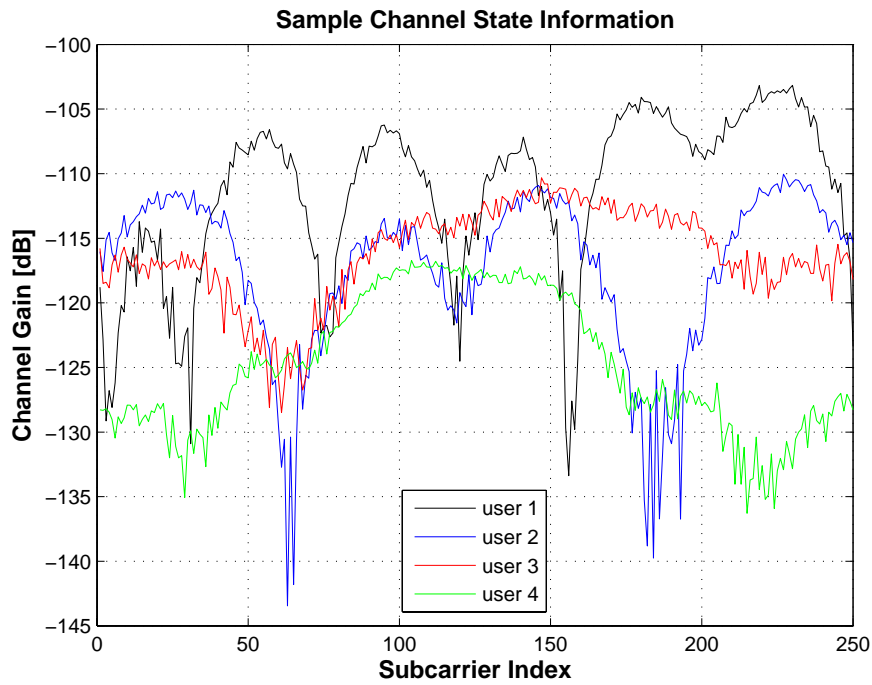
Στην αναφορά [85] παρουσιάζεται ένας υποβέλτιστος αλγόριθμος ανάθεσης υποφερόντων και ισχύος ο οποίος συγκλίνει στη βέλτιστη συμπεριφορά της πολιτικής PF, ενώ στην [86] εκτός από την πρόταση ορισμένων προσεγγιστικών λύσεων, υπολογίζεται και το άνω όριο της επίδοσης του PF, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέτρο σύγκρισης για οποιοδήποτε άλλο σχετικό αλγόριθμο.

Τέλος, στα σχήματα 3.6 και 3.7, αναπαριστούμε γραφικά μία τυχαία περίπτωση δυναμικής ανάθεσης ραδιοπόρων. Συγκεκριμένα, στο σχήμα 3.6 παρουσιάζεται το κέρδος του διαύλου για ένα τυχαίο χρονικό στιγμιότυπο, για ένα σύστημα 4 χρηστών και 250 φερόντων, ενώ στο σχήμα 3.7, η τελική ανάθεση των φερόντων, του σχήματος διαμόρφωσης (σε μονάδες bits/subcarrier) και της ισχύος (σε Watts). Παρατηρούμε ότι ο αλγόριθμος ανάθεσης προμοδοτεί τον 1ο χρήστη, ο οποίος διαθέτει και τον ποιοτικότερο δίαυλο, ωστόσο κατανέμει και τον ελάχιστο αριθμό απαιτούμενων πόρων και στους υπόλοιπους χρήστες προκειμένου να ικανοποιηθούν οι ελάχιστες απαιτήσεις τους ως προς το throughput.

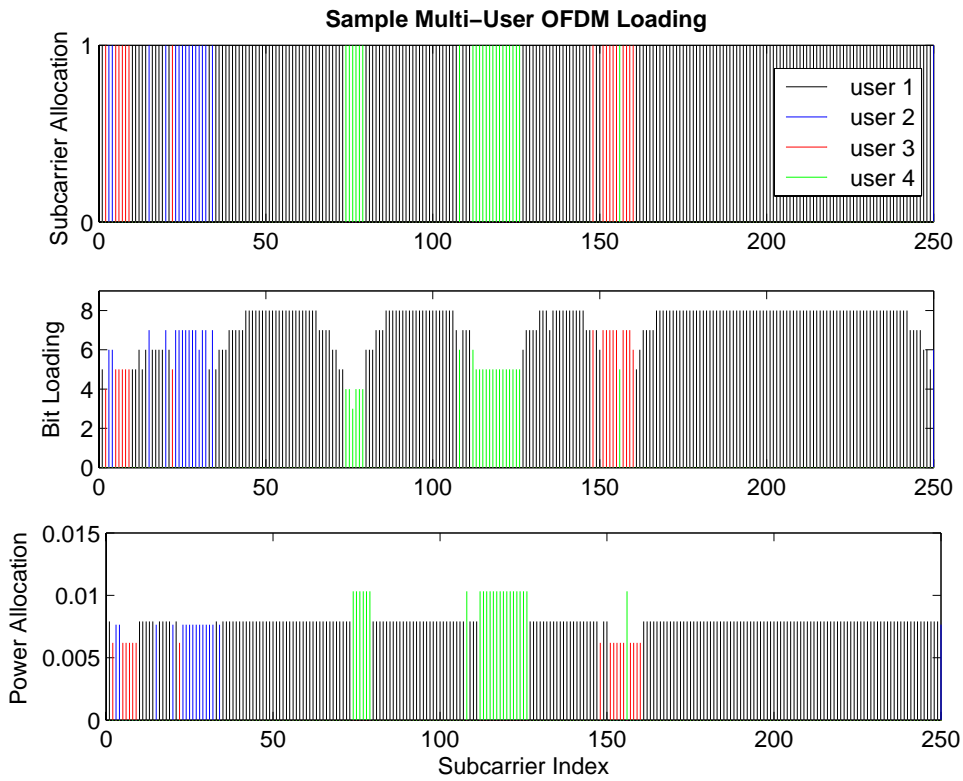
3.2.3 Συνδυαστική Ανάθεση Ραδιοπόρων και Χρονοπρογραμματισμού Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης σε Συστήματα Πολλαπλών Φερόντων OFDMA

Μία πρώτη ιδέα για την αντιμετώπιση του προβλήματος του χρονοπρογραμματισμού σε συστήματα πολλαπλών φερόντων, όπως είναι τα OFDMA, είναι η επέκταση των μηχανισμών που αφορούν στα δίκτυα μονής φέρουσας και πολυπλεξίας TDMA [37]. Ωστόσο η τακτική αυτή δεν είναι η βέλτιστη δυνατή καθώς εξαιτίας της ύπαρξης πλήθους ανεξάρτητων διαύλων, σε κάθε χρονοθυρίδα ευνοείται η μετάδοση πολλών χρηστών. Επίσης εξαιτίας των φαινομένων της συχνοεπιλεκτικότητας του ασύρματου διαύλου και της διαφορικότητας χρηστών, η αποδοτικότητα της πολυπλεξίας εξαρτάται άμεσα από την πολιτική ανάθεσης των υποφερόντων και της ισχύος. Ουσιαστικά πλέον δεν συνιστάται η αφιέρωση όλων των διαθέσιμων ραδιοπόρων σε έναν μόνο χρήστη. Είναι εμφανές ότι στα συστήματα που υποστηρίζουν την τεχνική OFDMA οι μηχανισμοί ανάθεσης των ραδιοπόρων και του χρονοπρογραμματισμού πακέτων πολυπλέκονται και οι βέλτιστες αποφάσεις εντέλει λαμβάνονται μέσω της κοινής θεώρησής τους (joint scheduling and resource allocation optimization). Στην ενότητα αυτή σκοπεύουμε να παρουσιάσουμε τις σημαντικότερες απόπειρες αντιμετώπισης του συγκεκριμένου ιδιαίτερα σύνθετου και υπολογιστικά πολύπλοκου συνδυαστικού προβλήματος, οι οποίες απαντώνται στη βιβλιογραφία. Εξαρχής πρέπει να αναφέρουμε ότι οι ακόλουθες εργασίες παρουσιάζουν ετερογενή χαρακτηριστικά ως προς τον τρόπο αντιμετώπισης και ότι η λίστα φυσικά δεν είναι εξαντλητική.

Μία από τις πρώτες και πληρέστερες προσεγγίσεις της συνδυαστικής ανάθεσης των ρα-



Σχήμα 3.6: Τυχαίο στιγμιότυπο κατάστασης διαύλων σε σύστημα 4 χρηστών



Σχήμα 3.7: Τα αποτελέσματα της αντίστοιχης ανάθεσης ραδιοπόρων

διοπόρων και χρονοπρογραμματισμού της κίνησης για OFDMA δίκτυα προτάθηκε από τον Song στη διδακτορική του διατριβή [37] και στις σχετικές δημοσιεύσεις [87, 88, 89, 90]. Αρχικά, καταστρώνεται ένα γενικό πλαίσιο διαχείρισης των ασύρματων πόρων βασισμένο στην από κοινού θεώρηση των λειτουργιών του φυσικού στρώματος και του στρώματος ελέγχου πρόσβασης στο μέσο (joint PHY-MAC radio resource management framework) και στη συνέχεια προτείνονται αλγόριθμοι απόφασης ανάθεσης των πόρων για διαφορετικές κλάσεις κίνησης (best-effort, time-sensitive, mixed). Τα επίπεδα QoS ελέγχονται μέσω συναρτήσεων ή δεικτών ωφέλειας (Utility Functions) και ανάλογα με το εκάστοτε πρόβλημα, επιλέγονται οι κατάλληλες συναρτήσεις και μεγιστοποιείται η μέση συνάρτηση ωφέλειας του δικτύου σε κάθε χρονοθυρίδα υπό τον περιορισμό της φυσικής χωρητικότητας του διαύλου. Εν γένει το πρόβλημα της ταυτόχρονης εξυπηρέτησης αιτημάτων των χρηστών είναι ένα πολυαντικειμενικό πρόβλημα βελτιστοποίησης καθώς υπάρχει η πιθανότητα σύγκρουσης των αιτημάτων και η ύπαρξη πολλαπλών λύσεων. Μέσω του μαθηματικού εργαλείου των utility functions, το αρχικό πρόβλημα μετασχηματίζεται σε κλασικό πρόβλημα βελτιστοποίησης μίας αντικειμενικής συνάρτησης, το οποίο μπορεί να επιλυθεί και να δώσει μία μοναδική βέλτιστη απάντηση. Προφανώς η επιλογή της συνάρτησης είναι ίσως το κρίσιμότερο σημείο στην όλη πορεία της διαδικασίας. Οι δείκτες ωφέλειας για υπηρεσίες διαδικτύου, ανεκτικές ως προς την καθυστέρηση, έχουν ως βασική παράμετρο το στιγμιαίο ή μέσο ρυθμό διέλευσης δεδομένων ανά χρήστη, επομένως το αρχικό πρόβλημα ουσιαστικά μετασχηματίζεται σε ένα πρόβλημα εύρεσης των βέλτιστων ρυθμών για κάθε χρήστη καθώς και τον τρόπο υλοποίησής τους (μέσω ποιων υποφερόντων και με ποια ισχύ θα εκπέμψει το καθένα). Έτσι, αναπτύσσονται διάφοροι αλγόριθμοι δυναμικής ανάθεσης φάσματος (dynamic spectrum allocation - DSA) και προσαρμοστικής ανάθεσης ισχύος (adaptive power allocation - APA) που καλούνται να οδηγήσουν το δίκτυο προς τη βέλτιστη κατάσταση ως προς το υποστηριζόμενο αθροιστικό throughput εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα μία όσο το δυνατόν δικαιότερη κατανομή των πόρων μεταξύ των χρηστών. Όσον αφορά στις υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, εισάγονται νέοι δείκτες οι οποίοι σχετίζονται άμεσα με το μέσο ρυθμό αναμονής των πακέτων στις ουρές των χρηστών. Σε κάθε χρονοθυρίδα, σκοπός είναι η μεγιστοποίηση της μέσης ωφέλειας του δικτύου ως προς τους εκτιμώμενους μέσους χρόνους αναμονής για την αμέσως επόμενη χρονοθυρίδα. Τα αποτελέσματα ως προς την επίδοση των πολιτικών αυτών σε σχέση με απλές εκδοχές που προέρχονται από τα δίκτυα μονής φέρουσας καταδεικνύουν την υπεροχή της από κοινού βελτιστοποίησης των στρωμάτων PHY και MAC [37]. Ένα ακόμη πλεονέκτημα της παρούσας θεώρησης είναι ότι για την υποστήριξη μιας νέας υπηρεσίας, αρκεί η κατασκευή της κατάλληλης συνάρτησης ωφέλειας, καθώς οι μηχανισμοί ανάθεσης ραδιοπόρων έχουν σχεδιαστεί για τυχαία (arbitrary) συνάρτηση. Ωστόσο, η εφαρμογή των τεχνικών αυτών σε ένα πραγματικό δίκτυο, σε συνθήκες συμφόρησης και δίχως την τέλεια γνώση των συνθηκών του διαύλου χρήζει περαιτέρω μελέτης. Ένα παρόμοιο πλαίσιο εργασίας υιοθετήθηκε και από μία άλλη ομάδα ερευνητών (βλ. [91]), με τη διαφορά ότι οι προτεινόμενοι αλγόριθμοι επίλυσης βασίζονται στο μαθηματικό εργαλείο της βελτιστοποίησης τύπου convex. Τα αντικείμενα προς μελλοντική έρευνα που αναφέρθηκαν στο πλαίσιο του Song ισχύουν και για τη τελευταία προσέγγιση.

Μία σημαντικά διαφορετική προσέγγιση του προβλήματος προτάθηκε στις εργασίες [92]

και [93], η ειδοποιός διαφορά της οποίας ήταν η λογική αποσύμπλεξη των λειτουργικών μηχανισμών χρονοπρογραμματισμού της κίνησης (PS) και της ανάθεσης των ραδιοπόρων του φυσικού στρώματος (RRA). Αν και εκ πρώτης όψεως η συγκεκριμένη λογική είναι υποβέλτιστη ως προς τη συνολική επίδοση του δικτύου, παρουσιάζει πλήθος πλεονεκτημάτων που την καθιστούν υποψήφια για εφαρμογή σε πραγματικά δίκτυα. Καταρχάς, υποστηρίζει μεγάλη ευελιξία επιλογής των μηχανισμών PS και RRA, εφόσον έχουν οριστεί οι κατάλληλες διεπαφές. Η δυνατότητα αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς όπως είδαμε στην ενότητα 3.2.1 ανάλογα με το είδος της υπηρεσίας και τα απαιτούμενα επίπεδα QoS, επιλέγεται και ο κατάλληλος αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού. Παρόμοια, για το φυσικό στρώμα, υποστηρίζονται διάφοροι αντικειμενικοί στόχοι, όπως η ελαχιστοποίηση της συνολικής μεταδιδόμενης ισχύος από το σταθμό βάσης ή η μεγιστοποίηση της φασματικής απόδοσης. Η συγκεκριμένη πρόταση διαθέτει τα χαρακτηριστικά μιας “χαλαρά συνδεδεμένης” προσέγγισης (loose-coupling approach), σε αντίθεση με την πολιτική του Song, η οποία είναι σαφώς μία “ισχυρά ή αυστηρά συνδεδεμένη” διαστρωματική προσέγγιση (tight-coupling approach). Εδώ πρέπει να σημειώσουμε ενδεικτικά διάφορα ζητήματα που ανακύπτουν και δεν αντιμετωπίζονται από τη συγκεκριμένη προσέγγιση: η επιλογή των κατάλληλων αλγορίθμων χρονοπρογραμματισμού και ανάθεσης φυσικών ραδιοπόρων σε κάθε περίπτωση και η αλληλεπίδρασή τους, η μελέτη της διεπαφής των δύο οντοτήτων, και η απώλεια ως προς την επίδοση από την αποσύμπλεξη των στρωμάτων PHY και MAC.

Οι ερευνητές Cai, Shen, και Mark ήταν από τους πρώτους που ασχολήθηκαν με το πρόβλημα της διαχείρισης των ραδιοπόρων για συστήματα μετάδοσης πακέτων πάνω από μία φυσική διεπιφάνεια που βασίζεται στην τεχνολογία OFDM [94]. Προσπάθησαν να προσαρμόσουν έναν μηχανισμό δίκαιου χρονοπρογραμματισμού της κίνησης που είχε αναπτυχθεί για τα ενσύρματα δίκτυα (generalized processor sharing scheduling - GPS), ώστε να υποστηρίξει ετερογενείς υπηρεσίες σε ασύρματα δίκτυα OFDM. Αρχικά, προτείνεται ένα σχήμα βέλτιστης διαχείρισης πόρων που βασίζεται στην τεχνική GPS, το οποίος όμως πρακτικά είναι μη υλοποιήσιμο. Στη συνέχεια, υιοθετείται η παραδοχή του σταθερού ρυθμού μετάδοσης ανά υποφέρον, με αποτέλεσμα ο αριθμός των ανατιθέμενων καναλιών σε κάθε χρήστη να είναι ευθέως ανάλογος με το ρυθμό μετάδοσής του. Προκειμένου να απλοποιηθεί η λύση στο αρχικό πρόβλημα βελτιστοποίησης η διαδικασία ανάθεσης πόρων χωρίζεται σε τρία βήματα: στο πρώτο βήμα, υπολογίζεται ο αριθμός των υποφερόντων που πρέπει να ανατεθεί σε κάθε χρήστη, έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι δείκτες QoS που αφορούν στη δίκαιη κατανομή των πόρων (μία απόφαση του GPS ουσιαστικά), να διατηρείται ο ελάχιστος απαιτούμενος σηματοθορυβικός λόγος και να μην υπερβαίνεται η διαθέσιμη ισχύς μετάδοσης. Σε δεύτερη φάση αποφασίζεται μέσω ενός ευριστικού αλγορίθμου ποια συγκεκριμένα υποφέροντα θα ανατεθούν σε κάθε χρήστη, με το συνολικό αριθμό να καθορίζεται από το προηγούμενο βήμα. Στο τρίτο στάδιο ανατίθεται σε κάθε υποφέρον η κατάλληλη ισχύς ώστε να ικανοποιούνται τα ελάχιστα επίπεδα SNR. Εφόσον, μετά την ανάθεση της ισχύος η συνολική ισχύς ξεπερνάει τη μέγιστη διαθέσιμη, ο αριθμός των διαθέσιμων υποφερόντων μειώνεται κατά ένα και το πρόβλημα λύνεται εξαρχής. Κατά την άποψη μας, αυτό αποτελεί και ένα βασικό μειονέκτημα του προτεινόμενου αλγορίθμου. Τέλος, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της επίδοσης του συγκεκριμένου μηχανισμού

σε σχέση με έναν συμβατικό αλγόριθμο τύπου GPS (τα οποία εξάγονται μέσω στοχαστικών προσομοιώσεων) παρουσιάζεται σημαντικό κέρδος ως προς τη μέση καθυστέρηση μετάδοσης και το συνολικό ρυθμό διέλευσης. Επίσης, εξετάζεται η επίδοση του αλγορίθμου για διάφορες διαθέσιμες ισχύεις ή ισοδύναμα προσφερόμενα φορτία κίνησης και για ροές φωνής και video οι οποίες μοντελοποιούνται αρκετά ρεαλιστικά.

Μία εναλλακτική προσέγγιση τύπου tight-coupling προτάθηκε από τους ερευνητές Zhang και Letaief και δημοσιεύθηκε στις εργασίες [95, 96]. Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη πολιτική, ο χρονοπρογραμματισμός της κίνησης, η κατανομή της ισχύος και η ανάθεση των υποφερόντων σχεδιάζονται υπό ένα ενοποιημένο πλαίσιο, προκειμένου να αξιοποιηθούν οι αλληλεπιδράσεις των στρωμάτων PHY και MAC. Όπως αποδεικνύεται και μέσω των προσομοιώσεων, η θεωρία αυτή υπερτερεί των παραδοσιακών προσεγγίσεων, κατά τις οποίες σχεδιάζονται και αναπτύσσονται ανεξάρτητα στατικοί ή δυναμικοί αλγόριθμοι PHY και MAC. Σκοπός της εργασίας είναι η ανάπτυξη αλγορίθμων που στοχεύουν στη μεγιστοποίηση του λόγου του συνολικού throughput του δικτύου προς τη απαιτούμενη ισχύ μετάδοσης (system power efficiency), εξασφαλίζοντας συγκεκριμένα επίπεδα QoS και δικαιοσύνης για κάθε χρήστη. Ένα μειονέκτημα της εν λόγω εργασίας είναι η υιοθέτηση ενός απλοποιημένου μοντέλου γέννησης της κίνησης (Poisson). Επίσης, δεν εξετάζεται η υποστήριξη υπηρεσιών ευαίσθητων ως προς την καθυστέρηση (real time services) ή υπηρεσιών που απαιτούν ένα απόλυτο ελάχιστο μέσο ρυθμό διέλευσης (guaranteed bit rate). Ένα μειονέκτημα της προσέγγισης αυτής σε σχέση με την tight-coupling προσέγγιση του Song, είναι η έλλειψη ευελιξίας ως προς τους αντικειμενικούς στόχους, καθώς οι αλγόριθμοι αυτοί επιλύουν μόνο το συγκεκριμένο μαθηματικό πρόβλημα.

Η τελευταία εργασία που θα παρουσιάσουμε στην ενότητα αυτή αντιμετωπίζει το πρόβλημα της διαχείρισης των ραδιοπόρων από μία αρκετά διαφορετική σκοπιά [97]. Σε αντίθεση με τις προηγούμενες προσεγγίσεις, δίνεται μεγάλη έμφαση στην ευστάθεια των ουρών αναμονής των χρηστών, επομένως αναζητούνται πολιτικές χρονοπρογραμματισμού που έχουν την ιδιότητα της βελτιστότητας ως προς το throughput. Αρχικά μελετώνται δίκτυα μόνης φέρουσας και οι μηχανισμοί στη συνέχεια επεκτείνονται σε συστήματα πολλαπλών φερόντων. Εν γένει πρέπει να σημειώσουμε ότι το πλαίσιο της συγκεκριμένης εργασίας είναι αρκετά θεωρητικό και δε φαίνεται εκ πρώτης ματιάς να είναι άμεσα εφαρμόσιμο σε ένα πραγματικό σύστημα. Ωστόσο, παρέχει σημαντικές ενδείξεις για τη συμπεριφορά ενός δυναμικά εξελισσόμενου OFDM συστήματος. Αντικείμενο περαιτέρω έρευνας αποτελεί η προσπάθεια ενσωμάτωσης των προτεινόμενων αλγορίθμων σε ένα σύστημα και η μελέτη της επίδοσής τους σε ρεαλιστικές συνθήκες κίνησης.

3.3 Σύνοψη

Σκοπός του παρόντος κεφαλαίου ήταν η εκτενής παρουσίαση του αντικειμένου που πραγματεύεται η εκπονούμενη ερευνητική εργασία. Σε πρώτη φάση παραθέσαμε το γενικό πλαίσιο της εργασίας, δίνοντας έμφαση στη μεθοδολογία που έχουμε υιοθετήσει και στη μοντελοποίηση σε επίπεδο συστήματος, ζεύξης, διαύλου και τηλεπικοινωνιακής κίνησης. Στη συνέχεια

αναφερθήκαμε στις σημαντικότερες εργασίες που απαντώνται στη βιβλιογραφία και σχετίζονται με τα δύο βασικά ερευνητικά αντικείμενα που μας απασχολούν, την δυναμική ανάθεση ραδιοπόρων στο στρώμα PHY και το χρονοπρογραμματισμό της τηλεπικοινωνιακής κίνησης στο στρώμα MAC. Εκτός από τις παραδοσιακές αρχιτεκτονικές σύμφωνα με τις οποίες τα δύο αυτά στρώματα βελτιστοποιούνται ανεξάρτητα το ένα από το άλλο, έγινε ιδιαίτερη αναφορά και σε μία νέα προσέγγιση του συγκεκριμένου ζητήματος, που καλείται διαστρωματική ή από κοινού βελτιστοποίηση (cross-layer/joint PHY-MAC optimization) .

□

Κεφάλαιο 4

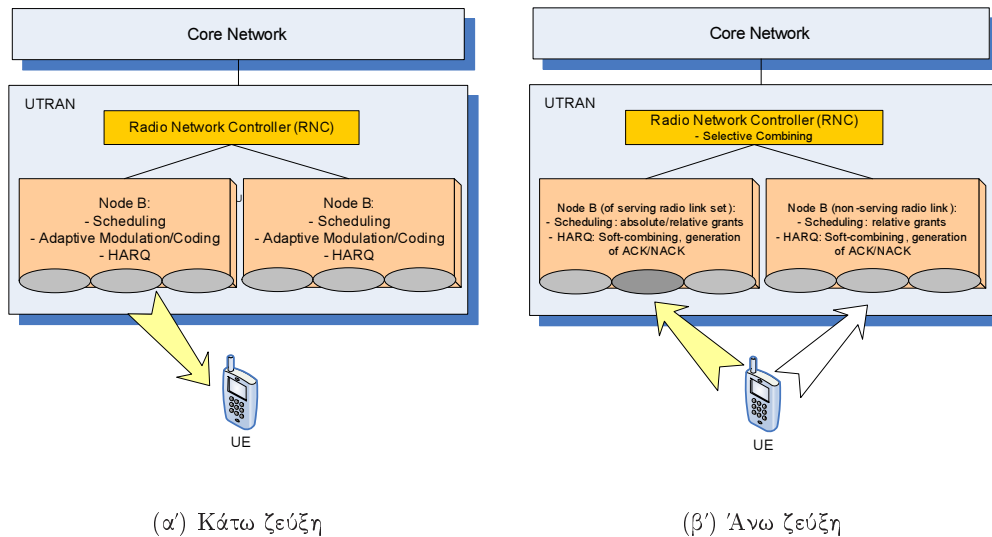
Εκτίμηση Επίδοσης Ασυρμάτων Τηλεπικοινωνιακών Συστημάτων

4.1 Εισαγωγή

Η ορθή εκτίμηση του τρόπου λειτουργίας των δικτύων ασυρμάτων τηλεπικοινωνιών, καθώς και η επίδραση των επί μέρους πρωτοκόλλων που τα απαρτίζουν, είναι απαραίτητη ώστε να είναι δυνατή στα μετέπειτα κεφάλαια της διατριβής η διατύπωση μεθόδων βελτίωσης της χρήσης των διαθέσιμων ραδιοπόρων. Σε αυτό το κεφάλαιο θα εξεταστούν αναλυτικά μέσω εξαντλητικών προσομοιώσεων τέτοια συστήματα. Ενδεικτικά, σκοπός είναι η απόκτηση βαθύτερης και τεκμηριωμένης γνώσης όσον αφορά στις υπηρεσίες που καλείται το δίκτυο να εξυπηρετήσει και στις δομικές μονάδες που ελέγχουν την επίδοσή του. Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί ότι απώτερος στόχος δεν είναι η καταγραφή ειδικών αποτελεσμάτων που έχουν ισχύ μόνο για έναν τύπο δικτύου, αλλά περισσότερο η εξαγωγή κρίσιμων γενικών συμπερασμάτων για τις παραμέτρους που καθορίζουν την εν γένει λειτουργία των συστημάτων ασυρμάτων τηλεπικοινωνιών. Έχοντας αυτά υπόψη, θα μελετηθεί σε αυτό το κεφάλαιο το HSPA, ως αντιπροσωπευτικός εκπρόσωπος της νέας γενιάς δικτύων. Τέλος, για να διατηρηθεί ένα κοινό σημείο αναφοράς ως προς την τηλεπικοινωνιακή κίνηση που καλείται το δίκτυο να διαχειριστεί, επιλέγονται προς εξυπηρέτηση υπηρεσίες υγείας και άμεσης περίθαλψης, οι οποίες (όπως θα αναλυθεί παρακάτω) περιλαμβάνουν τόσο υπηρεσίες πραγματικού, όσο και μη πραγματικού χρόνου.

4.2 Εκτίμηση Επίδοσης Μονοκυψελωτού Δικτύου HSPA με Έμφαση στην Κάτω Ζεύξη

Σε αυτό το τμήμα θα εξεταστεί η επίδοση ενός αυτόνομου δικτύου HSPA, το οποίο καλείται εξυπηρετήσει υπηρεσίες σχετιζόμενες με υγεία και περίθαλψη, ενώ παράλληλα στην κυψέλη συνυπάρχουν και τυπικοί HSPA χρήστες. Η ταυτόχρονη μετάδοση υπηρεσιών φωνής, βίντεο σε πραγματικό χρόνο και ιατρικών δεδομένων (υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου), συνιστά ένα πλήρες σενάριο για τη μελέτη της λειτουργίας του δικτύου. Η επίτευξη της επιθυμη-



Σχήμα 4.1: Αρχιτεκτονική δικτύου HSPA

της ποιότητας υπηρεσίας (QoS) μελετάται μέσα από τη σταδιακή ενσωμάτωση των έμφυτων στοιχείων ελέγχου του δικτύου (έλεγχος αποδοχής κλήσης, συμφόρησης), ενώ οι υπηρεσίες υγείας εξυπηρετούνται εν γένει κατά προτεραιότητα.

4.2.1 Περιγραφή του Προσομοιωτικού Μοντέλου

Για τη μελέτη της επίδοσης του HSPA (σχήμα 4.1), η διεξαγωγή εκτενών προσομοιώσεων κατατάσσεται ανάμεσα στις βέλτιστες μεθόδους. Σε αυτήν την περίπτωση το εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη του προσομοιωτικού μοντέλου, είναι το OPNET [98]. Στον προσομοιωτή υλοποιήθηκαν τόσο η κάτω, όσο και η άνω ζεύξη, έτσι ώστε να προκύψουν αναλυτικά και ακριβή αποτελέσματα. Κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης του μοντέλου ελήφθησαν υπόψη κάποιες αναγκαίες απλοποιήσεις. Πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι αυτές οι απλοποιήσεις οδηγούν σε μία ελάχιστη υπερεκτίμηση της επίδοσης του συστήματος. Όλα τα θεμελιώδη στοιχεία (RNC, Node B, ραδιοδιεπαφή, κινητά τερματικά κ.τ.λ.) ενός πλήρους κυψελωτού δικτύου υλοποιήθηκαν σε τέτοιο βαθμό, ώστε να εξαχθούν αποτελέσματα με επαρκή ακρίβεια. Όπως θα αναλυθεί αργότερα, η προσομοιωτική διάταξη συμπληρώνεται από μία γεννήτρια κίνησης, η οποία δύναται να παράξει αρκετά είδη τηλεπικοινωνιακής κίνησης.

Όλες οι παράμετροι του δικτύου είναι ρυθμιζόμενες, επομένως ήταν εφικτή η μελέτη μίας ποικιλίας σεναρίων. Η δημιουργία των συνόδων ήταν δυναμική, ενώ η εισαγωγή στο δίκτυο επιτεύχθηκε μέσω κατάλληλων κατανομών (exponential, Poisson), ενώ κάθε τερματικό δύναται να έχει μία ή περισσότερες υπηρεσίες. Η διάρκεια των συνόδων ακολουθεί εκθετική κατανομή με μέσο όρο τα 100 s. Τα τερματικά είναι κινητά, ενώ το μοντέλο κίνησης είναι αυτό της πεζής ή/και οχηματικής κίνησης, σύμφωνα με τα αντίστοιχα μοντέλα της ITU. Στο μοντέλο διάδοσης συνυπολογίζονται οι απώλειες διάδοσης (propagation loss), σκίασης (shadowing) και οι ταχείες διαλείψεις (fast fading), προσαρμοσμένες σε αστικό περιβάλλον. Επίσης υλοποιούνται στον RNC ο έλεγχος αποδοχής κλήσης για τη σύναψη των συνόδων

και ο έλεγχος συμφόρησης για την εξισορρόπηση του φορτίου (load balancing). Στον Node B υλοποιήθηκαν αρκετοί αλγόριθμοι δρομολόγησης, με έμφαση στην παρούσα φάση στο δρομολογητή ισόποσου χρόνου διέλευσης (Fair Time) και στο δρομολογητή ισόποσης ρυθμοαπόδοσης (Fair Throughput). Τέλος, κάθε κινητό τερματικό αναφέρει στον Node B το Δείκτη Ποιότητας Διάυλου (Channel Quality Indicator – CQI), μέσω του οποίου λαμβάνεται η απόφαση για το εκάστοτε σχήμα μετάδοσης (διαμόρφωση και κωδικοποίηση).

Η γεννήτρια κίνησης είναι ικανή να παράγει όλες τις απαραίτητες τυπικές υπηρεσίες στα πλαίσια ενός κυψελωτού δικτύου. Το VoIP, η περιήγηση στο διαδίκτυο, οι εφαρμογές βίντεο και η προς τα κάτω μεταφορά δεδομένων είναι τυπικές περιπτώσεις τέτοιων υπηρεσιών. Ορισμένες από αυτές υλοποιήθηκαν βάσει των προτύπων τους (π.χ. VoIP), ενώ για κάποιες άλλες χρησιμοποιήθηκαν trace αρχεία από πραγματικά δίκτυα (π.χ. βίντεο). Το συνολικό προσφερόμενο φορτίο στο δίκτυο, καθώς και η αναλογία κάθε υπηρεσίας στο συνολικό φορτίο, κανονίστηκαν ανά γύρο προσομοίωσης. Κατ' αυτόν τον τρόπο εξερευνήθηκαν διαφορετικές αναλογίες φορτίων. Στο VoIP ενσωματώθηκαν όλες οι διαθέσιμες βελτιώσεις που απαντώνται στη βιβλιογραφία, με αποτέλεσμα ο απαιτούμενος ρυθμός μετάδοσης να είναι 12.2 kbps για AMR (Adaptive Multi-Rate) κωδικοαποκωδικοποιητή (codec). Ο κωδικοαποκωδικοποιητής του βίντεο είναι είτε H.263, είτε H.264/AVC. Για την περιήγηση στο διαδίκτυο υλοποιήθηκε μία απλή ριπιαία (bursty) πηγή, ενώ για την προς τα κάτω μεταφορά δεδομένων χρησιμοποιήθηκε μία απλή πηγή συνεχούς ή μεταβλητού ρυθμού μετάδοσης, ανάλογα με την αρχική επιλογή στις παραμέτρους του προσομοιωτή.

Όπως προαναφέρθηκε, κάποιες απλοποιήσεις ήταν απαραίτητες κατά την ανάπτυξη του προσομοιωτή. Καταρχάς, μετά τη σύναψη μίας συνόδου, το μόνο μέρος που έχει τη δυνατότητα να διακόψει τη σύνδεση είναι το κινητό τερματικό. Αυτό πρακτικά μεταφράζεται στο ότι γενικά ο έλεγχος συμφόρησης δεν έχει δικαίωμα να διακόψει κάποια σύνοδο. Ακόμα, το υπό εξέταση δίκτυο είναι μονοκύψελο και τα κινητά τερματικά δεσμεύονται ως προς την κίνησή τους εντός της περιοχής κάλυψης της κυψέλης αυτής. Παρόλα αυτά, οι 6 γειτονικές κυψέλες έχουν επίσης προσομοιωθεί εικονικά, έτσι ώστε να λαμβάνονται υπόψη τα φαινόμενα διακυβελικών παρεμβολών. Ο όρος “εικονικά” αναφέρεται στο ότι δεν είναι δυνατόν να εκτελεστεί διαπομπή μεταξύ της κεντρικής κυψέλης και οιασδήποτε εκ των έξι γειτονικών της, ωστόσο οι κυψέλες αυτές εξυπηρετούν κανονικά το φορτίο τους και δημιουργούν τις αντίστοιχες παρεμβολές. Επίσης, θεωρείται ότι όλα τα πακέτα που εκπέμπονται αποκωδικοποιούνται σωστά στο δέκτη και τέλος ότι ο αλγόριθμος δρομολόγησης λαμβάνει άμεσα γνώση των υφιστάμενων CQI.

Σε σχέση με την κάτω ζεύξη, η διερεύνηση εκκινεί από ένα μη συμφορημένο δίκτυο. Κατόπιν, προστίθενται διαδοχικά σε κάθε γύρο προσομοίωσης ο έλεγχος αποδοχής κλήσης, ο έλεγχος συμφόρησης και δίνεται προτεραιότητα στις υπηρεσίες υγείας. Σχετικά με την άνω ζεύξη, μετά από το πρώτο στάδιο, ερευνάται ένα δίκτυο σε κατάσταση συμφόρησης και προτείνονται βασικές λύσεις για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του. Οι εφαρμογές που συμπεριελήφθησαν στην προσομοίωση συνοψίζονται στον πίνακα 4.1 και εξηγούνται αναλυτικά παρακάτω:

1. VoIP με καθαρό ρυθμό μετάδοσης 12.2 kbps για AMR κωδικοαποκωδικοποιητή, τόσο για

Πίνακας 4.1: Ρυθμός μετάδοσης ανά υπηρεσία στην προσομοίωση

Τύπος χρήστη	Τύπος υπηρεσίας	Ρυθμός μετάδοσης
Χρήστες υπηρεσιών υγείας	VoIP Βίντεο Υπηρεσίες υγείας	16 kbps 256 kbps 512 kbps
Υπόλοιποι χρήστες	VoIP Περιήγηση στο διαδίκτυο Βίντεο	16 kbps 512 kbps 100 kbps

τους χρήστες υπηρεσιών υγείας, όσο και για τους υπόλοιπους χρήστες της κυψέλης. Τελικά, μαζί με τις κεφαλίδες, ο ρυθμός μετάδοσης ανέρχεται περίπου στα 16 kbps.

2. Περιήγηση στο διαδίκτυο για τους χρήστες της κυψέλης με διαθέσιμο ρυθμό μετάδοσης 256 kbps.
3. Μία εφαρμογή βίντεο με κωδικοαποκωδικοευτή H.263, που είναι και η πιο απαιτητική υπηρεσία στο δίκτυο.
4. Ροή δεδομένων για τους χρήστες υπηρεσιών υγείας, η οποία συμπεριλαμβάνει όλα τα κρίσιμα ιατρικά βιοσήματα, με ρυθμό μετάδοσης 100 kbps.

4.2.2 Περιγραφή Υπηρεσιών Υγείας

4.2.2.1 Απαιτήσεις Ηλεκτρονικών Υπηρεσιών Υγείας

Οι ηλεκτρονικές υπηρεσίες υγείας και περίθαλψης, συμπεριλαμβανομένων αυτών που βασίζονται σε ασύρματες τεχνολογίες, απλώνονται στις περιοχές της επείγουσας περίθαλψης, της τηλεϊατρικής διαφόρων μορφών (τηλεκαρδιολογία, τηλεακτινολογία, τηλεπαθολογία κ.τ.λ.) και της ηλεκτρονικής πρόσβασης στα ιατρικά αρχεία των ασθενών (Electronic access to Health Records - EHR). Επιπροσθέτως, οι υπηρεσίες υγείας τηλεματικής επιτρέπουν την άμεση και έγκυρη ιατρική περίθαλψη και έχουν άμεση εφαρμογή σε περιοχές με μειωμένο ιατρικό προσωπικό, δυσπρόσιτες περιοχές, σε ασθενοφόρα, πλοία κ.τ.λ. [99, 100]. Η απαιτούμενη επίδοση της τηλεπικοινωνιακής τεχνολογίας διαφέρει ανάλογα με το είδος της ιατρικής υπηρεσίας, αν και συνήθως τα όρια τίθενται από τις αντίστοιχες ψηφιακές συσκευές που χρησιμοποιούνται. Ο πίνακας 4.2 καταδεικνύει ένα πλήθος ψηφιακών συσκευών για τη μέτρηση σημάτων στην ιατρική. Με εξαίρεση τις τελευταίες σειρές του πίνακα (από τους υπερήχους και έπειτα), η πλειοψηφία των μετρούμενων σημάτων απαιτεί σχετικά χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης [101].

Όσον αφορά στη μετάδοση ιατρικών εικόνων, δεν υπάρχουν ελάχιστες θεωρητικές απαιτήσεις στο ρυθμό μετάδοσης, ωστόσο μία υποβαθμισμένη ποιοτικά υπηρεσία μεταφράζεται σε μεγαλύτερους χρόνους αναμονής. Παρόλα αυτά, οι ιατρικές εικόνες υψηλής ποιότητας (όπως π.χ. μία ακτινογραφία θώρακα) ενδέχεται να απαιτούν 40 - 50 Mbytes πληροφορίας. Πρακτικά είναι επιθυμητό να μεταδίδονται οι εικόνες κατά τη διάρκεια μίας επίσκεψης στον ασθενή,

Πίνακας 4.2: Ρυθμοί μετάδοσης τυπικών συσκευών στην τηλεϊατρική

Ψηφιακή συσκευή	Ανάλυση σήματος ή εικόνας		Ρυθμός μετάδοσης
	Χρονική (δείγματα ανά s)	bits / δείγμα	
Ελεγκτής πίεσης - σφυγμομανόμετρο	1	16	< 10 kbps
Θερμόμετρο	5	16	< 10 kbps
Καταγραφέας αναπνοής	50	6	< 10 kbps
Στηθοσκόπιο (ήχος καρδιάς)	10000	12	~ 120 kbps
Ηλεκτροκαρδιογράφημα ECG	1250	12	~ 15 kbps
Ηλεκτροεγκεφαλογράφημα EEG	350	12	~ 10 kbps
Ηλεκτρομυογράφημα EMG	50000	12	~ 600 kbps
Υπέρηχος, καρδιολογία, ακτινολογία	512 × 512	8	256 kbytes (image size)
Μαγνητική απεικόνιση	512 × 512	8	384 kbytes (image size)
Τομογράφος	1024 × 1250	12	1.8 Mbytes (image size)
Ακτινογραφία	2048 × 2048	12	6 Mbytes (image size)
Μαστογραφία	4096 × 4096	12	24 Mbytes (image size)
Συμπίεσμένο βίντεο με κίνηση (τηλεϊατρική)	–	–	384 kbps – 1.544 Mbps

ώστε να αποφεύγονται οι αναίτιες πολλαπλές επισκέψεις. Εξάλλου οι τεχνικές συμπίεσης ιατρικών εικόνων εστιάζουν στη συμπίεση χωρίς απώλειες, ώστε να είναι δυνατή η ακριβής ανακατασκευή του αρχικού δείγματος.

Όσον αφορά στο ψηφιακό βίντεο, η επιτροπή Ψηφιακών Εικόνων και Επικοινωνιών στην Ιατρική (Digital Imaging and Communications in Medicine – DICOM committee) δεν έχει καταλήξει στην υιοθέτηση κάποιου προτύπου συμπίεσης. Η υιοθέτηση του προτύπου MPEG-2 είναι δυνατή, αλλά η μέθοδος αυτή έχει τον περιορισμό της απαίτησης για σταθερή καθυστέρηση για το συγχρονισμό των πλαισίων. Από την άλλη, δυνατή είναι επίσης η μετάδοση offline βίντεο. Απαραίτητο κρίνεται σε αυτό το σημείο να γίνει ένας διαχωρισμός ανάμεσα στις απαιτήσεις για μετάδοση βίντεο πραγματικού χρόνου, offline βίντεο, μετάδοση βίντεο και ήχου για διαγνωστικούς λόγους, και βίντεο και ήχου για μη διαγνωστικούς λόγους. Η πρώτη περίπτωση είναι ξεκάθαρα η πιο απαιτητική, ενώ η δεύτερη περιορίζει την άμεση επαφή ιατρού - ασθενούς. Ο ήχος πραγματικού χρόνου για διαγνωστικούς σκοπούς περιλαμβάνει τη μετάδοση ήχου στηθοσκοπίου, ή τη μετάδοση ήχου συνοδευτικού ως προς το αντίστοιχο βίντεο. Μία τυπική εφαρμογή απαιτεί μετάδοση διαγνωστικού ήχου και βίντεο, επιπροσθέτως της σταθερής ροής τηλεδιάσκεψης [102].

Γενικά οι εφαρμογές υγείας διαχωρίζονται σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με την απαιτούμενη μέθοδο μετάδοσης:

- Εφαρμογές πραγματικού χρόνου: περιλαμβάνουν τις συνδέσεις μεταξύ των νοσηλευτικών κέντρων (π.χ. νοσοκομείων) και κινητών μονάδων (π.χ. ασθενοφόρα) και αποτελούνται από υπηρεσίες ανταλλαγής ήχου και εικόνας, βιοϊατρικών σημάτων και ζωτικών παραμέτρων (όπως ηλεκτροκαρδιογράφημα, πίεση, κορεσμός οξυγόνου κ.τ.λ.).
- Εφαρμογές σχεδόν πραγματικού χρόνου: αντιστοιχούν σε υπηρεσίες πρόσβασης σε διαχειριστικά αρχεία και ανταλλαγές αρχείων ασθενών (μεταξύ κέντρων και μεταξύ κέντρων και οχημάτων), ερωτήματα προς τη φαρμακαποθήκη κ.τ.λ.

Σε αυτήν τη μελέτη θα δοθεί έμφαση σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου, οι οποίες χρησιμοποιούνται σε επείγουσες καταστάσεις. Οι απαιτήσεις QoS για τις προαναφερθείσες υπηρεσίες καταγράφονται στον πίνακα 4.3.

Πίνακας 4.3: Κατηγοριοποίηση των QoS απαιτήσεων των υπηρεσιών υγείας

Τύπος υπηρεσίας	Ρυθμός μετάδοσης	Απαίτηση για μικρό delay	Απαίτηση για μικρό jitter
Τηλεσύσκεψη	Υψηλός	Ναι	Ναι
Τηλεδιάγνωση	Υψηλός	Ναι	Όχι
Τηλεέλεγχος	Χαμηλός	Όχι	Όχι
Τηλεεκπαίδευση VoD	Υψηλός	Όχι	Όχι
Πρόσβαση σε EHR	Χαμηλός	Όχι	Όχι

4.2.2.2 Σενάρια Ηλεκτρονικών Υπηρεσιών Υγείας

Τα επικρατέστερα σενάρια χρησιμοποίησης ηλεκτρονικών υπηρεσιών υγείας είναι τα παρακάτω:

- Επείγουσες υπηρεσίες σε περίπτωση ατυχημάτων
- Υπηρεσίες αποθεραπείας - τηλεέλεγχος ασθενούς
- Κατ' οίκον νοσηλεία
- Ενδονοσοκομειακές υπηρεσίες υγείας
- Υπηρεσίες διαχείρισης ιστορικού και πληροφοριών ασθενών

Η προσομοίωση εστιάζει στην πρώτη περίπτωση (η οποία είναι και η πιο απαιτητική σε επίπεδο πόρων συστήματος), η οποία και αναλύεται σε αυτήν την υποενότητα. Το σενάριο των επείγουσών υπηρεσιών αναφέρεται συνήθως στην ανάγκη υποστήριξης κινητών μονάδων (π.χ. ασθενοφόρων) ή περιφερειακών εγκαταστάσεων (π.χ. αγροτικά ιατρεία) στην περίπτωση ατυχημάτων. Τελευταίες μελέτες υποδεικνύουν ότι η έγκαιρη και εξειδικευμένη προ-νοσοκομειακή φροντίδα του τραυματία συμβάλλει τα μέγιστα στην επιβίωσή του. Ειδικά στην περίπτωση κρανιακών κακώσεων, χτυπημάτων στη σπονδυλική στήλη και στα εσωτερικά όργανα, η μέθοδος

μεταφοράς και παροχής φροντίδας είναι ζωτικής σημασίας για την εξέλιξη του ασθενούς. Δυστυχώς, οι γενικοί ιατροί σε απομακρυσμένα ιατρεία ή το προσωπικό των ασθενοφόρων που είναι οι πρώτοι που έρχονται σε επαφή με το θύμα, πολλές φορές δεν έχουν την κατάλληλη θεωρητική κατάρτιση και εμπειρία για τη βέλτιστη αντιμετώπιση των περιστατικών. Εφόσον για οικονομικούς και όχι μόνο λόγους δεν είναι δυνατόν όλα τα τμήματα να επανδρώνονται από εξειδικευμένους ιατρούς, το προσωπικό που καταφτάνει πρώτο στο σημείο του συμβάντος οφείλει να βασιστεί στις οδηγίες των ειδικών. Οι υπηρεσίες υγείας σε αυτές τις περιπτώσεις επιτρέπουν στους εξειδικευμένους ιατρούς να συντονίζουν απομακρυσμένα τις προσπάθειες των τραυματιοφορέων ή του λιγότερο έμπειρου προσωπικού, μέσω τηλεδιάγνωσης και διαδραστικών μεθόδων τηλεδιάσχεψης.

4.2.3 Αποτελέσματα Προσομοίωσης

Όπως προαναφέρθηκε στο μοντέλο του προσομοιωτή, το δίκτυο μελετήθηκε σε διακριτές φάσεις και εκτελέστηκε μία βαθμιαία μελέτη της επίδοσής του. Μετά την εξέταση ενός μη συμφορημένου δικτύου HSPA, στην προσομοίωση θα συμπεριληφθεί ο έλεγχος αποδοχής κλήσης και ο έλεγχος συμφόρησης. Τέλος, υλοποιείται ένας απλός αλγόριθμος δρομολόγησης που αποδίδει προτεραιότητα στις συνόδους υπηρεσιών υγείας. Στα επόμενα τμήματα περιγράφονται αναλυτικά τα αποτελέσματα τόσο για την κάτω, όσο και για την άνω ζεύξη.

4.2.3.1 Μη Συμφορημένο Δίκτυο HSPA

Αρχικά πραγματοποιήθηκε μία προσομοίωση για μη συμφορημένο δίκτυο. Ένα μετρίως φορτωμένο HSPA θα πρέπει άνετα να μπορεί να αντιμετωπίσει τις απαιτήσεις των υπηρεσιών υγείας, τόσο στην κάτω, όσο και στην άνω ζεύξη ταυτόχρονα. Σύμφωνα με την καθορισμένη παραμετροποίηση, η υπό εξέταση εφαρμογή υγείας μπορεί να αποτελείται από δύο υπηρεσίες (VoIP και βίντεο), με συνολικό προσφερόμενο φορτίο 528 kbps για την κάτω ζεύξη. Στην άνω ζεύξη προστίθεται και μία ροή βιοσημάτων, οπότε το αντίστοιχο φορτίο είναι 628 kbps. Στην κάτω ζεύξη το HSPA είναι δυνατόν να διαχειριστεί θεωρητικά έως 10.7 Mbps με διαμόρφωση 16-QAM και 15 κώδικες, ενώ στην άνω ζεύξη έως 5.7 Mbps. Αν και στην πραγματικότητα η υποστηριζόμενη ρυθμοαπόδοση είναι αρκετά χαμηλότερη, εν τούτοις δεν υπάρχει αμφιβολία ότι το HSPA είναι σε θέση να διαχειριστεί το προαναφερθέν φορτίο, διατηρώντας την καθυστέρηση στο ελάχιστο.

Το μέσο συνολικό φορτίο του δικτύου σε αυτόν τον προσομοιωτικό γύρο ήταν 4 Mbps για την κάτω και 1.5 Mbps για την άνω ζεύξη. Η αναλογία υπηρεσιών ήταν περίπου 10% VoIP, 50% περιήγηση στο διαδίκτυο και 30% βίντεο, ενώ το υπλοιπόμενο ποσοστό καταλαμβάνεται από μία σύνοδο υπηρεσιών υγείας. Η μέση διάρκεια των συνόδων τέθηκε να ακολουθεί εκθετική κατανομή, με μέσο όρο 100 s. Η χωρητικότητα του HSPA δεν περιορίστηκε με κανέναν τρόπο, οπότε οι μέγιστες δυνατές τιμές συμπίπτουν με τις θεωρητικές. Οι κύριες παράμετροι της προσομοίωσης συνοψίζονται στον πίνακα 4.4 και τα αποτελέσματα απεικονίζονται στα σχήματα 4.2 και 4.3.

Σύμφωνα με τα σχήματα, ένα μη συμφορημένο HSPA είναι σε θέση να διαχειριστεί άνετα

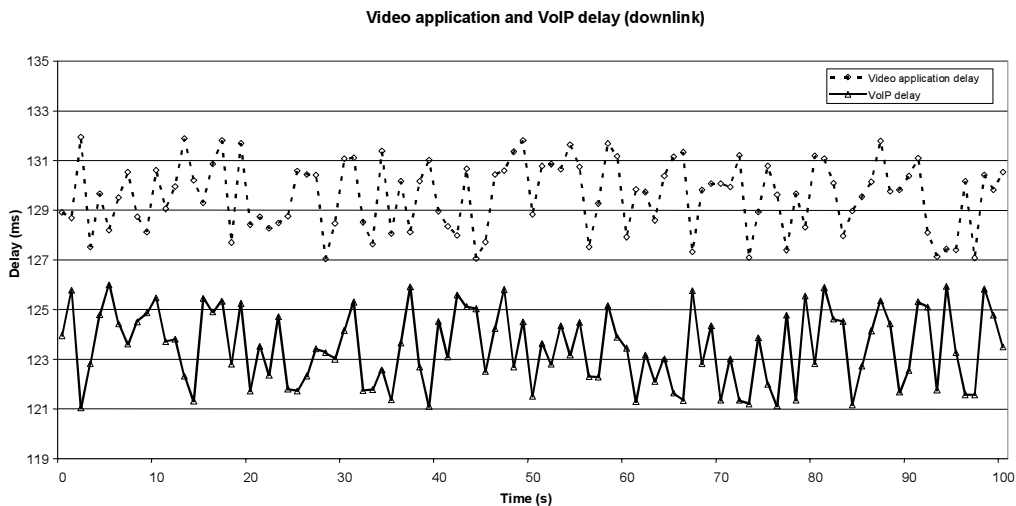
Πίνακας 4.4: Παράμετροι προσομοίωσης

Παράμετρος	Τιμή
Διαθέσιμες διαμορφώσεις HSDPA	QPSK, 16QAM
Διαθέσιμοι κώδικες HSDPA	15
Δρομολογητής HSDPA	Ισόποσου χρόνου διέλευσης (Fair Time)
Μέγιστη χωρητικότητα διαύλου HSPA (DL / UL)	10.7 / 5.6 Mbps
Συνολικός μέσος ρυθμός μετάδοσης (DL / UL)	4 / 1.5 Mbps
Ποσόστωση υπηρεσιών (VoIP / περιήγηση στο διαδίκτυο / βίντεο)	10% / 50% / 30%
Ονομαστικός ρυθμός μετάδοσης ανά υπηρεσία για τους χρήστες υπηρεσιών υγείας (VoIP / περιήγηση στο διαδίκτυο / βίντεο)	16 / 512 / 100 kbps
Ονομαστικός ρυθμός μετάδοσης ανά υπηρεσία για τους λοιπούς χρήστες (VoIP / περιήγηση στο διαδίκτυο / βίντεο)	16 / 256 / 256 kbps
Αριθμός συνόδων για υπηρεσίες υγείας	1
Διάρκεια συνόδου	εκθετική κατανομή (100 s)

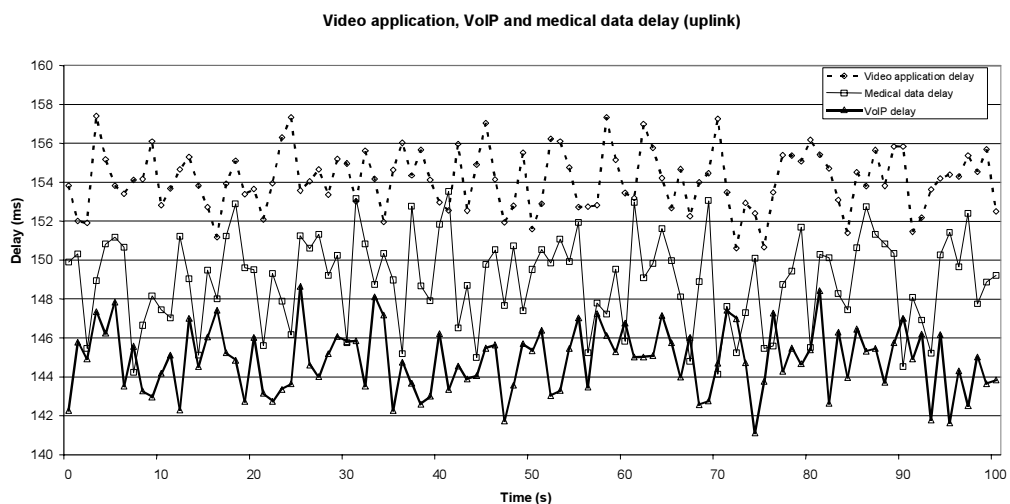
το φορτίο που χρειάζεται για την επαρκή εξυπηρέτηση των υπηρεσιών υγείας. Η καθυστέρηση για κάθε υπηρεσία που ενσωματώνεται στη σύνοδο υγείας είναι σχετικά χαμηλή και για τις δύο ζεύξεις και κυμαίνεται από 120 έως 160 ms, ενώ η διακύμανσή της είναι πρακτικά αμελητέα. Ακόμα, ο ρυθμός μετάδοσης για κάθε υπηρεσία είναι ίσος με τον αντίστοιχο ονομαστικό. Συνοπτικά, το HSPA απέδειξε ότι είναι σε θέση σε αυτήν την περίπτωση να παράσχει το επιθυμητό επίπεδο QoS για τη σύνοδο υγείας, κάτω από την προϋπόθεση του μερικώς φορτωμένου δικτύου.

4.2.3.2 Συμφορημένο Δίκτυο HSDPA

Μετά τον αρχικό έλεγχο, θα μελετηθούν σενάρια λιγότερο ευνοϊκά για το HSPA, ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα για τη συνολική λειτουργία του. Εξετάζεται λοιπόν ένα δίκτυο HSDPA που διαθέτει έλεγχο αποδοχής κλήσης, αλλά όχι έλεγχο συμφόρησης. Ο έλεγχος αποδοχής κλήσης είναι η διαδικασία που είναι υπεύθυνη να αρνηθεί τη σύναψη μίας συνόδου, στην περίπτωση που ανιχνευθεί υπερφόρτωση στο δίκτυο. Ο έλεγχος συμφόρησης είναι η διαδικασία που είναι υπεύθυνη να επαναφέρει το δίκτυο σε μία σταθερή κατάσταση, είτε διακόπτοντας κάποιες συνδέσεις, είτε μειώνοντας το συνολικό φορτίο. Αν και πρακτικά οι δύο αυτοί μηχανισμοί ελέγχου δεν υφίστανται αυτόνομα, παρά μόνο αλληλοσυμπληρούμενα, θα εξεταστεί αυτό το δίκτυο ώστε αποτυπωθεί η επίδραση της παράκαμψης του ελέγχου αποδοχής κλήσης για μία επείγουσα σύνοδο υγείας. Η σύνοδος υγείας αποτελείται από μία εφαρμογή VoIP και μία βίντεο, με αθροιστικό ρυθμό μετάδοσης 528 kbps. Ένας σημαντικός παράγοντας σε αυτό το σενάριο είναι ότι δεν επιτρέπεται καμία απόρριψη πακέτου, ανεξαρτήτως υφιστάμενης καθυστέρησης. Το μέσο συνολικό φορτίο στο δίκτυο είναι 4.5 Mbps και οι διαθέσιμοι HSDPA κώδικες έχουν περιοριστεί στους 10. Όλες οι άλλες παράμετροι παραμένουν όπως περιγράφηκαν στον πίνακα 4.4. Τα σχήματα 4.4, 4.5 και 4.6 δείχνουν τα αποτελέσματα του σεναρίου



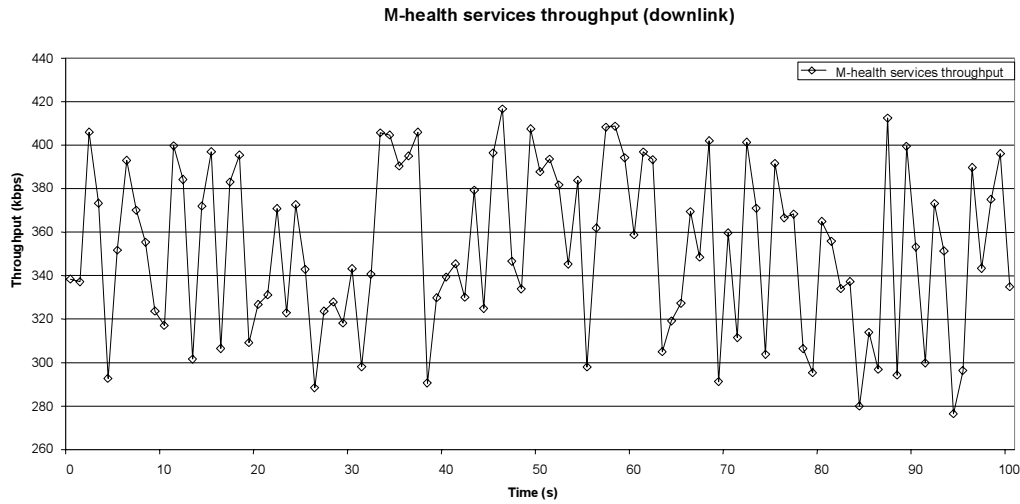
Σχήμα 4.2: Καθυστέρηση ανά εφαρμογή για τις υπηρεσίες υγείας στην κάτω ζεύξη



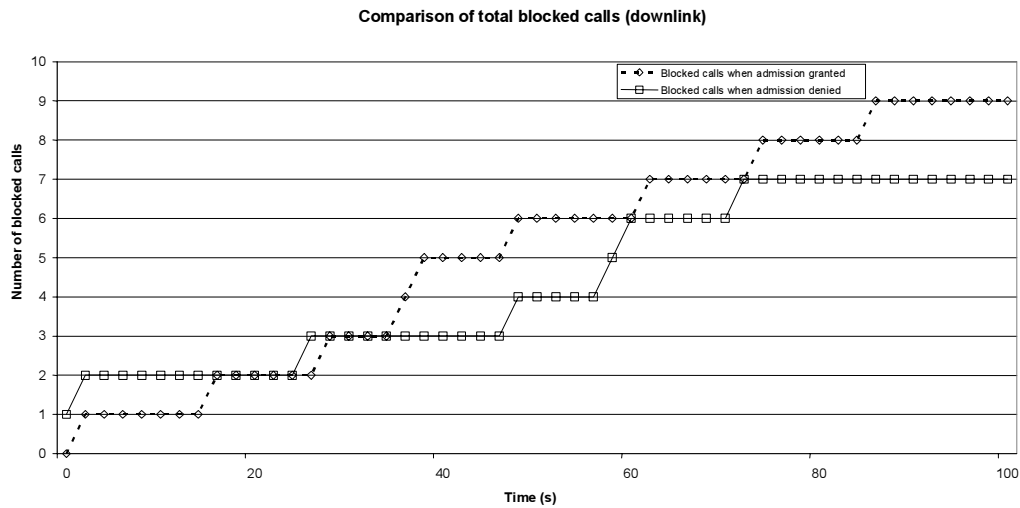
Σχήμα 4.3: Καθυστέρηση ανά εφαρμογή για τις υπηρεσίες υγείας στην άνω ζεύξη

αυτού.

Συγκρίνοντας τον αριθμό των φραγμένων κλήσεων και την καθυστέρηση στις περιπτώσεις που η σύνοδος υγείας έγινε / δεν έγινε αποδεκτή, είναι φανερό ότι η αποδοχή της συνόδου υγείας υποβάθμισε την επίδοση του δικτύου, καθώς το φορτίο που εξυπηρετείται από τον Node B έγινε ιδιαίτερα ασταθές. Αυτό ήταν αναμενόμενο, αφού το δίκτυο ήταν ήδη συμφορημένο και δεν ήταν σε θέση να εξυπηρετήσει πλεονάζουσα κίνηση. Επιβάλλοντας την αποδοχή μίας ακόμα συνόδου, η ενδεδειγμένη λειτουργία του ελέγχου αποδοχής κλήσης καταλύεται και αυτό το γεγονός επηρεάζει όλα τα στοιχεία του δικτύου. Τα αποτελέσματα της αλυσιδωτής αντίδρασης που επακολουθεί φαίνονται καθαρά στα σχήματα. Στο σχήμα 4.5 ο αριθμός των φραγμένων κλήσεων αυξάνεται ταχύτερα στην περίπτωση αποδοχής της συνόδου υγείας. Στο σχήμα 4.6 η καθυστέρηση είναι σημαντικά μεγαλύτερη στην περίπτωση αποδοχής. Ακόμα, αν και ο ονομαστικός ρυθμός μετάδοσης για τη σύνοδο υγείας είναι 528 kbps, μόνο ένα μέρος αυτών εξυπηρετείται πραγματικά, όπως δείχνει το σχήμα 4.4. Τονίζουμε ότι για το σκοπό του



Σχήμα 4.4: Ρυθμός διέλευσης δεδομένων για τις υπηρεσίες υγείας (στην περίπτωση που η σύνοδος συνήφθη)



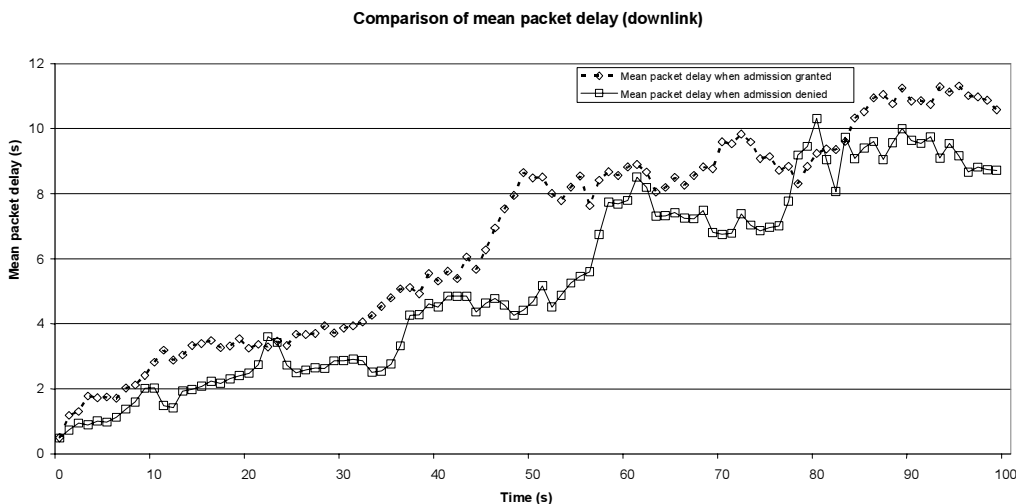
Σχήμα 4.5: Σύγκριση φραγμένων κλήσεων στις περιπτώσεις που η σύνοδος υπηρεσιών υγείας έγινε / δεν έγινε αποδεκτή

σεναρίου, μόνο η σύνοδος υγείας επιτρέπεται να παρακάμψει τον έλεγχο αποδοχής κλήσης. Τελικά, όταν ο έλεγχος παρακάμφθηκε, η επίδοση του δικτύου υποβαθμίστηκε εξαιρετικά.

Σχόλιο: σημειώνεται ότι η δεικνυόμενη καθυστέρηση δε θα παρουσιαζόταν ποτέ σε ένα πραγματικό δίκτυο, καθώς ακόμα και μετά τον έλεγχο αποδοχής κλήσης, ο έλεγχος συμφόρησης θα φρόντιζε για τη σταθεροποίηση του δικτύου.

4.2.3.3 Ο Έλεγχος Συμφόρησης στο HSDPA

Ο έλεγχος συμφόρησης είναι η διεργασία του δικτύου που είναι υπεύθυνη για τη διατήρηση της ευστάθειας του συστήματος σε καταστάσεις κατά τις οποίες το προσφερόμενο φορτίο είναι ιδιαίτερα υψηλό ώστε να αντιμετωπιστεί επαρκώς. Για παράδειγμα, κατά τη διάρκεια του προηγούμενου γύρου προσομοιώσεων, ο έλεγχος αποδοχής κλήσεων εξαναγκάστηκε να

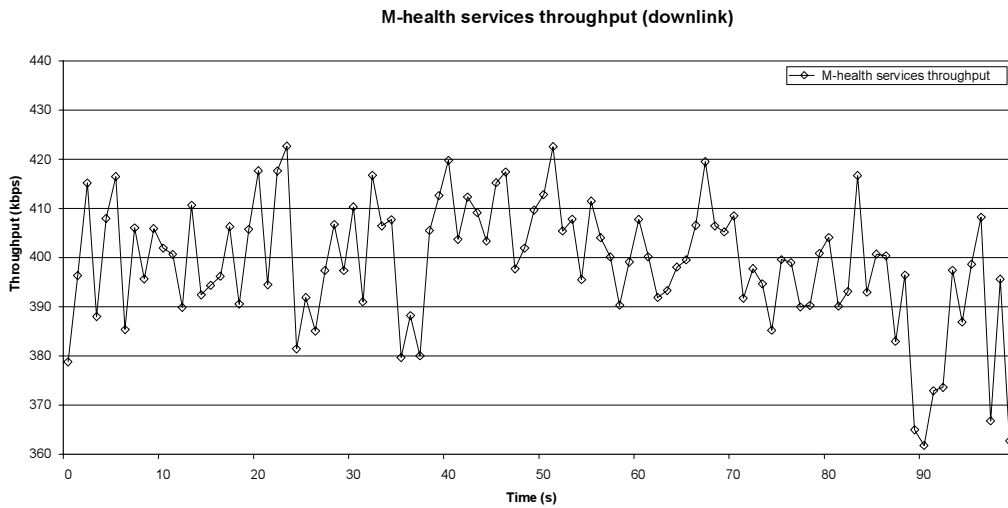


Σχήμα 4.6: Σύγκριση μέσης καθυστέρησης στις περιπτώσεις που η σύνοδος υπηρεσιών υγείας έγινε / δεν έγινε αποδεκτή

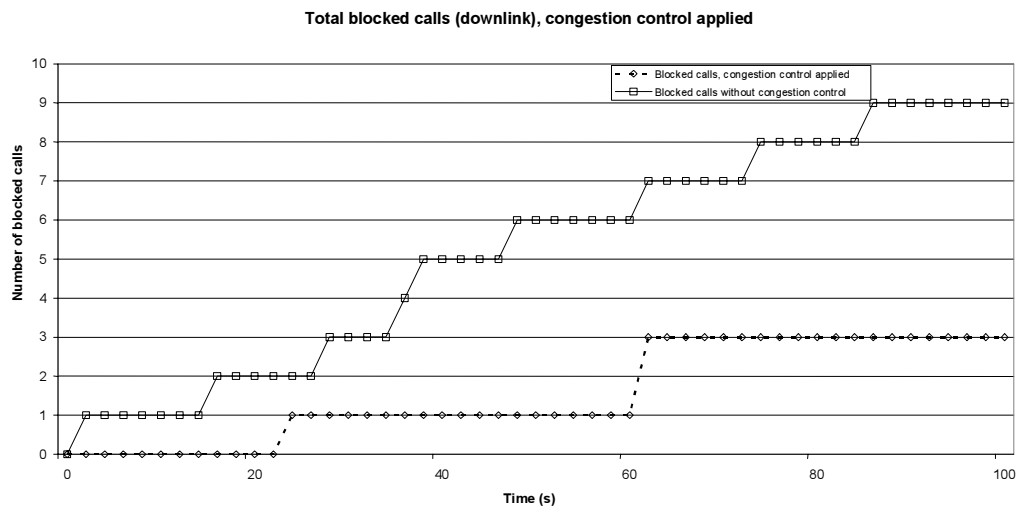
δεχθεί τη σύναψη μίας επείγουσας συνόδου υγείας, αν και το δίκτυο δεν ήταν σε θέση να εξυπηρετήσει την αντίστοιχη κίνηση. Αυτό το γεγονός οδήγησε σε μία σοβαρή υποβάθμιση της ποιότητας των παρεχομένων υπηρεσιών. Σε αυτήν την περίπτωση, σε ένα πραγματικό δίκτυο θα επενέβαινε ο έλεγχος συμφόρησης για να αποκαταστήσει την ποιότητα σε αποδεκτά επίπεδα.

Υπάρχουν αρκετοί τρόποι για να επιτύχει ο έλεγχος συμφόρησης το στόχο του. Μία επιλογή είναι να μειώσει το διαθέσιμο ρυθμό μετάδοσης για τις υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου (π.χ. για την περιήγηση στο διαδίκτυο), ή να εξαναγκάσει κάποια κινητά τερματικά να εκκινήσουν διαδικασία διαπομπής σε άλλο σταθμό βάσης, ή ακόμα και να διακόψει βίαια μία ή περισσότερες εγκατεστημένες συνόδους. Στην προσομοίωση υλοποιήθηκε την πρώτη μέθοδο, ενώ οι παράμετροι του σεναρίου είναι ακριβώς ίδιες με αυτές του προηγούμενου τμήματος, ώστε να εξασφαλιστεί η συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων. Τα σχήματα 4.7, 4.8 και 4.9 παρουσιάζουν τα αποτελέσματα του σεναρίου αυτού.

Το σχήμα 4.9 είναι ένα τυπικό παράδειγμα της επέμβασης του ελέγχου συμφόρησης. Λίγο πριν το 40^ο δευτερόλεπτο, η καθυστέρηση συνεχώς αυξάνεται, γεγονός το οποίο υποβαθμίζει το QoS. Ο μηχανισμός ενεργοποιείται και μειώνει το προσφερόμενο φορτίο, επαναφέροντας άμεσα το σύστημα σε κατάσταση ισορροπίας. Αυτό το μοτίβο επαναλαμβάνεται περίπου στο 60^ο δευτερόλεπτο της προσομοίωσης. Η ενέργεια αυτή οδηγεί σε συνολική βελτίωση της επίδοσης του συστήματος. Η σύγκριση της μέσης καθυστέρησης δικαιολογεί τη λήψη των προαναφερθέντων μέτρων, καθώς η μέγιστη μέση καθυστέρηση διατηρείται στην περίπτωση που εφαρμόστηκε έλεγχος συμφόρησης συνήθως κάτω από τα 2 s, σε αντίθεση με τα 11 s που παρατηρούνται απουσία του ελέγχου. Επιπλέον ο αριθμός φραγμένων κλήσεων περιορίζεται σημαντικά, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.8. Τέλος, ο ρυθμός μετάδοσης για τη σύνοδο υγείας, αν και παραμένει μακριά από το να χαρακτηριστεί ικανοποιητικός, εν τούτοις είναι αισθητά αναβαθμισμένος. Εδώ πρέπει να τονιστεί ότι η σχετική αυτή εξισορρόπηση ήταν επιτεύξιμη εξαιτίας της ανταλλαγής (tradeoff) ανάμεσα στη διαθέσιμη χωρητικότητα που είχε αποδοθεί



Σχήμα 4.7: Ρυθμός διέλευσης δεδομένων για τις υπηρεσίες υγείας υπό την παρουσία ελέγχου συμφόρησης

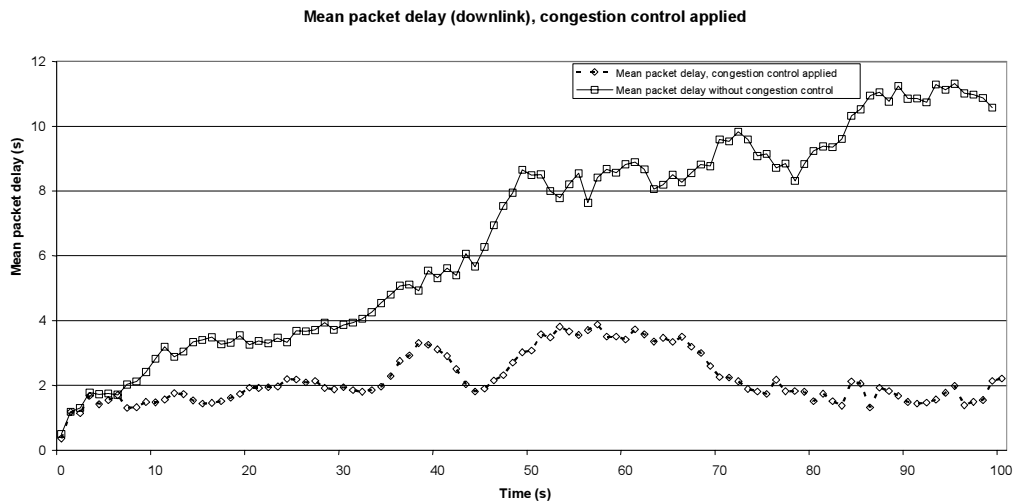


Σχήμα 4.8: Σύγκριση φραγμένων κλήσεων υπό την παρουσία / απουσία ελέγχου συμφόρησης

στις υπηρεσίες περιήγησης στο διαδίκτυο (αρχικά 50% της διαθέσιμης χωρητικότητας) και στη διαθέσιμη χωρητικότητα των υπηρεσιών πραγματικού χρόνου (συμπεριλαμβανομένης της συνόδου υγείας).

4.2.3.4 Απόδοση Προτεραιότητας στη Σύνοδο Υπηρεσιών Υγείας

Έως τώρα έχει παρακαμφθεί ο έλεγχος αποδοχής κλήσης για να εξυπηρετηθεί μία σύνοδος επειγουσών υπηρεσιών υγείας και κατόπιν ενεργοποιήθηκε ο έλεγχος συμφόρησης ώστε να είναι δυνατή η επαναφορά του δικτύου σε κατάσταση ευστάθειας. Αν και ο στόχος της εξυπηρέτησης μίας επείγουσας συνόδου σε κατάσταση συμφόρησης του δικτύου επιτεύχθηκε, εν τούτοις το παρεχόμενο QoS δεν ήταν το επιθυμητό. Παρά την επιτυχή διαχείριση της κίνησης, η μέση καθυστέρηση πακέτου έφτασε ανά στιγμές έως και τα 4 s. Η τελική λύση είναι η απόδοση προτεραιότητας στις συνόδους υγείας, μέσω κατάλληλων τροποποιήσεων στη



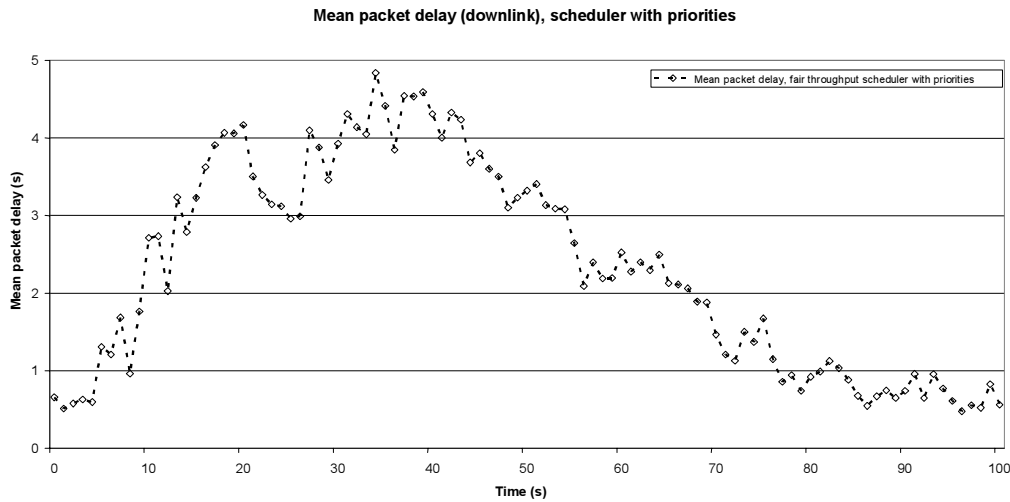
Σχήμα 4.9: Σύγκριση μέσης καθυστέρησης υπό την παρουσία / απουσία ελέγχου συμφόρησης

λειτουργία του αλγόριθμου δρομολόγησης του HSDPA. Με αυτόν τον τρόπο, τα δεδομένα που προέρχονται από τις συνόδους υγείας θα δρομολογούνται πρώτα, συντελώντας στην ελάττωση της αντίστοιχης καθυστέρησης.

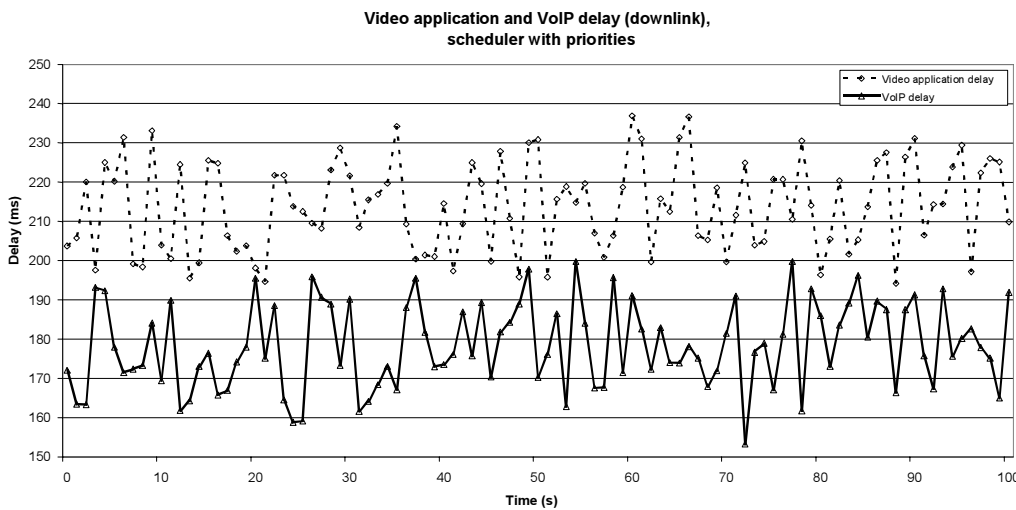
Κάθε αλγόριθμος δρομολόγησης κίνησης προσπαθεί να επιτύχει ένα tradeoff μεταξύ της δικαιοσύνης ανάμεσα στους χρήστες και της μέγιστης ρυθμοαπόδοσης του δικτύου. Η δικαιοσύνη είναι μία επιθυμητή ιδιότητα του συστήματος, ώστε να εξυπηρετούνται όλοι οι χρήστες ισότιμα. Δίνοντας προτεραιότητα σε κάποια υπηρεσία, η δικαιοσύνη του συστήματος υποσκάπτεται. Για αυτόν το λόγο σε αυτόν το γύρο προσομοίωσης χρησιμοποιείται αλγόριθμος ισόποσης ρυθμοαπόδοσης Fair Throughput, τροποποιημένος για τη βελτίωση της επίδοσης των συνόδων υγείας. Ο Fair Throughput είναι ένας εξαιρετικά δίκαιος αλγόριθμος, ο οποίος στοχεύει στην εξισορρόπηση του ρυθμού μετάδοσης όλων των εξυπηρετούμενων κινητών τερματικών, με αντιστάθμισμα τη μείωση του συνολικού φορτίου που δύναται να εξυπηρετήσει το δίκτυο. Σε αυτόν το γύρο προσομοίωσης το προσφερόμενο φορτίο είναι 5.5 Mbps, ενώ οι διαθέσιμοι κώδικες είναι 15. Στα σχήματα 4.10 και 4.11 είναι ορατή η επίδοση του προτεινόμενου αλγορίθμου δρομολόγησης.

Μελετώντας τα σχήματα, είναι φανερό ότι ο αλγόριθμος δρομολόγησης επιτυγχάνει το στόχο του. Αν και η συνολική μέση καθυστέρηση αυξάνεται λίγο (σχεδόν 5 s αντί για τα 4 s του σχήματος 4.9), η καθυστέρηση μετάδοσης δεδομένων για τη σύνοδο υπηρεσιών υγείας περιορίζεται σε αποδεκτά επίπεδα, παρουσιάζοντας διακύμανση από 150 έως 240 ms.

Συμπερασματικά, ξεκινώντας από ένα μη συμφορημένο δίκτυο HSDPA, προστέθηκαν στη συνέχεια επιπλέον φορτίο, ο έλεγχος αποδοχής κλήσης, ο έλεγχος συμφόρησης και τέλος ένας αλγόριθμος δρομολόγησης με προτεραιότητες. Βήμα προς βήμα η προσομοίωση απέδειξε ότι το σύστημα έχει τη δυνατότητα να αντιμετωπίσει επιτυχώς το προσφερόμενο φορτίο και να επανέλθει σε κατάσταση ευστάθειας μέσω των εγγενών μηχανισμών του.



Σχήμα 4.10: Συνολική μέση καθυστέρηση πακέτων στην κάτω ζεύξη



Σχήμα 4.11: Καθυστέρηση ανά εφαρμογή για τις υπηρεσίες υγείας με προτεραιότητα στην κάτω ζεύξη

4.2.3.5 Συμφορημένο Δίκτυο HSUPA με Απόδοση Προτεραιότητας στη Σύνοδο Υπηρεσιών Υγείας

Όταν μία σύνοδος γίνεται αποδεκτή σε ένα HSPA σύστημα, το δίκτυο καλείται να διαχειριστεί τόσο την κάτω, όσο και την άνω ζεύξη. Έως τώρα εξετάστηκε η λειτουργία και αντιμετωπίστηκαν θέματα που αφορούσαν στην κάτω ζεύξη του δικτύου. Το επόμενο λογικό βήμα είναι να εξεταστεί και η άνω ζεύξη. Η άνω ζεύξη παίζει σημαντικό ρόλο στις περιπτώσεις παροχής ιατρικών υπηρεσιών σε περίπτωση ατυχήματος, ενώ χρησιμοποιείται επίσης και στην περίπτωση της αποθεραπείας του ασθενούς (βλ. παράγραφο 4.2.2.2).

Όποτε ζητείται μία νέα σύνοδος στην άνω ζεύξη, η διαδικασία που λαμβάνει χώρα έχει τα ίδια χαρακτηριστικά με την αντίστοιχη περίπτωση της κάτω ζεύξης. Επομένως υπάρχει και στην άνω ζεύξη αλγόριθμος δρομολόγησης, έλεγχος αποδοχής κλήσης, έλεγχος συμφόρησης κ.τ.λ. Για παράδειγμα ο έλεγχος αποδοχής κλήσης ενδέχεται να περιορίζει το μέγιστο αριθμό

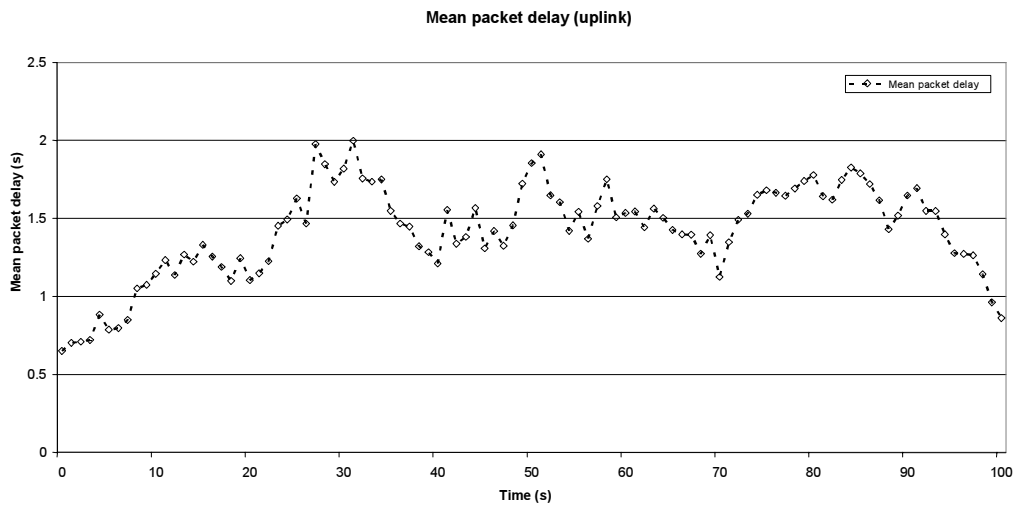
συνόδων στη ζεύξη, ή να κάνει μία εκτίμηση για τη μέγιστη παρεμβολή στο δέκτη (Node B). Μπορεί ακόμα να συνυπολογίζει το Δείκτη Προτεραιότητας Δρομολόγησης (Scheduling Priority Indicator - SPI) της υπό εξέταση συνόδου και να αποφασίζει για την τύχη της συγκριτικά με τους υπάρχοντες SPIs. Ο έλεγχος συμφόρησης μπορεί αντίστοιχα να υπολογίζει τον αριθμό των χαμένων πακέτων ή την καθυστέρηση των πακέτων, προβλέποντας συνθήκες υπερφόρτωσης στον Node B. Είναι φανερό από αυτά τα μικρά παραδείγματα ότι η άνω και η κάτω ζεύξη υλοποιούν παρομοιές διεργασίες, δυαδικές και αλληλοσυμπληρούμενες.

Το πρώτο ζήτημα που πρέπει να αντιμετωπιστεί σε ένα συμφορημένο δίκτυο είναι η διαχείριση του ελέγχου αποδοχής κλήσης, ώστε να εισαχθούν στο σύστημα οι σύνοδοι υπηρεσιών υγείας. Η βέλτιστη μέθοδος για να επιτευχθεί αυτό είναι η ανάθεση του μέγιστου SPI στη σύνοδο υγείας. Κατ' αυτόν τον τρόπο οι χρήστες υπηρεσιών υγείας θα έχουν ένα συγκριτικό πλεονέκτημα έναντι των υπολοίπων κατά τον ανταγωνισμό για την πρόσβαση στους πόρους του ραδιοδικτύου. Αυτή η ενέργεια ενδέχεται να προκαλέσει μία προσωρινή ανισορροπία στη λειτουργία της άνω ζεύξης εξαιτίας του πλεονάζοντος φορτίου που θα διοχετευθεί στο δίκτυο, όπως ήδη παρουσιάστηκε κατά τη μελέτη του HSDPA. Ο έλεγχος συμφόρησης σύντομα θα ανιχνεύσει μία αυξανόμενη μέση καθυστέρηση (ή απώλειες πακέτων) και θα πληροφορήσει τον Node B σχετικά. Ο αλγόριθμος δρομολόγησης είναι τώρα υπεύθυνος να διατηρήσει την παρεμβολή στην άνω ζεύξη εντός των αποδεκτών ορίων, σηματοδοτώντας στα κινητά τερματικά να προσαρμόσουν τις παραμέτρους της μετάδοσής τους (εκπεμπόμενη ισχύς κ.τ.λ.). Η σύνodos υπηρεσιών υγείας θα αντιμετωπιστεί ευνοϊκά (λόγω του υψηλού SPI) και θα είναι από τις τελευταίες που θα κληθεί να μεταβάλλει τις αντίστοιχες παραμέτρους. Με αυτήν την προσέγγιση, η επίδοση του Enhanced Uplink υποβαθμίζεται ελαφρά, αλλά η σύνodos υγείας απολαμβάνει έναν ικανοποιητικό βαθμό εξυπηρέτησης. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έχουν κοινά χαρακτηριστικά με τα αντίστοιχα του HSDPA. Τα σχήματα 4.12 και 4.13 είναι παραδείγματα αυτού του γύρου προσομοίωσης και απεικονίζουν την τελική μέση καθυστέρηση της άνω ζεύξης, σε σύγκριση με την καθυστέρηση κάθε υπηρεσίας της συνόδου υγείας, μετά την απόδοση προτεραιότητας στη σύνοδο υπηρεσιών υγείας.

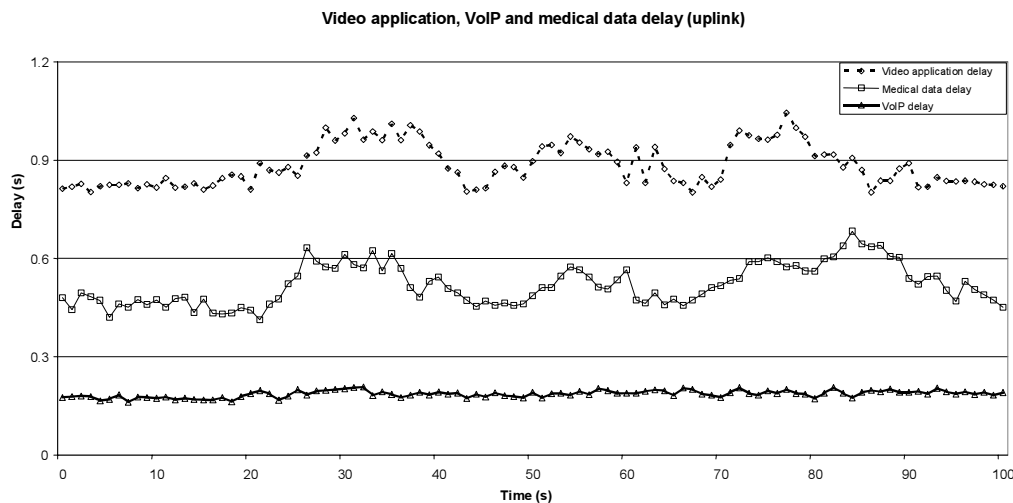
4.2.4 Συμπεράσματα

Στο παρόν τμήμα εξετάστηκε η επίδοση ενός ασύρματου τηλεπικοινωνιακού συστήματος (συγκριμένα ενός δικτύου HSPA), το οποίο κλήθηκε να εξυπηρετήσει τυπικές συνόδους ασυρμάτων δικτύων και συνόδους επείγουσών υπηρεσιών υγείας. Η επίδοση εκτιμήθηκε σε όρους ρυθμοαπόδοσης και καθυστέρησης πακέτων, υπό διάφορες παραμέτρους λειτουργίας και προσφερόμενου φορτίου. Η έρευνα ξεκίνησε σε μη συμφορημένο δίκτυο HSPA, ενώ κατόπιν προστέθηκαν ο έλεγχος αποδοχής κλήσεων, ο έλεγχος συμφόρησης και ένας απλός αλγόριθμος δρομολόγησης. Η προσομοίωση απέδειξε ότι η σωστή διαχείριση των ραδιοπόρων, συνδυαζόμενη με προσεκτική σχεδίαση του συστήματος, διαδραματίζει τον κύριο ρόλο στη βελτιστοποίηση της επίδοσης του δικτύου.

Εν κατακλείδι, δύο είναι τα σημεία που αναγνωρίζονται ως σημαντικότερα προβλήματα και θα αποτελέσουν αντικείμενο έρευνας στα επόμενα κεφάλαια:



Σχήμα 4.12: Συνολική μέση καθυστέρηση πακέτων στην άνω ζεύξη



Σχήμα 4.13: Καθυστέρηση ανά εφαρμογή για τις υπηρεσίες υγείας με προτεραιότητα στην άνω ζεύξη

- Η βελτιστοποίηση των μηχανισμών ανάθεσης ραδιοπόρων στις υπηρεσίες πραγματικού χρόνου (όπως οι υπηρεσίες της συνόδου υγείας στην προηγούμενη προσομοίωση). Αυτού του είδους οι υπηρεσίες είναι οι πιο απαιτητικές όσον αφορά στην υφιστάμενη καθυστέρηση πακέτου και επομένως καθορίζουν σε ένα πολύ μεγάλο βαθμό την προσφερόμενη ποιότητα υπηρεσίας του δικτύου συνολικά.
- Η επίτευξη δικαιοσύνης ανάμεσα στους χρήστες. Είναι φανερό ότι η διατήρηση συγκεκριμένου επιπέδου QoS για μία συγκεκριμένη ομάδα χρηστών, δεν είναι δυνατόν να γίνει εις βάρος κάποιας άλλης ομάδας. Επομένως στόχος κατά τη διαχείριση των πόρων του ραδιοδικτύου είναι και η κατά το δυνατόν δίκαιη κατανομή τους.

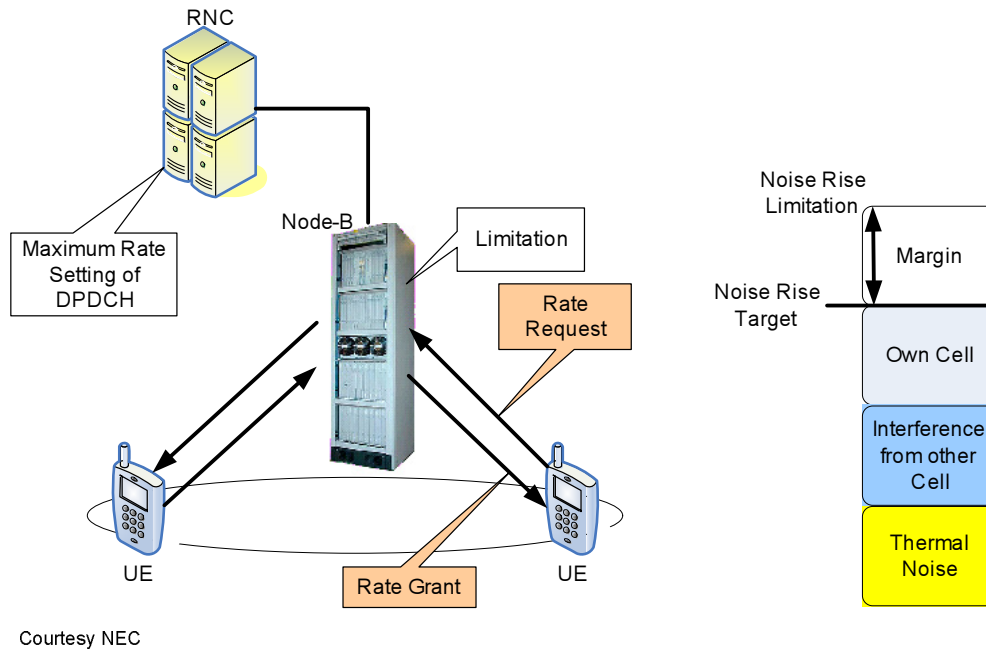
4.3 Εκτίμηση Επίδοσης Μονοκυψελωτού Δικτύου HSPA με Έμφαση στην Άνω Ζεύξη

Έχοντας εξετάσει ήδη την επίδοση ενός HSPA συστήματος κυρίως όσον αφορά στην κάτω ζεύξη μετάδοσης, θα ακολουθήσει η μελέτη του ίδιου συστήματος αναφορικά με την άνω ζεύξη του, η οποία καλείται Enhanced Uplink. Κατ' αυτόν τον τρόπο θα αποκτηθεί μία σφαιρική εικόνα σχετικά με τη λειτουργία ενός ασύρματου ευρυζωνικού συστήματος τηλεπικοινωνιών, ώστε να καταστεί δυνατή η μετέπειτα διερεύνηση και πρόταση νέων αλγορίθμων που θα βελτιστοποιούν τη χρήση των διαθέσιμων ραδιοπόρων. Με σκοπό τη διατήρηση της συνέχειας της εν λόγω μελέτης, τα δεδομένα που θα ληφθούν υπόψη στο παρακάτω σενάριο αποτελούνται από υπηρεσίες φωνής, βίντεο και ιατρικών δεδομένων, όπως και στο προηγούμενο σενάριο. Τα δεδομένα αυτά αντιστοιχούν τόσο σε υπηρεσίες πραγματικού, όσο και μη πραγματικού χρόνου.

4.3.1 Σύντομη Περιγραφή Άνω Ζεύξης HSPA

Η άνω ζεύξη του HSPA, σε αντίθεση με την κάτω ζεύξη, είναι περιορισμένη από την παρεμβολή (interference limited). Καθώς στη γενική περίπτωση περισσότερα του ενός κινητά τερματικά αποστέλλουν δεδομένα στο σταθμό βάσης την ίδια στιγμή, το σήμα που λαμβάνεται από κάθε τερματικό επιδρά ως παρεμβολή στα σήματα όλων των υπολοίπων. Η ποιότητα της ζεύξης υποβαθμίζεται περαιτέρω από την ετεροκυψελική παρεμβολή, εξαιτίας της λειτουργίας άλλων σταθμών βάσης του δικτύου στην ίδια συχνότητα σε γειτονικές γεωγραφικές περιοχές. Στόχος επομένως του Node B είναι να βρεθεί το σημείο ισορροπίας ανάμεσα σε δύο αντικρουόμενους στόχους: επιβάλλεται από τη μία η μεγιστοποίηση της απόδοσης της ζεύξης και από την άλλη η διατήρηση του επιπέδου του θορύβου σε ανεκτά επίπεδα, ώστε να είναι δυνατή η σωστή αποκωδικοποίηση των δρομολογούμενων δεδομένων. Είναι σημαντικό σε αυτό το σημείο να αναφερθεί ότι το μέγιστο επιτρεπτό επίπεδο ανύψωσης του θορύβου υπολογίζεται σε σχέση με το θερμικό θόρυβο σε συνθήκες ηρεμίας στην κεραία λήψης του σταθμού βάσης. Στο σχήμα 4.14 διακρίνονται οι κύριες οντότητες που αποτελούν το δίκτυο, καθώς και οι βασικές λειτουργίες που επιτελούνται κατά την απόδοση ενός ρυθμού μετάδοσης σε κάποιο κινητό τερματικό.

Στο Enhanced Uplink η υπεύθυνη οντότητα για την προσαρμογή της ζεύξης του κάθε κινητού τερματικού είναι ο ίδιος ο σταθμός βάσης, καθώς αυτή η διαδικασία είναι σαφώς ταχύτερη στο επίπεδο του Node B σε σχέση με τον RNC. Όταν ένας χρήστης ζητάει να του αποδοθούν πόροι του δικτύου (rate request), ο Node B γνωρίζοντας τη στιγμιαία διακύμανση της ανύψωσης θορύβου, λαμβάνει τις κατάλληλες αποφάσεις και ενημερώνει άμεσα το κινητό τερματικό μέσω αντίστοιχων σημάτων ελέγχου (rate grant), που μεταφράζονται από το τελευταίο ως εντολές ρύθμισης του επιπέδου της μέγιστης εκπεμπόμενης ισχύος του. Στο αίτημα απόδοσης πόρων από την πλευρά του κινητού τερματικού περιλαμβάνονται πληροφορίες που υποβοηθούν τη λήψη της απόφασης στο σταθμό βάσης, όπως το μέγεθος της προσωρινής μήμης των προς αποστολή δεδομένων, το συνολικό μέγεθος της ουράς που βρίσκεται σε αναμονή



Σχήμα 4.14: Δρομολόγηση στον Node B και επίπεδο ανύψωσης θορύβου

και άλλες συναφείς πληροφορίες. Τέλος, η παραχώρηση πόρων από την πλευρά του δικτύου μπορεί να γίνει τόσο σε απόλυτες τιμές ισχύος, όσο και σε σχετικές τιμές που ουσιαστικά αφορούν στη μικρορύθμιση της εκπεμπόμενης ισχύος γύρω από την τρέχουσα τιμή (absolute και relative grant αντίστοιχα).

4.3.2 Περιγραφή του Προσομοιωτικού Μοντέλου

Για τη μελέτη της επίδοσης του Enhanced Uplink, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο που περιγράφηκε στην παράγραφο 4.2.1, ώστε να διασφαλιστεί η ενότητα των αποτελεσμάτων. Στον πίνακα 4.5 καταγράφονται οι κύριες παράμετροι της προσομοίωσης της άνω ζεύξης.

4.3.3 Περιγραφή Υπηρεσιών Υγείας

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα σύγχρονα δίκτυα ασυρμάτων τηλεπικοινωνιών μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξυπηρέτηση εφαρμογών υγείας με υψηλό επίπεδο παρεχομένης ποιότητας υπηρεσίας. Σε αυτήν την υποενότητα θα αναφερθούν οι εφαρμογές υγείας που θα χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή της εκτίμησης της επίδοσης του δικτύου Enhanced Uplink κατά την προσομοίωση.

4.3.3.1 Επείγουσες Υπηρεσίες σε Περίπτωση Ατυχήματος

Αυτή η υπηρεσία αναφέρεται στην υποστήριξη μονάδων μεταφοράς (π.χ. ασθενοφόρα) ή περιφερειακών κέντρων υγείας σε περίπτωση ατυχημάτων. Πρόσφατες έρευνες καταλήγουν στο ότι η έγκαιρη και εξειδικευμένη προ-νοσοκομειακή διαχείριση ενός ασθενούς συμβάλλει καθοριστικά στην επιτυχή αντιμετώπιση τέτοιου είδους περιστατικών. Ειδικά σε περιστατικά

Πίνακας 4.5: Παράμετροι προσομοίωσης

Παράμετρος	Τιμή
Συχνότητα φέροντος	2.1 GHz
Εύρος ζώνης καναλιού	5 MHz
Διάρκεια χρονοσχισμής TTI	2 (msec)
Ακτίνα κυψέλης	800 m
Μοντέλο απωλειών διάδοσης	$L = 128.1 + 37.6 * \log_{10} R$
Κατανομή αργών διαλείψεων	Λογαριθμοκανονική
Τυπική απόκλιση αργών διαλείψεων	8.0 dB
Πυκνότητα θερμικού θορύβου	-174 dBm/Hz
Παράγοντας ετεροκυψελικής παρεμβολής	0.5
Ισχύς εκπομπής τερματικών	19 έως 23 dBm
Όριο ανύψωσης θερμικού θορύβου	6 dB
Γεννήτρια κίνησης	VoIP, βίντεο, περιήγηση στο διαδίκτυο, FTP
Μοντέλο κινητικότητας	ITU-Veh / ITU-Ped

σοβαρών κρανιοεγκεφαλικών τραυματισμών, προβλημάτων στη σπονδυλική στήλη και σε εσωτερικά όργανα, η μέθοδος μεταφοράς και η εν γένει αντιμετώπιση του συμβάντος, είναι ζωτικής σημασίας για το μέλλον του ασθενούς. Δυστυχώς, οι ειδικευόμενοι ιατροί και το προσωπικό των ασθενοφόρων, οι οποίοι συνήθως είναι οι πρώτοι που καλούνται να αντιμετωπίσουν αυτές τις καταστάσεις, δεν έχουν την απαραίτητη θεωρητική κατάρτιση ή/και πρακτική εμπειρία. Καθώς (για πρακτικούς και οικονομοτεχνικούς λόγους), δεν είναι δυνατόν να πληρωθούν όλες οι θέσεις από εξειδικευμένο προσωπικό, το υπάρχον προσωπικό πολλές φορές εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό και συνεπικουρείται από έμπειρο ιατρικό προσωπικό. Οι ιατρικές υπηρεσίες που εντάσσονται σε αυτήν την κατηγορία επιτρέπουν σε εξειδικευμένους ιατρούς που βρίσκονται πιθανότατα σε κάποια μεγάλη νοσοκομειακή μονάδα να συντονίσουν απομακρυσμένα τις απαραίτητες ενέργειες για τη διάσωση της ζωής των ασθενών, μέσω τηλεδιάγνωσης και διαδραστικής επικοινωνίας με το απομακρυσμένο κέντρο υγείας. Ο πίνακας 4.6 συνοψίζει τις εφαρμογές που ενδέχεται να περιλαμβάνονται στην παροχή υπηρεσιών αυτής της κατηγορίας.

4.3.3.2 Συνεργατικές Σύνοδοι Τηλεδιάσκεψης μεταξύ Ιατρικού Προσωπικού σε Κίνηση

Οι πρόσφατες εξελίξεις στον τομέα των δικτύων και η τήρηση ηλεκτρονικών αρχείων υγείας έδωσαν τη δυνατότητα άμεσης συνεργασίας μεταξύ γεωγραφικά απομακρυσμένων μονάδων περίθαλψης. Σε αυτό το πνεύμα, μία σύνοδος τηλεδιάσκεψης υλοποιεί ένα συνεργατικό εργασιακό περιβάλλον για ιατρούς σε διαφορετικές περιοχές, επιτρέποντας [103]:

1. Την ηλεκτρονική ανταλλαγή ιατρικών δεδομένων.
2. Τις επικοινωνίες ήχου και εικόνας.
3. Την κοινή διαχείριση δεδομένων (π.χ. από κοινού διαχείριση εικόνων, σχολιασμό κ.ά.)

Πίνακας 4.6: Επείγουσες υπηρεσίες σε περίπτωση ατυχήματος

Ψηφιακή συσκευή	Ανάλυση σήματος ή εικόνας		Ρυθμός μετάδοσης
	Χρονική (δείγματα ανά s)	bits / δείγμα	
Πληροφορίες θέσης	1	16	< 10 kbps
Ελεγκτής πίεσης - σφυγμομανόμετρο	1	16	< 10 kbps
Θερμόμετρο	5	16	< 10 kbps
Καταγραφέας αναπνοής	50	6	< 10 kbps
Στηθοσκόπιο (ήχος καρδιάς)	10000	12	~ 120 kbps
Επικοινωνία μέσω VoIP	–	–	~ 64 kbps
Συμπιεσμένο βίντεο με κίνηση (τηλεϊατρική)	–	–	384 kbps – 1.544 Mbps

Στη συχνή περίπτωση που τουλάχιστον ένας από τους συνεργαζόμενους ιατρούς μετακινηθεί ή βρεθεί σε περιοχή χωρίς κάλυψη από σταθερά δίκτυα, δίκτυα ασυρμάτων τηλεπικοινωνιών νέας γενιάς μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη συνέχιση της επικοινωνίας. Ο πίνακας 4.7 συνοψίζει τις εφαρμογές που ενδέχεται να περιλαμβάνονται στην παροχή υπηρεσιών αυτής της κατηγορίας.

4.3.3.3 Υπηρεσίες Διαχείρισης Ιατρικών Πληροφοριών - Κινητή Πρόσβαση σε Ηλεκτρονικά Αρχεία Υγείας

Αυτή η υπηρεσία αναφέρεται σε εφαρμογές που επιτρέπουν την καθολική παράδοση ιατρικών δεδομένων και πληροφοριών που σχετίζονται με ηλεκτρονικά αρχεία υγείας (Electronic Health Records - EHR), προσβάσιμων από PDAs ή tablet PCs. Εξυπηρετεί το ιατρικό προσωπικό που χρειάζεται άμεση γνώση των ιατρικών δεδομένων του ασθενούς από τυχαίες γεωγραφικές θέσεις [104]. Για την απρόσκοπτη μετάδοση του απαιτούμενου όγκου πληροφοριών, είναι απαραίτητη η χρήση ευρυζωνικών ασυρμάτων δικτύων νέας γενιάς. Τα προς μετάδοση ιατρικά δεδομένα για αυτήν την κατηγορία περιγράφονται στον πίνακα 4.8.

4.3.4 Αποτελέσματα Προσομοίωσης

Όπως αναλύθηκε στην παράγραφο 4.3.3, τρία κύρια σενάρια ελήφθησαν υπόψη κατά την προσομοίωση του δικτύου και βάσει αυτών εκτιμήθηκε βήμα προς βήμα η επίδοση του δικτύου. Το πρώτο σενάριο που μελετήθηκε ήταν η παροχή επειγουσών υπηρεσιών σε περίπτωση ατυχήματος, εν συνεχεία εξετάστηκαν οι συνεργατικές σύνοδοι τηλεδιάσκεψης μεταξύ ιατρικού προσωπικού σε κίνηση και τελικά διερευνήθηκαν οι υπηρεσίες διαχείρισης ιατρικών πληροφοριών και κινητής πρόσβασης σε ηλεκτρονικά αρχεία υγείας. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται αφορούν κυρίως στην από άκρου εις άκρον καθυστέρηση μετάδοσης πακέτων (end to end delay), καθώς αυτό το μετρικό θεωρείται ευρέως ως ένας βέλτιστος δείκτης για την εκτίμηση της επίδοσης ενός δικτύου, επηρεάζοντας άμεσα ή έμμεσα μία σειρά άλλων δεικτών. Κατά

Πίνακας 4.7: Συνεργατικές σύνοδοι τηλεδιάσκεψης

Ψηφιακή συσκευή	Ανάλυση σήματος ή εικόνας		Ρυθμός μετάδοσης
	Χρονική (δείγματα ανά s)	bits / δείγμα	
Δημογραφικά δεδομένα	–	–	100 Kbytes (μέγεθος κειμένου)
Εργαστηριακά και κλινικά δεδομένα, ιατρικό ιστορικό	–	–	1 Mbyte (μέγεθος κειμένου)
Ελεγκτής πίεσης - σφυγμομανόμετρο	1	16	< 10 kbps
Θερμόμετρο	5	16	< 10 kbps
Καταγραφέας αναπνοής	50	6	< 10 kbps
Στηθοσκόπιο (ήχος καρδιάς)	10000	12	~ 120 kbps
Ηλεκτροκαρδιογράφημα ECG	1250	12	~ 15 kbps
Ηλεκτροεγκεφαλογράφημα EEG	350	12	~ 10 kbps
Ηλεκτρομυογράφημα EMG	50000	12	~ 600 kbps
Υπέρηχος, καρδιολογία, ακτινολογία	512 × 512	8	256 kbytes (image size)
Μαγνητική απεικόνιση	512 × 512	8	384 kbytes (image size)
Τομογράφος	1024 × 1250	12	1.8 Mbytes (image size)
Ακτινογραφία	2048 × 2048	12	6 Mbytes (image size)
Μαστογραφία	4096 × 4096	12	24 Mbytes (image size)
Ιατρικό βίντεο για τηλεδιάσκεψη	–	–	1.544 Mbps
Συμπιεσμένο βίντεο με κίνηση (τηλεϊατρική)	–	–	384 kbps – 1.544 Mbps
Εργαλεία κοινής διαχείρισης αρχείων	–	–	~ 10 kbps

Πίνακας 4.8: Υπηρεσίες διαχείρισης ιατρικών δεδομένων

Ψηφιακή συσκευή	Ανάλυση σήματος ή εικόνας		Ρυθμός μετάδοσης
	Χρονική (δείγματα ανά s)	bits / δείγμα	
Δημογραφικά δεδομένα	–	–	100 Kbytes (μέγεθος κειμένου)
Εργαστηριακά και κλινικά δεδομένα, ιατρικό ιστορικό	–	–	1 Mbyte (μέγεθος κειμένου)
Στηθοσκόπιο (καταγεγραμμένος ήχος καρδιάς)	10000	12	~ 120 kbps
Υπέρηχος, καρδιολογία, ακτινολογία	512 × 512	8	256 kbytes (image size)
Μαγνητική απεικόνιση	512 × 512	8	384 kbytes (image size)
Τομογράφος	1024 × 1250	12	1.8 Mbytes (image size)
Ακτινογραφία	2048 × 2048	12	6 Mbytes (image size)
Μαστογραφία	4096 × 4096	12	24 Mbytes (image size)
Καταγραφή βίντεο ενδοσκόπησης	–	–	384 kbps

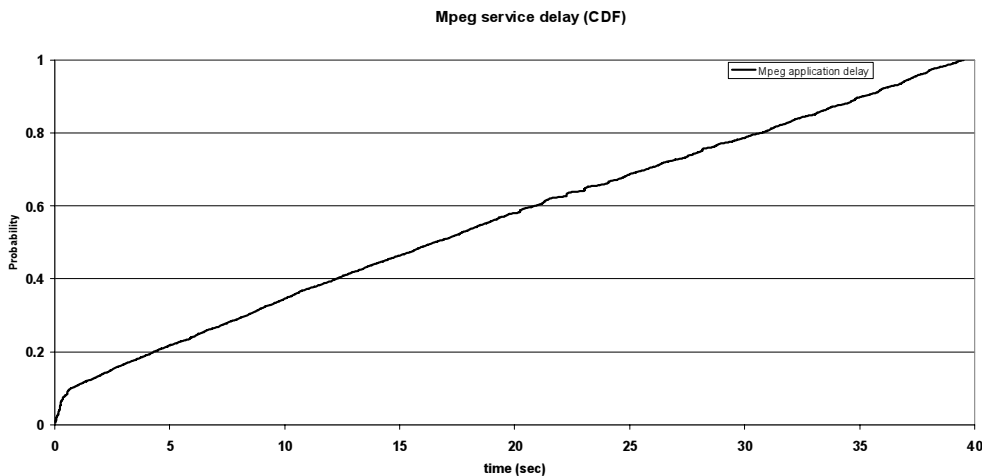
τη διάρκεια της προσομοίωσης παρουσιάζονται σημαντικά ευρήματα, τα οποία θα συμβάλλουν στην αποκρυστάλλωση μίας στέρεας εικόνας για τα απαιτούμενα βήματα για τη βελτιστοποίηση ενός Enhanced Uplink συστήματος, και αφαιρετικά ενός ασυρμάτου ευρυζωνικού δικτύου νέας γενιάς εν γένει.

4.3.4.1 Αποτελέσματα Προσομοίωσης για το Πρώτο Σενάριο

Για να εξαχθούν συμπεράσματα για την συνολική επίδοση του Enhanced Uplink, η πρώτη περίπτωση που θα εξεταστεί για αυτό το σενάριο είναι η ταυτόχρονη συνύπαρξη δύο συνόδων στο δίκτυο. Στον πίνακα 4.9 παρουσιάζονται οι παράμετροι αυτής της εκτέλεσης, ενώ οι υπηρεσίες που υλοποιήθηκαν και οι αντίστοιχοι ρυθμοί μετάδοσης βρίσκονται σε συμφωνία με τα δεδομένα του πίνακα 4.6.

Πίνακας 4.9: Παράμετροι προσομοίωσης πρώτης περίπτωσης σεναρίου

Παράμετρος	Τιμή
Αριθμός συνόδων	2
Διάρκεια συνόδου	σταθερή 100 s
Υπηρεσίες (ρυθμός μετάδοσης)	VoIP (12.2 kbps), MPEG (768 kbps), FTP (150 kbps)

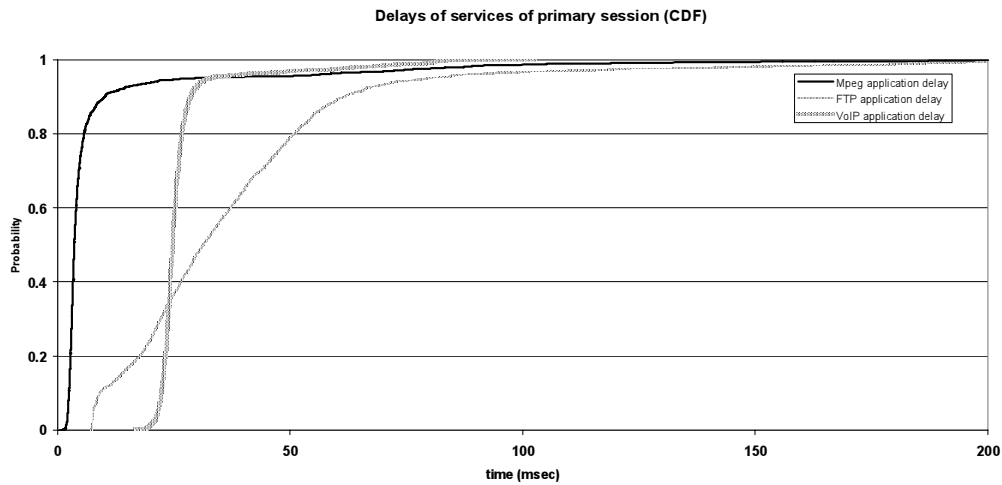


Σχήμα 4.15: Καθυστέρηση βίντεο MPEG για την πρώτη περίπτωση του σεναρίου

Οι δύο σύνοδοι απαιτούν αθροιστικά ρυθμό μετάδοσης της τάξης των 2 Mbps, ενώ παροδικά κατά τη διάρκεια των ριπών του βίντεο αυτό το νούμερο μπορεί να αυξηθεί κατά 20% ή και περισσότερο. Ένας σημαντικός παράγοντας που πρέπει να αναφερθεί είναι ότι δεν επιτρέπεται η απόρριψη πακέτων, ανεξαρτήτως της καθυστέρησης την οποία υφίστανται τα δεδομένα έως ότου δρομολογηθούν. Το γράφημα 4.15 είναι το πιο χαρακτηριστικό αποτέλεσμα αυτής της εκτέλεσης και δείχνει τη συνάρτηση αθροιστικής κατανομής της καθυστέρησης μετάδοσης των πακέτων της υπηρεσίας MPEG.

Είναι φανερό από το σχήμα 4.15 ότι το δίκτυο δεν κατορθώνει να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις δύο ταυτόχρονων συνόδων. Η καθυστέρηση του βίντεο συνεχώς αυξάνεται, χωρίς καμία τάση για σταθεροποίηση. Σε αυτό το σημείο επιβάλλεται να παρατεθεί μία σύντομη ανάλυση της δομής του δικτύου και των δυνατοτήτων του. Εξαιτίας της φύσης του Enhanced Uplink, η ανάθεση υψηλού (> 1 Mbps) ρυθμού μετάδοσης σε μία σύνοδο εγείρει ένα πλήθος ζητημάτων. Το Enhanced Uplink είναι (σε σχέση με τη χωρητικότητά του) ένα σύστημα περιοριζόμενο από την παρεμβολή. Η παρεμβολή που προκαλείται από κάθε εκπομπή είναι αθροιστική στο σταθμό βάσης και συνήθως οι κύριες πηγές παρεμβολής είναι τα κινητά τερματικά του κάθε σταθμού βάσης που χρησιμοποιούν τους πόρους του, καθώς και η παρεμβολή που προκαλείται από τις άλλες κυψέλες. Αποδίδοντας υψηλό ρυθμό μετάδοσης σε ένα κινητό τερματικό (και κατ'επέκταση υψηλή ισχύ εκπομπής), το επακόλουθο είναι να αυξηθεί κατά πολύ η παρεμβολή που υφίστανται τα άλλα τερματικά που εξυπηρετούνται από την ίδια κυψέλη. Το αποτέλεσμα είναι να μην είναι δυνατή η απόδοση και δεύτερου υψηλού ρυθμού μετάδοσης, καθώς κάτι τέτοιο θα προκαλούσε την ανύψωση του θερμικού θορύβου στο σταθμό βάσης πάνω από τα όρια εύρυθμης λειτουργίας του. Στο γράφημα 4.15 απαντάται η περίπτωση που μόλις περιγράφηκε, καθώς η πρώτη σύνοδος στην πραγματικότητα φμώνει τη δεύτερη και το αντίστροφο σε κάθε TTI, γεγονός που προκαλεί ένα φαύλο κύκλο και οδηγεί την καθυστέρηση σε μη αποδεκτές τιμές.

Το παραπάνω συμπέρασμα θα επιβεβαιωθεί από τη δεύτερη προσομοίωση αυτού του σεναρίου. Οι νέες παράμετροι δίνονται στον πίνακα 4.10. Η κύρια διαφορά είναι ότι η δεύτερη σύνοδος



Σχήμα 4.16: Καθυστέρηση υπηρεσιών για τη δεύτερη περίπτωση του σεναρίου

έχει αντικατασταθεί από δύο νέες (μη επείγουσες) συνόδους με χαμηλότερες απαιτήσεις σε ρυθμούς μετάδοσης, αν και ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης δε διαφοροποιείται ιδιαίτερα. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται στο σχήμα 4.16.

Πίνακας 4.10: Παράμετροι προσομοίωσης δεύτερης περίπτωσης σεναρίου

Παράμετρος	Τιμή
Αριθμός συνόδων	3
Διάρκεια συνόδου	σταθερή 100 s
Υπηρεσίες (ρυθμός μετάδοσης) για την πρώτη σύνοδο	VoIP (12.2 kbps), MPEG (768 kbps), FTP (150 kbps)
Υπηρεσίες (ρυθμός μετάδοσης) για τη δεύτερη και τρίτη σύνοδο	VoIP (12.2 kbps), FTP (384 kbps)

Στο σχήμα 4.16 η καθυστέρηση για όλες τις εφαρμογές είναι για το 95% των δειγμάτων χαμηλότερη από 80 msec και για το 98% κάτω από 150 msec. Είναι φανερό ότι συντελέστηκε μία δραστική βελτίωση της επίδοσης του συστήματος, εξαιτίας του γεγονότος ότι καμία από τις δύο νέες συνόδους δεν απαιτεί υψηλό ρυθμό μετάδοσης. Αυτό το αποτέλεσμα επιβεβαιώνει την υπόθεση ότι το Enhanced Uplink δεν μπορεί πάντοτε να διαχειριστεί επαρκώς δύο συνόδους με υψηλές απαιτήσεις, καθώς ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης δεν είναι ο μοναδικός παράγοντας καθορισμού της συνολικής ποιότητας της παρεχόμενης υπηρεσίας. Για την επίλυση του προβλήματος είναι δυνατόν να ληφθεί μία σειρά μέτρων, όπως:

1. Καθώς η ομαλή λήψη εικόνας βίντεο είναι ζωτικής σημασίας για τις υπό μελέτη περιπτώσεις, ο ρυθμός μετάδοσης πρέπει να περιοριστεί στα 512 kbps, που αποφέρει ούτως ή άλλως εικόνα ικανοποιητικής ποιότητας για αυτήν την υπηρεσία με τις σύγχρονες κωδικοποιήσεις.
2. Αν υπάρχει κάποια σύνοδος που απαιτεί υψηλό ρυθμό μετάδοσης και αποτελείται από

δύο ή περισσότερες υπηρεσίες, η σύνοδος αυτή θα μπορούσε να διαχωριστεί σε δύο διακριτές συνόδους, το οποίο σε κάποιες περιπτώσεις ενδέχεται να οδηγήσει ακόμα και στη μείωση της ολικής παρεμβολής στην κυψέλη, εξαιτίας του τρόπου με τον οποίο αυξάνεται η εκπεμπόμενη ισχύς στην πλευρά του κινητού τερματικού (σε βήματα του 1 dB).

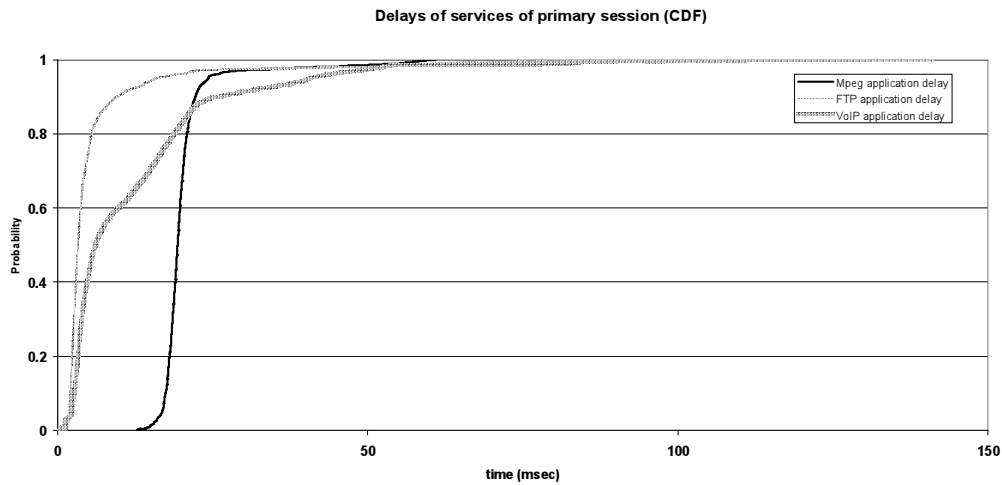
3. Τέλος, αν είναι απαραίτητο να υπάρχουν σύνοδοι με υψηλό ρυθμό μετάδοσης, τότε το δίκτυο θα πρέπει να ρυθμιστεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε κατά τη διάρκεια των ριπών μίας υπηρεσίας (π.χ. βίντεο), να αποδίδεται προτεραιότητα στις υπηρεσίες πραγματικού χρόνου και πάντα σύμφωνα με τα όρια που έχουν τεθεί για τη μέγιστη καθυστέρηση ανά υπηρεσία. Είναι φανερό εξάλλου ότι τόσο ο αλγόριθμος δρομολόγησης (Max SNR) του οποίου τα αποτελέσματα παρουσιάζονται, όσο και οι υπόλοιποι αλγόριθμοι που μελετήθηκαν, ανταποκρίνονται ικανοποιητικά μόνο σε ένα συγκεκριμένο εύρος καταστάσεων του δικτύου. Σημειώνεται ότι στο επόμενο κεφάλαιο της παρούσας διδακτορικής διατριβής προτείνεται ένας νέος αλγόριθμος με εγγενή δυνατότητα διαφοροποίησης της παρεχόμενης ποιότητας υπηρεσίας, ο οποίος παρουσιάζει εύρυθμη λειτουργία σε ένα μεγάλο εύρος καταστάσεων του δικτύου.

4.3.4.2 Αποτελέσματα Προσομοίωσης για το Δεύτερο Σενάριο

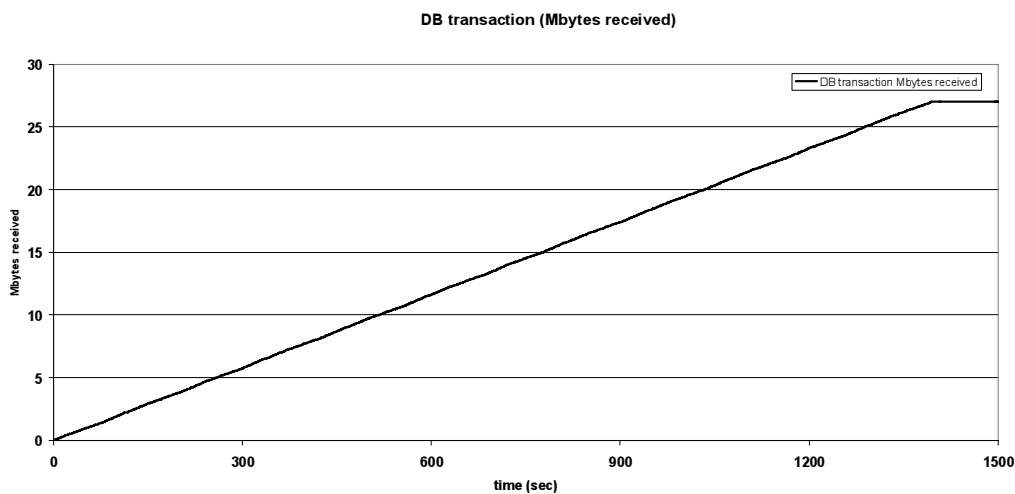
Σε αυτήν την παράγραφο θα μελετηθούν σύνοδοι συνεργατικής τηλεδιάσκεψης μεταξύ ιατρικού προσωπικού σε κίνηση. Οι παράμετροι για αυτόν το γύρο προσομοίωσης καταγράφονται στον πίνακα 4.11. Κατά τη διάρκεια της συνόδου θεωρήθηκε και μία υπηρεσία συνδιαλλαγής με βάση δεδομένων (ιατρικά αρχεία και εικόνες), με μεταφερόμενα δεδομένα συνολικού όγκου 27 Mbytes. Αυτός ο όγκος δεδομένων αναλύεται ως εξής: 100 kbytes για δημογραφικά δεδομένα, 1 Mbyte για εργαστηριακά και κλινικά δεδομένα, καθώς και ιατρικό ιστορικό, 24 Mbytes καταγεγραμμένου ιατρικού βίντεο για διαγνωστικούς σκοπούς και τέλος κάποιες ιατρικές εικόνες, σε συμφωνία με τον πίνακα 4.7. Ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης για κάθε σύνοδο έχει περιοριστεί στα 768 kbps, σύμφωνα με τις παρατηρήσεις στην προηγούμενη παράγραφο. Επιπροσθέτως, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης απεικονίζονται στα σχήματα 4.17 και 4.18.

Πίνακας 4.11: Παράμετροι προσομοίωσης δεύτερου σεναρίου

Παράμετρος	Τιμή
Αριθμός συνόδων	3
Διάρκεια συνόδου	σταθερή 1500 s
Υπηρεσίες (ρυθμός μετάδοσης) για την πρώτη και δεύτερη σύνοδο	VoIP (12.2 kbps), MPEG (512 kbps), Στοιχεία ελέγχου (10 kbps, Συνδιαλλαγή με βάση δεδομένων (27 Mbytes)
Υπηρεσίες (ρυθμός μετάδοσης) για την τρίτη σύνοδο	VoIP (12.2 kbps), FTP (256 kbps)



Σχήμα 4.17: Καθυστέρηση υπηρεσιών για το δεύτερο σενάριο



Σχήμα 4.18: Όγκος ληφθέντων δεδομένων από βάση δεδομένων προς χρόνο

Σύμφωνα με το σχήμα 4.17, το Enhanced Uplink μπορεί εύκολα να χειριστεί τον όγκο δεδομένων για να εξυπηρετήσει όλες τις υπηρεσίες σε αυτό το σενάριο. Η καθυστέρηση για κάθε υπηρεσία της συνόδου είναι χαμηλή, καθώς το 95% των δειγμάτων παρουσιάζουν καθυστέρηση μικρότερη των 40 msec, ενώ το 98% χαμηλότερη από 50 msec. Η πραγματική ρυθμοαπόδοση του συστήματος ακολουθεί με πιστότητα τον ονομαστικό ρυθμό μετάδοσης των υπηρεσιών. Συμπερασματικά, το Enhanced Uplink αντεπεξέρχεται άνετα στις απαιτήσεις του σεναρίου, παρέχοντας ικανοποιητικό QoS για όλες τις υπηρεσίες των συνόδων.

Από την άλλη πλευρά, στα αποτελέσματα υποβόσκει ένα πρόβλημα που καθίσταται αντιληπτό από την παρατήρηση του σχήματος 4.18. Για να ανακτηθούν τα 27 Mbytes δεδομένων από τη βάση, χρειάστηκαν περίπου 24 λεπτά. Αυτό δεν προκαλεί έκπληξη, καθώς εφόσον έχει τεθεί ένα άνω όριο στο μέγιστο συνολικό ρυθμό μετάδοσης που μπορεί να αποδοθεί σε μία σύνοδο, με τη συγκεκριμένη διάταξη ο ελάχιστος θεωρητικά χρόνος ανάκτησης υπολογίζεται στα 16 λεπτά (δεδομένου του γεγονότος ότι υπηρεσίες πραγματικού χρόνου της συνόδου απαιτούν

περίπου 535 kbps, ενώ το όριο έχει τεθεί στα 768 kbps). Αν και τα 27 Mbytes θεωρούνται ένας μη ευκαταφρόνητος όγκος δεδομένος για ένα ασύρματο κυψελωτό δίκτυο, εν τούτοις ανάλογα μεγέθη αποτελούν ένα σημαντικό και αναπόσπαστο τμήμα των παρεχόμενων υπηρεσιών. Συνεπώς, η βέλτιστη λύση είναι να υλοποιηθεί ένας νέος αλγόριθμος δρομολόγησης που προβλέποντας τις ανάγκες των υπηρεσιών πραγματικού χρόνου και διαχειριζόμενος τις απότομες μεταβολές τους, θα δύναται να εξυπηρετήσει με αποδοτικό τρόπο και τις υπόλοιπες υπηρεσίες.

4.3.4.3 Αποτελέσματα Προσομοίωσης για το Τρίτο Σενάριο

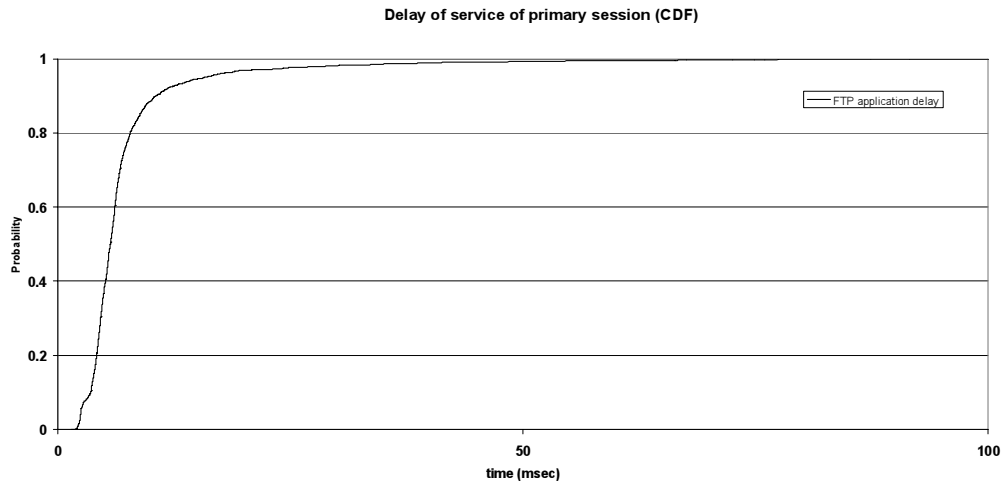
. Σε αυτήν την προσομοίωση θα ελεγχθεί το σενάριο της πρόσβασης κινούμενου χρήστη σε ηλεκτρονικά αρχεία υγείας μέσω ενός δικτύου Enhanced Uplink. Οι κύριες παράμετροι της προσομοίωσης συνοψίζονται στον πίνακα 4.12 και τα γραφήματα 4.19 και 4.20 απεικονίζουν τα αποτελέσματα. Από τη βάση δεδομένων ανακτώνται 60 Mbytes πληροφορίας, τα διαμοιράζονται ως εξής: 100 kbytes για δημογραφικά δεδομένα, 1 Mbyte για εργαστηριακά και κλινικά δεδομένα, καθώς και ιατρικό ιστορικό, και ο υπόλοιπος όγκος είναι διαγνωστικό ιατρικό βίντεο και ιατρικές εικόνες, σύμφωνα με τον πίνακα 4.8.

Πίνακας 4.12: Παράμετροι προσομοίωσης τρίτου σεναρίου

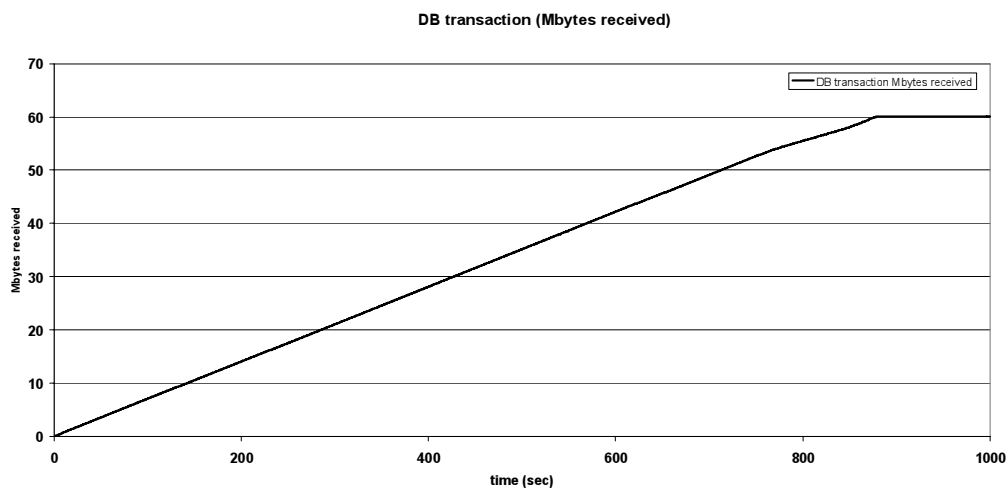
Παράμετρος	Τιμή
Αριθμός συνόδων	4
Διάρκεια συνόδου	σταθερή 1000 s
Υπηρεσίες (ρυθμός μετάδοσης) για την πρώτη σύνοδο	FTP (120 kbps), Συνδιαλλαγή με βάση δεδομένων (60 Mbytes)
Υπηρεσίες (ρυθμός μετάδοσης) για τη δεύτερη και τρίτη σύνοδο	MPEG (384 kbps)
Υπηρεσίες (ρυθμός μετάδοσης) για την τέταρτη σύνοδο	VoIP (12.2 kbps), MPEG (256 kbps)

Αυτό το σενάριο είναι το λιγότερο απαιτητικό από τα τρία που μελετήθηκαν. Ενδεικτικό αυτού του γεγονότος είναι ότι η καθυστέρηση για το 95% των δειγμάτων δεν ξεπέρασε τα 15 msec, ενώ για το 98% ο αντίστοιχος χρόνος είναι 30 msec. Οι υπηρεσίες της κύριας συνόδου του σεναρίου είναι μη πραγματικού χρόνου και επομένως οι απαιτήσεις σε πόρους δεν είναι τόσο εξαντλητικές.

Ένα σημαντικό σημείο αυτού του σεναρίου είναι η συμπεριφορά της υπηρεσίας ανάκτησης δεδομένων από τη βάση. Αδιαμφισβήτητα, 60 Mbytes είναι ένας σημαντικός όγκος δεδομένων, που χρειάζονται αρκετό χρόνο για να μεταδοθούν. Για να επιτευχθεί ένας ικανοποιητικός χρόνος μεταφοράς της τάξης των 4-5 λεπτών, ο ρυθμός μετάδοσης θα έπρεπε να προσεγγίζει το 1.5 Mbps, κάτι το οποίο είναι πρακτικά μη εφαρμόσιμο στο παρόν δίκτυο. Συμπερασματικά, αν και το Enhanced Uplink ανταποκρίθηκε στις απαιτήσεις του σεναρίου, ο χρόνος που δαπανήθηκε για την ολοκλήρωση της μεταφοράς των δεδομένων το καθιστά πρακτικά μη αξιοποιήσιμο για τις υπό εξέταση υπηρεσίες. Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι υπηρεσίες μη πραγματικού



Σχήμα 4.19: Καθυστέρηση FTP υπηρεσίας για το τρίτο σενάριο



Σχήμα 4.20: Όγκος ληφθέντων δεδομένων από βάση δεδομένων προς χρόνο

χρόνου δεν είναι ιδιαίτερα απαιτητικές όσον αφορά στην απαιτούμενη ποιότητα υπηρεσίας (και συνεπώς στους απαιτούμενους πόρους από την πλευρά του δικτύου), υπάρχει η δυνατότητα είτε να υπάρξει ένας συμβιβασμός με αυτό το χαρακτηριστικό, είτε να προσεγγιστεί αυτό το θέμα από διαφορετική γωνία, με την επιλογή διαφορετικού δικτύου επικοινωνιών για τη μαζική μετάδοση των δεδομένων. Για παράδειγμα, το WiMax αποτελεί ιδανικό υποψήφιο για την αντιμετώπιση αυτού του θέματος.

4.3.5 Συμπεράσματα

Στην παρούσα παράγραφο μελετήθηκε ένα Enhanced Uplink δίκτυο που κλήθηκε να εξυπηρετήσει συνόδους υπηρεσιών υγείας και αποδείχθηκε ότι είναι δυνατόν να αντιμετωπίσει τις απαιτήσεις για την εξυπηρέτηση των αντίστοιχων εφαρμογών. Κατά τη διάρκεια των προσομοιώσεων ελήφθησαν υπόψη υπηρεσίες φωνής, βίντεο πραγματικού χρόνου, βιοσημάτων και μεταφοράς αρχείων (πρωτόκολλο FTP). Η επίδοση του συστήματος εκτιμήθηκε κυρίως

ως προς την υφιστάμενη καθυστέρηση υπό διάφορες συνθήκες φορτίου και απαιτήσεων των υπηρεσιών.

Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα, είναι φανερό ότι το Enhanced Uplink κατάφερε να ανταπεξέλθει σχεδόν σε όλες τις προδιαγραφές των υπό μελέτη σεναρίων. Οι καθυστερήσεις που σημειώθηκαν ήταν ικανοποιητικές, με εξαίρεση την περίπτωση της ταυτόχρονης παρουσίας δύο συνόδων υψηλών απαιτήσεων. Εν κατακλείδι, δύο είναι τα σημεία που αναγνωρίζονται ως σημαντικότερα προβλήματα και στα οποία θα πρέπει να εστιάσει η έρευνα στα επόμενα κεφάλαια:

- Οι υπάρχοντες αλγόριθμοι δρομολόγησης δεν αξιοποιούν αποδοτικά τους διαθέσιμους πόρους του δικτύου, αφού αδυνατούν να προβλέψουν ή έστω να αντιμετωπίσουν τις απότομες στιγμιαίες μεταβολές στις υπηρεσίες πραγματικού χρόνου (που επηρεάζουν άμεσα την όλη λειτουργία του δικτύου) και να σταθεροποιήσουν το σύστημα σε μία κατάσταση λειτουργίας κοντά στη βέλτιστη. Παρουσιάζεται επομένως η ανάγκη για την υλοποίηση ενός αλγορίθμου που να προσφέρει στο σύστημα την απαραίτητη ευστάθεια, αντιμετωπίζοντας κατά το δυνατόν τις απαιτήσεις των υπηρεσιών πραγματικού χρόνου.
- Το σύστημα παρουσιάζει εγγενή αδυναμία για μεταφορά σε ανεκτό χρόνο μεγάλου όγκου δεδομένων. Υπό αυτές τις συνθήκες, επιβάλλεται η εξέταση εναλλακτικών δικτύων ασυρμάτων επικοινωνιών, όπως για παράδειγμα το WiMax, ώστε να επιτευχθεί ο στόχος της αναβάθμισης της παρεχόμενης ποιότητας υπηρεσίας.

4.4 Σύνοψη

Σε αυτό το κεφάλαιο εξετάστηκαν μέσω εξαντλητικών προσομοιώσεων δίκτυα ασυρμάτων τηλεπικοινωνιών. Συγκεκριμένα επελέγη ως αντιπροσωπευτικός εκπρόσωπος της νέας γενιάς δικτύων για την εις βάθος μελέτη μας το δίκτυο HSPA. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, υλοποιήθηκε από την αρχή ένα ολοκληρωμένο δίκτυο HSPA με όλες τις απαραίτητες οντότητές του (σταθμοί βάσης, RNC, γεννήτριες κίνησης, αλγόριθμοι δρομολόγησης, συμφόρησης και αποδοχής κλήσης, κανάλι κ.ά.) σε εξειδικευμένο λογισμικό προσομοίωσης. Για να διατηρηθεί ένα κοινό σημείο αναφοράς ως προς την τηλεπικοινωνιακή κίνηση που καλείται το δίκτυο να διαχειριστεί, επελέγησαν υπηρεσίες υγείας και άμεσης περίθαλψης, οι οποίες αντιστοιχούν σε ρεαλιστικά σενάρια λειτουργίας του συστήματος και περιλαμβάνουν τόσο υπηρεσίες πραγματικού, όσο και μη πραγματικού χρόνου. Μέσω αυτής της μεθόδου σχηματίστηκε μία ακριβής εικόνα για τον τρόπο λειτουργίας, τις αρετές και τις εγγενείς αδυναμίες του δικτύου. Πρέπει να τονιστεί ότι απώτερος στόχος, ο οποίος και επιτεύχθη, δεν ήταν η καταγραφή ειδικών αποτελεσμάτων που έχουν ισχύ μόνο για έναν τύπο δικτύου, αλλά η εξαγωγή κρίσιμων γενικών συμπερασμάτων για τις παραμέτρους που καθορίζουν την εν γένει λειτουργία των δικτύων ασυρμάτων τηλεπικοινωνιών.

□

Κεφάλαιο 5

Διαχείριση Ραδιοπόρων σε Δίκτυα Φασματικής Εξάπλωσης WCDMA

5.1 Εισαγωγή

Το HSPA είναι ένα κυψελωτό δίκτυο μεταγωγής πακέτων, το οποίο υλοποιείται πάνω από τα υπάρχοντα WCDMA UMTS δίκτυα, επιτυγχάνοντας υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης και μειωμένες καθυστερήσεις μετάδοσης. Υπεύθυνη για την προτυποποίηση του HSPA είναι η 3GPP. Εμπορικά υπάρχουν ήδη πολλά δίκτυα HSPA, μέσω των οποίων καθίσταται ουσιαστικά εφικτή η παροχή υπηρεσιών που απαιτούν υψηλή ποιότητα υπηρεσίας, κάτι που τα προγενέστερα δίκτυα δεν ήταν σε θέση να προσφέρουν ή να εγγυηθούν.

Η συνεχώς αυξανόμενη απαίτηση για υπηρεσίες υψηλού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων προϋποθέτει μηχανισμούς που εγγυώνται την ποιότητα υπηρεσίας στο HSPA, όσον αφορά στη μέση καθυστέρηση πακέτου, στην απόκλιση καθυστέρησης (delay jitter), στους αλγόριθμους του κινητού τερματικού και στους αλγόριθμους δρομολόγησης των δεδομένων. Η δρομολόγηση δεδομένων για τις ασύρματες υπηρεσίες δεδομένων υψηλής ταχύτητας έχει μελετηθεί τόσο για την κάτω, όσο και για την άνω ζεύξη [55, 105, 106, 107]. Ειδικά για το Enhanced Uplink, στις εργασίες προτείνονται διάφορα σχήματα δρομολόγησης, που εστιάζουν στη βελτίωση της επίδοσης του συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά των προσφερόμενων υπηρεσιών. Εξάλλου, το κανάλι E-DCH (Enhanced Dedicated Channel) για τη μετάδοση δεδομένων στην άνω ζεύξη υποστηρίζει ταχεία δρομολόγηση που εκτελείται στο σταθμό βάσης, με σκοπό την ελαχιστοποίηση του χρόνου λήψης αποφάσεων και συνεπώς της υφιστάμενης καθυστέρησης των πακέτων. Παρ' όλα αυτά, η αλληλεπίδραση των προτεραιοτήτων ανάμεσα στα δεδομένα των υπηρεσιών του κάθε χρήστη και στα πακέτα που βρίσκονται σε αναμονή στην προσωρινή μνήμη (buffer) δεν έχει μελετηθεί. Σε αυτό το κεφάλαιο θα μελετήσουμε το πρόβλημα της ταυτόχρονης εξυπηρέτησης πολλαπλών υπηρεσιών πραγματικού χρόνου στους χρήστες της άνω ζεύξης, καθώς και την πολυπλεξία τυπικών υπηρεσιών του HSPA σε ένα E-DCH. Προτείνουμε νέους αλγόριθμους δρομολόγησης, οι οποίοι λαμβάνουν

υπόψη την ευαισθησία ως προς την καθυστέρηση της κάθε ροής δεδομένων, καθώς και την πραγματική καθυστέρηση των υπό αναμονή δεδομένων του buffer. Η εκτίμηση της επίδοσης των προτεινόμενων αλγορίθμων θα γίνει μέσω προσομοιωτικών σεναρίων για διάφορους τύπους υπηρεσιών πραγματικού χρόνου, με στόχο τη βελτίωση του μέσου και μέγιστου χρόνου καθυστέρησης στη μετάδοση των πακέτων.

5.2 Επισκόπηση της Βιβλιογραφίας

Σε γενικές γραμμές, οι αλγόριθμοι δρομολόγησης που προτείνονται στη βιβλιογραφία για τα ασύρματα δίκτυα, μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο κλάσεις: στους αλγόριθμους με βάση το ρυθμό μετάδοσης και σε αυτούς που οδηγούνται από την καθυστέρηση (delay driven).

Η πρώτη κατηγορία αποτελείται από αυτούς τους δρομολογητές που στόχο έχουν την παροχή ενός εγγυημένου ρυθμού μετάδοσης για κάθε ροή δεδομένων, όπως είναι ο Idealized Wireless Fair Queuing (IWFQ) [108], ο Channel condition Independent Fair Queuing (CIF-Q) [109] και ο Server Based Fairness Approach (SBFA) [110]. Όλα αυτά τα σχήματα αναπτύχθηκαν επί της ίδιας βάσης: εξομοιώνουν έναν Generalized Processor Sharing (GPS) δρομολογητή [111] σε ένα περιβάλλον χωρίς λάθη και τον χρησιμοποιούν σαν μοντέλο αναφοράς για την πραγματική ανάθεση πόρων. Η ανάθεση για τις ροές που έχουν συνολικό ρυθμό μετάδοσης μικρότερο του ονομαστικού επιτυγχάνεται σε επόμενους γύρους δρομολόγησης.

Τα σχήματα δρομολόγησης που παρουσιάζονται στα [112] και [113] είναι βελτιστοποιημένα για συστήματα WCDMA. Αυτά τα σχήματα είναι παρόμοια με το Wireless Fair Queuing, καθώς χρησιμοποιούν μία μεταβλητή για απόδοση προτεραιοτήτων που ονομάζεται πιστωτική μονάδα (credit), που ουσιαστικά ισούται με τη διαφορά ανάμεσα στο ονομαστικό και στον πραγματικό ρυθμό μετάδοσης της υπηρεσίας. Οι συνδέσεις με τις περισσότερες πιστωτικές μονάδες εξυπηρετούνται κατά προτεραιότητα.

Ο δρομολογητής Channel-State Aware Fair Throughput (CSAFT) [107] βασίζεται επίσης στο ρυθμό μετάδοσης. Ωστόσο ασχολείται με το θέμα από μία διαφορετική οπτική γωνία, αφού είναι σχεδιασμένος για να προσφέρει μία ανταλλαγή μεταξύ της δικαιοσύνης ανάμεσα στους χρήστες και στη μεγιστοποίηση της ρυθμοαπόδοσης της κυψέλης.

Η δεύτερη κατηγορία, αυτή των δρομολογητών που οδηγούνται από την καθυστέρηση, αποτελείται από δρομολογητές που στόχο έχουν να μεταδίδουν τα πακέτα της κάθε ροής πριν τη λήξη του αντίστοιχου ορίου καθυστέρησης. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι ο Feasible Earliest Due Date (FEDD) που προτείνεται στο [114] και ο Proactive EDD (PEDD) [115]. Και οι δύο αυτοί αλγόριθμοι υποθέτουν τέλεια γνώση του καναλιού. Ο Realistic PEDD (R-PEDD) και ο R-PEDD+ [116] είναι παραλλαγές του βασικού EDD σχήματος που απαιτούν ξεχωριστούς μηχανισμούς ανίχνευσης του καναλιού για την ανάκτηση της απαραίτητης πληροφορίας για τη ζεύξη. Ο δρομολογητής που παρουσιάζεται στο [117] βασίζει τις αποφάσεις του στην καθυστέρηση πακέτου κάθε ροής και στην κλάση υπηρεσιών στην οποία ανήκει κάθε ροή. Τέλος, ο Modified Largest Weighted Delay First (MLWDF) [118] ανήκει και αυτός σε αυτήν την κατηγορία και η πολιτική του λαμβάνει υπόψη τις εκάστοτε συνθήκες του καναλιού και την κατάσταση των ουρών.

5.3 Μοντελοποίηση του Συστήματος και Διατύπωση του Προβλήματος

Μολονότι η 3GPP χρησιμοποιεί τον όρο Enhanced Dedicated Channel, εν τούτοις ο όρος High Speed Uplink Packet Access (HSUPA) έχει επικρατήσει στη βιομηχανία για την περιγραφή του E-DCH ως το δυαδικό αντίστοιχο του High Speed Downlink Packet Access (HSDPA). Τόσο το HSDPA, όσο και το E-DCH υλοποιούν χρονικό διάστημα μετάδοσης (TTI) της τάξης των 2 ms και ταχεία δρομολόγηση στο Node B, η οποία ελαχιστοποιεί την καθυστέρηση κατά τη λήψη αποφάσεων. Από την άλλη πλευρά, το E-DCH είναι ένα αποκλειστικό κανάλι (dedicated channel) που δεν υποστηρίζει προσαρμοστική διαμόρφωση, ενώ υποστηρίζει μεταβλητό παράγοντα εξάπλωσης, καθώς και ταχεία υβριδική επανεκπομπή και ταχύ έλεγχο ισχύος [4, 119, 120].

Για την ορθή λειτουργία του E-DCH, ένας αριθμός νέων καναλιών είναι απαραίτητος. Το Enhanced Dedicated Physical Data Channel (E-DPDCH) χρησιμοποιείται για τη μεταφορά δεδομένων, ενώ η απαιτούμενη σηματοδότηση μεταφέρεται από το Enhanced Dedicated Physical Control Channel (E-DPCCH). Ανά κινητό τερματικό επιτρέπεται η απόδοση ενός και μόνο ενός E-DCH, ενώ περισσότερες της μίας υπηρεσίας είναι δυνατόν να πολυπλεχθούν σε ένα E-DCH.

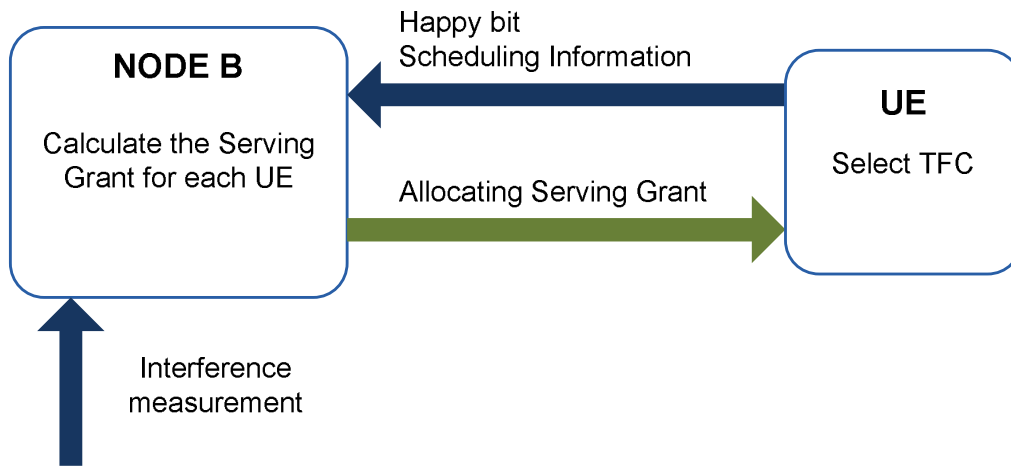
5.3.1 Δρομολόγηση στο Node B

Η διαδικασία που ακολουθείται από το Node B για τη δρομολόγηση των πακέτων φαίνεται στο σχήμα 5.1. Ο πόρος του Node B που διαμοιράζεται και καταναλώνεται κατά τη δρομολόγηση πακέτων στην άνω ζεύξη είναι η ανύψωση πάνω από το θερμικό θόρυβο (uplink noise rise). Ο σταθμός βάσης υπολογίζει την παρεμβολή που προκαλείται από τους χρήστες της κυψέλης στην κεραία λήψης του και ανθροίζει σε αυτήν την παρεμβολή από άλλες κυψέλες. Η ανύψωση που προκαλούν αυτές οι πηγές σε σχέση με το θερμικό θόρυβο δεν πρέπει να υπερβαίνει κάποιο κατώφλι, ώστε ο σταθμός βάσης να παραμένει λειτουργικός και να λαμβάνονται σωστά τα μεταδιδόμενα πακέτα. Ο αλγόριθμος δρομολόγησης πρέπει ουσιαστικά να καθορίσει την ισχύ μετάδοσης κάθε κινητού τερματικού (άδεια εξυπηρέτησης - serving grant) για την άνω ζεύξη και επομένως έμμεσα το ρυθμό μετάδοσης κάθε τερματικού με τέτοιο τρόπο ώστε η ολική ανύψωση να παραμένει μικρότερη από το κατώφλι που έχει τεθεί.

Επιπροσθέτως, ο δρομολογητής οφείλει να συνυπολογίσει τις απαιτήσεις σε ποιότητα για κάθε ροή δεδομένων. Για την επίτευξη αυτού του στόχου είναι απαραίτητο ο σταθμός βάσης να λαμβάνει πληροφορία υπό τη μορφή ανάδρασης από τα κινητά τερματικά.

5.3.1.1 Πληροφορίες Δρομολόγησης

Σε κάθε μετάδοση δεδομένων τα τερματικά εκπέμπουν και το λεγόμενο “happy bit” ώστε να ενημερώσουν εάν απαιτούν περισσότερους πόρους ή όχι. Ένα τερματικό δηλώνει μη ικανοποιημένο όταν συντρέχουν οι ακόλουθες συνθήκες [119]:



Σχήμα 5.1: Διαδικασία δρομολόγησης στο Node B

1. Το τερματικό ήδη μεταδίδει με το μέγιστο εφικτό ρυθμό υπό την παρούσα απόδοση ισχύος.
2. Έχει επάρκεια ισχύος ώστε να εκπέμψει σε υψηλότερη στάθμη.
3. Με την κατάσταση στην οποία βρίσκεται η προσωρινή μνήμη, θα απαιτηθεί χρόνος μεγαλύτερος από αυτόν που θέτει η σταθερά του προτύπου *Happy_Bit_Delay_Condition* σε ms για να εκκενωθεί υπό την παρούσα απόδοση ισχύος.

Ο αλγόριθμος δρομολόγησης στο σταθμό βάσης ενδέχεται να χρησιμοποιεί και αναφορές πληροφοριών δρομολόγησης (SI - Scheduling Information reports) συμπληρωματικά με το “happy bit”. Οι αναφορές αυτές αποστέλλονται από το τερματικό στο σταθμό βάσης, είτε περιοδικά, είτε μετά από σχετικό αίτημα από την πλευρά του δικτύου [4, 119, 120].

Κάθε αναφορά πληροφοριών δρομολόγησης περιέχει τα ακόλουθα στοιχεία:

1. Ένα αναγνωριστικό για το λογικό κανάλι που κατέχει την υψηλότερη προτεραιότητα (*Highest priority Logical channel ID - HLID*), με μέγεθος 4 bits. Στην περίπτωση που υπάρχουν δύο ή περισσότερα λογικά κανάλια με την ίδια υψηλή προτεραιότητα, αναφέρεται το κανάλι με τα πιο πολλά δεδομένα στην προσωρινή μνήμη.
2. Τη συνολική κατάσταση της προσωρινής μνήμης του E-DCH (*Total E-DCH Buffer Status - TEBS*), με μέγεθος 5 bits.
3. Την κατάσταση της προσωρινής μνήμης του λογικού καναλιού με την υψηλότερη προτεραιότητα (*Highest priority Logical channel Buffer Status - HLBS*), με μέγεθος 4 bits. Αναφέρεται ως κλάσμα επί του TEBS.
4. Το περιθώριο ισχύος του τερματικού (*UPH*), που υποδηλώνει τη δυνατότητα του τερματικού να αυξήσει την ισχύ εκπομπής του, με μέγεθος 5 bits.
5. Τις απώλειες διάδοσης εξυπηρετούσας και γειτονικής κυψέλης (*Serving and Neighbor Path Loss - SNPL*). Αυτή η πληροφορία μπορεί να χρησιμοποιηθεί από το Node B για

υποβοήθηση στην εκτίμηση των διακυβελικών παρεμβολών. Το μέγεθος της πληροφορίας αυτής είναι 5 bits.

5.3.1.2 Άδεια Εξυπηρέτησης

Βάσει των πληροφοριών δρομολόγησης που λαμβάνονται από το τερματικό, ο αλγόριθμος δρομολόγησης αποδίδει προτεραιότητες βάσει υπολογισμών για το ποιες ροές έχουν την υψηλότερη προτεραιότητα. Στο επόμενο στάδιο, συνεκτιμώντας τις υφιστάμενες παρεμβολές, ο δρομολογητής αναθέτει ισχύ εκπομπής (άδεια εξυπηρέτησης) σε κάθε UE. Κατόπιν, το κάθε τερματικό, ανάλογα με την εκάστοτε ανάθεση, επιλέγει τον κατάλληλο συνδυασμό σχήματος μετάδοσης (Transport Format Combination - TFC) που αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο κατώφλι λόγου σήματος προς θόρυβο και παρεμβολή (Signal to Interference plus Noise Ratio - SINR) και στο μέγιστο επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσης πληροφορίας.

5.3.2 Διατύπωση του Προβλήματος

Η μετάδοση των HLID και HLBS πληροφορεί τον αλγόριθμο δρομολόγησης για το λογικό κανάλι με την υψηλότερη προτεραιότητα μεταξύ των ροών ενός τερματικού και την αντίστοιχη ποσότητα δεδομένων στην προσωρινή μνήμη. Υποθέτοντας ότι τα λογικά κανάλια έχουν αποδοθεί σε ξεχωριστές ροές υπηρεσιών, ο δρομολογητής στο σταθμό βάσης έχει θεωρητικά τη δυνατότητα να αναγνωρίσει την υπηρεσία σε κάθε λογικό κανάλι. Επομένως, ένας ορθολογικά δομημένος αλγόριθμος θα ήταν ικανός να εξυπηρετήσει τις συνδέσεις VoIP πριν τις αντίστοιχες FTP. Παρ' όλα αυτά, το μόνο κριτήριο που έχει ο δρομολογητής για να ταξινομήσει σε φθίνουσα προτεραιότητα τις συνδέσεις ίδιας κατηγορίας, είναι η ποσότητα των δεδομένων στην προσωρινή μνήμη. Δεν υπάρχει δηλαδή η ευχέρεια χρήσης δεδομένων σχετικών με την ευαισθησία ως προς την καθυστέρηση κάθε ροής, ούτε της πραγματικής καθυστέρησης στην οποία υπόκεινται τα προσωρινά αποθηκευμένα δεδομένα. Λαμβάνοντας υπόψη τις υπηρεσίες πραγματικού χρόνου που έχουν αυστηρά όρια καθυστέρησης, είναι απαραίτητη η υλοποίηση ενός αλγορίθμου ικανού να παρέχει διαφοροποίηση ποιότητας υπηρεσίας βάσει των κατωφλίων καθυστέρησης. Η υπάρχουσα δομή των πληροφοριών δρομολόγησης (και επομένως και οι αντίστοιχοι δρομολογητές) είναι σχεδιασμένη για δρομολογητές εγγυημένου ρυθμού μετάδοσης, όπως ο [111]. Για την επίτευξη της διαφοροποίησης της ποιότητας υπηρεσίας βάσει των κατωφλίων καθυστέρησης, είναι απαραίτητη η εισαγωγή πεδίων σχετικών με το χρόνο στις πληροφορίες δρομολόγησης.

5.4 Ο Δρομολογητής Δυναμικής Προτεραιότητας – DPS

Σε αυτήν την παράγραφο θα προταθούν και θα αξιολογηθούν κάποιες τροποποιήσεις επί του προτύπου, με στόχο να λαμβάνονται υπόψη η ευαισθησία της κάθε υπηρεσίας ως προς την καθυστέρηση και η τρέχουσα κατάστασή της κατά τη λήψη της απόφασης δρομολόγησης.

5.4.1 Προτεινόμενες Τροποποιήσεις στο Πρότυπο

Για την εκπλήρωση των προαναφερθέντων στόχων, θεωρούμε μία νέα παράμετρο στις πληροφορίες δρομολόγησης, την *Προτεραιότητα Λογικού Καναλιού (Logical Channel Priority - LCP)*, που υπολογίζεται στο UE για όλες τις E-DCH ροές. Η LCP ορίζεται ως ο λόγος της καθυστέρησης του πρώτου πακέτου στην προσωρινή μνήμη της ροής (head of line packet delay), προς το αντίστοιχο κατώφλι καθυστέρησης, όπως φαίνεται στην εξίσωση 5.1.

$$LCP = \frac{HOL_packet_delay}{flow_delay_threshold} \quad (5.1)$$

Τα στοιχεία της LCP αποτελούν το μέσο για την απόδοση προτεραιοτήτων στις συνδέσεις.

5.4.1.1 Τροποποίηση του HLID

Σε σχέση με το HLID προτείνεται η ακόλουθη τροποποίηση: το UE, στη θέση των 4 bits του HLID, μεταδίδει τη μεγαλύτερη LCP (Higher LCP - HLCP), που προσδιορίζει τη ροή με την υψηλότερη προτεραιότητα ανάμεσα σε όλες τις ροές του UE. Η HLCP μπορεί επίσης να αντιστοιχηθεί σε 4 bits, σύμφωνα με τον πίνακα 5.1.

Υιοθετώντας αυτό το μετρικό, ο δρομολογητής αποκτά τη δυνατότητα για απευθείας σύγκριση των ροών ανάμεσα σε διαφορετικά τερματικά, βάσει ενός κριτηρίου που συνυπολογίζει την ευαισθησία ως προς την καθυστέρηση των υπηρεσιών, όπως επίσης και την κατάσταση των ουρών των ροών.

Πίνακας 5.1: Αντιστοιχία HLCP

HLCP				Μεταδιδόμενη HLCP (4 bits)
Κενή προσωρινή μνήμη				0000
Av	0,00	≤ HLCP <	0,07	0001
Av	0,07	≤ HLCP <	0,14	0010
Av	0,14	≤ HLCP <	0,21	0011
Av	0,21	≤ HLCP <	0,29	0100
Av	0,29	≤ HLCP <	0,36	0101
Av	0,36	≤ HLCP <	0,43	0110
Av	0,43	≤ HLCP <	0,50	0111
Av	0,50	≤ HLCP <	0,57	1000
Av	0,57	≤ HLCP <	0,64	1001
Av	0,64	≤ HLCP <	0,71	1010
Av	0,71	≤ HLCP <	0,79	1011
Av	0,79	≤ HLCP <	0,86	1100
Av	0,86	≤ HLCP <	0,93	1101
Av	0,94	≤ HLCP <	1,00	1110
Av	1,00	≤ HLCP		1111

5.4.1.2 Τροποποίηση του “happy bit”

Επιπροσθέτως, τροποποιείται η τρίτη συνθήκη του “happy bit” (όπως αυτή έχει περιγραφεί στην παράγραφο 5.3.1.1) ως εξής: τα δεδομένα στην προσωρινή μνήμη της κάθε ροής απαιτούν περισσότερο χρόνο για να μεταδοθούν από το αντίστοιχο κατώφλι καθυστέρησης, υπό την παρούσα άδεια εξυπηρέτησης. Επομένως, αντί για τη χρήση του Happy_Bit_Delay_Condition, εισάγεται μία νέα μεταβλητή, η οποία προσαρμόζεται δυναμικά στις απαιτήσεις κάθε ροής. Η παράμετρος αυτή είναι ήδη γνωστή σε κάθε τερματικό και επομένως δε γεννάται καμία ανάγκη πλεονάζουσας σηματοδότησης.

5.4.2 Ανάλυση του DPS

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος Dynamic Priority Scheduler (DPS) βασίζεται στις προαναφερθείσες τροποποιήσεις και λαμβάνει υπόψη την πληροφορία HLCP. Παρακάτω περιγράφεται η πορεία εκτέλεσης του αλγορίθμου, στην οποία δε συμμετέχουν καθόλου οι συνδέσεις με άδειες ουρές:

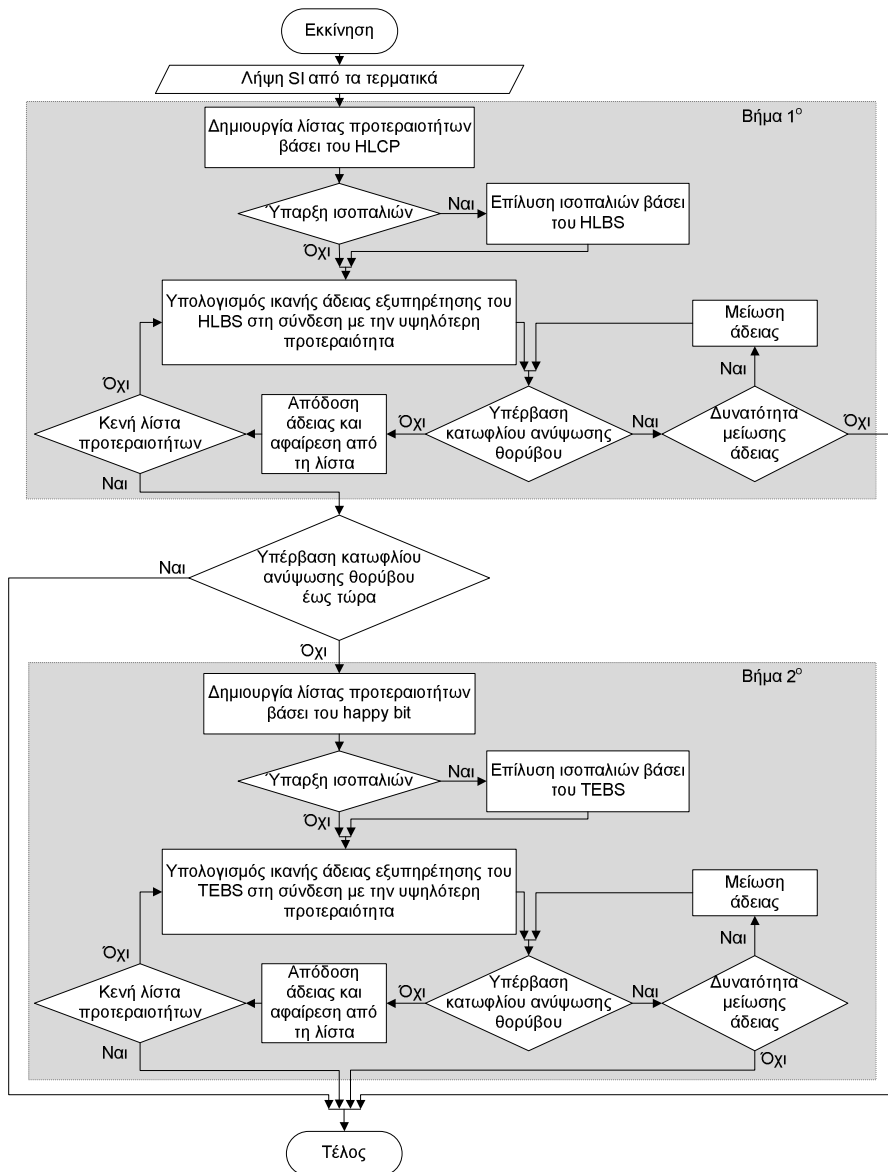
1. Βήμα πρώτο:

- Αποδίδονται προτεραιότητες στις E-DCH συνδέσεις, ανάλογα με την HLCP που έχει αναφέρει η κάθε μία. Οι ισοπαλίες επιλύονται με βάση το HLBS.
- Ξεκινώντας από τη σύνδεση υψηλότερης προτεραιότητας, αποδίδεται στην κάθε ροή (i) μία άδεια εξυπηρέτησης ικανή για την εξυπηρέτηση του αντίστοιχου HLBS, ή (ii) την υψηλότερη δυνατή άδεια εξυπηρέτησης, δεδομένου ότι το UE έχει επαρκές απόθεμα ισχύος και δεν προκύπτει υπέρβαση του κατωφλίου ανύψωσης θορύβου.

2. Βήμα δεύτερο - καταμερισμός εναπομείνουσας χωρητικότητας (στην περίπτωση που στο πρώτο βήμα δεν ξεπεράστηκε το κατώφλι ανύψωσης θορύβου). Για όλες τις E-DCH συνδέσεις που έχουν περισσότερα δεδομένα στην προσωρινή μνήμη από όσα μπορούν να μεταδοθούν στην επόμενη χρονοσχισμή με την άδεια εξυπηρέτησης που αποδόθηκε στο προηγούμενο βήμα, και δεδομένου ότι το UE έχει επαρκές απόθεμα ισχύος για να χρησιμοποιήσει μία επαυξημένη άδεια εξυπηρέτησης:

- Αποδίδονται προτεραιότητες στις E-DCH συνδέσεις, ανάλογα με το αντίστοιχο “happy bit”. Οι ισοπαλίες επιλύονται με βάση το TEBS.
- Ξεκινώντας από τη ροή υψηλότερης προτεραιότητας, αποδίδεται στην κάθε ροή (i) μία άδεια εξυπηρέτησης ικανή για την εξυπηρέτηση του αντίστοιχου TEBS, ή (ii) την υψηλότερη δυνατή άδεια εξυπηρέτησης, δεδομένου ότι το UE έχει επαρκές απόθεμα ισχύος και δεν προκύπτει υπέρβαση του κατωφλίου ανύψωσης θορύβου.

Στο σχήμα 5.2 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του προτεινόμενου αλγορίθμου δρομολόγησης.



Σχήμα 5.2: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου DPS

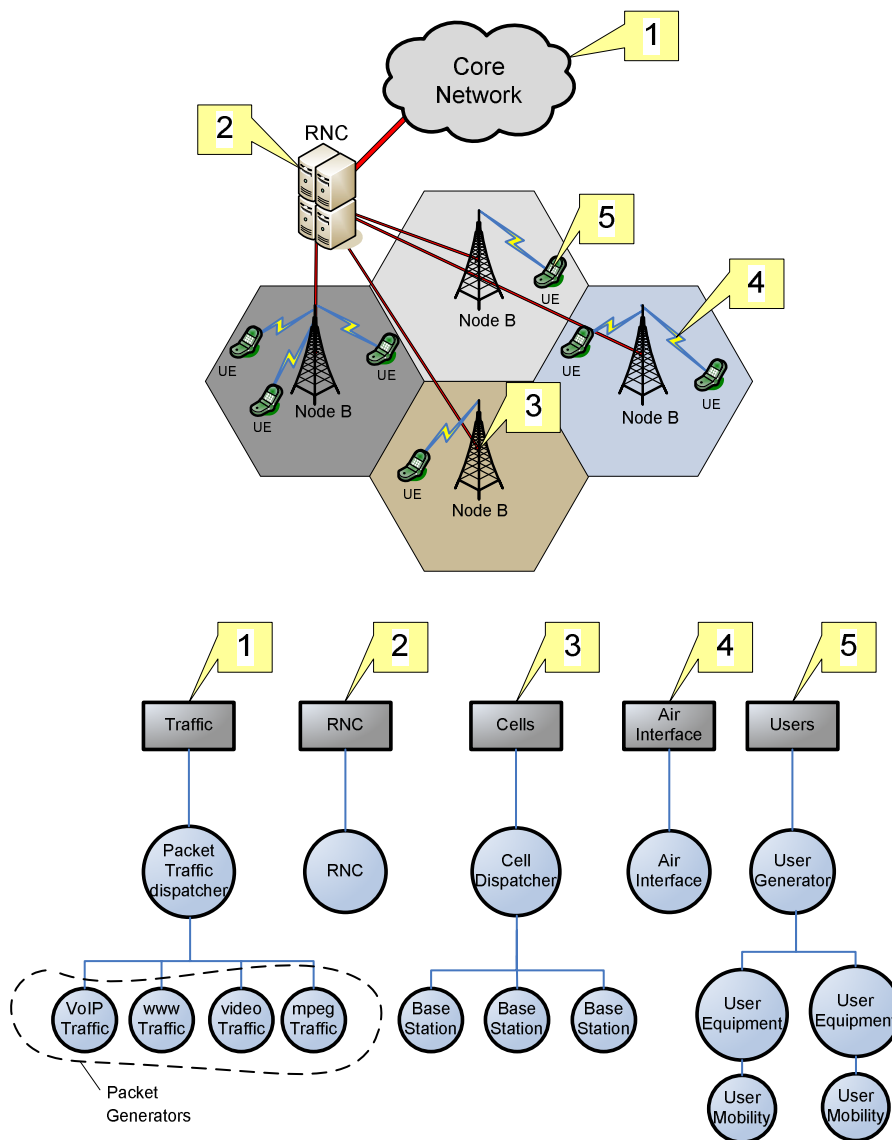
5.4.3 Εκτίμηση Επίδοσης Αλγορίθμου

Για τη μελέτη της επίδοσης του HSPA, η διεξαγωγή εκτενών προσομοιώσεων κατατάσσεται ανάμεσα στις βέλτιστες μεθόδους. Σε αυτήν την περίπτωση το εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη του προσομοιωτικού μοντέλου, είναι το OPNET [98].

5.4.3.1 Περιγραφή του Προσομοιωτικού μοντέλου

Στον προσομοιωτή υλοποιήθηκαν τόσο η κάτω, όσο και η άνω ζεύξη, έτσι ώστε να προκύψουν αναλυτικά και ακριβή αποτελέσματα. Όλα τα θεμελιώδη στοιχεία (RNC, Node B, ραδιοδιεπαφή, κινητά τερματικά κ.τ.λ.) ενός πλήρους κυψελωτού δικτύου υλοποιήθηκαν σε τέτοιο βαθμό, ώστε να εξάγουμε αποτελέσματα με επαρκή ακρίβεια. Ακόμα, το υπό εξέταση

δίκτυο είναι μονοκύβελο και τα κινητά τερματικά δεσμεύονται ως προς την κίνησή τους εντός της περιοχής κάλυψης της κυψέλης αυτής. Παρόλα αυτά, οι 6 γειτονικές κυψέλες έχουν επίσης προσομοιωθεί εικονικά, έτσι ώστε να λαμβάνονται υπόψη τα φαινόμενα διακυβελικών παρεμβολών. Η λέξη “εικονικά” αναφέρεται στο ότι δεν είναι δυνατόν να εκτελεστεί διαπομπή μεταξύ της κεντρικής κυψέλης και των έξι γειτονικών της, ωστόσο οι κυψέλες αυτές εξυπηρετούν κανονικά το φορτίό τους και δημιουργούν τις αντίστοιχες παρεμβολές. Επίσης έχει ληφθεί υπόψη η κινητικότητα των τερματικών (τόσο οχηματική, όσο και πεζή), σύμφωνα με το [40]. Στο σχήμα 5.3 φαίνεται τόσο η αντιστοιχία των οντοτήτων του δικτύου στα μπλοκ του προσομοιωτή, όσο και η γενική διασύνδεση των τμημάτων του προσομοιωτή.



Σχήμα 5.3: Η δομή του προσομοιωτή και η αντιστοιχία με τις οντότητες του δικτύου

Στο μοντέλο διάδοσης συνυπολογίζονται οι απώλειες διάδοσης (propagation loss), σκίασης (shadowing) και οι ταχείες διαλείψεις (fast fading), προσαρμοσμένες σε αστικό περιβάλλον. Λαμβάνονται υπόψη διαλείψεις Rayleigh [20], ενώ η φασματική πυκνότητα ισχύος

Doppler μοντελοποιείται σύμφωνα με τον τύπο του Jakes [121]. Τα δείγματα του καναλιού παρήχθησαν εκ των προτέρων μέσω μιας υλοποίησης του παραπάνω μοντέλου στο Matlab. Η αναλυτική μεθοδολογία για την εξαγωγή αυτών των δειγμάτων μπορεί να βρεθεί στο [39]. Η προσομοιωτική διάταξη συμπληρώνεται από μία γεννήτρια κίνησης, η οποία δύναται να παράξει αρκετά είδη τηλεπικοινωνιακής κίνησης. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιας κίνησης είναι το VoIP [122] και το βίντεο. Κάποιες από τις υπηρεσίες υλοποιήθηκαν βάσει των αντίστοιχων προτύπων (όπως π.χ. το VoIP), ενώ για κάποιες άλλες χρησιμοποιήθηκαν πραγματικά αρχεία κίνησης (trace files) (όπως π.χ. για το H263 βίντεο).

Κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης του μοντέλου, ελήφθησαν υπόψη κάποιες αναγκαίες απλοποιήσεις. Πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι αυτές οι απλοποιήσεις οδηγούν σε μία ελάχιστη υπερεκτίμηση της επίδοσης του συστήματος. Καταρχάς, η διάρκεια κάθε συνόδου είναι άπειρη και το μόνο μέρος που έχει τη δυνατότητα να διακόψει τη σύνδεση για οποιονδήποτε λόγο, είναι το κινητό τερματικό. Επίσης, θεωρείται ότι όλα τα πακέτα που εκπέμπονται αποκωδικοποιούνται σωστά στο δέκτη και τέλος ότι οι πληροφορίες δρομολόγησης εκπέμπονται χωρίς καμία καθυστέρηση από το τερματικό στο σταθμό βάσης.

Οι παράμετροι της προσομοίωσης συνοψίζονται στον πίνακα 5.2.

Πίνακας 5.2: Παράμετροι προσομοίωσης

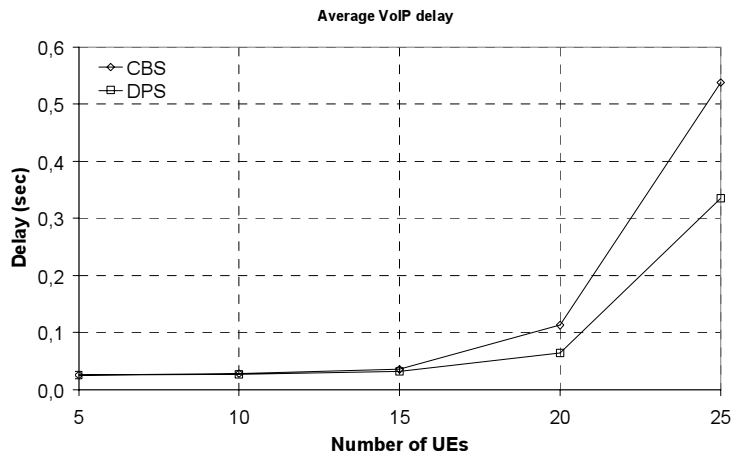
Συχνότητα φέροντος	2.1 GHz
Εύρος ζώνης καναλιού	5 MHz
Διάρκεια χρονοσχιsmής TTI	2 ms
Ακτίνα κυψέλης	800 m
Μοντέλο απωλειών διάδοσης	$L = 128.1 + 37.6 * \log_{10} R$
Κατανομή αργών διαλείψεων	Λογαριθμοκανονική
Τυπική απόκλιση αργών διαλείψεων	8.0 dB
Πυκνότητα θερμικού θορύβου	-174 dBm/Hz
Παράγοντας ετεροκυψελικής παρεμβολής	0.5
Ισχύς εκπομπής τερματικών	19 – 23 dBm
Κατώφλι ανύψωσης θερμικού θορύβου	6 dB
Γεννήτρια κίνησης (κατώφλι καθυστέρησης [42])	A-law G.711 VoIP 12 kbps (100 ms), H.263 video 60 kbps (200 ms)
Μοντέλο κινητικότητας	ITU-Veh / ITU-Ped
Επαναλήψεις ανά προσομοίωση	5
Διάρκεια προσομοίωσης ανά επανάληψη	3600 s

5.4.3.2 Αποτελέσματα

Για να εκτιμηθεί η επίδοση του αλγορίθμου, θα χρησιμοποιηθεί το προσομοιωτικό μοντέλο που περιγράφηκε. Η εκκίνηση γίνεται με την εισαγωγή 5 UEs στο σύστημα και εν συνεχεία εισάγονται 5 ακόμα σε κάθε επόμενο βήμα, μέχρι τα 25 τερματικά. Για λόγους σύγκρισης, την ίδια ακριβώς διάταξη θα κληθεί να εξυπηρετήσει και ένα δρομολογητής που βασίζεται σε κλάσεις υπηρεσιών (Class Based Scheduler - CBS) και λαμβάνει αποφάσεις με βάση τις πληροφορίες δρομολόγησης, όπως αυτές περιγράφονται στα αντίστοιχα πρότυπα της 3GPP.

Ο CBS αλγόριθμος αποδίδει προτεραιότητες ανάλογα με τον τύπο της υπηρεσίας που καλείται να διαχειριστεί (για παράδειγμα, δρομολογεί τις VoIP συνδέσεις πριν τις αντίστοιχες βίντεο). Ανάμεσα σε κλήσεις ίδιου τύπου, η δρομολόγηση γίνεται με βάση της πληροφορίες δρομολόγησης που λαμβάνονται από τα τερατικά.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνονται στα σχήματα 5.4 έως 5.8. Τα δύο πρώτα σχήματα απεικονίζουν τη μέση καθυστέρηση την οποία υφίστανται τα πακέτα VoIP και βίντεο αντίστοιχα, για έναν ολοένα αυξανόμενο αριθμό χρηστών στην κυψέλη. Όπως είναι αναμενόμενο, καθώς εισέρχονται περισσότερα UEs, η μέση καθυστέρηση ακολουθεί ανοδική πορεία για όλες τις ροές. Παρόλα αυτά, ο προτεινόμενος αλγόριθμος επιτυγχάνει μία σημαντική μείωση και στις δύο περιπτώσεις. Συνυπολογίζοντας την πληροφορία του HLCP, ο DPS είναι ικανός να διαχειριστεί ορθότερα την ευαισθησία ως προς το χρόνο της κάθε ροής, καθώς όσο αυξάνεται η αναμονή στην ουρά του κινητού τερατικού, τόσο βελτιώνεται και η προτεραιότητα που του αποδίδεται. Αυτό το χαρακτηριστικό επιτρέπει στον DPS να υποστηρίξει έναν σημαντικά μεγαλύτερο αριθμό συνδέσεων σε σχέση με τον CBS, διατηρώντας παράλληλα την απαιτούμενη ποιότητα υπηρεσίας.



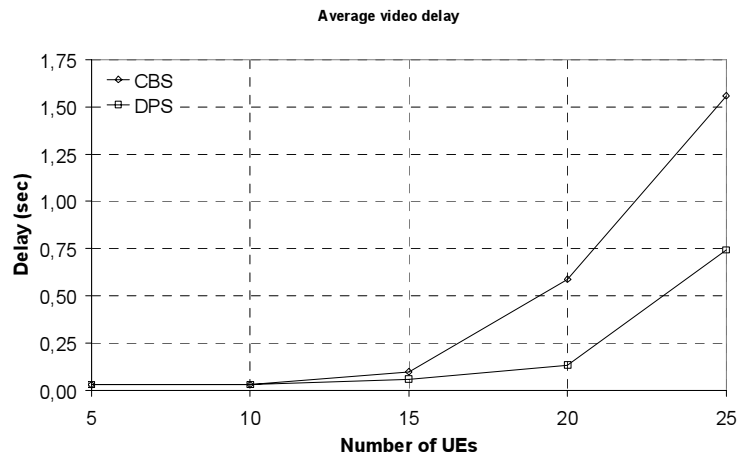
Σχήμα 5.4: Μέση καθυστέρηση πακέτων VoIP

Το ίδιο συμπέρασμα επιβεβαιώνεται και από τα σχήματα 5.6 και 5.7, όπου επισημαίνεται η μέγιστη καθυστέρηση εντός της οποίας μεταδίδεται το 95% των VoIP και βίντεο πακέτων αντίστοιχα.

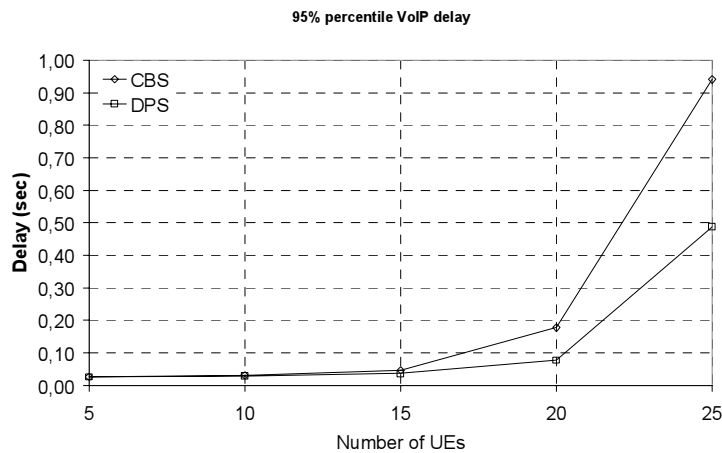
Τέλος, στο σχήμα 5.8 αποτυπώνεται η ρυθμοαπόδοση της κυψέλης για τους δύο αλγόριθμους. Οι δύο αλγόριθμοι κινούνται στα ίδια περίπου επίπεδα (ο DPS φαίνεται να αποδίδει ελάχιστα καλύτερα), ενώ ταυτόχρονα βελτιώνει και το σύστημα όσον αφορά στην καθυστέρηση της μετάδοσης των δεδομένων, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως.

5.4.4 Συμπεράσματα

Σε αυτήν την παράγραφο προτάθηκε ένας νέος αλγόριθμος δρομολόγησης, ο Dynamic Priority Scheduler (DPS), ο οποίος κάνει χρήση των πληροφοριών δρομολόγησης που αποστέλλουν τα UEs στο σταθμό βάσης για να υπολογίσει τις αντίστοιχες προτεραιότητες και αποδόσεις



Σχήμα 5.5: Μέση καθυστέρηση πακέτων video

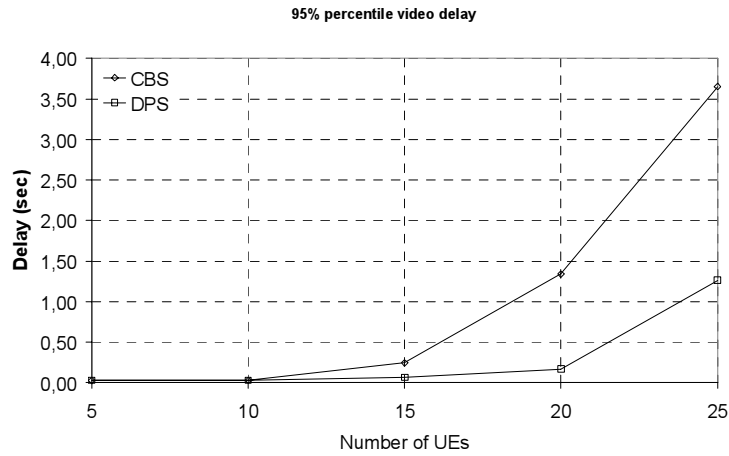


Σχήμα 5.6: 95% καθυστέρηση πακέτων VoIP

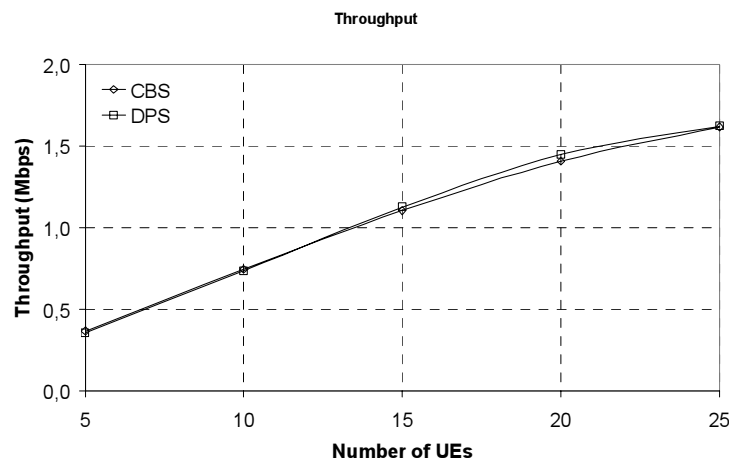
πόρων εκ μέρους του συστήματος. Στην πραγματικότητα ο DPS διορθώνει το σημαντικότερο μειονέκτημα των υπάρχοντων αλγορίθμων δρομολόγησης, το οποίο είναι η απουσία πληροφορίας σε σχέση με την εγγενή ευαισθησία ως προς την καθυστέρηση που παρουσιάζει κάθε ροή δεδομένων, και την πραγματική καθυστέρηση στην οποία υπόκειται η αντίστοιχη ουρά αναμονής. Επιπλέον, εισήχθησαν τα κατάλληλα μετρικά στις πληροφορίες δρομολόγησης, που στηρίζονται σε απαραίτητες μεταβολές στα 3GPP πρότυπα. Η επίδοση του αλγορίθμου εκτιμήθηκε μέσω προσομοιώσεων, οι οποίες έδειξαν σημαντική μείωση στην καθυστέρηση σε ένα περιβάλλον υπηρεσιών πραγματικού χρόνου εν συγκρίσει με έναν συμβατικό CBS αλγόριθμο, ενώ παράλληλα υπήρξε και μία οριακή βελτίωση της ρυθμοαπόδοσης του συστήματος.

5.5 Ο Δρομολογητής Δυναμικής Προτεραιότητας Μέσης προτεραιότητας λογικού καναλιού – MDPS

Σε αυτήν την παράγραφο θα προταθούν βελτιώσεις επί του αλγορίθμου DPS, με στόχο να λαμβάνεται υπόψη κατά τη λήψη της απόφασης δρομολόγησης όχι μόνο η ευαισθησία της υπηρεσίας



Σχήμα 5.7: 95% καθυστέρηση πακέτων video



Σχήμα 5.8: Μέση ρυθμοαπόδοση κυψέλης

με την υψηλότερη προτεραιότητα, αλλά η συνολική κατάσταση των υπηρεσιών πραγματικού χρόνου του κάθε τερματικού.

5.5.1 Προτεινόμενες Τροποποιήσεις στο Πρότυπο

Για τον MDPS αλγόριθμο, θεωρούμε ξανά το μετρικό LCP που υπολογίζεται στο UE, διαφοροποιημένο ως εξής: το LCP για την i -οστή υπηρεσία του κάθε τερματικού θα ισούται με το λόγο της καθυστέρησης του πρώτου πακέτου στην προσωρινή μνήμη της ροής (Head Of Line packet delay - HOL), προς το τετράγωνο του αντίστοιχου κατωφλίου καθυστέρησης Delay threshold - D , όπως φαίνεται στην εξίσωση 5.2.

$$LCP_i = \frac{HOL_i}{D_i^2} \quad (5.2)$$

Το αποτέλεσμα αυτής της εξίσωσης θα χρησιμοποιηθεί για την απόδοση προτεραιοτήτων στις υπάρχουσες συνδέσεις της κυψέλης.

5.5.1.1 Τροποποίηση του HLID

Προτείνεται η αντικατάσταση των 4 bits του HLID με ένα νέο μετρικό, το Mean LCP (MLCP). Το MLCP μεταδίδεται από το τερματικό προς το σταθμό βάσης σε κάθε ΤΤΙ και ορίζεται σύμφωνα με την εξίσωση 5.3.

$$MLCP = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N LCP_i, \quad (5.3)$$

όπου N το πλήθος των υπηρεσιών του UE και ο δείκτης i υποδηλώνει την i -οστή υπηρεσία. Είναι φανερό ότι το LCP έχει αντιστρόφως ανάλογη σχέση με το κατώφλι καθυστέρησης της κάθε υπηρεσίας. Συνεπώς, για υπηρεσίες με μεγαλύτερη ευαισθησία ως προς την καθυστέρηση, θα αυξάνεται και το αντίστοιχο LCP και επομένως η αποδιδόμενη προτεραιότητα στη σύνδεση. Το κέρδος αυτής της προσπάθειας είναι ότι ο αλγόριθμος δρομολόγησης αποκτάει μία πολύ ισχυρή ένδειξη ως προς τις καθυστερήσεις των πρώτων πακέτων στην ουρά για κάθε ροή και ταυτόχρονα συνυπολογίζει και τις απαιτήσεις τους σε ποιότητα. Το κριτήριο MLCP είναι δυνατόν να αντιστοιχηθεί στα 4 bits που καταλαμβάνει το HLID, όπως φαίνεται στον πίνακα 5.3 (που έχει ισχύ για τυπικές υπηρεσίες πραγματικού χρόνου).

Πίνακας 5.3: Αντιστοιχία MLCP

MLCP				Μεταδιδόμενο MLCP (4 bits)
Κενή προσωρινή μνήμη				0000
Av	0	\leq MLCP <	1	0001
Av	1	\leq MLCP <	2	0010
Av	2	\leq MLCP <	3	0011
Av	3	\leq MLCP <	4	0100
Av	4	\leq MLCP <	5	0101
Av	5	\leq MLCP <	6,5	0110
Av	6,5	\leq MLCP <	8	0111
Av	8	\leq MLCP <	9,5	1000
Av	9,5	\leq MLCP <	11	1001
Av	11	\leq MLCP <	13	1010
Av	13	\leq MLCP <	15	1011
Av	15	\leq MLCP <	17	1100
Av	17	\leq MLCP <	19	1101
Av	19	\leq MLCP <	21	1110
Av	21	\leq MLCP		1111

5.5.1.2 Τροποποίηση του “happy bit”

Η τροποποίηση του προτύπου όσον αφορά στο “happy bit” είναι ίδια με αυτήν που περιγράφηκε στο τμήμα 5.4.1.2.

5.5.2 Ανάλυση του MDPS

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος Mean logical channel priority Dynamic Priority Scheduler (MDPS) βασίζεται στις προαναφερθείσες τροποποιήσεις και λαμβάνει υπόψη την πληροφορία MLCP. Παρακάτω περιγράφεται η πορεία εκτέλεσης του αλγορίθμου, στην οποία δε συμμετέχουν καθόλου οι συνδέσεις με άδειες ουρές:

1. Βήμα πρώτο - διαφοροποίηση QoS:

- Αποδίδονται προτεραιότητες στις E-DCH συνδέσεις, ανάλογα με το MLCP που έχει αναφέρει η κάθε μία. Σε περίπτωση ισοπαλίας, προτεραιότητα έχει η σύνδεση με τον υψηλότερο λόγο σήματος προς παρεμβολή συν θόρυβο (SINR).
- Ξεκινώντας από τη σύνδεση υψηλότερης προτεραιότητας, αποδίδεται στην κάθε ροή (i) μία άδεια εξυπηρέτησης ικανή για την εξυπηρέτηση του αντίστοιχου HLBS, ή (ii) την υψηλότερη δυνατή άδεια εξυπηρέτησης, δεδομένου ότι το UE έχει επαρκές απόθεμα ισχύος και δεν προκύπτει υπέρβαση του κατώφλιου ανύψωσης θορύβου.

2. Βήμα δεύτερο - καταμερισμός εναπομείνας χωρητικότητας (στην περίπτωση που στο πρώτο βήμα δεν ξεπεράστηκε το κατώφλι ανύψωσης θορύβου). Για όλες τις E-DCH συνδέσεις που έχουν περισσότερα δεδομένα στην προσωρινή μνήμη από όσα μπορούν να μεταδοθούν στην επόμενη χρονοσχισμή με την άδεια εξυπηρέτησης που αποδόθηκε στο προηγούμενο βήμα, και δεδομένου ότι το UE έχει επαρκές απόθεμα ισχύος για να χρησιμοποιήσει μία επαυξημένη άδεια εξυπηρέτησης:

- Αποδίδονται προτεραιότητες στις E-DCH συνδέσεις, ανάλογα με το αντίστοιχο "happy bit". Σε περίπτωση ισοπαλίας, προτεραιότητα έχει η σύνδεση με τον υψηλότερο λόγο σήματος προς παρεμβολή συν θόρυβο.
- Ξεκινώντας από τη ροή υψηλότερης προτεραιότητας, αποδίδεται στην κάθε ροή (i) μία άδεια εξυπηρέτησης ικανή για την εξυπηρέτηση του αντίστοιχου TEBS, ή (ii) την υψηλότερη δυνατή άδεια εξυπηρέτησης, δεδομένου ότι το UE έχει επαρκές απόθεμα ισχύος και δεν προκύπτει υπέρβαση του κατώφλιου ανύψωσης θορύβου.

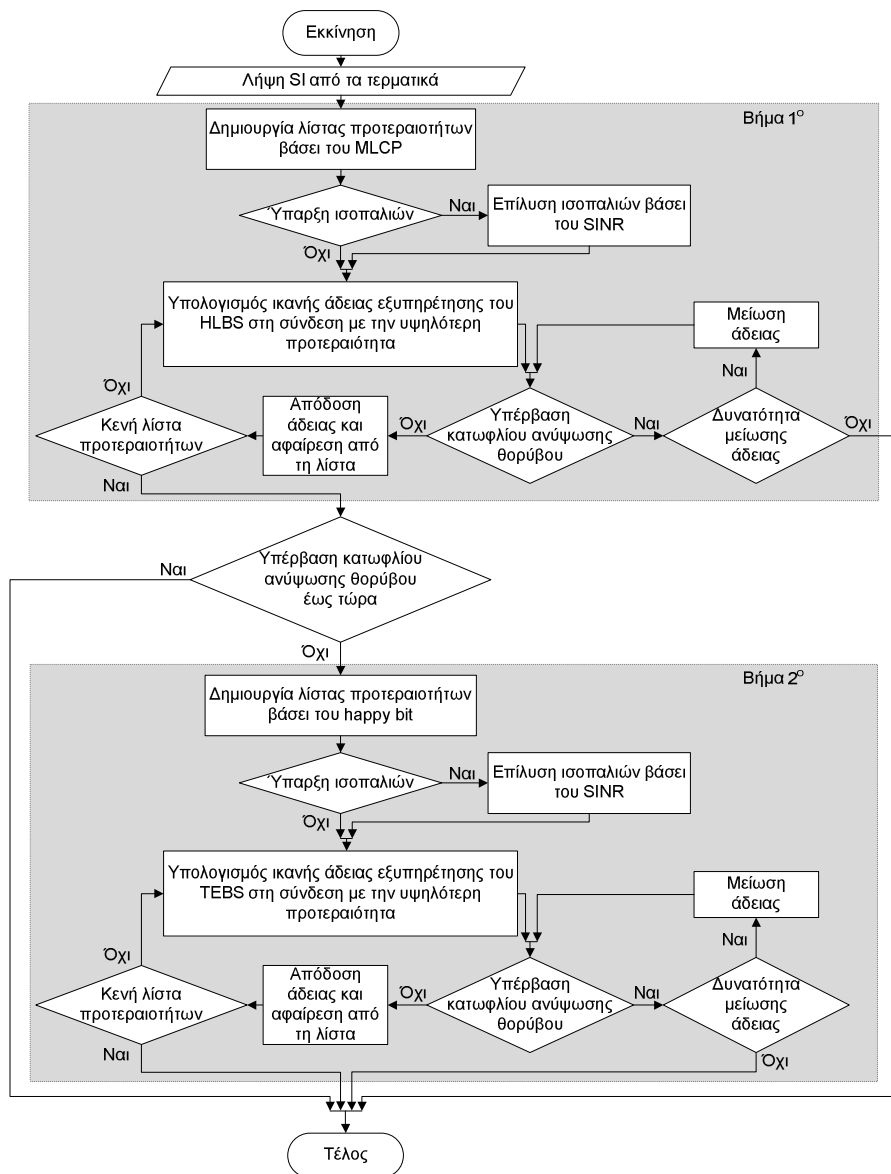
Στο σχήμα 5.9 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του προτεινόμενου αλγορίθμου δρομολόγησης.

5.5.3 Εκτίμηση Επίδοσης Αλγορίθμου

Η μελέτη της επίδοσης του προτεινόμενου αλγορίθμου έγινε μέσω προσομοιωτικού μοντέλου που αναπτύχθηκε στην πλατφόρμα OPNET.

5.5.3.1 Περιγραφή του Προσομοιωτικού μοντέλου

Το προσομοιωτικό μοντέλο της παραγράφου είναι αυτό που περιγράφηκε με λεπτομέρεια στην παράγραφο 5.4.3.1. Η μόνη μεταβολή είναι ότι χρησιμοποιούμε κίνηση VoIP με ρυθμό μετάδοσης στα 64 kbps, ώστε να παρατηρήσουμε τη συμπεριφορά της οικογένειας των δρομολογητών



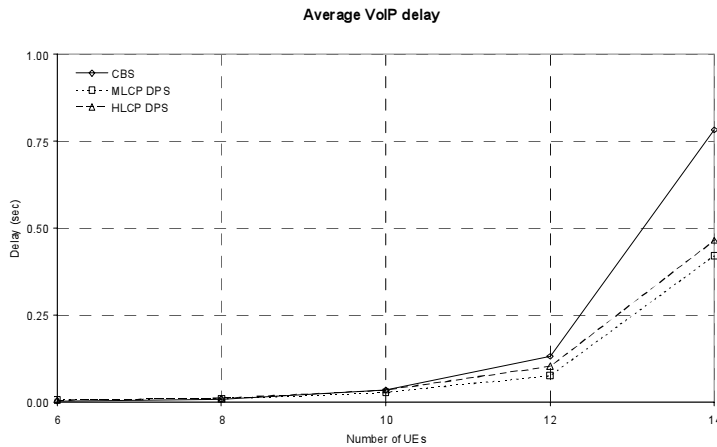
Σχήμα 5.9: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου MDPS

μας σε συνθήκες ίσου ρυθμού μετάδοσης μεταξύ των υπηρεσιών του δικτύου. Στόχος αυτής της κίνησης είναι να αποκλειστεί η (μικρή ούτως ή άλλως) πιθανότητα να εμφανίσει ευνοϊκότερα αποτελέσματα η υπηρεσία VoIP σε σύγκριση με αυτή του βίντεο, εξαιτίας όχι της δομής του αλγορίθμου, αλλά των εγγενώς μικρότερων απαιτήσεών της σε πόρους του συστήματος.

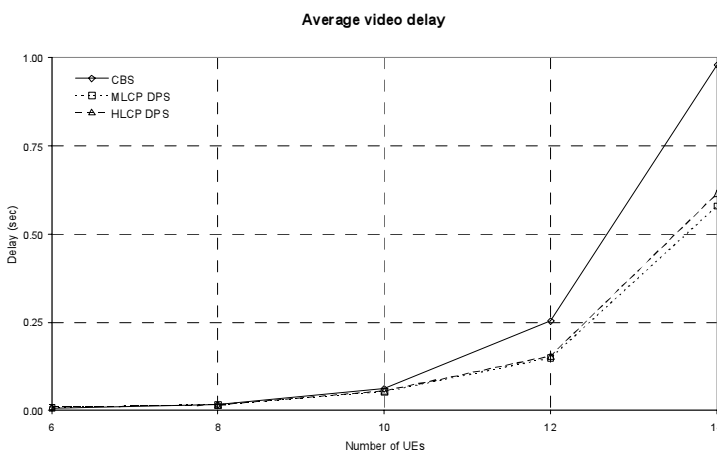
5.5.3.2 Αποτελέσματα

Για να εκτιμηθεί η επίδοση του αλγορίθμου, θα χρησιμοποιηθεί το προσομοιωτικό μοντέλο που περιγράφηκε ανωτέρω. Η εκκίνηση γίνεται με την εισαγωγή 6 UEs στο σύστημα και εν συνεχεία εισάγονται 2 ακόμα σε κάθε επόμενο βήμα, μέχρι τα 14 τερματικά. Για λόγους σύγκρισης, την ίδια ακριβώς διάταξη θα κληθεί να εξυπηρετήσει και ένα δρομολογητής που βασίζεται σε κλάσεις υπηρεσιών (Class Based Scheduler - CBS), καθώς και ο DPS που

αναπτύχθηκε στην παράγραφο 5.4. Για να αποφευχθεί πιθανή σύγχυση, στα γραφήματα ο DPS αναφέρεται ως HLCP DPS, καθώς το βασικό κριτήριο για τη λειτουργία του είναι το HLCP, ενώ ο MDPS ως MLCP DPS, εξαιτίας του MLCP κριτηρίου. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνονται στα σχήματα 5.10 έως 5.14.



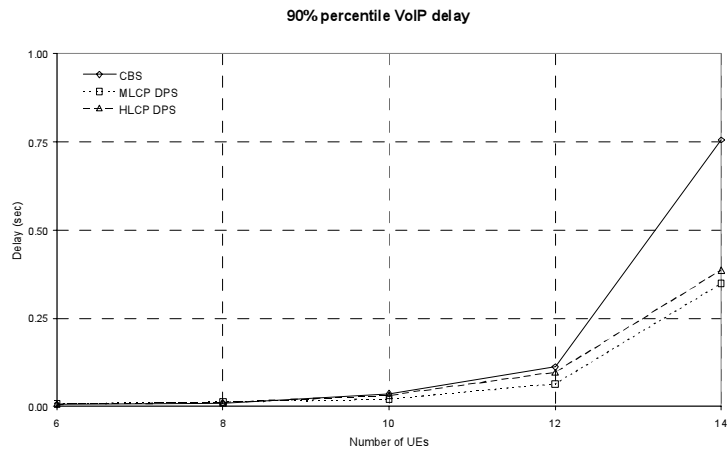
Σχήμα 5.10: Μέση καθυστέρηση πακέτων VoIP



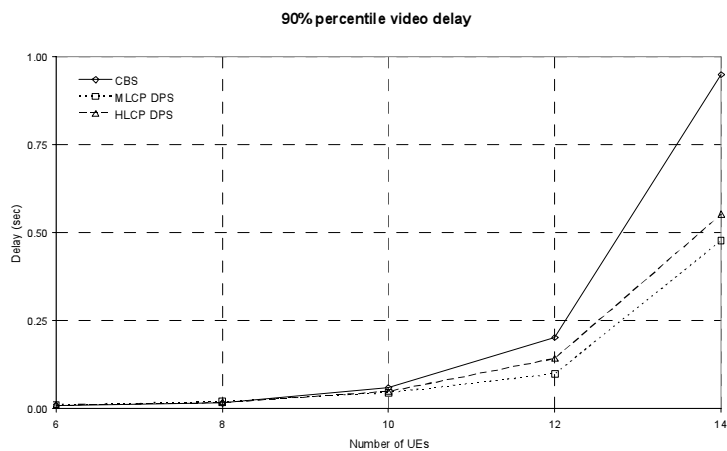
Σχήμα 5.11: Μέση καθυστέρηση πακέτων video

Παρατηρώντας τα γραφήματα, είναι φανερό ότι ο MLCP DPS όχι μόνο παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά από τον CBS, αλλά υπερτερεί και του HLCP DPS. Το αποτέλεσμα αυτό ήταν από την αρχή αναμενόμενο, εξαιτίας του γεγονότος ότι ο MLCP DPS αξιοποιεί πληροφορίες για όλες τις ροές κάθε συνόδου. Καθώς το φορτίο που καλείται το δίκτυο να εξυπηρετήσει αυξάνεται, η ανωτερότητα του αλγορίθμου αυτού γίνεται πιο εμφανής, αν και σε κάποιες περιπτώσεις η διαφοροποίηση από τον HLCP DPS είναι οριακή.

Παράλληλα, ο CBS υστερεί σημαντικά όσον αφορά στην καθυστέρηση μετάδοσης πακέτων, ειδικά σε συνθήκες αυξημένου φορτίου. Μπορεί γενικά να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι ο CBS είναι ένας άκαμπος αλγόριθμος που αντιμετωπίζει σημαντικές δυσκολίες όταν καλείται να λειτουργήσει σε περιβάλλοντα με πολλαπλές υπηρεσίες διαφορετικών κλάσεων, γεγονός που τελικά προκαλεί αστάθεια στη λειτουργία του συστήματος.



Σχήμα 5.12: 90% καθυστέρηση πακέτων VoIP

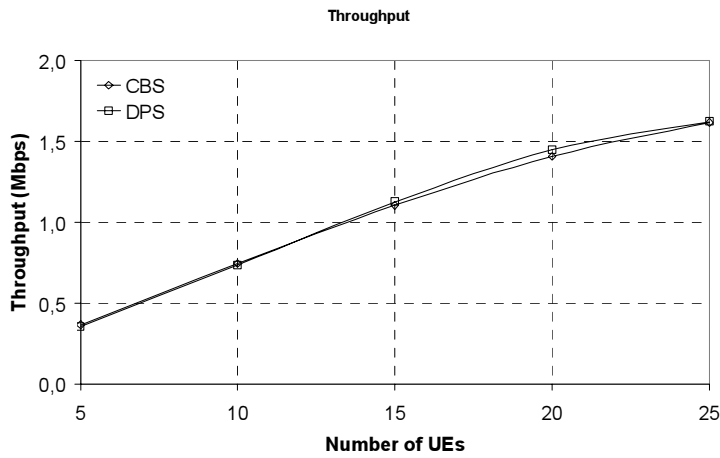


Σχήμα 5.13: 90% καθυστέρηση πακέτων video

Τέλος, στο σχήμα 5.14 φαίνεται ότι οι τρεις αλγόριθμοι δε διαφοροποιούνται ιδιαίτερα στη μέση ρυθμοαπόδοση της κυψέλης. Η οικογένεια των DPS αλγορίθμων αποδίδει ελαφρώς καλύτερα από τον CBS, ωστόσο αυτό το συμπέρασμα βρίσκεται στα όρια του στατιστικού σφάλματος. Από την άλλη, η σκοπιμότητα των DPS αλγορίθμων δεν έγκειται στη βελτίωση της ρυθμοαπόδοσης της κυψέλης, αλλά στη μείωση και σταθεροποίηση της καθυστέρησης μετάδοσης των πακέτων και στην εξομάλυνση των διαφορών ανάμεσα στους χρήστες και στις ροές τους. Εξάλλου ο σκοπός της μεγιστοποίησης της ρυθμοαπόδοσης είναι δυνατόν να επιτευχθεί με έναν καθαρό SIR δρομολογητή, όπως περιγράφεται στη σχετική βιβλιογραφία.

5.5.4 Συμπεράσματα

Σε αυτήν την παράγραφο προτάθηκε ένας νέος αλγόριθμος δρομολόγησης, ο Mean logical channel priority Dynamic Priority Scheduler (MDPS), ο οποίος κάνει χρήση των πληροφοριών δρομολόγησης που αποστέλλουν τα UEs στο σταθμό βάσης για να υπολογίσει τις αντίστοιχες προτεραιότητες και αποδόσεις πόρων εκ μέρους του συστήματος. Ο MDPS στηρίζεται στον DPS που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 5.4, αλλά διαφοροποιείται σημαντικά



Σχήμα 5.14: Μέση ρυθμοαπόδοση κυψέλης

ως προς το κριτήριο που χρησιμοποιεί για την απόδοση προτεραιοτήτων στις συνδέσεις του δικτύου. Στο μετρικό MLCP υπεισέρχονται πληροφορίες για όλες τις ροές του κάθε κινητού τερματικού, γεγονός που παρέχει στην αλγόριθμο σημαντική γνώση για τη συνολική κατάσταση των ουρών του κάθε τερματικού. Αυτή η γνώση αξιοποιείται κατάλληλα και έχει ως άμεση συνέπεια τη βελτίωση της καθυστέρησης μετάδοσης των πακέτων των ροών δεδομένων. Για την υλοποίηση του αλγορίθμου είναι αναγκαία η ενσωμάτωση μεταβολών στα 3GPP πρότυπα. Η επίδοση του MDPS εκτιμήθηκε μέσω προσομοιώσεων, οι οποίες έδειξαν σημαντική μείωση στην καθυστέρηση σε ένα περιβάλλον υπηρεσιών πραγματικού χρόνου εν συγκρίσει με έναν συμβατικό CBS αλγόριθμο, ενώ παράλληλα βελτιώνεται και η επίδοση του απλού DPS.

5.6 Ο Δρομολογητής Προτεραιότητας Καναλιού με Γνώση της Καθυστέρησης – DACP-S

Σε αυτήν την παράγραφο προτείνονται κάποιες κατάλληλες μετατροπές στην οικογένεια των DPS αλγορίθμων, με στόχο (i) τη βελτιστοποίηση της καθυστέρησης στην οποία υπόκεινται τα πακέτα δεδομένων έως ότου δρομολογηθούν και (ii) τη δυνατότητα διαφοροποίησης στην παρεχόμενη ποιότητα υπηρεσίας για υπηρεσίες πραγματικού χρόνου.

5.6.1 Προτεινόμενες Τροποποιήσεις στο Πρότυπο

Έστω ότι ένα τερματικό έχει εκκινήσει N ροές πραγματικού χρόνου, οι οποίες πολυπλέκονται σε μία E-DCH σύνδεση. Ορίζεται ως προτεραιότητα P_i της i -οστής ροής ο λόγος της καθυστέρησης d_i του πρώτου πακέτου στην προσωρινή μνήμη της ροής (Head of Line packet delay - HoL), προς την k -οστή δύναμη του αντίστοιχου κατωφλίου καθυστέρησης (Delay threshold - D_i), όπως φαίνεται στην εξίσωση 5.4.

$$P_i = \frac{d_i}{D_i^k} \quad (5.4)$$

Το HoL πακέτο είναι αυτό που έχει υποστεί τη μεγαλύτερη καθυστέρηση στην ουρά και επομένως το d_i είναι ενδεικτικό της καθυστέρησης που υφίσταται συνολικά η ουρά. Επιπλέον, ο λόγος d_i/D_i παρέχει ένα κανονικοποιημένο μετρικό του πόσο κοντά βρίσκεται κάθε ροή στο χρονικό κατώφλι μετάδοσής της. Με αυτόν τον τρόπο καθίσταται δυνατή η σύγκριση μεταξύ των προτεραιοτήτων διαφορετικών ροών, ανεξαρτήτως των πραγματικών απαιτήσεων της κάθε μίας σε ποιότητα υπηρεσίας. Ως αποτέλεσμα, οι συνδέσεις που έχουν πακέτα που αντιμετωπίζουν υψηλή καθυστέρηση, εξυπηρετούνται κατά προτεραιότητα και έτσι διαφυλάσσεται η αναγκαία ποιότητα. Η παράμετρος k καθορίζει την ευαισθησία του προσομοιωτή: καθώς το k αυξάνεται, παρόμοια διαδρομή ακολουθεί και το P_i , δεδομένου του γεγονότος ότι το κατώφλι καθυστέρησης για τις υπηρεσίες πραγματικού χρόνου κυμαίνεται από 0,075 έως 0,4 s [123] (είναι δηλαδή μικρότερο της μονάδας). Επομένως, όσο πιο αυστηρές απαιτήσεις παρουσιάζει μια υπηρεσία ως προς την καθυστέρηση, τόσο πιο πολύ επωφελείται από την αύξηση της παραμέτρου k .

5.6.1.1 Τροποποίηση του HLID

Προτείνεται η αντικατάσταση του HLID με ένα νέο μετρικό, το Delay Aware Channel Prioritization (DACP). Το DACP ορίζει την προτεραιότητα κάθε UE κατά τη δρομολόγηση, μεταδίδεται από το τερματικό προς το σταθμό βάσης σε κάθε TTI και ορίζεται σύμφωνα με την εξίσωση 5.5.

$$P_{UE} = \sum_{i=1}^N P_i = \sum_{i=1}^N \frac{d_i}{D_i^k}, \quad (5.5)$$

Είναι φανερό ότι στη γενική περίπτωση, όσο πιο πολλές ροές πραγματικού χρόνου εκκινεί ένα τερματικό, τόσο μεγαλύτερη προτεραιότητα του αποδίδεται. Αυτή είναι μία επιθυμητή ιδιότητα του αλγορίθμου, καθώς επιτρέπει στο UE να αυξομειώνει την προτεραιότητά του ανάλογα με τις απαιτήσεις του σε ρυθμό μετάδοσης. Από την άλλη, είναι επίσης απαραίτητη η εισαγωγή μηχανισμών ελέγχου στο δίκτυο, ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα φίμωσης τερματικών, σε περίπτωση που υπάρχουν στο δίκτυο κακοπροαίρετοι χρήστες. Για αυτόν ακριβώς το λόγο επιβάλλεται (σαν πρόσθετο μέτρο ασφαλείας) να υπάρχει εγγύηση από την πλευρά του δικτύου ως προς τα συμφωνημένα χαρακτηριστικά κίνησης των εισερχόμενων ροών, υπό τη μορφή ενός αλγορίθμου “δοχείου διαρροής” (leaky bucket). Ακόμα, απαραίτητη κρίνεται η παρουσία ενός ικανού σχήματος ελέγχου αποδοχής κλήσεων (Call Admission Control - CAC), το οποίο θα ελαχιστοποιούσε την πιθανότητα υπερφόρτωσης του δικτύου.

Η απόδοση προτεραιοτήτων στις υπηρεσίες μπορεί επίσης να ελεγχθεί μέσω της παραμέτρου k , η οποία ορίζει το επίπεδο της διαφοροποίησης της ποιότητας υπηρεσίας ανάμεσα στις συνδέσεις. Η τιμή της εξαρτάται όχι μόνο από τα χαρακτηριστικά και την ευαισθησία ως προς την καθυστέρηση της κάθε ροής, αλλά είναι επίσης άμεσα συνδεδεμένη με τη δυναμικά μεταβαλλόμενη σύνθεση του φορτίου του δικτύου, καθώς και την καθυστέρηση της κάθε ουράς ξεχωριστά. Εξαιτίας αυτού, η παράμετρος k πρέπει στην πραγματικότητα να προσαρμόζεται συνεχώς και βηματικά, επί της βάσης των στατιστικών του δικτύου, με τη διαδικασία προ-

σαρμογής να συντονίζεται αυτόματα από κάποια οντότητα του δικτύου (π.χ. από τον Node B).

5.6.1.2 Τροποποίηση του “happy bit”

Η τροποποίηση του προτύπου όσον αφορά στο “happy bit” είναι ίδια με αυτήν που περιγράφηκε στο τμήμα 5.4.1.2.

5.6.2 Ανάλυση του DACP-S

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος Delay Aware Channel Prioritization - based packet Scheduler (DACP-S) βασίζεται στις προαναφερθείσες τροποποιήσεις και λαμβάνει υπόψη την πληροφορία DACP. Παρακάτω περιγράφεται η πορεία εκτέλεσης του αλγορίθμου, στην οποία δε συμμετέχουν καθόλου οι συνδέσεις με άδειες ουρές:

1. Βήμα πρώτο - διαφοροποίηση QoS:

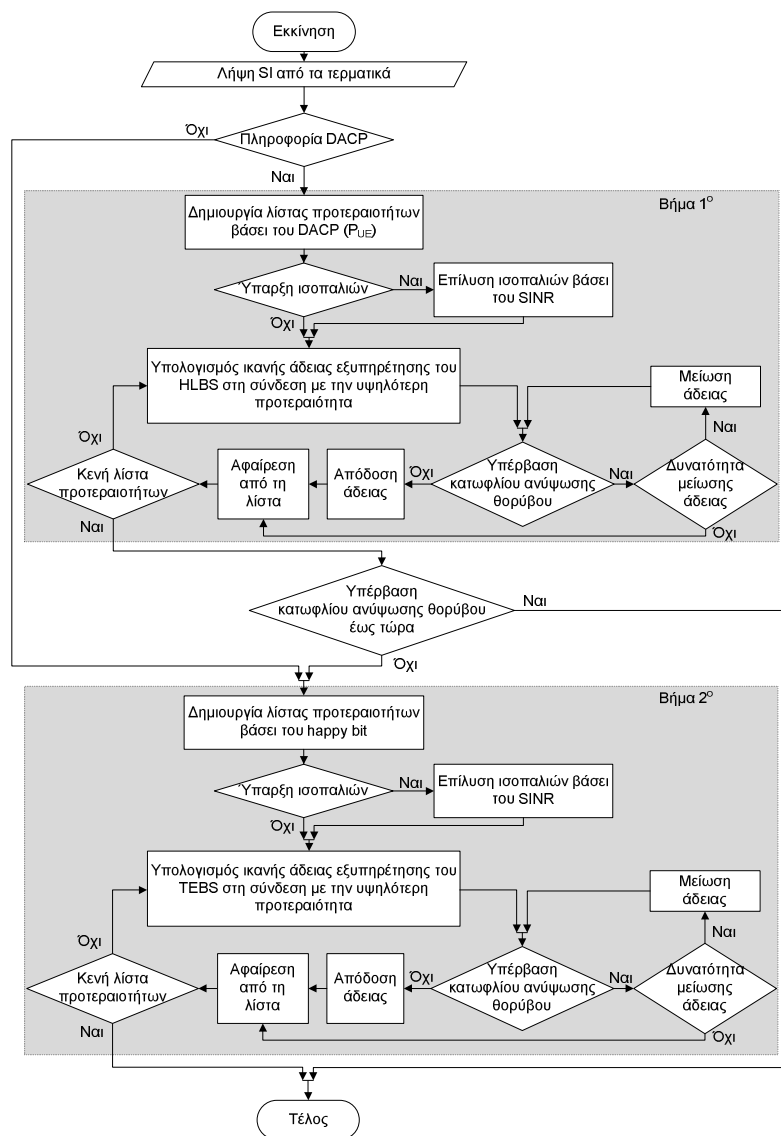
- Αποδίδονται προτεραιότητες στις E-DCH συνδέσεις, ανάλογα με το DACP που έχει αναφέρει η κάθε μία. Σε περίπτωση ισοπαλίας, προτεραιότητα έχει η σύνδεση με τον υψηλότερο λόγο σήματος προς παρεμβολή συν θόρυβο (SINR).
- Ξεκινώντας από τη σύνδεση υψηλότερης προτεραιότητας, αποδίδεται στην κάθε ροή (i) μία άδεια εξυπηρέτησης ικανή για την εξυπηρέτηση του αντίστοιχου HLBS, ή (ii) την υψηλότερη δυνατή άδεια εξυπηρέτησης, δεδομένου ότι το UE έχει επαρκές απόθεμα ισχύος και δεν προκύπτει υπέρβαση του κατωφλίου ανύψωσης θορύβου. Αν μία E-DCH σύνδεση εξαιτίας περιορισμών ισχύος δεν είναι δυνατόν να λάβει καμία άδεια εξυπηρέτησης, αφαιρείται από τη λίστα προτεραιοτήτων για αυτό το TTI.

2. Βήμα δεύτερο - καταμερισμός εναπομείναντας χωρητικότητας (στην περίπτωση που στο πρώτο βήμα δεν ξεπεράστηκε το κατώφλι ανύψωσης θορύβου). Για όλες τις E-DCH συνδέσεις που έχουν περισσότερα δεδομένα στην προσωρινή μνήμη από όσα μπορούν να μεταδοθούν στην επόμενη χρονοσχισμή με την άδεια εξυπηρέτησης που αποδόθηκε στο προηγούμενο βήμα, και δεδομένου ότι το UE έχει επαρκές απόθεμα ισχύος για να χρησιμοποιήσει μία επαυξημένη άδεια εξυπηρέτησης:

- Αποδίδονται προτεραιότητες στις E-DCH συνδέσεις, ανάλογα με το αντίστοιχο “happy bit”. Σε περίπτωση ισοπαλίας, προτεραιότητα έχει η σύνδεση με τον υψηλότερο λόγο σήματος προς παρεμβολή συν θόρυβο.
- Ξεκινώντας από τη ροή υψηλότερης προτεραιότητας, αποδίδεται στην κάθε ροή (i) μία άδεια εξυπηρέτησης ικανή για την εξυπηρέτηση του αντίστοιχου TEBS, ή (ii) την υψηλότερη δυνατή άδεια εξυπηρέτησης, δεδομένου ότι το UE έχει επαρκές απόθεμα ισχύος και δεν προκύπτει υπέρβαση του κατωφλίου ανύψωσης θορύβου.

Συνοψίζοντας, το πρώτο βήμα του αλγορίθμου βασίζεται στην τροποποιημένη πληροφορία δρομολόγησης και ουσιαστικά είναι υπεύθυνο για τη διαφοροποίηση της ποιότητας ανάμεσα στις υπηρεσίες. Το δεύτερο βήμα βασίζεται στο “happy bit” και είναι υπεύθυνο για την απόδοση της πλεονάζουσας χωρητικότητας. Επιπλέον, το δεύτερο βήμα καθιστά τον αλγόριθμο συμβατό με τα πρότυπα της 3GPP εάν οι λαμβανόμενες πληροφορίες δρομολόγησης δεν περιέχουν τις προτεινόμενες τροποποιήσεις. Σε αυτήν την περίπτωση το πρώτο βήμα παρακάμπτεται και η συνολική χωρητικότητα του συστήματος διαμοιράζεται βάσει του δεύτερου βήματος, της πληροφορίας δηλαδή του “happy bit”.

Στο σχήμα 5.15 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του προτεινόμενου αλγορίθμου δρομολόγησης.



Σχήμα 5.15: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου DACP-S

5.6.3 Εκτίμηση Επίδοσης Αλγορίθμου

Η μελέτη της επίδοσης του προτεινόμενου αλγορίθμου έγινε μέσω προσομοιωτικού μοντέλου που αναπτύχθηκε στην πλατφόρμα OPNET.

5.6.3.1 Περιγραφή του Προσομοιωτικού μοντέλου

Το προσομοιωτικό μοντέλο της παραγράφου είναι αυτό που περιγράφηκε με λεπτομέρεια στο τμήμα 5.4.3.1, με ελάχιστες διαφοροποιήσεις. Καταρχάς χρησιμοποιείται κίνηση VoIP με ρυθμό μετάδοσης στα 64 kbps και βίντεο κωδικοποίησης H.264/AVC [124, 125] στα 152 kbps. Η κωδικοποίηση H.264/AVC είναι μεταγενέστερη της H263 και έχει πάρει τη θέση της σε πολλές πρακτικές εφαρμογές, καθώς παρουσιάζει βελτιωμένη ποιότητα εικόνας για τον ίδιο ρυθμό μεταφοράς σε σχέση με την προκάτοχό της. Επίσης, μικρές μεταβολές υπάρχουν και στις παραμέτρους της προσομοίωσης, οι οποίες δίνονται στον πίνακα 5.4.

Πίνακας 5.4: Παράμετροι προσομοίωσης

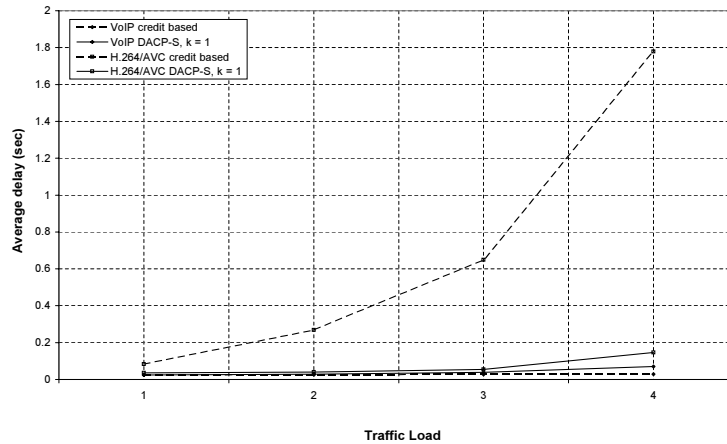
Συχνότητα φέροντος	2.1 GHz
Εύρος ζώνης καναλιού	5 MHz
Διάρκεια χρονοσχισμής TTI	2 ms
Ακτίνα κυψέλης	1000 m
Μοντέλο απωλειών διάδοσης	$L = 128.1 + 37.6 * \log_{10} R$
Κατανομή αργών διαλείψεων	Λογαριθμοκανονική
Τυπική απόκλιση αργών διαλείψεων	8.0 dB
Πυκνότητα θερμικού θορύβου	-174 dBm/Hz
Παράγοντας ετεροκυψελικής παρεμβολής	0.2
Κατώφλι ανύψωσης θερμικού θορύβου	6 dB
Γεννήτρια κίνησης (κατώφλι καθυστέρησης [42])	A-law G.711 VoIP 64 kbps (100 ms), H.264/AVC video 152 kbps (200 ms)
Μοντέλο κινητικότητας	ITU-Veh / ITU-Ped
Επαναλήψεις ανά προσομοίωση	5
Διάρκεια προσομοίωσης ανά επανάληψη	3600 s

5.6.3.2 Αποτελέσματα

Για να εκτιμηθεί η επίδοση του DACP-S, θα συγκριθεί με έναν δρομολογητή που βασίζεται στο ρυθμό μετάδοσης (rate based) και με έναν που οδηγείται από την καθυστέρηση (delay driven). Η εκκίνηση γίνεται με την εισαγωγή στον προσομοιωτή πέντε τερματικών και ο αριθμός αυτός αυξάνεται κατά ένα για κάθε επόμενο γύρο προσομοίωσης. Όσον αφορά στα γραφήματα που θα ακολουθήσουν, η μοναδιαία τιμή του φορτίου στον οριζόντιο άξονα αντιπροσωπεύει το φορτίο που γεννούν τα πέντε πρώτα τερματικά και η τιμή αυτή αυξάνεται κατά ένα για κάθε επόμενο τερματικό.

Καταρχάς θα συγκριθεί ο DACP-S με τον αλγόριθμο που βασίζεται στο ρυθμό μετάδοσης [112]. Αυτό το σχήμα ταξινομεί και αποδίδει προτεραιότητες στις συνόδους σε μία φθίνουσα σειρά, ανάλογα με το χάσμα ανάμεσα στον ονομαστικό και στον πραγματικό ρυθμό

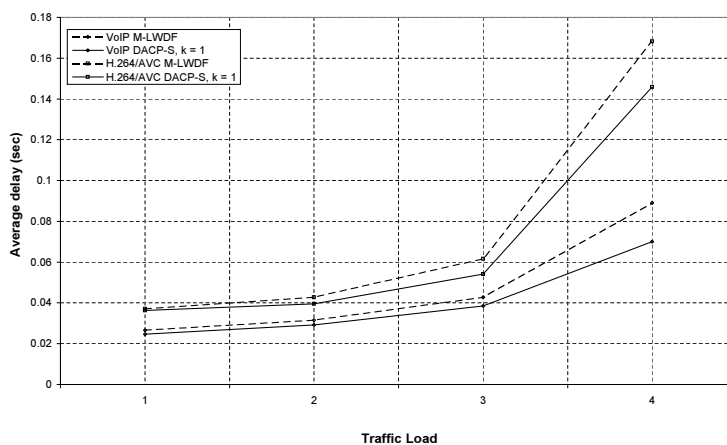
μετάδοσης κάθε συνόδου εντός ενός στενού χρονικού παραθύρου. Το σχήμα 5.16 απεικονίζει το αποτέλεσμα αυτής της προσομοίωσης.



Σχήμα 5.16: Σύγκριση DACP-S με δρομολογητή που βασίζεται στο ρυθμό μετάδοσης

Παρά το γεγονός ότι ο DACP-S αποδίδει ελάχιστα χειρότερα όσον αφορά στο VoIP, εν τούτοις είναι φανερό ότι ο αλγόριθμος ρυθμού μετάδοσης δεν καταφέρνει να διαχειριστεί τις ριπές της υπηρεσίας βίντεο. Καθώς το βίντεο παρουσιάζει σημαντικές μεταβολές στον απαιτούμενο ρυθμό μετάδοσης ανάμεσα σε διαδοχικά καρέ (υψηλός Peak to Average ρυθμός μετάδοσης), ο δεύτερος αλγόριθμος δεν έχει την ικανότητα να παρακολουθήσει αυτές τις στιγμιαίες αλλαγές, εξαιτίας της στατικής φύσης του μετρικού που τον οδηγεί στη λήψη της απόφασης. Επομένως, ο DACP-S υποσκελίζει αυτόν το δρομολογητή, λόγω της δυναμικής μεθόδου που διαθέτει για την ανάθεση των ραδιοπόρων του συστήματος.

Το επόμενο βήμα είναι η σύγκριση του DACP-S με τον Modified Largest Weighted Delay First (M-LWDF) [118]. Ο M-LWDF είναι ένας γνωστός αλγόριθμος δρομολόγησης για υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, ο οποίος οδηγείται από την καθυστέρηση, δηλαδή ανήκει στην ίδια κατηγορία με τον DACP-S. Επομένως η σύγκριση αυτή αποτελεί και το ουσιαστικό εμπόδιο που καλείται να υπερβεί ο προτεινόμενος αλγόριθμος. Τα αποτελέσματα αυτής της προσομοίωσης παρουσιάζονται στο σχήμα 5.17.

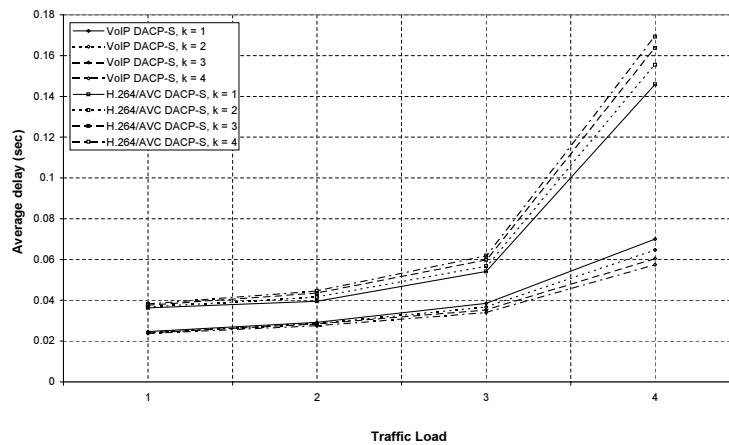


Σχήμα 5.17: Σύγκριση DACP-S με το δρομολογητή M-LWDF

Όπως είναι αναμενόμενο, η αύξηση του αριθμού των συνόδων που εξυπηρετούνται από την κυψέλη έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της μέσης καθυστέρησης μετάδοσης πακέτων, τόσο για το VoIP, όσο και για το βίντεο. Είναι επίσης φανερό ότι ο DACP-S κατορθώνει να επιτύχει μία σημαντική μείωση και για τις δύο υπηρεσίες σε σχέση με τον συγκρινόμενο αλγόριθμο. Η εξήγηση για αυτό το φαινόμενο έγκειται στο γεγονός ότι ο DACP-S έχει μία πλήρη εικόνα της κατάστασης της ουράς για κάθε ροή δεδομένων και αποδίδει τις προτεραιότητες ανάλογα, χωρίς περιττή σπατάλη πόρων του δικτύου. Αντίθετα, ο M-LWDF δίνει πολύ μεγάλη βαρύτητα στο σηματοθορυβικό λόγο του καναλιού και επομένως έχει μία τάση προς τους δρομολογητές σηματοθορυβικού λόγου, οι οποίοι ευνοούν τη ρυθμοαπόδοση της κυψέλης, αλλά εις βάρος της καθυστέρησης που υφίστανται τα μεταδιδόμενα πακέτα. Εξάλλου στα πραγματικά δίκτυα (με τα οποία κατά νου δημιουργήθηκε η οικογένεια των DPS αλγορίθμων) υπάρχουν σχήματα πρόληψης και καταστολής της υπερφόρτωσης του δικτύου (π.χ. ο έλεγχος αποδοχής κλήσεων και ο έλεγχος συμφόρησης), και σαφώς η αντιμετώπιση των συμφορήσεων είναι δευτερεύουσας προτεραιότητας εργασία για ένα δρομολογητή σε σχέση με τη διατήρηση του μέγιστου δυνατού επιπέδου ποιότητας υπηρεσίας υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Παρ' όλα αυτά, στη συνέχεια θα φανεί ότι ο DACP-S έχει τη δυνατότητα να συνεισφέρει αποτελεσματικά και σε πιθανή προσπάθεια μερικής αποσυμφόρησης του δικτύου. Συμπερασματικά, η υιοθέτηση του προτεινόμενου αλγορίθμου επιφέρει βελτίωση στην παρεχόμενη ποιότητα υπηρεσίας, εξαιτίας της επακριβούς γνώσης που προσφέρει στο σταθμό βάσης για τις αντικειμενικές ανάγκες της κάθε συνόδου.

Ένα ακόμα ενδιαφέρον σημείο του προτεινόμενου δρομολογητή είναι η ικανότητά του για διαφοροποίηση της ποιότητας υπηρεσίας ανάμεσα σε διαφορετικές κλάσεις υπηρεσιών (Classes of Services - CoS). Ρυθμίζοντας την τάξη του εκθέτη του παρονομαστή, δηλαδή την παράμετρο k , η συνεισφορά κάθε ροής στον υπολογισμό του μετρικού είναι δυνατόν να μεταβληθεί, σύμφωνα με κάποια προκαθορισμένη πολιτική του δικτύου. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι χρήσιμο είτε για τη θωράκιση του δικτύου απέναντι σε χρονικά εντοπισμένες έντονες μεταβολές του προσφερόμενου φορτίου, είτε για την υποβοήθηση του δικτύου στην προσπάθεια διατήρησης της ποιότητας υπηρεσίας σε επιλεγμένες κλάσεις σε συνθήκες υπερφόρτωσης.

Στο γράφημα 5.18 απεικονίζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τις τέσσερις πρώτες ακέραιες θετικές τιμές της παραμέτρου k . Καθώς το k αυξάνεται, το VoIP ευνοείται έναντι του βίντεο, γεγονός που οδηγεί στην αύξηση της διαφοράς της υφιστάμενης καθυστέρησης ανάμεσα στις δύο υπηρεσίες. Από την άλλη, η χρήση δεκαδικών θετικών τιμών μικρότερων της μονάδας θα οδηγούσε στη μείωση αυτής της διαφοράς. Σε κάθε περίπτωση, για κάθε σύνολο υπηρεσιών πραγματικού χρόνου που προσφέρει ένα δίκτυο, υπάρχει μία κατάλληλη τιμή του k που έχει τη δυνατότητα να προσαρμόσει την παρεχόμενη ποιότητα υπηρεσίας στις απαιτήσεις του διαχειριστή του δικτύου. Τέλος, η απόφαση για τη μεταβολή της τιμής του k μπορεί να ληφθεί είτε από μία κεντρική οντότητα του δικτύου και να σηματοδοτηθεί γενικευμένα προς όλα τα τερματικά που εξυπηρετεί το δίκτυο, είτε από κάποιο σταθμό βάσης και να εκπεμφθεί προς τους χρήστες του σε περίπτωση τοπικού προβλήματος.



Σχήμα 5.18: Διαφοροποίηση ποιότητας υπηρεσίας με μεταβολή της παραμέτρου k

5.6.4 Συμπεράσματα

Σε αυτήν την παράγραφο προτάθηκε ένας νέος αλγόριθμος δρομολόγησης, ο Delay Aware Channel Prioritization - based packet Scheduler (DACP-S), ο οποίος κάνει χρήση των πληροφοριών δρομολόγησης που αποστέλλουν τα UEs στο σταθμό βάσης για να υπολογίσει τις αντίστοιχες προτεραιότητες και αποδόσεις πόρων εκ μέρους του συστήματος. Ο DACP-S ανήκει στην οικογένεια αλγορίθμων DPS. Στο κριτήριο που χρησιμοποιεί για την απόδοση προτεραιοτήτων στις συνδέσεις του δικτύου (DACP) υπεισέρχονται πληροφορίες για όλες τις ροές του κάθε κινητού τερματικού, με δυνατότητα διαφοροποίησης της παρεχόμενης ποιότητας υπηρεσίας σε διαφορετικές κλάσεις υπηρεσιών. Αυτή η γνώση αξιοποιείται κατάλληλα και έχει ως άμεση συνέπεια τη βελτίωση της καθυστέρησης των πακέτων των ροών δεδομένων. Για την υλοποίηση του αλγορίθμου είναι αναγκαία η ενσωμάτωση μεταβολών στα 3GPP πρότυπα. Η επίδοση του DACP-S εκτιμήθηκε μέσω προσομοιώσεων, οι οποίες έδειξαν σημαντική μείωση στην καθυστέρηση σε ένα περιβάλλον υπηρεσιών πραγματικού χρόνου εν συγκρίσει με έναν αλγόριθμο δρομολόγησης που βασίζεται στο ρυθμό μετάδοσης και με έναν που οδηγείται από την καθυστέρηση, ενώ παράλληλα ο DACP-S βελτιώνει και την επίδοση του απλού DPS.

5.7 Σύνοψη

Η συνεχώς αυξανόμενη απαίτηση για υπηρεσίες υψηλού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων προϋποθέτει μηχανισμούς που εγγυώνται την παρεχόμενη ποιότητα υπηρεσίας στα ευρυζωνικά ασύρματα δίκτυα τηλεπικοινωνιών, όσον αφορά στη μέση καθυστέρηση πακέτου, στην απόκλιση καθυστέρησης, στους αλγορίθμους του κινητού τερματικού και στους αλγορίθμους δρομολόγησης των δεδομένων. Σε αυτό το κεφάλαιο μελετήθηκε το πρόβλημα της ταυτόχρονης εξυπηρέτησης πολλαπλών υπηρεσιών πραγματικού χρόνου στους χρήστες της άνω ζεύξης ενός δικτύου HSPA, καθώς και η πολυπλεξία τυπικών υπηρεσιών του. Παρ' όλο που έχουν προταθεί αρκετοί αλγόριθμοι δρομολόγησης δεδομένων για τις ασύρματες υπηρεσίες δεδομένων υψηλής ταχύτητας τόσο για την κάτω όσο και για την άνω ζεύξη, εν τούτοις η αλληλεπίδραση των προτεραιοτήτων ανάμεσα στα δεδομένα των υπηρεσιών του κάθε χρήστη και στα

πακέτα που βρίσκονται σε αναμονή στην προσωρινή μνήμη δεν έχει μελετηθεί επαρκώς στη βιβλιογραφία. Σε αυτά τα πλαίσια προτάθηκε μία νέα οικογένεια αλγορίθμων δρομολόγησης, η οποία λαμβάνει υπόψη την ευαισθησία ως προς την καθυστέρηση της κάθε ροής δεδομένων και την πραγματική καθυστέρηση των υπό αναμονή δεδομένων στην ουρά των τερματικών, ενώ παράλληλα προσφέρει τη δυνατότητα διαφοροποίησης της παρεχόμενης ποιότητας υπηρεσίας ανάμεσα σε διαφορετικές κλάσεις υπηρεσιών. Η εκτίμηση της επίδοσης των προτεινόμενων αλγορίθμων έγινε μέσω προσομοιωτικών σεναρίων για διάφορους τύπους υπηρεσιών πραγματικού χρόνου, με κύριο στόχο τη βελτίωση του μέσου και μέγιστου χρόνου καθυστέρησης στη μετάδοση των πακέτων.

□

Κεφάλαιο 6

Διαχείριση Ραδιοπόρων σε Δίκτυα Ορθογωνικής Πρόσβασης Πολλαπλών Φερόντων OFDMA

6.1 Εισαγωγή

Υπό το πρίσμα της εξέλιξης των δικτύων κινητών τηλεπικοινωνιών προς τη νέα (4η) γενιά, η ερευνητική κοινότητα αλλά και οι οργανισμοί προτυποποίησης υιοθέτησαν την τεχνολογία OFDMA ως την κύρια μέθοδο διαμόρφωσης και πολυπλεξίας χρηστών. Η τεχνολογία ραδιοπρόσβασης OFDMA επιτρέπει την αποδοτική αξιοποίηση ευρύτατων φασματικών ζωνών, δεκάδων ή ακόμη και εκατοντάδων MHz, αλλά και ταυτόχρονα υποστηρίζει την παροχή ευέλικτων υπηρεσιών διαφορετικού τύπου και απαιτήσεων. Για τους παραπάνω λόγους τα προσφάτως προτυποποιημένα δίκτυα προπομποί της 4ης γενιάς 3GPP-LTE [126] και IEEE-Mobile WiMAX [8] αλλά και τα υπό διαμόρφωση συστήματα LTE-Advanced και 802.16m βασίζονται να υποστρώματα PHY και MAC σε τεχνικές ορθογωνικής πολυπλεξίας φερόντων.

Από τη σκοπιά της διαχείρισης πόρων η ραδιοπρόσβαση OFDMA εισάγει ορισμένες νέες τεχνικές προκλήσεις που καλούνται να αντιμετωπιστούν ώστε να υποστηριχθούν αποδοτικά ετερογενείς υπηρεσίες δεδομένων. Σε αντίθεση με τα κλασικά δίκτυα τύπου TDMA, όπου σε κάθε χρονοθυρίδα ή πλαίσιο δεδομένων δρομολογείται αποκλειστικά ένας χρήστης, στα δίκτυα OFDMA δύναται να πολυπλεχθούν πολλαπλοί χρήστες. Επίσης, σε αντίθεση με τα δίκτυα WCDMA, όπου σε κάθε χρονοθυρίδα υποστηρίζεται πολυπλεξία μέσω ενός περιορισμένου πλήθους ορθογωνικών κωδίκων, στα νέα δίκτυα (pre-)4G η πολυπλεξία στο πεδίο της συχνότητας είναι πολύ πιο ευέλικτη. Συγκεκριμένα, η δεξαμενή πόρων για ένα σύστημα OFDMA αποτελείται από ένα πολύ μεγάλο πλήθος ορθογωνικών χρονο-συχνοτικών υπομονάδων, οι οποίες μάλιστα παρουσιάζουν διαφορετικά επίπεδα απόδοσης (π.χ. μέγιστος ρυθμός μετάδοσης, ελάχιστη ισχύς, επίπεδο BER) ανάλογα με το χρήστη στον οποίο πρόκειται να αποδοθούν, εξαιτίας της φύσης του ευρυζωνικού και χρονικά μεταβαλλόμενου μέσου διάδοσης. Συνεπώς, το πρόβλημα της δρομολόγησης πακέτων είναι πιο πολύπλοκο λαμβάνοντας υπόψη ότι:

- Σε κάθε χρονοθυρίδα πρέπει να επιλέγεται με δυναμικό τρόπο το υποσύνολο των χρηστών στο οποίο πρόκειται να δοθεί πρόσβαση στους κοινούς πόρους ισχύος και εύρους ζώνης, όπου δεν δύναται να προ-υπολογιστεί ο υποστηριζόμενος ρυθμός μετάδοσης για κάθε χρήστη (σε αντίθεση με τα δίκτυα WCDMA). Επομένως δεν μπορούν να εφαρμοστούν απευθείας οι τυπικοί μηχανισμοί δρομολόγησης 3G (βλ. επίσης τη σχετική συζήτηση στην [37]).
- Προκειμένου η κατανομή πόρων να είναι αποδοτική, ο μηχανισμός δρομολόγησης πακέτων θα πρέπει να συνεργάζεται στενά με τον μηχανισμό ανάθεσης φερόντων και ισχύος στο πεδίο της συχνότητας. Η πλήρης λογική αποσύζευξη των μηχανισμών αυτών έχει αποδειχτεί ότι οδηγεί σε μη αποδοτικές προσεγγίσεις, επομένως η βελτιστοποίηση της διαχείρισης πόρων απαιτεί την από κοινού θεώρηση των διαστάσεων συχνότητας και χρόνου κατά την επιλογή των χρηστών και των παραμέτρων μετάδοσης. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι σύμφωνα με την εργασία [127] η αξιοποίηση της φασματικής επιλεκτικότητας των χρηστών πλέον των κλασικών προσεγγίσεων χρονικής πολυπλεξίας (max SNR, Proportional-Fair, Round-Robin), ενισχύει την απόδοση του συστήματος κατά 30-40% τουλάχιστον.

Το παρόν κεφάλαιο εστιάζει σε θέματα δρομολόγησης πακέτων σε δίκτυα OFDMA, προτείνοντας νέους μηχανισμούς που υποστηρίζουν προφίλ δίκαιης απόδοσης πόρων, συνυπάρχουσες ετερογενείς τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες καθώς και διαφορετικά σχήματα μετάδοσης ισχύος. Το πεδίο εφαρμογής των μηχανισμών αυτών είναι τα συστήματα LTE και Mobile WiMAX.

6.2 Επισκόπηση της Βιβλιογραφίας

Ανάθεση πόρων αποκλειστικά στο πεδίο της συχνότητας: Τα πρώτα θέματα διαχείρισης πόρων για δίκτυα πολλαπλής πρόσβασης OFDMA αφορούσαν αποκλειστικά στη βελτιστοποίηση της διαδικασίας ανάθεσης υποκαναλιών, ισχύος και προσαρμοστικών σχημάτων μετάδοσης στο πεδίο της συχνότητας. Οι πρωτοποριακές εργασίες [71] και [80] έθεσαν τα θεμελιώδη μαθηματικά προβλήματα βελτιστοποίησης και πρότειναν ορισμένες βέλτιστες και υπο-βέλτιστες τεχνικές ανάθεσης πόρων για την αποδοτική επίλυσή τους. Ωστόσο τα θεωρούμενα προφίλ QoS ήταν αρκετά απλουστευτικά, ενώ επίσης οι αλγόριθμοι επίλυσης παρουσίαζαν υψηλή πολυπλοκότητα. Η εργασία [79] πρότεινε την εφαρμογή τεχνικών γραμμικού προγραμματισμού από το πεδίο της μαθηματικής βελτιστοποίησης στα συγκεκριμένα προβλήματα, μειώνοντας σημαντικά το υπολογιστικό κόστος επίλυσης. Στην εργασία [82] εξετάστηκε για πρώτη φορά το σενάριο δίκαιης κατανομής πόρων στα πλαίσια ενός δικτύου OFDMA και προτάθηκε ένας αποδοτικός και υπολογιστικά απλός αλγόριθμος ανάθεσης φερόντων που επιτυγχάνει δικαιοσύνη τύπου “max-min”. Ο αλγόριθμος αυτός επεκτάθηκε στην [83] έτσι ώστε πλέον της ανάθεσης υποκαναλιών, να προσαρμόζεται με δυναμικό τρόπο η ισχύς στα φέροντα του συστήματος, οδηγώντας σε μια σημαντική βελτίωση των επιπέδων ρυθμοαπόδοσης των χρηστών. Το μειονέκτημα της τελευταίας προσέγγισης είναι η ανάγκη επίλυσης (σε πραγματικό χρόνο) ενός συστήματος μη γραμμικών εξισώσεων προκειμένου να υπολογιστεί η κατανομή

της ισχύος επί του εύρους ζώνης των χρηστών. Η υπόθεση της στατικής και ομοιόμορφης κατανομής της ισχύος εξετάστηκε ενδελεχώς στις εργασίες [128] και [129], όπου αφενός εκτιμήθηκε το κόστος που εισάγεται στη ρυθμοαπόδοση του συστήματος από την υιοθέτηση της και αφετέρου προτάθηκαν σχετικοί αποδοτικοί αλγόριθμοι απόδοσης υποκαναλιών. Τέλος, στην εργασία [130] εξετάστηκε ένα ρεαλιστικότερο σενάριο ανάθεσης πύρων OFDMA, σύμφωνα με το οποίο ζητούνται ταυτόχρονα υπηρεσίες από διαφορετικές τηλεπικοινωνιακές κλάσεις χρηστών.

Δρομολόγηση στα πεδία του χρόνου και της συχνότητας: Το μειονέκτημα των προηγούμενων εργασιών είναι ότι δε λαμβάνουν υπόψη τη χρονική εξέλιξη των συνόδων των χρηστών αλλά απομονώνουν τη διαδικασία ανάθεσης πύρων σε μία χρονοθυρίδα. Στην πράξη απαιτείται η λειτουργία ενός μηχανισμού δρομολόγησης, ο οποίος παρακολουθεί την πορεία εξυπηρέτησης της ζητούμενης τηλεπικοινωνιακής κίνησης και αναπροσαρμόζει τις προτεραιότητες των χρηστών στην πρόσβασή τους στο κοινό εύρος ζώνης, αλληλεπιδρώντας στενά με τις διαδικασίες βελτιστοποίησης στο πεδίο της συχνότητας. Το πρώτο αξιόλογο σχήμα δρομολόγησης για συστήματα OFDMA παρουσιάστηκε στην εργασία [94], όπου οι συγγραφείς πρότειναν ορισμένες τροποποιήσεις σε έναν κλασικό αλγόριθμο δίκαιης δρομολόγησης δεδομένων σχεδιασμένο για ενσύρματα δίκτυα (truncated GPS). Το μειονέκτημα της εν λόγω προσέγγισης ήταν διττό: αφενός υποστηριζόταν ένα μοναδικό σχήμα διαμόρφωσης (QPSK) αφετέρου η διαδικασία κατανομής υποκαναλιών δεν αξιοποιούσε την εγγενή επιλεκτικότητα του ραδιοδιαύλου στα πεδία της συχνότητας και των χρηστών. Στη διατριβή [37] μελετήθηκε το πρόβλημα δρομολόγησης μέσω ενός καινοτόμου πλαισίου εργασίας που βασιζόταν στις λεγόμενες συναρτήσεις χρησιμότητας (Utility Functions). Αν και η συγκεκριμένη προσέγγιση παρουσιάζει ιδιαίτερα έντονο θεωρητικό ενδιαφέρον, η πολυπλοκότητα των προτεινόμενων αλγορίθμων είναι αρκετά υψηλή. Η επέκταση του κλασικού αλγορίθμου δρομολόγησης 3G, Proportional-Fair (που απαντάται ευρέως στα δίκτυα HSPA) στα δίκτυα OFDMA παρουσιάζεται στην [86]. Τέλος δύο ακόμη εργασίες που χρήζουν αναφοράς είναι οι [131] και [132], οι οποίες υποβοηθούν τις αποφάσεις ανάθεσης και δρομολόγησης χρησιμοποιώντας στατιστική γνώση των κατανομών ποιότητας των ραδιοδιαύλων για τους επιμέρους χρήστες του συστήματος. Ωστόσο πρέπει να σημειωθεί ότι η εκ των προτέρων και με ακρίβεια γνώση της κατάστασης των διαύλων δεν είναι εν γένει δυνατή.

Μηχανισμοί δρομολόγησης προσανατολισμένοι προς τα συστήματα LTE και Mobile WiMAX: Στην τελευταία κατηγορία σχετικών εργασιών από τη βιβλιογραφία, παρατίθενται οι προτάσεις εκείνες που εξετάζουν το πρόβλημα δρομολόγησης πακέτων υπό το πρίσμα συγκεκριμένων συστημάτων, του Mobile WiMAX και του LTE. Οι εν λόγω προτάσεις διακρίνονται για τη σχετικά χαμηλή υπολογιστική πολυπλοκότητά τους αλλά και τη θεώρηση πρακτικών ζητημάτων υλοποίησης, όπως η σηματοδότηση. Οι εργασίες [93] και [133] επικεντρώθηκαν σε μονοκύψελα και πολυκύψελα δίκτυα Mobile WiMAX και εξέτασαν ρεαλιστικές συνθήκες τηλεπικοινωνιακής φόρτισης που περιλαμβάνουν υπηρεσίες πραγματικού χρόνου αλλά και υπηρεσίες ανεκτικές ως προς την καθυστέρηση μετάδοσης. Αντίστοιχες

προτάσεις για τα συστήματα LTE μπορούν να βρεθούν στις εργασίες [134, 135, 136]. Η μεθοδολογία διαχείρισης πόρων που προτείνεται στις συγκεκριμένες εργασίες αποσυμπλέκει τις διαδικασίες δρομολόγησης στα πεδία της συχνότητας και του χρόνου, καθορίζοντας σε 1η φάση το υποσύνολο των χρηστών που πρόκειται να λάβει πόρους στην τρέχουσα χρονοθυρίδα και αναθέτοντας κατά τη 2η φάση τους πόρους ισχύος και φάσματος στους ενεργούς χρήστες. Σημειώνεται ότι και στις τρεις προτάσεις η ισχύς διαμοιράζεται ομοιόμορφα στα φέροντα προκειμένου το υπολογιστικό κόστος να διατηρηθεί σε χαμηλά επίπεδα.

6.3 Μοντελοποίηση του Συστήματος

Στην παρούσα ενότητα θα παρουσιαστούν συνοπτικά ο τρόπος μοντελοποίησης ενός δικτύου OFDMA και οι κεντρικές παραδοχές αυτής της ερευνητικής προσπάθειας. Ιδιαίτερη έμφαση θα δοθεί σε θέματα μοντελοποίησης των υποστρωμάτων PHY και MAC, του μέσου διάδοσης και της τηλεπικοινωνιακής κίνησης.

Παρακάτω θα εξεταστεί η κάτω ζεύξη (downlink) ενός τυπικού μονοκύψελου δικτύου OFDMA με απλά κεραιοσυστήματα SISO όπως το LTE. Έστω ένα διαθέσιμο εύρος ζώνης BW αποτελούμενο από N_s ορθογωνικά (υπο)φέροντα ή (υπο)κανάλια ή ομάδες φυσικών συχνοτικών πόρων (Physical Resource Blocks - PRBs) σύμφωνα με την ορολογία που χρησιμοποιείται στο πρότυπο LTE. Τα δεδομένα εκπέμπονται από το σταθμό βάσης σε διακριτές χρονοθυρίδες αποτελούμενες από ακέραιο αριθμό συμβόλων OFDMA, διάρκειας T_f msec. Έτσι κάθε χρονοθυρίδα t απαρτίζεται από δεκάδες ή εκατοντάδες χρονο-συχνοτικές υπομονάδες πόρων, κάθε μία εκ των οποίων μπορεί να αποδοθεί αποκλειστικά σε ένα χρήστη. Η τελευταία παραδοχή εξασφαλίζει ότι δεν θα εμφανιστεί ενδοκυψελική παρεμβολή, απλοποιώντας τις λειτουργίες αποδιαμόρφωσης και αποκωδικοποίησης των δεκτών των κινητών τερματικών, και θεωρείται πλέον κοινή πρακτική. Επίσης, για λόγους απλότητας και δίχως βλάβη της γενικότητας στη μοντελοποίηση υιοθετείται από εδώ και στο εξής η παραδοχή ότι εντός μίας χρονοθυρίδας η απόδοση υποκαναλιών δεν μεταβάλλεται. Ως γνωστόν, οι πόροι της κάτω ζεύξης χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση χρήσιμων δεδομένων προς τους χρήστες της κυψέλης, την αποστολή της απαραίτητης σηματοδότησης, αλλά και τη μετάδοση πιλοτικών σημάτων αναφοράς για την εκτίμηση της συνάρτησης μεταφοράς των ζεύξεων. Καθώς τα δύο τελευταία θέματα κινούνται πέραν του επιστημονικού ενδιαφέροντος της διατριβής, θεωρείται η απλούστευση ότι N από τα N_s διαθέσιμα υποκανάλια μεταφέρουν χρήσιμη τηλεπικοινωνιακή κίνηση και τα υπόλοιπα αγνοούνται. Συνεπώς σε 1η φάση γίνεται αντιληπτό ότι ο σκοπός του υποστρώματος OFDMA-MAC είναι η απόδοση των N διακριτών φυσικών πόρων φάσματος στους χρήστες του συστήματος.

Κάθε υποκανάλι n μπορεί να τεθεί σε ένα διαφορετικό σχήμα μετάδοσης ανάλογα με τις συνθήκες διάδοσης, μία τεχνική γνωστή από τα συστήματα HSPA με την ονομασία προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση (AMC). Θεωρώντας ότι το σύστημα υποστηρίζει M το πλήθος προσαρμοστικά σχήματα με διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης, καταδεικνύεται και ο 2ος σκοπός του υποστρώματος OFDMA-MAC, δηλαδή η απόφαση για το προτιμότερο σχήμα προσαρμογής κάθε υποκαναλιού. Συμβολίζοντας με D το σύνολο των επιτρεπτών ρυθμών με-

τάδοσης (π.χ. για ένα τυπικό σύστημα QPSK, 16-QAM και 64-QAM, $\mathcal{D} = \{0, 2, 4, 6\}$) τότε σε κάθε υποκανάλι n αποδίδεται ένα μοναδικό σχήμα μετάδοσης m με αποτέλεσμα ο ρυθμός μετάδοσης συμβολιζόμενος με c_n bits/symbol να είναι διακριτός. Πλέον του σχήματος διαμόρφωσης ανά υποκανάλι, δίνεται η δυνατότητα της προσαρμογής της ισχύος P_n , δεδομένης μίας διαθέσιμης ποσότητας ισχύος στο σταθμό βάσης P_{bs} , μία διαδικασία που συνιστά τον 3ο σκοπό του υποστρώματος OFDMA-MAC.

Ωστόσο, οι παράμετροι μετάδοσης P_n και c_n συνδέονται μεταξύ τους, καθώς για κάθε υποκανάλι απαιτείται η εξασφάλιση ενός ελάχιστου αποδεκτού επιπέδου σφάλματος λήψης bits στο δέκτη (P_{min}^e). Επομένως προκειμένου να υποστηριχθεί ένας συγκεκριμένος ρυθμός μετάδοσης c_n σε ένα υποκανάλι, η αποδοθείσα ισχύς P_n πρέπει να είναι ικανή να διατηρήσει ένα αποδεκτό επίπεδο σηματοθορυβικού λόγου στο δέκτη. Αλλά και αντίστροφα, δεδομένης μίας γνωστής ισχύος μετάδοσης P_n , τίθεται ένα άνω όριο ως προς το ρυθμό μετάδοσης που μπορεί να αποδοθεί στο συγκεκριμένο υποκανάλι προκειμένου να μην πραγματοποιηθεί υπέρβαση του επιπέδου BER.

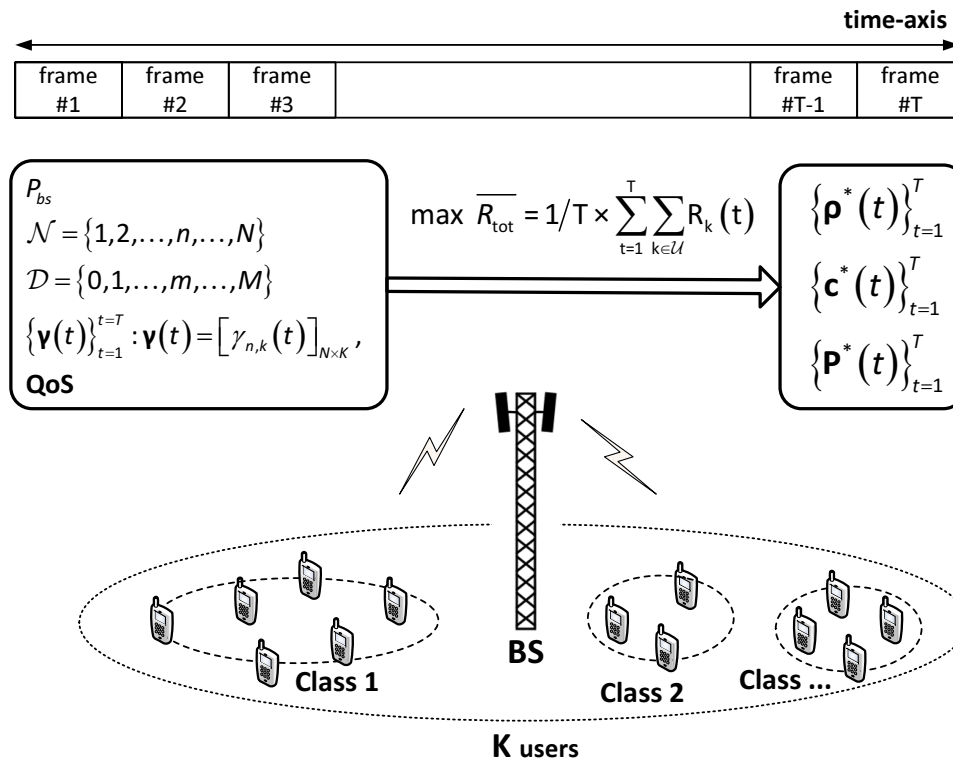
Θεωρώντας ένα τυχαίο υποκανάλι n , ορίζεται ο λόγος γ_n του πλάτους ισχύος της συνάρτησης μεταφοράς της ραδιοζεύξης σταθμού βάσης - κινητού τερματικού προς την ισχύ θορύβου: $\gamma_n = \frac{|h_n|^2}{N_0 \cdot \Delta f}$. Ο λόγος αυτός θεωρείται γνωστός τόσο στην πλευρά του κινητού τερματικού (μέσω χρήσης πιλοτικών σημάτων) όσο και στην πλευρά του σταθμού βάσης (μέσω ενός τέλει καναλιού ανάδρασης). Τότε για μία δεδομένη αφαιρετική συνάρτηση f που διασυνδέει τα υποστρώματα PHY και MAC, οι παράμετροι μετάδοσης P_n και c_n αλληλοεξαρτώνται ως εξής:

$$P_n = f(c_n, \gamma_n, P_{min}^e) \Leftrightarrow c_n = f^{-1}(P_n, \gamma_n, P_{min}^e) \quad (6.1)$$

Επομένως στα πλαίσια της διαχείρισης πόρων, το υπόστρωμα OFDMA-MAC οφείλει να καθορίσει για κάθε χρονοθυρίδα τα υποσύνολα υποκαναλιών για κάθε χρήστη καθώς και το σχήμα ή την ισχύ μετάδοσης για κάθε υποκανάλι.

Ολοκληρώνοντας την περιγραφή του μοντέλου του δικτύου, εισάγονται τα σενάρια τηλεπικοινωνιακής κίνησης και ποιότητας υπηρεσίας που θα μελετηθούν κατά την πρόταση των σχημάτων δρομολόγησης. Έστω ένας πεπερασμένος χρονικός ορίζοντας ή παράθυρο, αποτελούμενο από T χρονοθυρίδες μετάδοσης, όπου η παράμετρος T αντιστοιχεί σε χρονικά διαστήματα δεκάδων έως εκατοντάδων msec. Οι απαιτήσεις QoS σε επίπεδο χρηστών και συστήματος αφορούν είτε σε αυστηρή χρονική κλίμακα μίας χρονοθυρίδας (αν μιλάμε για υπηρεσία πραγματικού χρόνου) είτε σε κλίμακα T χρονοθυρίδων (αν αναφερόμαστε σε ελαστικού τύπου υπηρεσίες).

Έστω λοιπόν K το πλήθος χρήστες που ζητούν υπηρεσίες με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, ενδεχομένως ετερογενή. Συμβολίζοντας με $\rho_{n,k}(t)$ το δυαδικό δείκτη ανάθεσης του υποκαναλιού n στο χρήστη k κατά τη χρονοθυρίδα t , και με $c_{n,k}(t)$, $P_{n,k}(t)$ τις μεταβλητές ανάθεσης ρυθμού μετάδοσης και ισχύος, τότε ορίζονται τα ακόλουθα χρήσιμα φυσικά μεγέθη:



Σχήμα 6.1: Τυπικό σχηματικό διάγραμμα μοντελοποίησης δικτύου και δρομολόγησης OFDMA

- Στιγμιαίος Ρυθμός Μετάδοσης Χρήστη: $R_k(t) = \sum_{n=1}^N \rho_{n,k}(t) \cdot c_{n,k}(t)$
- Στιγμιαία Ρυθμοαπόδοση Κυψέλης: $R_{tot}(t) = \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \rho_{n,k}(t) \cdot c_{n,k}(t)$
- Μέση Ρυθμοαπόδοση Χρήστη: $\overline{R}_k = (1/T) \cdot \sum_{t=1}^T R_k(t)$
- Μέση Ρυθμοαπόδοση Κυψέλης: $\overline{R}_{tot} = \sum_{t=1}^T \overline{R}_k = (1/T) \cdot \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T \rho_{n,k}(t) \cdot c_{n,k}(t)$
- Ισχύς Μετάδοσης Σ.Β.: $P_{tx}(t) = \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \rho_{n,k}(t) \cdot f(c_{n,k}(t), \gamma_{n,k}(t), P_{min}^e) \leq P_{bs}$

Παρατήρηση: Το παρόν κεφάλαιο εστιάζει σε προβλήματα που αφορούν στην κάτω ζεύξη. Ωστόσο, αν ήταν επιθυμητή η εξέταση και σεναρίων της άνω ζεύξης, οι τροποποιήσεις που θα έπρεπε να εφαρμοστούν θα ήταν ελάχιστες, καθώς και σε αυτή την περίπτωση διατηρείται η ορθογωνικότητα στην απόδοση πόρων (σε αντίθεση με τα συστήματα WCDMA). Για προβλήματα UL, θα έπρεπε επομένως να αντικατασταθεί ο περιορισμός όσον αφορά στη μέγιστη ισχύ μετάδοσης του σταθμού βάσης με K αντίστοιχους περιορισμούς, έναν για κάθε κινητό τερματικό. Στο σχήμα 6.1 παρατίθεται μία τυπική σχηματική απεικόνιση ενός σεναρίου πρόσβασης OFDMA και τα βασικά στοιχεία του προβλήματος δρομολόγησης.

6.4 Ένας Ιδεατός Δρομολογητής Πακέτων για Δίκτυα OFDMA που Υποστηρίζει Δίκαιη Απόδοση Πόρων

6.4.1 Περιγραφή του Δρομολογητή

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστεί ένας ιδεατός δρομολογητής πακέτων για δίκτυα OFDMA, ο οποίος στοχεύει στην ταυτόχρονη μεγιστοποίηση της ρυθμοαπόδοσης σε επίπεδο κυψέλης και στη δίκαιη απόδοση QoS σε επίπεδο χρηστών. Ο δρομολογητής έχει κατά κύριο λόγο θεωρητικό ενδιαφέρον, καθώς δε μπορεί να εφαρμοστεί στην πράξη για διάφορους λόγους που θα περιγραφούν αναλυτικά στη συνέχεια. Αντιμετωπίζει το πρόβλημα της δρομολόγησης στο πεδίο της συχνότητας και του χρόνου από κοινού, βασιζόμενος σε εργαλεία από το πεδίο της μαθηματικής βελτιστοποίησης. Αρχικά θα γίνει αναφορά στη γενική περίπτωση όπου προσαρμόζονται με δυναμικό τρόπο όλες οι παράμετροι μετάδοσης, συμπεριλαμβανομένης της ισχύος, ενώ στη συνέχεια θα εξεταστεί και η ειδική περίπτωση της στατικής ομοιόμορφης κατανομής της ισχύος, η οποία βρίσκει ευρεία εφαρμογή σε προτάσεις που αφορούν σε πραγματικά συστήματα OFDMA, όπως το LTE και το Mobile WiMAX.

6.4.1.1 Δυναμική Κατανομή Ισχύος

Εν γένει τα θέματα διαχείρισης πόρων μπορούν να διατυπωθούν ως μαθηματικά προβλήματα βελτιστοποίησης όπου: (1ον) η αντικειμενική συνάρτηση εκφράζει το μετρικό επίδοσης από την πλευρά του συστήματος (π.χ. τη ρυθμοαπόδοση της κυψέλης), (2ον) οι περιοριστικές εξισώσεις εκφράζουν τους δείκτες ικανοποίησης από την πλευρά των χρηστών (QoS) καθώς και ορισμένους περιορισμούς που επιβάλλονται από το εκάστοτε σύστημα (π.χ. μέγιστη ισχύς σταθμού βάσης, ορθογωνική ανάθεση υποκαναλιών, κλπ.), και (3ον) οι μεταβλητές βελτιστοποίησης αναπαριστούν τις αποδόσεις πόρων και τις αποφάσεις δρομολόγησης. Η μαθηματική διατύπωση ενός πρόβλημα διαχείρισης πόρων καθιστά εφικτή τη χρήση τεχνικών και εργαλείων από το πεδίο της μαθηματικής βελτιστοποίησης, προκειμένου να επιλυθεί η διατύπωση και να ληφθεί η τελική βέλτιστη απόφαση κατανομής των πόρων.

Το υπό μελέτη σενάριο αφορά στη μεγιστοποίηση της ρυθμοαπόδοσης της κυψέλης, υπό την προϋπόθεση όμως της ανάθεσης αναλογικά δίκαιων επιπέδων ρυθμοαπόδοσης στο σύνολο των χρηστών για έναν ορίζοντα εύρους T χρονοθυρίδων. Σε κάθε χρήστη k του συστήματος αντιστοιχίζεται ένας κανονικοποιημένος παράγοντα δικαιοσύνης w_k ο οποίος καθορίζει το ποσοστό της επιτεύξιμης ρυθμοαπόδοσης της κυψέλης που λαμβάνει ο χρήστης αυτός, δηλαδή:

$$w_k = \frac{\overline{R}_k}{\sum_{i=1}^K \overline{R}_i}, \text{ όπου } \sum_{k=1}^K w_k = 1 \quad (6.2)$$

Η πλήρης μαθηματική διατύπωση για το εν λόγω πρόβλημα δίνεται στις εξισώσεις (6.3α)–

(6.3γ') που ακολουθούν:

$$\max_{\rho_{n,k}(t), c_n(t)} \left\{ (1/T) \cdot \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T \rho_{n,k}(t) \cdot c_n(t) \right\} \quad (6.3\alpha')$$

subject to

$$\overline{R}_k / \sum_{i=1}^K \overline{R}_i = w_k, \quad \sum_{k=1}^K \rho_{n,k,t} = 1, \quad \forall n, \forall t \quad (6.3\beta')$$

$$\sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \rho_{n,k}(t) \cdot f(c_n(t), \gamma_{n,k}(t), P_{\min}^e) \leq P_{bs}, \quad \forall t \quad (6.3\gamma')$$

Η συγκεκριμένη διατύπωση ανήκει στην κατηγορία των προβλημάτων μη γραμμικού και ακέραιου (διακριτού) μαθηματικού προγραμματισμού μεγάλης κλίμακας. Τα προβλήματα αυτά δε μπορούν να επιλυθούν απευθείας εξαιτίας κυρίως των διακριτών χώρων των μεταβλητών βελτιστοποίησης. Επίσης η εξαντλητική αναζήτηση όλων των πιθανών συνδυασμών ανάθεσων υποκαναλιών στους χρήστες και σχημάτων μετάδοσης στα υποκανάλια είναι πρακτικά αδύνατη λόγω της κλιμάκωσης του προβλήματος. Πράγματι, η εξέταση των συνδυασμών υποκαναλιών-χρηστών απαιτεί K^N αναζητήσεις, ενώ η αντίστοιχη εξέταση σχημάτων διαμόρφωσης M^N αναζητήσεις, όπου $N \sim 100$, $K \sim 10$ και $M \sim 10$.

Προκειμένου να μειωθεί δραστικά το υπολογιστικό κόστος αντιμετώπισης του προβλήματος, εφαρμόζεται μία τεχνική γραμμικοποίησης των εμπλεκόμενων μαθηματικών εξισώσεων, παρόμοια με εκείνη που είχε προταθεί στην εργασία [79] για ένα παραπλήσιο πρόβλημα ανάθεσης πόρων. Συγκεκριμένα εισάγεται ένας νέος δείκτης ανάθεσης 4 διαστάσεων, ο οποίος ενσωματώνει πλήρως την πληροφορία ανάθεσης σχήματος μετάδοσης, απόδοσης υποκαναλιού και δρομολόγησης για τη συγκεκριμένη χρονοθυρίδα. Ορίζεται λοιπόν η δυαδική μεταβλητή $x_{n,k,m,t}$, η οποία λαμβάνει την τιμή 1 αν το υποκάνάλι n αποδίδεται στο χρήστη k κατά τη χρονοθυρίδα t και προσαρμόζεται σύμφωνα με το σχήμα μετάδοσης m . Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση η τιμή της είναι μηδενική. Με βάση τη νέα αυτή μεταβλητή η μέση ρυθμοαπόδοση της κυψέλης μπορεί να γραφτεί σύμφωνα με την εξίσωση (6.4):

$$\overline{R}_{tot} = \sum_{k=1}^K \overline{R}_k = (1/T) \cdot \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T \mathcal{D}_m \cdot x_{n,k,m,t} \quad (6.4)$$

Επίσης, οι περιοριστικές εκφράσεις (6.3β') που αφορούν στη δίκαιη ανάθεση ρυθμοαπόδοσης για κάθε χρήστη, με μία απλή αναδιάταξη μπορούν να εκφραστούν μέσω της εξίσωσης (6.5):

$$(1 - w_k) \cdot \overline{R}_k - w_k \cdot \left(\sum_{i \leq K, i \neq k} \overline{R}_i \right) = 0 \quad \text{όπου} \quad \overline{R}_i = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T \mathcal{D}_m \cdot x_{n,i,m,t} \quad (6.5)$$

Ανάλογες εκφράσεις προκύπτουν για τις περιοριστικές εκφράσεις που σχετίζονται με την ορθογωνική απόδοση υποκαναλιών και τη διατήρηση της ισχύος μετάδοσης του σταθμού βάσης σε επιτρεπτά επίπεδα. Στις εξισώσεις (6.6α')–(6.6δ') αναπαριστάται το αρχικό πρόβλημα στην

επαναδιατυπωμένη του μορφή. Βάσει επομένως της νέας μεταβλητής ανάθεσης, το αρχικό πρόβλημα εκφράστηκε ως ένα πρόβλημα γραμμικού και δυαδικού προγραμματισμού (binary integer linear programming - BILP ή απλά IP), το οποίο μπορεί να επιλυθεί σε λογικά χρονικά πλαίσια με χρήση εξειδικευμένων μεθόδων (π.χ. branch & bound, cutting-planes) και λογισμικών (π.χ. CPLEX, SCIP) [137].

$$\max_{x_{n,k,m,t} \in \{0,1\}} \left\{ (1/T) \cdot \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T \mathcal{D}_m \cdot x_{n,k,m,t} \right\} \quad (6.6\alpha')$$

subject to

$$(1 - w_k) \cdot \overline{R}_k - w_k \cdot \left(\sum_{i \leq K, i \neq k} \overline{R}_i \right) = 0, \forall k \quad (6.6\beta')$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K x_{n,k,m,t} = 1, \forall n, \forall t \quad (6.6\gamma')$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K x_{n,k,m,t} \cdot f(\mathcal{D}_m, \gamma_{n,k}(t), P_{\min}^e) \leq P_{bs}, \forall t \quad (6.6\delta')$$

Ο ιδεατός δρομολογητής πακέτων βασίζεται στις παραπάνω εξισώσεις και επιπλέον:

1. Παρ' ότι η πολυπλοκότητα επίλυσης ενός γραμμικού προβλήματος είναι εν γένει χαμηλή, η διακριτή φύση των μεταβλητών δρομολόγησης δεν επιτρέπει την εφαρμογή μεθόδων προβλέψιμου υπολογιστικού κόστους. Για το λόγο αυτό προτείνεται η συνεχής χαλάρωση του πεδίου ορισμού τους, επιτρέποντας να λαμβάνουν πραγματικές τιμές εντός το διαστήματος $[0, 1]$. Με άλλα λόγια, επιτρέπεται η απόδοση υποκαναλιών σε περισσότερους από έναν χρήστες σε μία χρονοθυρίδα. Αν και η συγκεκριμένη θεώρηση οδηγεί σε μη υλοποιήσιμες αποδόσεις υποκαναλιών, ωστόσο είναι ιδιαίτερα ελκυστική υπολογιστικά, καθώς η χαλαρωμένη εκδοχή αντιστοιχεί σε ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού (linear programming - LP) [74]. Για τα προβλήματα αυτά έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι επίλυσης με επακριβές πολυωνυμικό υπολογιστικό κόστος 3ης τάξης (π.χ. Interior Point). Πρέπει να τονιστεί σε αυτό το σημείο ότι οι συνεχώς χαλαρωμένες εκδοχές των προβλημάτων ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού παρέχουν ένα άνω φράγμα της βέλτιστης επίδοσης της αντικειμενικής συνάρτησης, εν προκειμένω της ρυθμοαπόδοσης.
2. Προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η ρυθμοαπόδοση της κυψέλης για ένα πεπερασμένο ορίζοντα T χρονοθυρίδων, θα πρέπει οι αποφάσεις δρομολόγησης να ληφθούν άπαξ στην αρχή του παραθύρου ($t = 1$) για τον πλήρη ορίζοντα ($t = 1, \dots, T$). Για να συμβεί αυτό θα πρέπει ο σταθμός βάσης να γνωρίζει εκ των προτέρων τη συνάρτηση μεταφοράς των διαύλων των ζεύξεων σταθμού βάσης - χρηστών για όλες τις μελλοντικές χρονοθυρίδες εντός του ορίζοντα. Η γνώση αυτή δεν είναι δυνατή και θα καθιστούσε το πραγματικό σύστημα μη αιτιατό, ωστόσο στα πλαίσια της παρούσας μελέτης υιοθετούμε την παραδοχή αυτή.

Συνοψίζοντας την προηγηθείσα ανάλυση, παρουσιάστηκε ουσιαστικά ένας ιδεατός δρο-

μολογητής, ο οποίος παρέχει με ιδιαίτερα αποδοτικό τρόπο ένα άνω φράγμα στην επιτεύξιμη ρυθμοαπόδοση της κυψέλης. Ο ιδεατός δρομολογητής μπορεί να αξιοποιηθεί ως σχήμα αναφοράς σε μελέτες επίδοσης και αξιολόγησης δικτύων OFDMA, αλλά και ως μέτρο σύγκρισης για ρεαλιστικούς αλγορίθμους δρομολόγησης.

6.4.1.2 Στατική Ομοιόμορφη Κατανομή Ισχύος

Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα της σχετικής βιβλιογραφία, μία πάγια τακτική απλοποίησης των προβλημάτων διαχείρισης πόρων των δικτύων OFDMA συνίσταται στη θεώρηση της στατικής κατανομής της ισχύος. Μία κλασική κατανομή είναι η ομοιόμορφη σύμφωνα με την οποία σε κάθε υποκανάλι n αποδίδεται ισχύς $P_n = P_{bs}/N$ ανεξαρτήτως του επιλεγέντα χρήστη. Με γνωστή την απόδοση ισχύος, μπορεί να προϋπολογιστεί το υψηλότερο (από πλευράς επίδοσης) σχήμα μετάδοσης για κάθε πιθανό συνδυασμό υποκαναλιού-χρήστη, για το οποίο δεν υπερβαίνεται το μέγιστο κατώφλι BER. Επομένως το αρχικό πρόβλημα εκφυλίζεται σε ένα νέο πρόβλημα δυναμικής απόδοσης υποκαναλιών για κάθε χρονοθυρίδα.

Μαθηματικά, συμβολίζεται με $r_{n,k}(t)$ ο μέγιστος υποστηριζόμενος ρυθμός μετάδοσης για τον τυχαίο συνδυασμό υποκαναλιού n και χρήστη k κατά την χρονοθυρίδα t και ο οποίος μπορεί να υπολογιστεί εκ των προτέρων μέσω της σχέσης (6.7). Χρησιμοποιείται ο συμβολισμός $r_{n,k}(t)$ αντί του συμβολισμού $c_{n,k}(t)$ ώστε να τονιστεί ότι ο ρυθμός μετάδοσης για κάθε φέρον είναι πλέον γνωστή παράμετρος του προβλήματος βελτιστοποίησης και όχι άγνωστη μεταβλητή του.

$$r_{n,k}(t) = f^{-1} \left(\frac{P_{bs}}{N}, \gamma_{n,k}(t), P_{\min}^e \right) \quad (6.7)$$

Στη συνέχεια εκφράζεται μαθηματικά το νέο πρόβλημα διαχείρισης πόρων στις σχέσεις (6.8α')–(6.8γ'), απόπου εύκολα μπορεί να διαπιστώσει κανείς ότι πρόκειται για μια διατύπωση γραμμικού προγραμματισμού. Επομένως σε σχέση με το γενικό πρόβλημα, η υπόθεση της ομοιόμορφης απόδοσης της ισχύος αφενός μειώνει στο μισό των αριθμό των μεταβλητών βελτιστοποίησης και αφετέρου το μετατρέπει αυτόματα σε γραμμική μορφή δίχως τη χρήση μετασχηματισμού ή προσέγγισης.

$$\max_{\rho_{n,k}(t)} \left\{ (1/T) \cdot \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T r_{n,k}(t) \cdot \rho_{n,k}(t) \right\} \quad (6.8\alpha')$$

subject to

$$(1 - w_k) \cdot \bar{R}_k - w_k \cdot \left(\sum_{i \leq K, i \neq k} \bar{R}_i \right) = 0, \forall k = 1, 2, \dots, K \quad (6.8\beta')$$

$$\sum_{k=1}^K \rho_{n,k}(t) = 1, \forall n, \forall t \quad (6.8\gamma')$$

Ακολουθώντας τα 2 σχόλια που αφορούσαν στο γενικό πρόβλημα της προηγούμενης υπο-

ενότητας, με χρήση των εκφράσεων (6.8) λαμβάνεται ένας ιδεατός και υπολογιστικά αποδοτικός δρομολογητής για ένα σύστημα OFDMA που εφαρμόζει ομοιόμορφη κατανομή της ισχύος επί του εύρους ζώνης.

6.4.2 Αξιολόγηση της Επίδοσης

Η παρούσα υποενότητα αφορά στην αξιολόγηση της επίδοσης των δικτύων OFDMA με αξιοποίηση των δύο προτεινόμενων σχημάτων ιδεατής δρομολόγησης. Δύο είναι οι βασικοί στόχοι της παρούσας μελέτης:

- Η εκτίμηση της επίδρασης της χρονικής δρομολόγησης πακέτων πλέον της ανάθεσης πόρων που εφαρμόζεται αποκλειστικά στο πεδίο της συχνότητας και
- Η εκτίμηση της επίδρασης της στατικής προσαρμογής της ισχύος σε σχέση με το γενικευμένο σενάριο βέλτιστης κατανομής των υποκαναλιών και της ισχύος

Για το πρώτο ζήτημα θα χρησιμοποιηθεί ο γενικευμένος δρομολογητής που παρουσιάστηκε στην ενότητα 6.4.1.1 και θα μεταβληθεί το εύρος του χρονικού ορίζοντα προκειμένου να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα ως προς την κλιμάκωση του κέρδους χρονικής δρομολόγησης. Σημειώνεται ότι αν τεθεί $T = 1$ στις σχετικές εξισώσεις λαμβάνεται ένας δρομολογητής που βελτιστοποιεί την απόδοση των πόρων αποκλειστικά στο πεδίο της συχνότητας, δηλαδή ανεξάρτητα σε κάθε χρονοθυρίδα. Για το δεύτερο ζήτημα θα αξιοποιηθεί ο δρομολογητής της ενότητας 6.4.1.2, θεωρώντας κοινά σενάρια αξιολόγησης με παραπάνω.

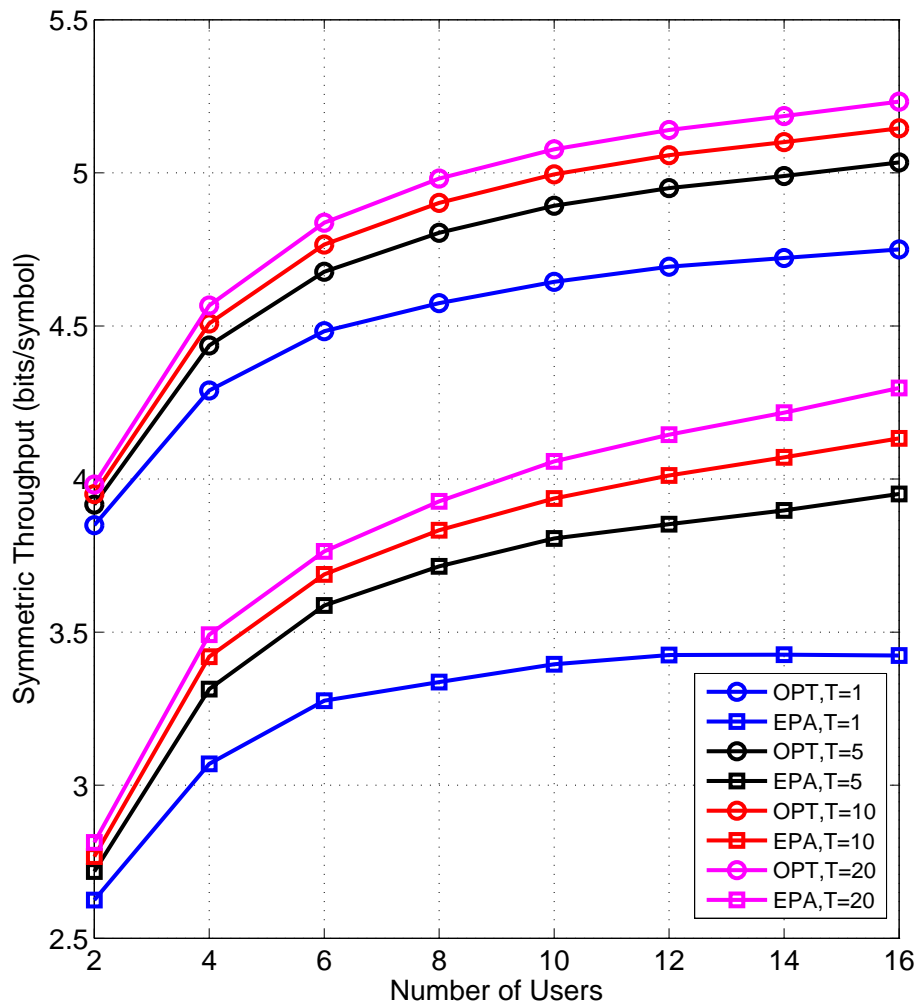
Το προσομοιωτικό μοντέλο: Οι μελέτες επίδοσης που θα παρουσιαστούν βασίζονται στο εργαλείο της υπολογιστικής προσομοίωσης. Για το σκοπό αυτό υλοποιήθηκαν στην υπολογιστική πλατφόρμα MATLAB οι βασικές λειτουργίες ενός δικτύου OFDMA σύμφωνα με τις παραδοχές που παρατέθηκαν στην ενότητα 6.3. Η μοντελοποίηση είχε ως στόχο την αναπαράσταση ενός δικτύου που διαθέτει τα κεντρικά χαρακτηριστικά του προτύπου LTE. Στον πίνακα 6.1 περιλαμβάνονται οι ακριβείς παράμετροι μοντελοποίησης και προσομοίωσης. Σημειώνεται ότι για κάθε σενάριο αξιολόγησης εξετάζονται 5 υλοποιήσεις δικτύου, κάθε μία εκ των οποίων περιλαμβάνει 2500 χρονοθυρίδες ή ισοδύναμα αντιστοιχεί σε 12.5 sec λειτουργίας του συστήματος. Ο αριθμός των χρηστών μεταβαλλόταν από 2 έως 16, με βήμα 2, όπου σε κάθε σενάριο υποτέθηκε ισότιμη παροχή ρυθμοαπόδοσης ανά χρήστη (“max-min fairness”). Για την αναπαράσταση του ραδιοδιαύλου χρησιμοποιήθηκε ένα ρεαλιστικό μοντέλο από την οικογένεια WinnerII [138]. Τέλος, για την επίλυση των προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού χρησιμοποιήθηκε το εμπορικό λογισμικό CPLEX [139] το οποίο διασυνδέθηκε με την κεντρική πλατφόρμα μέσω του ενδιάμεσου λογισμικού TOMLAB [140].

Αποτελέσματα & σχόλια: Στο σχήμα 6.2 παρουσιάζεται η μέση επιτευχθείσα ρυθμοαπόδοση ανά υποκανάλι ως συνάρτηση του αριθμού των χρηστών για διάφορους χρονικούς ορίζοντες, θεωρώντας το γενικευμένο ιδεατό δρομολογητή (σχήμα “OPT”) και την εκδοχή του που βασίζεται στην ομοιόμορφη κατανομή της ισχύος (σχήμα “EPA”). Τα κυριότερα συμπεράσματα είναι τα εξής:

Πίνακας 6.1: Βασικές παράμετροι πειραματικών προσομοιώσεων για τις μελέτες των ιδεατών δρομολογητών OFDMA

Φυσικό Μέγεθος	Συμβολισμός	Τιμή/Σχολιασμός
Κεντρική Φέρουσα	f_c	2.5 GHz
Εύρος Ζώνης Μετάδοσης	BW	20 MHz
Εύρος Ζώνης Υποκαναλιού	Δf	250 kHz
Αριθμός Χρήσιμων Υποκαναλιών	N	80
Κατώφλι Σφαλμάτων BER	P_{min}^e	10^{-6}
Πυκνότητα Ισχύος Θορύβου	N_0	-174 dBm/Hz
Υψηλότερη Τάξη Μετάδοσης ανά Υποκανάλι	c_{max}	6 bits/symbol
Υποστηριζόμενοι Ρυθμοί Μετάδοσης	\mathcal{D}	{0, 2, 4, 6} bits/symbol
Χωρητικότητα Χρονοθυρίδας OFDMA	C_{hard}	480 bits
Διάρκεια Χρονοθυρίδας OFDMA	T_f	5 msec
Ακτίνα Κυψέλης	R_{cell}	1 km
Μοντέλο Ραδιοδιαύλου	–	WinnerII C3 NLOS macro-cell
Συνάρτηση Διασύνδεσης PHY-MAC	$f(c_n, \gamma_n, P_e^{min})$	Μοντέλο SNR-gap/Cioffi [16]
Κατανομή Τερματικών	–	Σε 2 ζώνες ($\Delta SNR = 10$ dB)
Ταχύτητα Τερματικών	v_{max}	3 km/hr
Αριθμός Χρηστών	K	{2, 4, 6, ..., 16}
Τηλεπικοινωνιακό Προφίλ	–	Απείρως Κατελιημμένες Ουρές
Προφίλ QoS	$\{w_k\}_{k=1, \dots, K}$	$w_k = 1/K$ (Max-Min)
Εύρος Χρονικού Ορίζοντα	T	{1, 5, 10, 20} χρονοθυρίδες
Ισχύς Εκπομπής Σταθμού Βάσης	P_{bs}	46 dBm
Επαναλήψεις Χρονοθυρ. ανά Υλοποίηση	N_{frames}	2500
Επαναλήψεις Υλοποιήσεων Δικτύου	N_{drops}	5

1. Η χρονική δρομολόγηση πακέτων ($T > 1$) πλέον της αποκλειστικά συχνοτικής απόδοσης πόρων ($T = 1$), ενισχύει σημαντικά την επίδοση του συστήματος και για τους δύο δρομολογητές. Μάλιστα το κέρδος είναι αξιοσημείωτο από το στενότερο μήκος παραθύρου ($T = 5$), ενώ ο ρυθμός αύξησής του είναι μειούμενος καθώς προσεγγίζονται μεγαλύτερα μήκη παραθύρου. Η συμπεριφορά αυτή σχετίζεται άμεσα με την ταχύτητα μεταβολής του ραδιοδιαύλου, η οποία εξαρτάται από την κινητικότητα των χρηστών. Για τα εξεταζόμενα σενάρια η ταχύτητα των 3 km/hr αντιστοιχεί σε χρονική διάρκεια συνοχής περίπου ίση προς 5 χρονοθυρίδες. Για χαμηλότερες ταχύτητες και καθώς ο ραδιοδιαύλος θα αποσυσχετιζόταν πιο αργά, θα αναμενόταν αυξημένη επίδοση σε ευρύτερα μήκη ορίζοντα.
2. Η υπόθεση της ομοιόμορφης κατανομής της ισχύος αν και απλοποιεί σημαντικά την υπολογιστική πολυπλοκότητα του δρομολογητή, εισάγει ένα αξιοπρόσεκτο και μη αμελητέο κόστος στην επίδοση του συστήματος. Το κόστος αυτός παρατηρείται τόσο για την ανά χρονοθυρίδα βελτιστοποίηση όσο και για τη βελτιστοποίηση για ευρύτερους χρονικούς



Σχήμα 6.2: Αποτελέσματα επίδοσης ιδεατών δρομολογητών OFDMA για διάφορα σενάρια λειτουργίας

ορίζοντες. Το κόστος κυμάνθηκε από 15 έως 30% ανάλογα με το σενάριο και κατά μέσο όρο εκτιμήθηκε στο 20%. Επίσης παρατηρείται ότι η χρονική δρομολόγηση συνιστά έναν σημαντικό παράγοντα ενίσχυσης της επίδοσης ειδικά για την εκδοχή της ομοιόμορφης κατανομής της ισχύος. Για σενάρια υψηλής φόρτισης ($K > 12$) η διαφορά στην επίδοση των σχημάτων OPT και EPA καταγράφηκε στο 28% για $T = 1$ ενώ μειώθηκε στο 18% για $T = 20$.

6.5 Ένας Δυναμικός Αλγόριθμος Δρομολόγησης Πακέτων για Δίκτυα OFDMA που Υποστηρίζει Πολλαπλές Υπηρεσίες

6.5.1 Εισαγωγή και Ακριβής Ορισμός του Προβλήματος

Στο δεύτερο βασικό τμήμα του κεφαλαίου θα προταθεί ένας δυναμικός αλγόριθμος δρομολόγησης πακέτων ο οποίος υποστηρίζει την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλαπλών υπηρεσιών σταθερής ροής μετάδοσης και ελαστικής φύσης. Σε αντίθεση με την προηγούμενη ενότητα, όπου ο στόχος της εύρεσης της βέλτιστης απόδοσης πόρων οδήγησε στην υιοθέτηση ορισμένων μη ρεαλιστικών παραδοχών, κεντρικός στόχος της παρούσας ενότητας είναι η ανάπτυξη ενός υπολογιστικά αποδοτικού αλγορίθμου με υψηλή επίδοση και ο οποίος υπό προϋποθέσεις μπορεί να εφαρμοστεί σε πραγματικά συστήματα OFDMA όπως το LTE.

Δύο είναι τα κύρια συμπεράσματα που εξήχθησαν από την ανάλυση των ιδεατών δρομολογητών και τα οποία κατευθύνουν τη σχεδίαση του παρόντος δυναμικού αλγορίθμου:

- Αν και η υπόθεση της ομοιόμορφης μη δυναμικής προσαρμογής της ισχύος εισάγει ένα κόστος στην επίδοση του συστήματος, εν τούτοις απλοποιεί σημαντικά την πολυπλοκότητα του δρομολογητή και αποτελεί κλειδί για την ανάπτυξη ρεαλιστικών σχημάτων προοριζόμενων για πραγματικά συστήματα.
- Κάθε πρακτικό σχήμα απόδοσης πόρων πρέπει να λαμβάνει αποφάσεις δρομολόγησης σε επίπεδο χρονοθυρίδας αξιοποιώντας γνώση της ποιότητας των ραδιοζεύξεων για το τρέχον ή/και παρελθοντικά χρονικά στιγμιότυπα και όχι για μελλοντικά. Ωστόσο στόχος του δρομολογητή είναι η βελτιστοποίηση της μέσης ρυθμοαπόδοσης της κυψέλης για έναν ευρύ ορίζοντα αποτελούμενο από T χρονοθυρίδες.

Προκειμένου να αποδοθεί με ρεαλιστικό τρόπο ένα σενάριο πολλαπλής πρόσβασης OFDMA, θεωρούνται 2 κατηγορίες προσφερόμενων τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών: (1) Μία κατηγορία σταθερής ροής φορτίου και εξυπηρέτησης ανά χρονοθυρίδα (constant bit rate – CBR), και (2) Μία κατηγορία άπειρων δεδομένων, ελαστικής και αναλογικά δίκαιης εξυπηρέτησης (best effort – BE, βλ. ενότητα 6.4).

Η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος είναι παραπλήσια με εκείνη του σεναρίου (6.8), αρκεί να προστεθούν οι αντίστοιχες περιοριστικές εκφράσεις για την κατηγορία υπηρεσιών CBR. Στις εξισώσεις (6.9α')–(6.9δ') παρατίθεται η πλήρης διατύπωση του προβλήματος πολλαπλών υπηρεσιών:

$$\max_{\rho_{n,k,t}} \left\{ \frac{1}{T} \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T r_{n,k,t} \cdot \rho_{n,k,t} \right\} \quad (6.9\alpha')$$

subject to

$$\sum_{n=1}^N r_{n,k,t} \cdot \rho_{n,k,t} = R_k^{\min}, \forall k \in \mathcal{K}_{CBR}, \forall t \quad (6.9\beta')$$

$$\frac{\overline{R_k}}{\sum_{i \in \mathcal{K}_{BE}} \overline{R_i}} = w_k, \forall k \in \mathcal{K}_{BE} \quad (6.9\gamma')$$

$$\sum_{k=1}^K \rho_{n,k,t} = 1, \forall n, \forall t \quad (6.9\delta')$$

όπου επιπλέον:

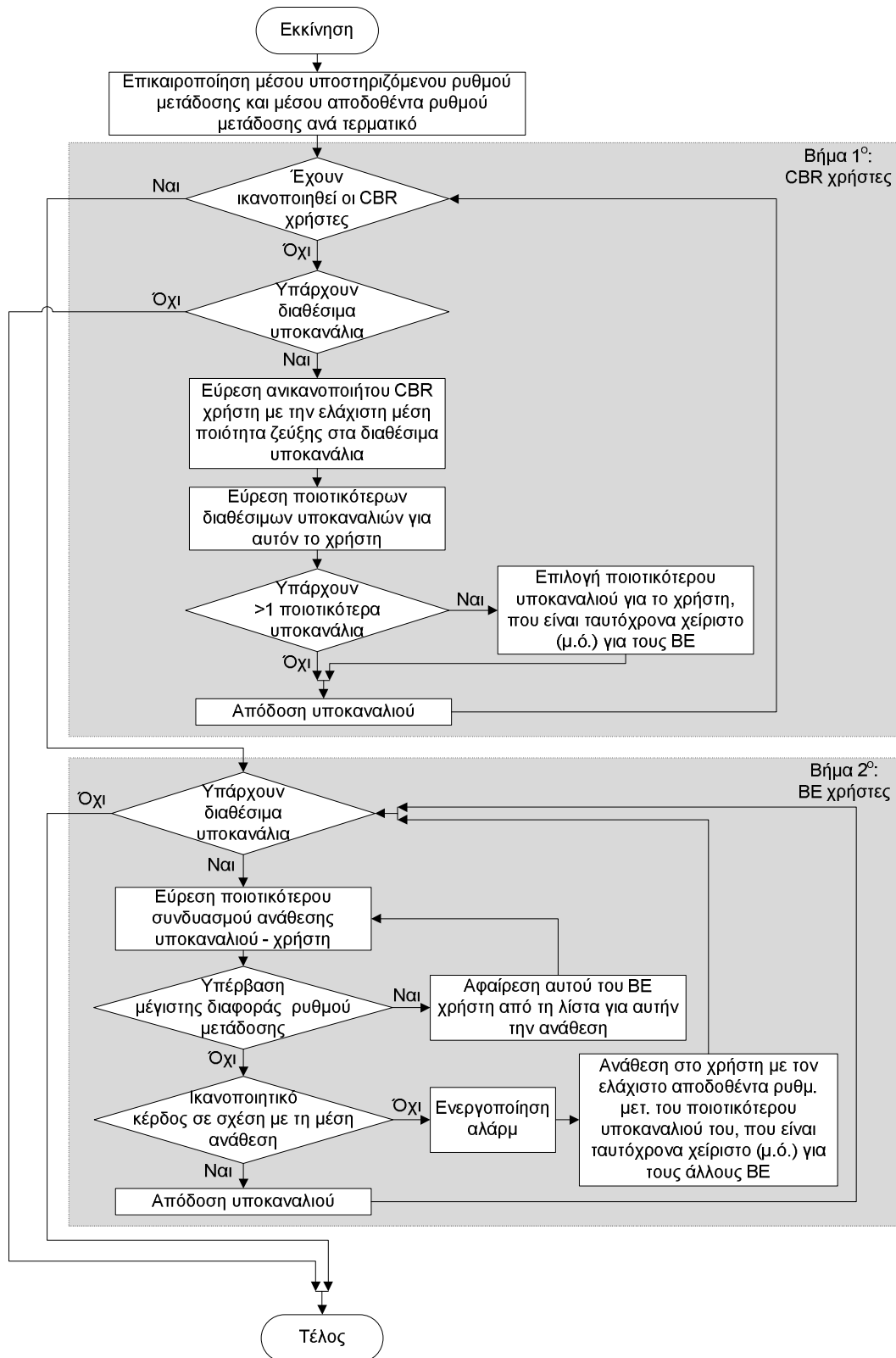
- \mathcal{K}_{CBR} , το υποσύνολο των K_1 χρηστών που ανήκουν στην τηλεπικοινωνιακή κατηγορία CBR και ζητούν υπηρεσίες σταθερής ροής R_k^{\min} bits/OFDMA symbol,
- \mathcal{K}_{BE} , το αντίστοιχο υποσύνολο των K_2 χρηστών που ανήκουν στην τηλεπικοινωνιακή κατηγορία BE με βάρη w_k ,
- $\rho_{n,k,t}$, οι μεταβλητές ανάθεσης υποκαναλιών στους χρήστες για κάθε χρονοθυρίδα εντός του χρονικού ορίζοντα, και
- $r_{n,k,t}$, οι μέγιστοι υποστηριζόμενοι ρυθμοί μετάδοσης για κάθε πιθανό συνδυασμό απόδοσης υποκαναλιού σε χρήστη, οι οποίοι είναι εκ των προτέρων γνωστοί λόγω της γνωστής κατανομής της ισχύος.

Μάλιστα, αν επιλυθεί το συγκεκριμένο πρόβλημα με τη χρήση μεθόδων γραμμικού προγραμματισμού, είναι δυνατόν να οριστεί ένα άνω φράγμα στην επίδοση του συστήματος. Το φράγμα αυτό θα χρησιμοποιηθεί ως αναφορά για την επίδοση του ρεαλιστικού αλγορίθμου δρομολόγησης που θα προταθεί στη συνέχεια.

6.5.2 Αναλυτική Περιγραφή του Αλγορίθμου

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος στοχεύει στη μεγιστοποίηση της μέσης ρυθμοαπόδοσης της κυψέλης στο τέλος του πεπερασμένου χρονικού ορίζοντα. Η ανάθεση των υποκαναλιών και η χρονο-επιλογή των χρηστών πραγματοποιείται σε επίπεδο χρονοθυρίδας και υποβοηθείται από την παρακολούθηση των αποδιδόμενων επιπέδων QoS αλλά και από ένα μοντέλο πρόβλεψης της ποιότητας των ζεύξεων σταθμού βάσης-χρηστών. Στη συνέχεια περιγράφεται η πλήρης διαδικασία απόδοσης πόρων για ένα τυχαίο χρονικό στιγμιότυπο t εντός του ορίζοντα.

Ο αλγόριθμος εξελίσσεται σε 2 βήματα, ένα για κάθε ομάδα χρηστών, ενώ προηγείται και ένα προπαρασκευαστικό βήμα στο οποίο ενημερώνονται τα εξελισσόμενα αποδιδόμενα επίπεδα QoS και επικαιροποιείται το μοντέλο πρόβλεψης ποιότητας των ραδιοζεύξεων για κάθε χρήστη. Στο σχήμα 6.3 αποτυπώνεται το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου.



Σχήμα 6.3: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου

1. Προπαρασκευαστικό Βήμα

Κατά την έναρξη της τρέχουσας χρονοθυρίδας t και για κάθε ενεργό χρήστη του συστήματος k επικαιροποιούνται τα στατιστικά μεγέθη $\overline{r_{k,t}}$ και $\overline{R_{k,t}}$ τα οποία εκφράζουν το μέσο υποστηριζόμενο ρυθμό μετάδοσης και το μέσο αποδοθέντα ρυθμό μετάδοσης μέχρι και την τρέχουσα χρονοθυρίδα αντίστοιχα. Μέσω του πρώτου μεγέθους (εξίσωση 6.10) εκτιμάται η μέση ποιότητα της ραδιοζεύξης σταθμού βάσης - κινητού τερματικού για κάθε χρήστη. Η πληροφορία αυτή αξιοποιείται από το χρονικό δρομολογητή για την παροχή προτεραιότητας κατά την απόδοση υποκαναλιών στην περίπτωση που στιγμιαία η ποιότητα υπερβεί τη μέση επιτεύξιμη. Μέσω του δεύτερου μετρικού (εξίσωση 6.11) το υπόστρωμα MAC παρακολουθεί τα πραγματικά αποδοθέντα επίπεδα QoS για κάθε χρήστη φροντίζοντας στο τέλος του χρονικού ορίζοντα οι χρήστες τύπου Best-Effort να έχουν λάβει αναλογικά δίκαιες μέσες ρυθμοαποδόσεις σύμφωνα με τα βάρη w_k . Δίχως βλάβη της γενικότητας αποδίδονται στη συνέχεια ισοδύναμα βάρη, δηλαδή $w_{K_1+1} = w_{K_1+2} = \dots = w_K$.

$$\overline{r_{k,t}} = (1/t) \cdot \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{t-1} r_{n,k,i} \quad (6.10)$$

$$\overline{R_{k,t}} = (1/t) \cdot \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{t-1} \rho_{n,k,i} \cdot r_{n,k,i} \quad (6.11)$$

2. Βήμα 1ο: Εξυπηρέτηση Τηλεπικοινωνιακών Υπηρεσιών Constant Bit Rate

Καθώς οι χρήστες που ανήκουν στη συγκεκριμένη κατηγορία υπηρεσιών απαιτούν την παροχή στατικών ροών εξυπηρέτησης προκαθορισμένου ρυθμού R_k^{min} για κάθε χρονοθυρίδα, ο δρομολογητής αποδίδει απόλυτη προτεραιότητα στην ικανοποίησή τους. Έτσι στον 1ο γύρο αποδόσεων υποκαναλιών, συμμετέχουν αποκλειστικά οι εν λόγω K_1 χρήστες. Η διαδικασία εύρεσης των κατάλληλων υποσυνόλων υποκαναλιών για κάθε χρήστη είναι επαναληπτικής και ευριστικής μορφής. Σε κάθε επανάληψη (α) επιλέγεται ένα ζεύγος υποκαναλιού (n^*) και χρήστη (k^*), (β) υλοποιείται η ανάθεση, (γ) το υποκανάλι n^* αφαιρείται από τη λίστα των διαθέσιμων, και (δ) η διαδικασία επανεκκινεί έως ότου ικανοποιηθούν όλοι οι χρήστες CBR.

Όσον αφορά στο χρήστη που επιλέγεται σε κάθε επανάληψη, προμοδοτείται εκείνος που παρουσιάζει την ελάχιστη μέση ποιότητα ζεύξης, καθώς αναμένεται να καταναλώσει και το μεγαλύτερο ποσοστό φασματικών πόρων και πρέπει να ικανοποιηθεί με τους ελάχιστους δυνατούς (εξίσωση 6.12α'). Για το λόγο αυτό επιλέγεται επίσης να αποδοθεί το υποκανάλι εκείνο με το μέγιστο υποστηριζόμενο ρυθμό μετάδοσης, το οποίο ταυτόχρονα παρουσιάζει τον ελάχιστο ρυθμό μετάδοσης για τους χρήστες της κλάσης BE (εξίσωση 6.12β'). Ακολουθώντας τη συγκεκριμένη πολιτική, οι χρήστες CBR ικανοποιούνται ως προς τις αυστηρές απαιτήσεις τους ενώ ταυτόχρονα παραμένει διαθέσιμο προς απόδοση

πλήθος υποκαναλιών προοριζόμενο για τους χρήστες BE. Στις ακόλουθες εξισώσεις με \mathcal{S} συμβολίζεται το υποσύνολο των διαθέσιμων υποκαναλιών που δεν έχουν ακόμη αποδοθεί σε κάποιον χρήστη, το οποίο πριν την έναρξη της διαδικασίας αρχικοποιείται ως εξής: $\mathcal{S} = \{1, 2, \dots, N\}$.

$$k^* = \left\{ k \in \mathcal{K}_{CBR} : \arg \min_k \overline{r}_{k,t} \right\} \quad (6.12\alpha')$$

$$n^* = \arg \min_n \left\{ \sum_{k \in \mathcal{K}_{BE}} r_{\arg \max_{n \in \mathcal{S}} \{r_{n,k^*,t}\}, k,t} \right\} \quad (6.12\beta')$$

Στο σχήμα 6.4 αναπαριστώνται εποπτικά τα στάδια ανάθεσης υποκαναλιών στους χρήστες CBR. Σημειώνεται ότι μία ειδική περίπτωση του προβλήματος αφορά στη μη επάρκεια των υποκαναλιών για την ικανοποίηση όλων των απαιτήσεων των χρηστών. Τότε το σύστημα εισέρχεται σε κατάσταση διακοπής (outage) και η διαδικασία δρομολόγησης διακόπτεται για την τρέχουσα χρονοθυρίδα. Ωστόσο, τα σενάρια αυτά δε θα μας απασχολήσουν στα πλαίσια της παρούσας έρευνας, συνιστώντας ένα από τα πιθανά θέματα μελλοντικής επέκτασης της διατριβής.

3. Βήμα 2ο: Εξυπηρέτηση Τηλεπικοινωνιακών Υπηρεσιών Best Effort

Στο 2ο βήμα του αλγορίθμου συμμετέχουν αποκλειστικά οι χρήστες BE στους οποίους αποδίδονται τα υπολειπόμενα υποκανάλια από το προηγούμενο βήμα. Στόχος του 2ου γύρου αναθέσεων είναι αφενός να μεγιστοποιηθεί η μέση ρυθμοαπόδοση του συστήματος και αφετέρου οι επιμέρους ρυθμοαποδόσεις των χρηστών να είναι ισότιμες. Με σκοπό την παροχή ενός πρώτου επιπέδου δικαιοσύνης, προμοδοτούνται οι χρήστες εκείνοι για τους οποίους οι στιγμιαίοι επιτεύξιμοι ρυθμοί μετάδοσης βρίσκονται σε ευνοϊκές συνθήκες, υπερβαίνοντας τη μέση επιτεύξιμη επίδοση που έχει παρατηρηθεί. Έτσι αρχικά επιλέγεται ο συνδυασμός ανάθεσης υποκαναλιού-χρήστη που μεγιστοποιεί το κριτήριο (6.13α'). Το κριτήριο αυτό αν και μακροπρόθεσμα εξασφαλίζει την ισότιμη πιθανότητα πρόσβασης στους κοινούς πόρους από όλους τους χρήστες, εν τούτοις παρουσιάζει δύο μειονεκτήματα: (1ο) απαιτεί εξαιρετικά μεγάλο μήκος χρονικού ορίζοντα προκειμένου να συγκλίνει ικανοποιητικά, (β) δεν εξασφαλίζει ισότιμη ανάθεση ρυθμοαποδόσεων καθώς ευνοούνται τελικά οι χρήστες που βρίσκονται εγγύτερα του σταθμού βάσης, οι οποίοι παρουσιάζουν υψηλότερους επιτεύξιμους ρυθμούς μετάδοσης επί των υποκαναλιών. Για το λόγο αυτό επιβάλλεται ένα δεύτερο κριτήριο ανάθεσης, το οποίο σχεδιάζεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε κατά την ολοκλήρωση του χρονικού παραθύρου (στο πέρας της χρονοθυρίδας T δηλαδή) όλες οι μέσες ρυθμοαποδόσεις να είναι ισότιμες. Συγκεκριμένα προτού υλοποιηθεί η ανάθεση που προτείνεται από το κριτήριο (6.13α'), εξετάζεται αν παραβιάζεται το κριτήριο (6.13β'). Το κριτήριο αυτό ορίζει ένα μέγιστο όριο στην απόκλιση των ρυθμών μετάδοσης που έχουν αποδοθεί στους χρήστες της κατηγορίας BE. Αν το όριο αυτό ξεπεραστεί ενδέχεται το σύστημα να μην μπορέσει σε μελλον-

τικές χρονοθυρίδες να υπερκαλύψει τη διαφορά αυτή, αποτυγχάνοντας ουσιαστικά να εξισορροπήσει τις επιμέρους ρυθμοαποδόσεις. Αν λοιπόν για τον υποψήφιο συνδυασμό απόδοσης υποκαναλιού-χρήστη η σχέση (6.13β') ικανοποιείται, τότε η ανάθεση υλοποιείται. Σε διαφορετική περίπτωση επαναλαμβάνεται ο έλεγχος του 1ου κριτηρίου, χωρίς όμως να συμμετέχει ο χρήστης που είχε αρχικά επιλεγεί. Αφού επιλεγεί ο χρήστης προς δρομολόγηση, αποφασίζεται εκ νέου το υποκανάλι που θα λάβει σύμφωνα με το κριτήριο (6.13γ') το οποίο εκφράζει το υποκανάλι με το μέγιστο υποστηριζόμενο ρυθμό μετάδοσης που είναι ταυτόχρονα όσο το δυνατόν λιγότερο αποδοτικό για τους υπόλοιπους χρήστες της κλάσης υπηρεσιών BE. Σημειώνεται επίσης ότι στην εξίσωση (6.13γ') η παράμετρος ε λαμβάνει τιμή κοντά στη μονάδα, ενώ η παράμετρος a ελέγχει ουσιαστικά το “trade-off” ρυθμοαπόδοσης/δικαιοσύνης κατά τη χρονική εξέλιξη του συστήματος¹. Το μετρικό μέγιστης διαφοροποίησης ΔG_t γίνεται πιο αυστηρό καθώς προσεγγίζεται το πέρας του χρονικού ορίζοντα και στην τελευταία χρονοθυρίδα μηδενίζεται ώστε να εξασφαλιστεί η ισότιμη ρυθμοαπόδοση.

$$\{n^*, k^*\} = \left\{ n \in S, k \in \mathcal{K}_{BE} : \arg \max_{n,k} (r_{n,k,t}/\overline{r_{k,t}}) \right\} \quad (6.13\alpha')$$

$$\Delta G_t = (\max \{\overline{R_{k,t}}\} - \min \{\overline{R_{k,t}}\}) / (a(T-t)) \leq \varepsilon \quad (6.13\beta')$$

$$\mathcal{N}_{k^*} = \{n \in \mathcal{N} : r_{n,k^*,t} = \max \{r_{n,k^*,t}\}\}, n^* = \arg \min_{n \in \mathcal{N}_{k^*}} \left\{ \sum_{k \in \mathcal{K}_{BE} \setminus \{k^*\}} r_{n,k,t} \right\} \quad (6.13\gamma')$$

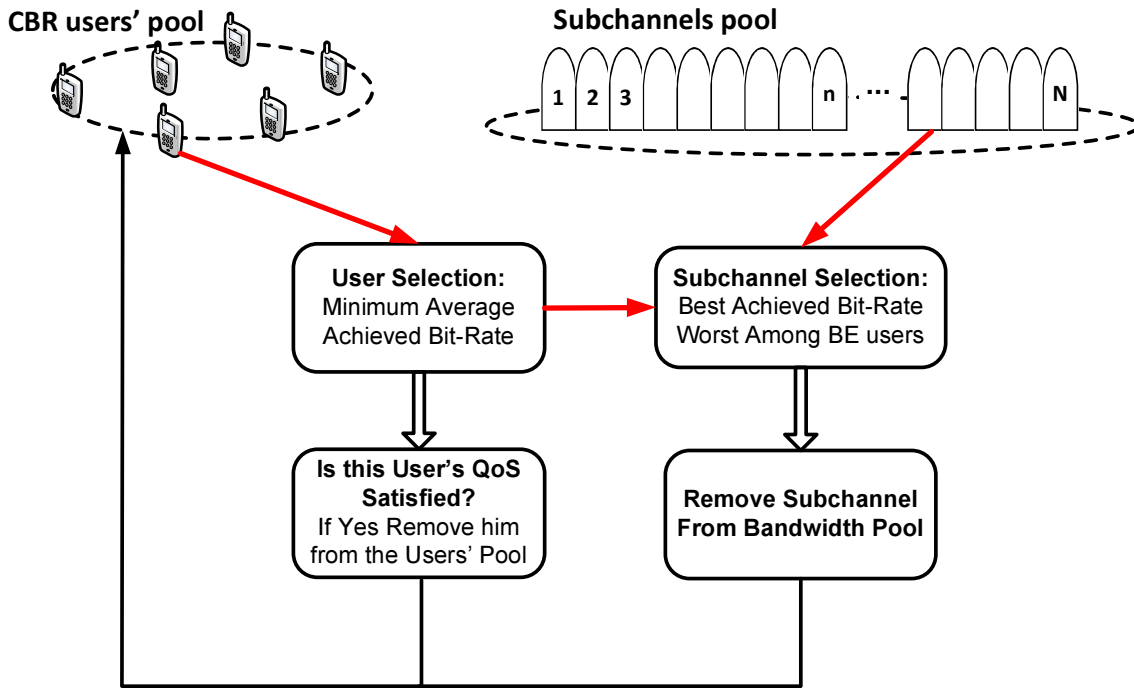
Στο σχήμα 6.5 αναπαριστώνται εποπτικά τα στάδια ανάθεσης υποκαναλιών στους χρήστες BE.

6.5.3 Υπολογιστική Πολυπλοκότητα του Αλγορίθμου

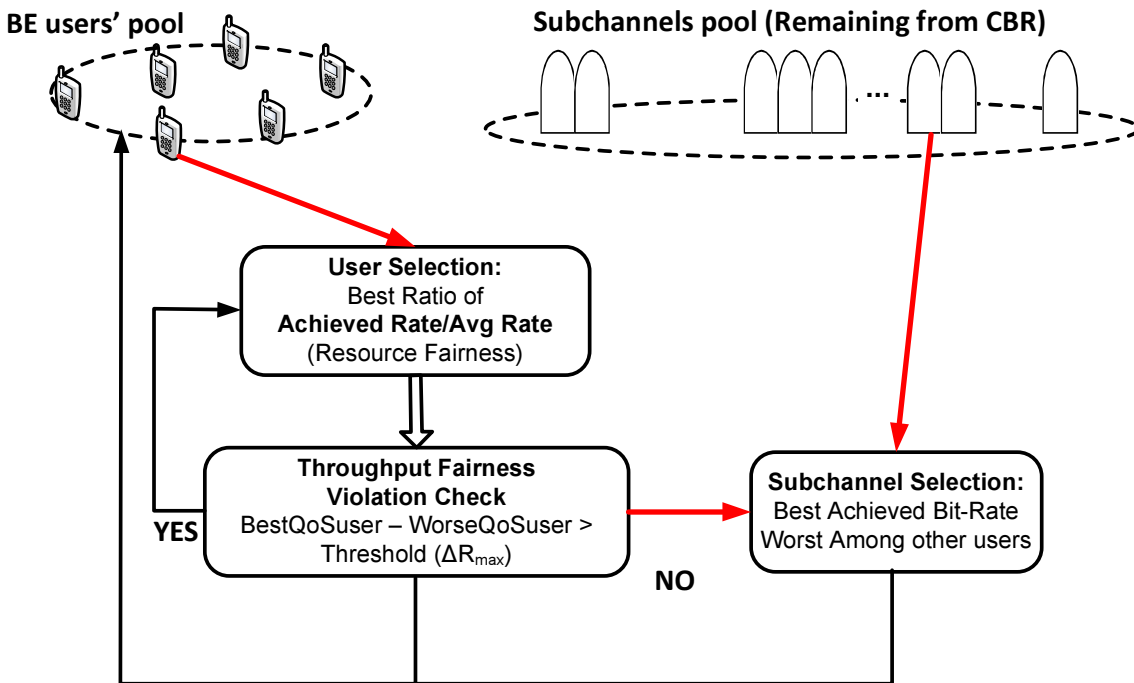
Θα παρουσιαστεί στη συνέχεια μία εκτίμηση της υπολογιστικής πολυπλοκότητας του προτεινόμενου αλγορίθμου δρομολόγησης ως προς την κλιμάκωσή του σε σχέση με τον αριθμό των υποκαναλιών N και τον αριθμό των χρηστών K . Για την εκτίμηση θα ληφθούν υπόψη οι ευριστικές διαδικασίες αναζήτησης, ταξινόμησης και σύγκρισης.

Όσον αφορά στο προπαρασκευαστικό βήμα, η πολυπλοκότητα είναι αμελητέα καθώς περιλαμβάνει την επικαιροποίηση δύο απλών στατιστικών μετρικών. Κατά το 1ο βήμα, εκτελούνται το πολύ N διαδικασίες επιλογής και ανάθεσης υποκαναλιών σε χρήστες (τυπικά $N/2$), κάθε μία από τις οποίες περιλαμβάνει: (1ον) Την εύρεση του χρήστη με την πιο υποβαθμισμένη μέση ποιότητα ζεύξης σύμφωνα με τη σχέση (6.12α'), με υπολογιστικό κόστος τάξης K , και (2ον) Την εύρεση του κατάλληλου φέροντος σύμφωνα με τη σχέση (6.12β') η οποία απαιτεί N τάξης πράξεις για τον εντοπισμό του υποκαναλιού με το μέγιστο επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσης

¹Η επιλογή της βέλτιστης παραμέτρου a^* εξαρτάται από το εκάστοτε σενάριο και την ανεκτικότητα στο ποσοστό διαφοροποίησης των επιμέρους ρυθμοαποδόσεων.



Σχήμα 6.4: Αναπαράσταση του σταδίου απόδοσης υποκαναλιών στους χρήστες CBR για τον προτεινόμενο αλγόριθμο δρομολόγησης OFDMA



Σχήμα 6.5: Αναπαράσταση του σταδίου απόδοσης υποκαναλιών στους χρήστες BE για τον προτεινόμενο αλγόριθμο δρομολόγησης OFDMA

και NK πράξεις για την αναγνώριση εκείνου του υποκαναλιού που ταυτόχρονα υποστηρίζει τον ελάχιστο ρυθμό μετάδοσης μεταξύ των χρηστών BE. Συνολικά λοιπόν απαιτούνται $N \cdot (K + N + NK)$ ή προσεγγιστικά N^2K πράξεις καθώς $N \gg K$.

Κατά το 2ο βήμα εκτελούνται επιπλέον N το πολύ διαδικασίες επιλογής και ανάθεσης, κάθε μία από τις οποίες περιλαμβάνει: (1ον) Την εύρεση του αρχικού ζεύγους απόδοσης με κόστος NK πράξεις (σχέση 6.13α'), τον έλεγχο παραβίασης του κριτηρίου (6.13β') με αμελητέο κόστος, και την επανάληψη της αναζήτησης το πολύ K φορές εφόσον το προηγούμενο κριτήριο παραβιαστεί. Συνολικά απαιτείται κόστος NK^2 , (2ον) Την τελική επιλογή του υποκαναλιού βάσει του κριτηρίου (6.13γ') που απαιτεί $N + N \approx N$ πράξεις. Συνολικά για το βήμα αυτό απαιτείται υπολογιστικό κόστος N^2K^2 .

Συνδυάζοντας όλα τα βήματα του αλγορίθμου και εφαρμόζοντας τις κατάλληλες απλοποιήσεις και προσεγγίσεις, καταλήγουμε στην έκφραση $O(N^2K^2)$ για την υπολογιστική πολυπλοκότητα κατά το χειρότερο δυνατό σενάριο εκτέλεσής του. Το κόστος επομένως είναι απολύτως προβλέψιμο και κλιμακώνεται τετραγωνικά ως προς τις βασικές παραμέτρους του συστήματος.

6.5.4 Αξιολόγηση της Επίδοσης

Η παρούσα ενότητα ολοκληρώνεται με την παρουσίαση αποτελεσμάτων επίδοσης του προτεινόμενου αλγορίθμου δρομολόγησης, εξετάζοντας συγκριτικά τόσο τον ιδεατό δρομολογητή όσο και δύο τυπικά σχήματα από τη σχετική βιβλιογραφία τα οποία αποδίδουν τους πόρους του συστήματος ανεξάρτητα σε κάθε χρονοθυρίδα (βελτιστοποίηση στο πεδίο της συχνότητας). Βάση για την συγκεκριμένη μελέτη αποτελεί και πάλι το εργαλείο των προσομοιώσεων Monte-Carlo, ακολουθώντας σε γενικές γραμμές το μοντέλο που παρουσιάστηκε στην ενότητα 6.4.2.

Το προσομοιωτικό μοντέλο: Στον πίνακα 6.2 παρατίθεται ο πλήρης κατάλογος των παραμέτρων και των σεναρίων προσομοίωσης που εκτελέστηκαν. Για τις συγκεκριμένες μελέτες αξιολόγησης ορίστηκε επιπλέον η παράμετρος P_{bs}^{norm} , η οποία συνιστά ένα κανονικοποιημένο μετρικό της ισχύος μετάδοσης του σταθμού βάσης, οριζόμενη από το λόγο της πραγματικής ισχύος εκπομπής προς την ελάχιστη ισχύ που απαιτείται για την ικανοποίηση των αυστηρών αιτημάτων QoS των K_1 χρηστών τύπου CBR (και η οποία έχει υπολογιστεί εκ των προτέρων για κάθε σενάριο). Τα σενάρια προσομοίωσης που εκτελέστηκαν αναπαριστούν 10 διαφορετικά επίπεδα ισχύος εκπομπής ($P_{bs}^{norm} = \{1, 2, \dots, 10\}$) και 6 διαφορετικά εύρη χρονικού ορίζοντα ($T = \{10, 20, \dots, 50\} \times T_f$). Κάθε σενάριο περιλαμβάνει 500 χρονοθυρίδες και επαναλαμβάνεται για 10 διαφορετικές τυχαίες τοποθετήσεις των χρηστών στην επιφάνεια της κυψέλης. Στην πλατφόρμα MATLAB επιτελέστηκε η ανάπτυξη και αξιολόγηση των ακολουθών σχημάτων (για την επίλυση των μαθηματικών προβλημάτων LP αξιοποιήθηκαν τα λογισμικά TOMLAB και CPLEX):

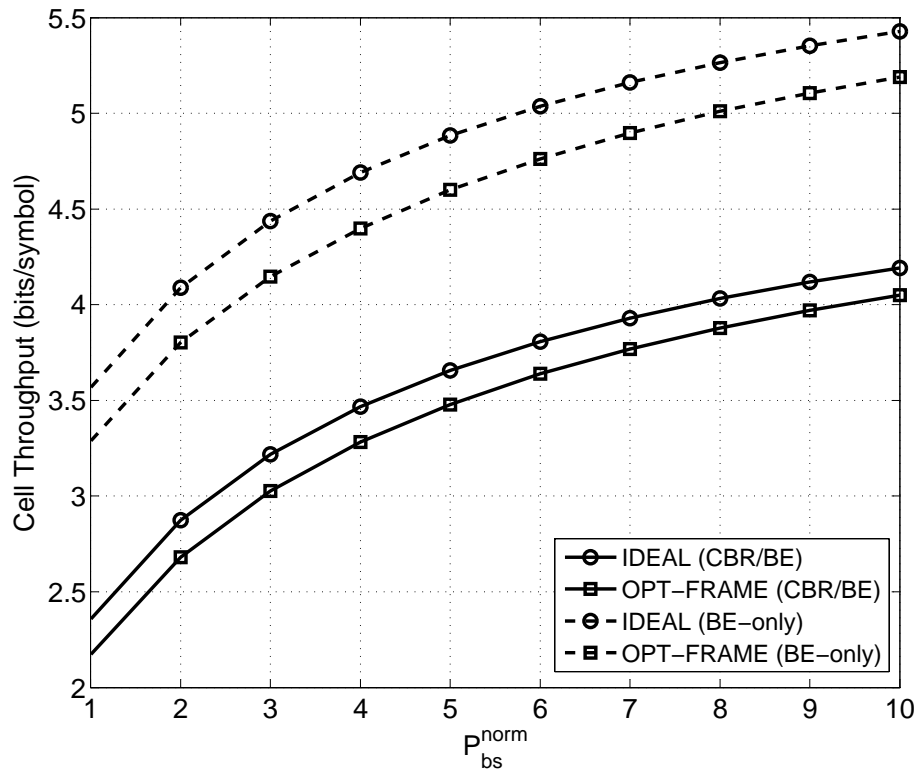
- Του ιδεατού δρομολογητή ομοιόμορφης κατανομής ισχύος που λειτουργεί σε εύρος T χρονοθυρίδων και βασίζεται στην επίλυση του γραμμικού προβλήματος βελτιστοποίησης

που περιγράφεται στις εξισώσεις (6.9) (σχήμα “IDEAL”)

- Του ιδεατού δρομολογητή ομοιόμορφης κατανομής ισχύος ο οποίος λειτουργεί σε κάθε χρονοθυρίδα ανεξάρτητα και προκύπτει από τις εξισώσεις (6.9) εφόσον τεθεί $T = 1$ (σχήμα “OPT-FRAME”)
- Του προτεινόμενου δυναμικού αλγορίθμου δρομολόγησης που λειτουργεί και στα δύο πεδία συχνότητας και χρόνου (σχήμα “HEUR”)
- Του αλγορίθμου αποκλειστικά συχνοτικής δρομολόγησης που προτάθηκε στην ερευνητική εργασία [82] και υιοθετεί την υπόθεση ομοιόμορφης κατανομής ισχύος (σχήμα “MAXMIN-FRAME”)
- Του αλγορίθμου αποκλειστικά συχνοτικής δρομολόγησης που προτάθηκε στην ερευνητική εργασία [130], ο οποίος πλέον της δυναμικής απόδοσης υποκαναλιών στους χρήστες, προσαρμόζει και την ισχύ μετάδοσης (σχήμα “YU-FRAME”)

Πίνακας 6.2: Βασικές παράμετροι πειραματικών προσομοιώσεων για τις μελέτες επίδοσης του προτεινόμενου αλγορίθμου δρομολόγησης OFDMA

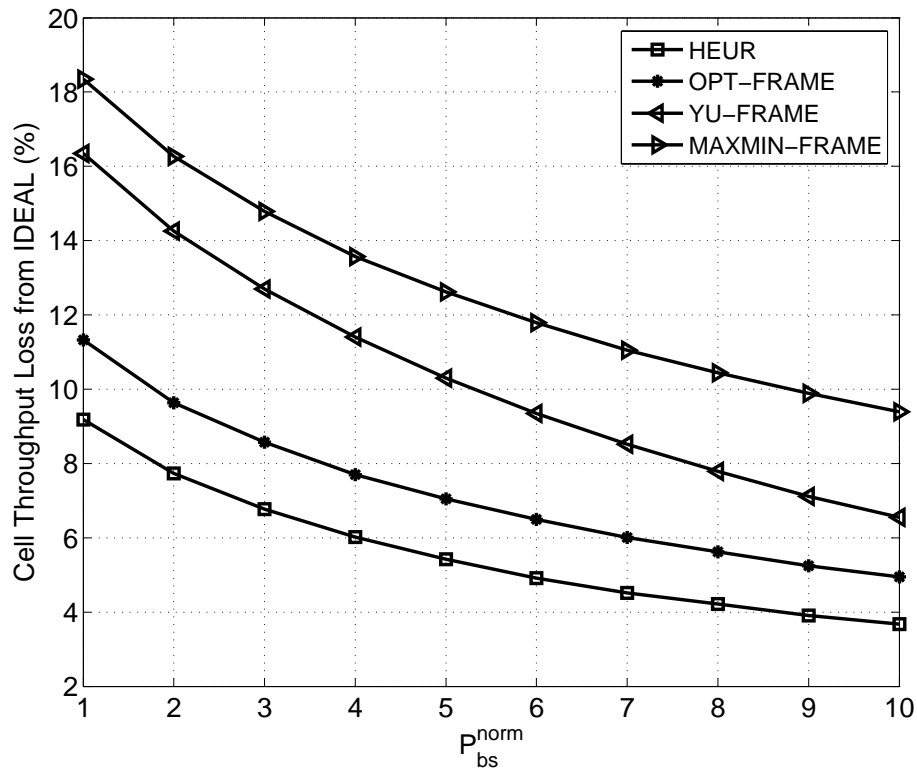
Φυσικό Μέγεθος	Συμβολισμός	Τιμή/Σχολιασμός
Κεντρική Φέρουσα	f_c	2.5 GHz
Εύρος Ζώνης Μετάδοσης	BW	25 MHz
Εύρος Ζώνης Υποκαναλιού	Δf	200 kHz
Αριθμός Χρήσιμων Υποκαναλιών	N	125
Κατώφλι Σφαλμάτων BER	P_{min}^e	10^{-6}
Πυκνότητα Ισχύος Θορύβου	N_0	-174 dBm/Hz
Υψηλότερη Τάξη Μετάδοσης ανά Υποκανάλι	c_{max}	6 bits/symbol
Υποστηριζόμενοι Ρυθμοί Μετάδοσης	\mathcal{D}	{0, 1, 2, ..., 6} bits/symbol
Χωρητικότητα Χρονοθυρίδας OFDMA	C_{hard}	750 bits
Διάρκεια Χρονοθυρίδας OFDMA	T_f	5 msec
Ακτίνα Κυψέλης	R_{cell}	1 km
Μοντέλο Ραδιοδιαύλου	-	WinnerII C3 NLOS macro-cell
Συνάρτηση Διασύνδεσης PHY-MAC	$f(c_n, \gamma_n, P_e^{min})$	Μοντέλο SNR-gap/Cioffi [16]
Κατανομή Τερματικών	-	Ομοιόμορφη
Ταχύτητα Τερματικών	v_{max}	3 km/hr
Αριθμός Χρηστών CBR	K_1	{0, 4}
Αριθμός Χρηστών BE	K_2	{6, 10}
Προφίλ QoS για χρήστες CBR	R_k^{min}	36 bits/OFDM symbol
Προφίλ QoS για χρήστες BE	$\{w_k\}_{k=5, \dots, 10}$	$w_k = 1/K_2$ (Max-Min)
Εύρος Χρονικού Ορίζοντα	T	{10, 20, ..., 50} πλαίσια
Μέγιστη Ισχύς Εκπομπής Σταθμού Βάσης	-	Ελεγχόμενη μέσω της P_{bs}^{norm}
Επαναλήψεις Χρονοθυρ. ανά Υλοποίηση	N_{frames}	500
Επαναλήψεις Υλοποιήσεων Δικτύου	N_{drops}	10



Σχήμα 6.6: Επίδοση ιδεατών δρομολογητών ομοιόμορφης κατανομής ισχύος για σενάρια ομογενούς και ετερογενούς τηλεπικοινωνιακής κίνησης ($T = 50 \cdot T_f$)

Αποτελέσματα & σχόλια: Στα σχήματα 6.6–6.10 αναπαριστώνται γραφικά τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και στα ακόλουθα σημεία περιγράφονται τα κυριότερα ευρήματα:

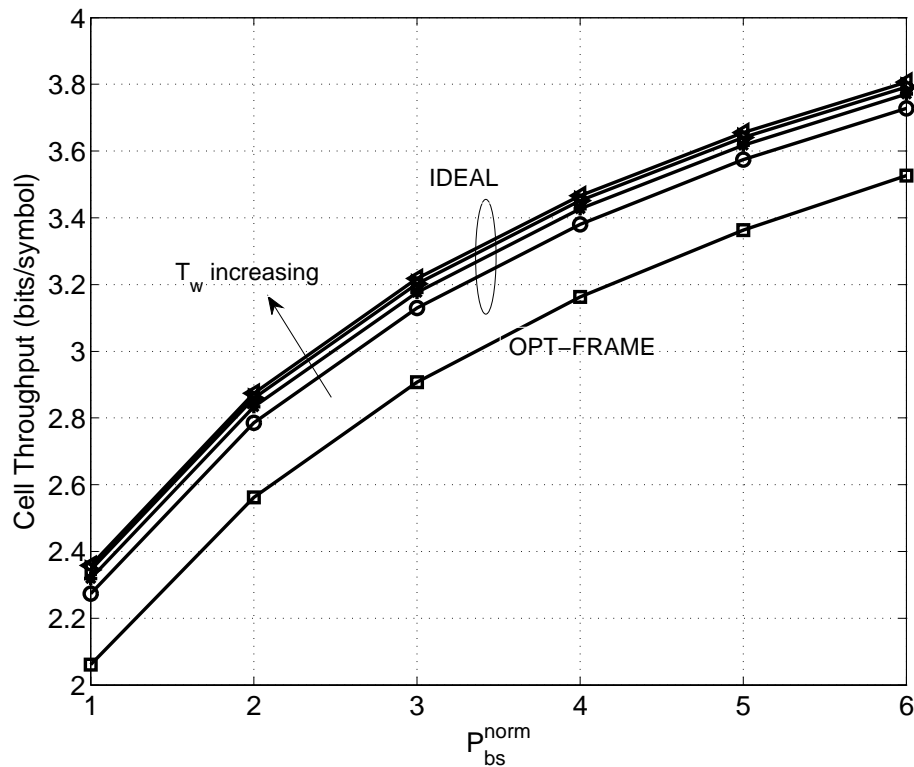
1. Στο σχήμα 6.6 παρουσιάζεται η μέση ρυθμοαπόδοση του συστήματος ανά υποκανάλι θεωρώντας τους δύο ιδεατούς δρομολογητές, εκ των οποίων ο 1ος λειτουργεί σε έναν ευρύτερο ορίζοντα 50 χρονοθυρίδων, ενώ ο 2ος σε κάθε χρονοθυρίδα ξεχωριστά, με άλλα λόγια πραγματοποιεί βελτιστοποίηση της απόδοσης πόρων αποκλειστικά στο πεδίο της συχνότητας. Το γράφημα αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο καθώς επιτρέπει την εκτίμηση του αναμενόμενου κέρδους στην επίδοση του συστήματος από την χρονική δρομολόγηση των πακέτων πλέον της συχνότητας. Για το σενάριο ετερογενούς τηλεπικοινωνιακής κίνησης (συνύπαρξη 4 χρηστών CBR και 6 χρηστών BE), παρατηρείται ένα κέρδος 12% σε συνθήκες χαμηλού σηματοθορυβικού λόγου και 8% κατά μέσο όρο λαμβάνοντας υπόψη και τα 10 σενάρια εκπεμπόμενης ισχύος. Στο σενάριο ομογενούς τηλεπικοινωνιακού φορτίου (παρουσία 10 χρηστών BE), το αντίστοιχο κέρδος ανήλθε στο 15% για υποβαθμισμένες συνθήκες SNR και 9% κατά μέσο όρο. Διαισθητικά, για το σενάριο αποκλειστικών υπηρεσιών best-effort, δεν επιβάλλονται αυστηροί περιορισμοί εξυπηρέτησης ανά πλαίσιο (όπως στο σενάριο υπηρεσιών CBR), με αποτέλεσμα ο δρομολογητής να λειτουργεί με πιο ευέλικτο τρόπο κατά την απόδοση των υποκαναλιών χρονικά.
2. Στο σχήμα 6.7 απεικονίζονται οι ποσοστιαίες απώλειες στην επίδοση των εξεταζόμενων



Σχήμα 6.7: Συγκριτική επίδοση των όλων των σχημάτων δρομολόγησης για το ετερογενές σενάριο τηλεπικοινωνιακής κίνησης και τον ευρύτερο χρονικό ορίζοντα 50 χρονοθυρίδων

σχημάτων δρομολόγησης σε σχέση με τον ιδεατό δρομολογητή για το σενάριο του ευρύτερου χρονικού ορίζοντα. Παρατηρείται ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος υπερτερεί και των δύο σχημάτων απόδοσης υποκαναλιών της βιβλιογραφίας: σε σχέση με το σχήμα YU-FRAME παρουσιάζει κέρδος 7.2% σε συνθήκες υποβαθμισμένου SNR (και 4.8% κατά μέσο όρο), ενώ σε σχέση με το σχήμα MAXMIN-FRAME υπερτερεί κατά 9.2% (και 7.2% κατά μέσο όρο). Σημειώνεται ότι από τα δύο υπάρχοντα σχήματα της βιβλιογραφίας το 1ο παρουσιάζει υψηλότερα επίπεδα απόδοσης καθώς πέραν της δυναμικής απόδοσης υποκαναλιών προσαρμόζει και την κατανομή της ισχύος. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος παρουσιάζει επίσης βελτιωμένη απόδοση ακόμη και σε σχέση με τον ιδεατό δρομολογητή ανά χρονοθυρίδα (OPT-FRAME), ενώ το συγκεκριμένο κέρδος κυμαίνεται από 1.3 έως 2.2% ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες SNR. Επίσης, οι απώλειες του προτεινόμενου αλγορίθμου σε σχέση με την ιδεατή προσέγγιση IDEAL κυμαίνονται σε χαμηλά επίπεδα, από 3.7 έως 9.2% (5.6% κατά μέσο όρο).

3. Στα σχήματα 6.8–6.10 εξετάζεται η επίδραση του εύρους του χρονικού ορίζοντα δρομολόγησης στα διάφορα σχήματα διαχείρισης πόρων που πραγματεύεται η παρούσα μελέτη. Καταρχάς στο σχήμα 6.8 παρουσιάζεται η κλιμάκωση της επίδοσης του ιδεατού δρομολογητή για διαφορετικά εύρη χρονικών παραθύρων. Παρατηρείται αξιόλογη αύξηση της ρυθμοαπόδοσης του συστήματος από το 1ο σενάριο χρονικής δρομολόγησης, 10 χρονοθυρίδων. Για ευρύτερους ορίζοντες το επιπρόσθετο κέρδος μειώνεται. Η συμπεριφορά αυτή σχετίζεται ευθέως με τη χρονική μεταβολή της ποιότητας των ζεύξεων σταθμού

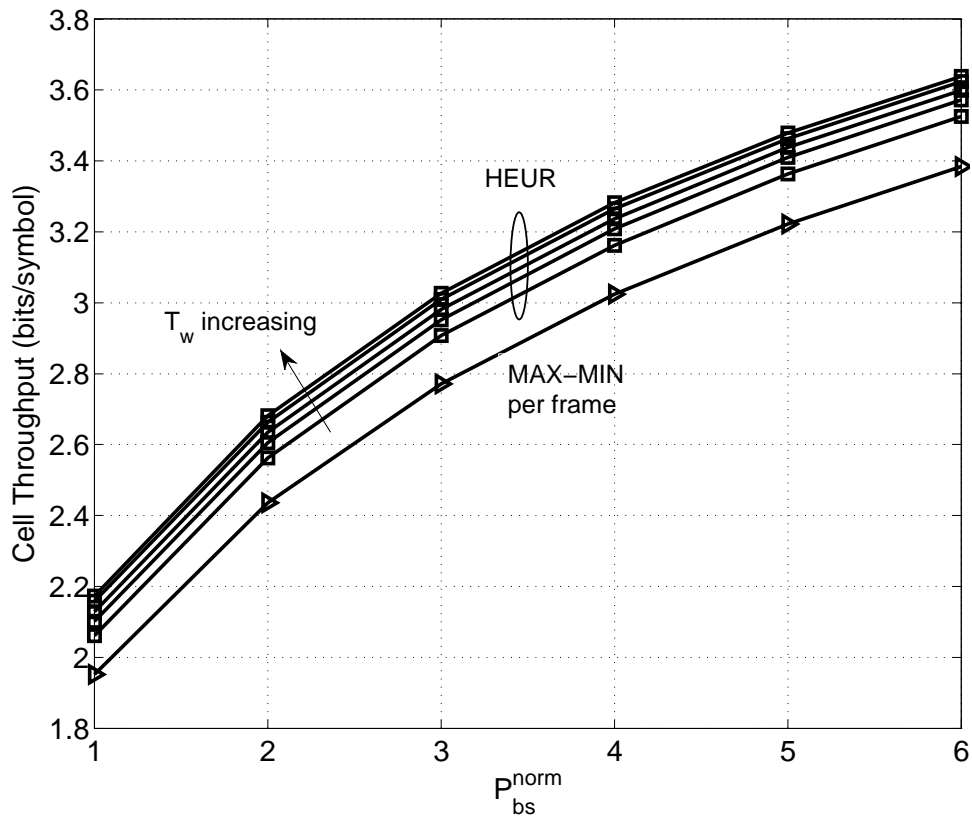


Σχήμα 6.8: Επίδραση του εύρους του χρονικού ορίζοντα στην απόδοση των ιδεατών δρομολογητών (IDEAL, OPT-FRAME)

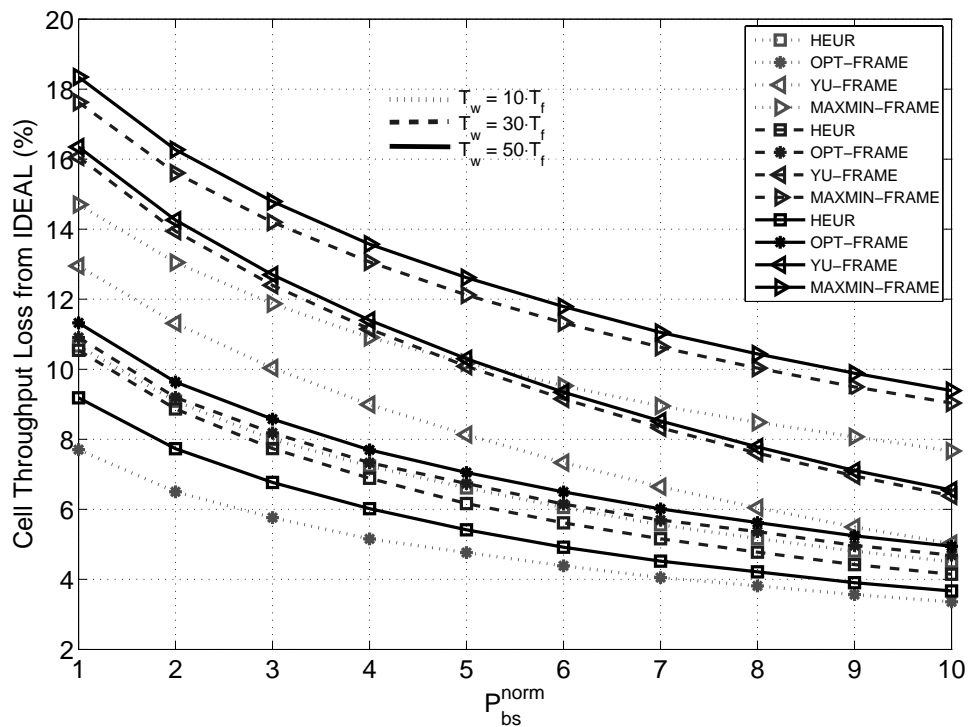
βάσης και κινητών τερματικών. Συγκεκριμένα, στα σενάρια που προσομοιώθηκαν θεωρήθηκε ταχύτητα κίνησης των χρηστών ίση προς 3 km/hr η οποία αντιστοιχεί σε χρονική διάρκεια συνοχής του ραδιοδιαύλου προσεγγιστικά ίση προς 10 χρονοθυρίδες. Επομένως για ευρύτερους χρονικούς ορίζοντες ο ραδιοδιάυλος έχει αποσυσχετιστεί πλήρως, με αποτέλεσμα το κέρδος χρονικής δρομολόγησης να περιορίζεται.

Στο σχήμα 6.9 παρουσιάζονται αντίστοιχα αποτελέσματα για τον προτεινόμενο αλγόριθμο και το σχήμα της βιβλιογραφίας MAXMIN-FRAME. Σε αντίθεση με την προηγούμενη συζήτηση, παρατηρείται ότι στην περίπτωση αυτή το κέρδος του προτεινόμενου σχήματος αυξάνεται με σχεδόν σταθερό ρυθμό καθώς διευρύνεται ο χρονικός ορίζοντας λειτουργίας του δρομολογητή. Η συμπεριφορά αυτή δικαιολογείται διαισθητικά καθώς ο αλγόριθμος έχει σχεδιαστεί κατά τέτοιον τρόπο ώστε το μοντέλο πρόβλεψης της ποιότητας των ζεύξεων (βλ. εξίσωση 6.10) να καθίσταται ακριβέστερο καθώς προστίθενται νέα δείγματα, επικαιροποιώντας το. Πρέπει όμως να τονιστεί ότι καθοριστικό ρόλο στη συμπεριφορά του αλγορίθμου διαδραματίζει η επιλογή της παραμέτρου ελέγχου a (βλ. εξίσωση 6.13γ'), καθώς πρέπει να βελτιστοποιείται ανάλογα με το εύρος του χρονικού ορίζοντα λειτουργίας.

Τέλος στο σχήμα 6.10 παρουσιάζεται συγκριτικά η επίδοση όλων των δρομολογητών (ιδεατών και ρεαλιστικών) για σενάρια 10, 30 και 50 χρονοθυρίδων. Συμπεραίνεται ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος υπερτερεί των 2 σχημάτων της βιβλιογραφίας σε όλα τα σενάρια, ενώ υπολείπεται του ιδεατού OPT-FRAME μόνο για το σενάριο 10



Σχήμα 6.9: Επίδραση του εύρους του χρονικού ορίζοντα στην απόδοση των ευριστικών αλγορίθμων δρομολόγησης (HEUR, MAXMIN-FRAME)



Σχήμα 6.10: Επίδραση του εύρους του χρονικού ορίζοντα σε όλα τα σχήματα δρομολόγησης

χρονοθυρίδων, κατά το οποίο δεν έχει καταφέρει να αξιοποιήσει πλήρως τη χρονική διαφορικότητα/επιλεκτικότητα του ραδιοδιαύλου.

6.6 Σύνοψη

Στο παρόν κεφάλαιο μελετήθηκαν θέματα δρομολόγησης πακέτων σε δίκτυα OFDMA και προτάθηκαν νέοι μηχανισμοί που υποστηρίζουν προφίλ δίκαιης απόδοσης πόρων, συνυπάρχουσες ετερογενείς τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες καθώς και διαφορετικά σχήματα μετάδοσης. Το πεδίο εφαρμογής των μηχανισμών αυτών είναι τα συστήματα LTE και Mobile WiMAX. Συγκεκριμένα, παρουσιάστηκε έναν ιδεατός δρομολογητής πακέτων για δίκτυα OFDMA, ο οποίος στοχεύει στην ταυτόχρονη μεγιστοποίηση της ρυθμοαπόδοσης σε επίπεδο κυψέλης και στη δίκαιη απόδοση QoS σε επίπεδο χρηστών και προτάθηκε ακόμα ένας πρακτικός αλγόριθμος ο οποίος στοχεύει στη μεγιστοποίηση της μέσης ρυθμοαπόδοσης της κυψέλης στο τέλος ενός πεπερασμένου χρονικού ορίζοντα, διατηρώντας τη δικαιοσύνη ανάμεσα στα τερματικά.

□

Κεφάλαιο 7

Διαστρωματική και Διασυστημική Βελτιστοποίηση Επίδοσης Δικτύων

7.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα θεωρητικά αποτελέσματα της ερευνητικής εργασίας που έχει συντελεστεί όσον αφορά στη διαστρωματική (cross layer) βελτιστοποίηση επίδοσης ενός ασυρμάτου τηλεπικοινωνιακού δικτύου. Λαμβάνοντας υπόψη τα στρώματα 1 (φυσικό - PHY), 2 (ζεύξης - MAC) και 4 (μεταφοράς - πρωτόκολλο TCP) της στοίβας του OSI, στόχος είναι η περιγραφή μέσω αναλυτικών μεθόδων του τρόπου αλληλεπίδρασής τους. Απώτερος σκοπός είναι η αποσαφήνιση των κρίσιμων παραμέτρων που καθορίζουν την τελική επίδοση ενός ασυρμάτου δικτύου με αφαιρετικό τρόπο, ώστε να είναι δυνατή η αναπαράσταση και η ανάλυση οποιουδήποτε συστήματος, ανεξαρτήτως της τεχνολογίας που χρησιμοποιείται στο επίπεδο MAC.

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν πολλοί ορισμοί ως προς τι θεωρείται διαστρωματική σχεδίαση ενός δικτύου. Στο παρόν κεφάλαιο θα υιοθετηθεί ο ορισμός που δίνεται στις [141, 142], σύμφωνα με τον οποίο οποιαδήποτε σχεδίαση και ανάπτυξη των πρωτοκόλλων ενός δικτύου, η οποία παραβιάζει την συστημική δομή που προβλέπεται από μία δεδομένη αρχιτεκτονική, θεωρείται διαστρωματική ως προς την αρχιτεκτονική αυτή. Ουσιαστικά, σε αυτό το κεφάλαιο θεωρείται ως δεδομένη αρχιτεκτονική το μοντέλο OSI (βλ. σχήμα 7.1 για τα στρώματα που το αποτελούν, συνοπτική επεξήγηση και παραδείγματα). Δύο είναι οι βασικές αρχές που διέπουν το μοντέλο OSI:

- Δεν είναι δυνατόν να υπάρξει άμεση επικοινωνία μεταξύ δύο μη γειτονικών στρωμάτων.
- Τα ανώτερα στρώματα χρησιμοποιούν τις υπηρεσίες των κατωτέρων στρωμάτων, χωρίς όμως να έχουν όμως γνώση περί του πώς υλοποιούνται αυτές οι υπηρεσίες.

Γενικά, οι διαστρωματικές τεχνικές σχεδίασης θα μπορούσαν να ταξινομηθούν σε τέσσερις

<p>Στρώμα 7: Εφαρμογής Περιγραφή λειτουργίας: Διεπαφή χρήστη Παραδείγματα: Telnet, HTTP</p>
<p>Στρώμα 6: Παρουσίασης Περιγραφή λειτουργίας: Τρόπος παρουσίασης δεδομένων και κρυπτογράφηση Παραδείγματα: JPEG, ASCII, EBCDIC</p>
<p>Στρώμα 5: Συνόδου Περιγραφή λειτουργίας: Διαχωρισμός δεδομένων διαφορετικών εφαρμογών Παραδείγματα: RPC, SQL, NFS,</p>
<p>Στρώμα 4: Μεταφοράς Περιγραφή λειτουργίας: Από άκρου εις άκρο συνδέσεις και αξιόπιστη ή μη παράδοση δεδομένων Παραδείγματα: TCP, UDP</p>
<p>Στρώμα 3: Δικτύου Περιγραφή λειτουργίας: Εύρεση βέλτιστης διαδρομής για παράδοση δεδομένων και λογική διευθυνσιοδότηση Παραδείγματα: IP, IPX</p>
<p>Στρώμα 2: Ζεύξης Περιγραφή λειτουργίας: Υποβοήθηση και έλεγχος της σωστής μετάδοση των δεδομένων από το φυσικό στρώμα Παραδείγματα: 802.11, 802.16</p>
<p>Στρώμα 1: Φυσικό Περιγραφή λειτουργίας: Έλεγχος της μετάδοσης της ροής των bits (bitstream) Παραδείγματα: Ethernet, FDDI</p>

Σχήμα 7.1: Μοντέλο OSI και στρώματα ενδιαφέροντος

κατηγορίες:

1. Δημιουργία νέων διεπαφών μεταξύ των στρωμάτων.
2. Ενοποίηση γειτονικών στρωμάτων.
3. Σχεδιαστική σύζευξη χωρίς τη δημιουργία νέων διεπαφών.
4. Κατακόρυφη ρύθμιση και από κοινού βελτιστοποίηση μεταξύ των στρωμάτων.

Στο παρόν κεφάλαιο θα προταθεί μία τεχνική διαστρωματικής σχεδίασης που συνδυάζει στοιχεία από την πρώτη και τέταρτη κατηγορία. Υπογραμμίζεται ότι η τεχνική αυτή χαρακτηρίζεται ως διασυστημική, καθώς όπως θα φανεί στη συνέχεια είναι ανεξάρτητη της εκάστοτε τεχνολογίας δικτύου, μέσω μίας αφαιρετικής μεθόδου που επιτρέπει ουσιαστικά την ένταξη της λειτουργίας του υποστρώματος MAC του δικτύου ως παραμέτρου στο αναλυτικό μοντέλο.

7.2 Η Αναγκαιότητα για τη Διαστρωματική Αρχιτεκτονική Σχεδίασης

Ένας από τους θεμέλιους λίθους του Διαδικτύου (Internet), το οποίο ειδικά κατά τα πρώτα χρόνια λειτουργίας του στηριζόταν στα σταθερά δίκτυα, υπήρξε η αρχιτεκτονική του. Αυτή η

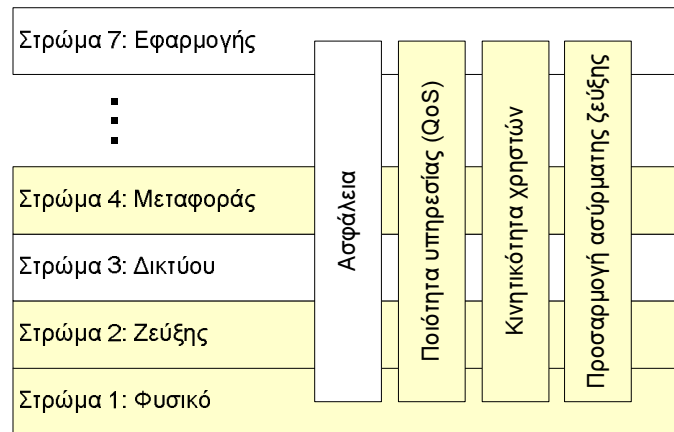
αρχιτεκτονική χαρακτηρίζεται από μία στοίβα στρωμάτων, όπου κάθε ένα είναι υπεύθυνο για τη διαχείριση ενός επί μέρους θέματος στο δίκτυο. Το κάθε στρώμα στη στοίβα αυτή χρησιμοποιεί τις υπηρεσίες που του προσφέρουν τα κατώτερα από αυτό στρώματα, χωρίς να είναι γνωστές σε αυτό οι μέθοδοι υλοποίησης αυτών των υπηρεσιών, και προσφέρει αντίστοιχα τις δικές του υπηρεσίες στα ανώτερα. Για να ενισχυθεί μάλιστα αυτό το αρθρωτό οικοδόμημα, η επικοινωνία επιτρέπεται μόνο ανάμεσα σε γειτονικά στρώματα και επιτυγχάνεται μέσα από ένα ελάχιστο υποσύνολο εντολών. Μία από τις συνηθέστερες τέτοιες υλοποιήσεις είναι τα πρωτόκολλα TCP πάνω από IP τα οποία υπέρκεινται ενός στρώματος ζεύξης (π.χ. Ethernet για σταθερά δίκτυα). Εναλλακτικά, τη θέση του TCP καταλαμβάνει πολλές φορές το RTP/UDP.

Αν και η προαναφερθείσα αρχιτεκτονική ήταν εξαιρετικά επιτυχημένη όσον αφορά στα δίκτυα σταθερής πρόσβασης, εν τούτοις η έλευση των ευρυζωνικών ασυρμάτων δικτύων δημιούργησε μία σειρά από νέα θέματα, τα οποία δεν είχαν απασχολήσει τα σταθερά δίκτυα [141, 142, 143, 144]. Συγκεκριμένα, στα ασύρματα δίκτυα κρίνεται επιβεβλημένη η ενσωμάτωση στη στοίβα λειτουργιών για παροχή εγγυημένης ποιότητας υπηρεσίας, με δυνατότητα διαφοροποίησης ανάλογα με τον τύπο της εξυπηρετούμενης υπηρεσίας. Απαραίτητη είναι επίσης η πρόβλεψη και υλοποίηση μηχανισμών για την υποστήριξη της κινητικότητας των χρηστών. Από τη μία, η εγγυημένη ποιότητα υπηρεσίας είναι αναγκαία για τις επικοινωνίες σε πραγματικό χρόνο πάνω από δίκτυα IP. Με αυτόν τον τρόπο οι παραδοσιακές υπηρεσίες τηλεφωνίας είναι δυνατόν να υποστηριχθούν από κοινού με τις υπηρεσίες δεδομένων που κερδίζουν ολοένα περισσότερο έδαφος. Από την άλλη, θεωρώντας δεδομένη την κινητικότητα των χρηστών τόσο ανάμεσα σε διαφορετικά σημεία ραδιοπρόσβασης του ίδιου δικτύου, τόσο και ανάμεσα σε διαφορετικά δίκτυα, είναι απαραίτητο να υποστηρίζεται και η άμεση και απρόσκοπτη εναλλαγή των σημείων ραδιοπρόσβασης σε ενδο-δικτυακό (intra-network) και δια-δικτυακό (inter-network) επίπεδο. Εξάλλου, τα σύγχρονα κινητά τερματικά εξοπλίζονται με πολλαπλές διεπαφές, για σύνδεση σε διαφορετικούς τύπους δικτύων (ενδεικτικά 2G, 3G, 3.5G, Wi-Fi, WiMax κ.ά.). Η λογική που επικρατεί πλέον είναι ότι κάθε τερματικό πρέπει να είναι “πάντοτε βέλτιστα συνδεδεμένο” (“always best connected”), βάσει κυρίως κριτηρίων κάλυψης δικτύου, κόστους και ρυθμού μεταφοράς δεδομένων. Επιπλέον, η παρούσα αρχιτεκτονική δε λαμβάνει υπόψη την ενεργειακή κατανάλωση των κινητών τερματικών συσκευών, αφού αυτό δεν αποτελούσε πρόβλημα στα δίκτυα σταθερής πρόσβασης.

Συμπερασματικά, όσο διατηρείται η υπάρχουσα αρθρωτή αρχιτεκτονική, όπου το κάθε στρώμα επικοινωνεί μόνο με τα γειτονικά του, η στοίβα αυτή των πρωτοκόλλων θα παραμένει αναποτελεσματική όσον αφορά στην επίδοση, στην ποιότητα υπηρεσίας, στην παροχή εγγυημένης ποιότητας υπηρεσίας, στη διαχείριση της κινητικότητας των χρηστών και στην ενεργειακή κατανάλωση των τερματικών συσκευών.

7.3 Επίπεδα Συντονισμού κατά τη Διαστρωματική Τεχνική

Για να αναδειχθούν τα θέματα με τα οποία καταπιάνονται οι διαστρωματικές αρχιτεκτονικές, εισάγεται στη βιβλιογραφία η έννοια των επιπέδων συντονισμού (coordination planes). Τα επίπεδα συντονισμού διατρέχουν κατακόρυφα τη στοίβα πρωτοκόλλων του OSI και περιλαμβάνουν ένα σύνολο παρομοίων προβλημάτων τα οποία είναι ανοιχτά προς επίλυση. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 7.2, τα επίπεδα συντονισμού είναι:



Σχήμα 7.2: Επίπεδα συντονισμού στις διαστρωματικές αρχιτεκτονικές

1. Το επίπεδο ασφαλείας: στόχος του είναι η ενοποίηση των διεργασιών κρυπτογράφησης που είναι διαμοιρασμένες σε παραπάνω από ένα στρώματα σε αρκετούς τύπους δικτύων.
2. Το επίπεδο ποιότητας υπηρεσίας: στόχος του είναι ο συντονισμός των προσπαθειών των διαφόρων στρωμάτων της στοίβας για διατήρηση ενός ελάχιστου εγγυημένου επιπέδου ποιότητας υπηρεσίας.
3. Το επίπεδο κινητικότητας των χρηστών: ασχολείται με θέματα που προκαλούνται εξαιτίας της κινητικότητας των χρηστών, που προέρχονται από την πολύ μικρή έως ανύπαρκτη συνεργασία ανάμεσα στον αλγόριθμο επιδιόρθωσης συμφόρησης του TCP, στο Mobile IP, στους αλγορίθμους του στρώματος ζεύξης κ.τ.λ.
4. Το επίπεδο προσαρμογής της ασύρματης ζεύξης: διαχειρίζεται, ενημερώνει και συντονίζει τις ενέργειες που απαιτούνται για την αντιστάθμιση στις μεταβολές της ποιότητας της ραδιοζεύξης.

Στο παρόν κεφάλαιο θα εστιάσουμε από κοινού στο επίπεδο ποιότητας υπηρεσίας, στο επίπεδο κινητικότητας των χρηστών και στο επίπεδο προσαρμογής της ασύρματης ζεύξης, με στόχο τη βελτιστοποίηση της επίδοσης των ευρυζωνικών ασυρμάτων δικτύων. Στη συνέχεια περιγράφονται τα τέσσερα επίπεδα συντονισμού, με έμφαση στα τρία επίπεδα ενδιαφέροντος.

7.3.1 Επίπεδο Συντονισμού Ασφαλείας

Το θέμα που καλούνται να αντιμετωπίσουν οι αρχιτεκτονικές με χρήση διαστρωματικών τεχνικών είναι το ότι η υπάρχουσα επεξεργασία για κρυπτογραφικούς σκοπούς των δεδομένων των πακέτων, έχει ανατεθεί σε περισσότερα του ενός στρώματα. Αυτό είναι ασύμφορο τόσο από άποψη επεξεργασίας, όσο και εξαιτίας του σωρευτικού χαρακτήρα της υφιστάμενης καθυστέρησης. Σκοπός αυτού του επιπέδου είναι η ενοποίηση των πολλαπλών βαθμών κρυπτογράφησης σε ένα σημείο. Το επίπεδο συντονισμού ασφαλείας δε θα μας απασχολήσει στα πλαίσια της παρούσας έρευνας και για αυτό το λόγο δεν θα αναλυθεί περαιτέρω.

7.3.2 Επίπεδο Συντονισμού Ποιότητας Υπηρεσίας

Η δυνατότητα παροχής εγγυημένης ποιότητας υπηρεσίας είναι στοιχείο ζωτικής σημασίας για τα σύγχρονα ευρυζωνικά ασύρματα δίκτυα. Στην πραγματικότητα επιτρέπει την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση υπηρεσιών διαφορετικής κλάσης, χωρίς όμως οι υπηρεσίες υψηλών απαιτήσεων να επηρεάζονται αρνητικά από τις αντίστοιχες χαμηλών. Υπάρχουν ωστόσο δύο σημαντικά θέματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη πάνω σε αυτό το ζήτημα:

- Επιβάλλεται η ποιότητα υπηρεσίας να αντιμετωπίζεται ενιαία, από άκρου εις άκρον της ζεύξης.
- Η προσπάθεια διατήρησης του εγγυημένου επιπέδου είναι αναγκαίο να επιτελείται από κοινού από τα συμμετέχοντα στρώματα της στοίβας.

Οι υπάρχουσες υλοποιήσεις για παροχή ποιότητας υπηρεσίας χαρακτηρίζονται από περιορισμένη επικοινωνία μεταξύ των στρωμάτων. Συνήθως, το στρώμα εφαρμογής είναι υπεύθυνο για τη δημιουργία των συνδέσεων στο επίπεδο μεταφοράς και για τον ορισμό της απαιτούμενης ποιότητας υπηρεσίας. Αυτό το γεγονός οδηγεί στην αναγνώριση ενός θεμελιώδους προβλήματος στις υπάρχουσες δομές παροχής QoS. Συγκεκριμένα, ορισμένα στρώματα της στοίβας δεν τροφοδοτούνται επαρκώς με πληροφορία για την ποιότητα της υπηρεσίας και επομένως η αλληλεπίδρασή τους με την υπόλοιπη στοίβα σε αυτά τα θέματα είναι από ελάχιστη έως μηδενική. Αν πάρουμε για παράδειγμα το πρωτόκολλο TCP στο στρώμα μεταφοράς (στο οποίο δίνεται έμφαση στη συνέχεια του κεφαλαίου), το πρωτόκολλο αυτό δεν έχει γνώση του αποδιδόμενου ρυθμού μετάδοσης στη ζεύξη. Από τη φύση του το TCP προσπαθεί να αυξάνει συνεχώς το παράθυρο συμφόρησής του (congestion window), έως ότου ανιχνεύσει απώλεια πακέτων. Δύο τινά ενδέχεται να συμβούν σε αυτήν την περίπτωση, ανάλογα με την πολιτική που εφαρμόζει το TCP σε κάθε υλοποίηση:

1. Τα πακέτα θα απορριφθούν, οπότε αυτό θα εκληφθεί από το TCP ως σημάδι συμφόρησης και θα μειωθεί το αντίστοιχο παράθυρο συμφόρησης.
2. Τα πακέτα θα αποθηκευθούν σε μία ενδιάμεση μνήμη, έως ότου καταστεί δυνατή η αποστολή τους. Επομένως το TCP θα θεωρήσει ότι το δίκτυο αντεπεξέρχεται στην κίνηση χωρίς απώλειες και θα συνεχίσει να αποστέλλει πακέτα. Αποτέλεσμα αυτής της

προσέγγισης είναι πολλές φορές να γεμίζει η ενδιάμεση μνήμη και να παρατηρείται ένα σημείο απότομης μετάβασης, όπου το δίκτυο απορρίπτει διαδοχικά πακέτα.

Και στις δύο περιπτώσεις είναι αναπόφευκτη η υποβάθμιση της ποιότητας της παρεχόμενης υπηρεσίας και η αυξημένη καθυστέρηση μετάδοσης για ορισμένα TCP πακέτα. Επιπλέον, εξαιτίας της μεταβαλλόμενης καθυστέρησης για την αποστολή κάθε πακέτου, ο αλγόριθμος που μεταχειρίζεται το TCP για την εκτίμηση του χρόνου διάδοσης μετ' επιστροφής (Round Trip Time - RTT) δε λειτουργεί αποδοτικά, κάτι που έχει αντίκτυπο και στο παράθυρο συμφόρησης. Για την αποφυγή αυτών των προβλημάτων, είναι απαραίτητη η επικοινωνία του επιπέδου συντονισμού ποιότητας υπηρεσίας με όλα τα στρώματα, και ειδικά με το στρώμα μεταφοράς και το πρωτόκολλο TCP.

7.3.3 Επίπεδο Συντονισμού της Κινητικότητας των Χρηστών

Με την εισαγωγή της κινητικότητας των χρηστών στα δίκτυα, έκανε την εμφάνισή της και μία νέα κατηγορία προβλημάτων. Συγκεκριμένα, η αρχιτεκτονική του Διαδικτύου δεν δημιουργήθηκε λαμβάνοντας ιδιαίτερα υπόψη την κινητικότητα. Ως αποτέλεσμα, τα αντίστοιχα πρωτόκολλα δεν παρουσιάζουν ικανοποιητικό βαθμό διαχείρισης απέναντι σε αυτό το θέμα.

Η πιο χαρακτηριστική περίπτωση είναι αυτή του TCP. Σε ένα συνηθισμένο σενάριο όπου ένα κινητό τερματικό εκτελεί διαπομπή από ένα σημείο ραδιοπρόσβασης σε ένα άλλο, η παρακάτω αλληλουχία γεγονότων συναντάται σε μία τυπική σύνδεση TCP:

- Η ζεύξη με το τρέχον σημείο ραδιοπρόσβασης υποβαθμίζεται ποιοτικά, αντίστοιχα το επίπεδο BER αυξάνεται σταδιακά και το πρωτόκολλο TCP αρχίζει να απορρίπτει πακέτα.
- Στη συνέχεια η τρέχουσα σύνδεση διακόπτεται και το τερματικό διαπραγματεύεται τη σύνδεση με ένα νέο σημείο ραδιοπρόσβασης.
- Τελικά η σύνδεση αποκαθίσταται και η TCP σύνδεση επανέρχεται.

Σε αυτό το σενάριο, υπάρχει μία χρονική περίοδος που τα πακέτα απορρίπτονται από το TCP. Αυτό επιφέρει άμεσες συνέπειες στην παρεχόμενη ποιότητα υπηρεσίας, όπως:

- Το παράθυρο συμφόρησης κατά τα προβλεπόμενα μικραίνει έως μία ελάχιστη τιμή κατά τη διαπομπή, αλλά επανέρχεται αργά στην πρότερη τιμή του μετά την αποκατάσταση της σύνδεσης. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της φάσης αποφυγής συμφόρησης (congestion avoidance) του ελέγχου συμφόρησης του TCP [145], κατά την οποία το παράθυρο συμφόρησης αυξάνεται γραμμικά με το χρόνο.
- Το TCP διατηρεί μία τιμή για το RTT, την οποία χρησιμοποιεί ως βάση για τον υπολογισμό του χρόνου λήξης επανεκπομπής (Retransmission Time-Out - RTO). Το RTT ανιχνεύεται αυτόματα και ανανεώνεται από το TCP. Κατά τη διάρκεια διαπομπής μεταξύ διαφορετικών τεχνολογιών, τα χαρακτηριστικά της ζεύξης είναι πολύ πιθανό να μεταβληθούν δραστηρικά, επομένως δεν είναι δόκιμο να διατηρηθεί η παλιά τιμή του RTT. Είναι

απόλυτα λογικό αντίθετα να προσδιοριστεί μία νέα τιμή, η οποία και θα αντικαταστήσει την προηγούμενη.

Η διαστρωματική αρχιτεκτονική είναι και σε αυτήν την περίπτωση η κατάλληλη προσέγγιση που θα επιτρέψει την επίλυση τέτοιου είδους ζητημάτων.

7.3.4 Επίπεδο Συντονισμού Προσαρμογής Ασύρματης Ζεύξης

Σε σύγκριση με τα δίκτυα σταθερής πρόσβασης, τα αντίστοιχα ασύρματα έχουν εν γένει μικρότερη χωρητικότητα, υψηλότερες καθυστερήσεις μετάδοσης, υψηλότερο επίπεδο BER και υποφέρουν από διαλείψεις. Τα πρωτόκολλα μεταφοράς, όπως το TCP υφίστανται πολύ έντονα τις επιδράσεις ειδικά των δύο τελευταίων παραγόντων. Τα δεδομένα που θεωρούνται ότι έχουν ληφθεί εσφαλμένα, απορρίπτονται στο επίπεδο της ζεύξης, ενώ το TCP θεωρεί ότι οι απώλειες αυτές είναι σημάδι συμφόρησης. Στη συνέχεια ο αλγόριθμος ελέγχου συμφόρησης του TCP μειώνει το παράθυρο συμφόρησης συνήθως στο μισό και εισέρχεται στη φάση αποφυγής συμφόρησης, κατά την οποία το αντίστοιχο παράθυρο αυξάνεται γραμμικά με το χρόνο. Αυτή η ενέργεια έχει ως αποτέλεσμα μία σημαντική υποβάθμιση στην επίδοση του πρωτοκόλλου.

Επιπλέον, οι ασύρματες ζεύξεις υφίστανται συχνά διαλείψεις, που έχουν ως αποτέλεσμα διακυμάνσεις στην αξιοποιήσιμη χωρητικότητα του καναλιού. Αν και οι ταχείες διαλείψεις δεν επηρεάζουν ιδιαίτερα την απόδοση του TCP, κατά τη διάρκεια των αργών διαλείψεων χάνονται πολλά πακέτα. Σε αυτές τις περιπτώσεις το TCP μειώνει το παράθυρο συμφόρησης ταχύτατα στην ελάχιστη τιμή του. Εξαιτίας μάλιστα της ιδιότητας “πολλαπλασιαστικής μείωσης - αθροιστικής αύξησης” (“multiplicative decrease - additive increase”) του αλγορίθμου αποφυγής συμφόρησης, το παράθυρο συμφόρησης καθυστερεί να ανακτήσει την αρχική τιμή του πριν την εμφάνιση της διάλειψης.

Το προαναφερθέν πρόβλημα έχει ως άμεσο αποτέλεσμα την υποβάθμιση της ποιότητας της ασύρματης ζεύξης και την υποχρησιμοποίηση των πόρων του δικτύου. Η εφαρμογή μίας διαστρωματικής τεχνικής βελτιστοποίησης του δικτύου κρίνεται απαραίτητη για την αντιμετώπιση αυτών των φαινομένων.

7.4 Διαστρωματική και Διασυστημική Βελτιστοποίηση Ασυρμάτων Δικτύων

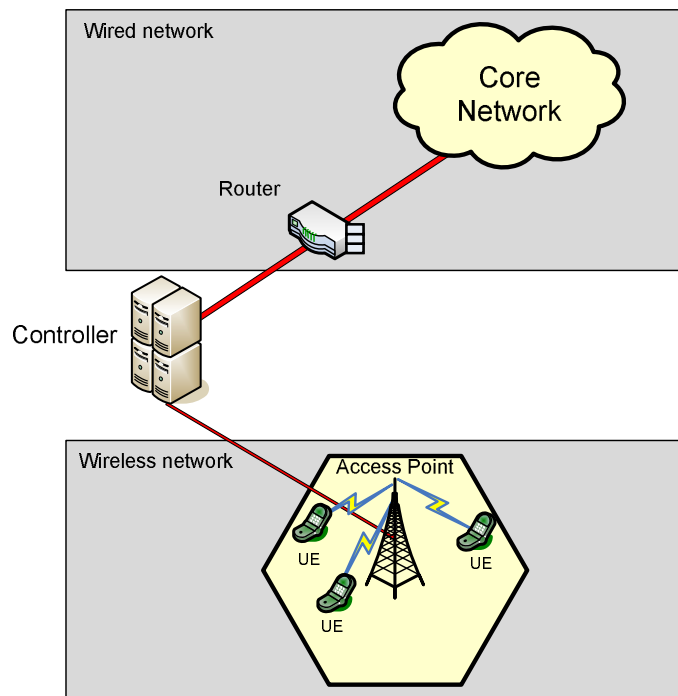
Σκοπός της παρούσας ενότητας είναι η επίλυση των προαναφερθέντων προβλημάτων μέσω της εισαγωγής μίας νέας τεχνικής διαστρωματικής αρχιτεκτονικής, η οποία θα μοντελοποιηθεί λεπτομερώς μέσω αναλυτικών σχέσεων που διασυνδέουν τις επί μέρους λειτουργίες του φυσικού στρώματος, του στρώματος ζεύξης και του στρώματος μεταφοράς της στοίβας. Η μοντελοποίηση θα δομηθεί γύρω από την αφαιρετική περιγραφή του υποστρώματος MAC της στοίβας, καθιστώντας την προσέγγιση διασυστημική, ικανή δηλαδή να περιγράψει τη συντριπτική πλειοψηφία των ασυρμάτων δικτύων επικοινωνιών, μέσω της τροποποίησης μίας και μοναδικής παραμέτρου στο σύστημα των αναλυτικών σχέσεων.

7.4.1 Εισαγωγή και Συνοπτική Παρουσίαση του Αναλυτικού Μοντέλου

Όπως προαναφέρθηκε, σκοπός είναι η επίτευξη διαστρωματικής και διασυστημικής βελτιστοποίησης, με βάση την περιγραφή του υποστρώματος MAC μέσω αφαιρετικής μεθόδου. Στην [146] επιχειρείται να περιγραφεί το MAC με έναν τέτοιο γενικό τρόπο. Γενικά, τα πρωτόκολλα MAC είναι στην πραγματικότητα δυναμικά συστήματα που με βάση την πιθανότητα για ορθή εκπομπή και λήψη των δεδομένων (successful transmission probability – q_i), λαμβάνουν απόφαση για το πότε θα αποδοθούν πόροι για εκπομπή ή λήψη στο κάθε τερματικό (scheduling rate – τ_i). Επομένως υπάρχει μία συναρτησιακή σχέση μεταξύ q_i και τ_i , η οποία στη γενική της μορφή μπορεί να περιγραφεί ως $\tau_i = h_i(q_i)$. Αυτή η σχέση, δεδομένων των χαρακτηριστικών των υπό μελέτη δικτύων, είναι δυνατόν να αναπτυχθεί κατά Taylor και λαμβάνοντας προσέγγιση πρώτης τάξης καταλήγει στην έκφραση $\tau_i = \alpha * q_i$. Η πιθανότητα q_i υπολογίζεται με γενικό τρόπο από την τοπολογία του εκάστοτε συστήματος (σχετική θέση κόμβων, παρεμβολές κ.τ.λ.) και η κατάληξη είναι μία τελική έκφραση στην οποία η παράμετρος α και μόνο μοντελοποιεί το αντίστοιχο πρωτόκολλο MAC. Αυτή η σχέση όπου η α περιλαμβάνει όλη τη λειτουργικότητα του MAC, είναι η αφαιρετική σχέση που αποτελεί την καρδιά της επιχειρούμενης βελτιστοποίησης και υπολογίζεται με ανάλυση των πιθανών συνδυασμών δικτύου και σχημάτων δρομολόγησης.

Πριν τον υπολογισμό της παραμέτρου α , απαιτείται μία σειρά διαδοχικών βημάτων για τον υπολογισμό ορισμένων κρίσιμων παραμέτρων του συστήματος (π.χ. πιθανότητα σφάλματος κατά τη μετάδοση, μέσος αριθμός μεταδόσεων ανά πακέτο κ.τ.λ.). Συνοπτικά, πρώτο βήμα είναι η έκφραση του λαμβανόμενου σηματοθορυβικού λόγου σε αναλυτική μορφή και ο ορισμός των δυνατών σχημάτων μετάδοσης πληροφορίας (διαμόρφωση και κωδικοποίηση, που αντιστοιχούν τελικά σε συγκεκριμένο ρυθμό μετάδοσης). Στη βιβλιογραφία [147, 148, 149] έχουν αναπτυχθεί σχετικές εκφράσεις. Κατόπιν υπολογίζεται με αναλυτικές σχέσεις ή από τις αντίστοιχες βιβλιογραφικές καμπύλες το επίπεδο BER ως συνάρτηση του αντίστοιχου σηματοθορυβικού λόγου [20, 150, 151, 152]. Εξαιρετικά σημαντικός είναι ο υπολογισμός του μέσου όρου μεταδόσεων ανά πακέτο έως την επιτυχή λήψη του, καθώς και η αντίστοιχη τυπική απόκλιση [147, 153]. Έπειτα υπολογίζεται η ολική πιθανότητα εσφαλμένης μετάδοσης και ο χρόνος διάδοσης μετ' επιστροφής στο ασύρματο και ενσύρματο τμήμα του δικτύου [153, 154, 155]. Συνέχεια αυτών των βημάτων αποτελεί ο υπολογισμός και η κατάλληλη χρήση της παραμέτρου α . Η παράμετρος αυτή εξαρτάται από την τεχνολογία του υποστρώματος MAC και από τον αλγόριθμο δρομολόγησης που έχει υλοποιηθεί.

Για τους σκοπούς της βελτιστοποίησης, υποτέθηκε ότι στο στρώμα μεταφοράς υλοποιείται πρωτόκολλο μετάδοσης TCP. Από τις [156] και [157] και μέσω των αναλυτικών εκφράσεων για το TCP, προκύπτει η αντίστοιχη ρυθμοαπόδοση. Στην έκφραση της ρυθμοαπόδοσης υπεισέρχεται η πιθανότητα λάθους σε TCP επίπεδο, καθώς και ο χρόνος διάδοσης μετ' επιστροφής. Μέσω των παραπάνω σχέσεων υπολογίζεται τελικά η ρυθμοαπόδοση σταθερής κατάστασης (steady state) στο επίπεδο TCP.



Σχήμα 7.3: Γενική τοπολογία του υπό μελέτη δικτύου

7.4.2 Εκτενής Παρουσίαση του Αναλυτικού Μοντέλου

Σε αυτήν την παράγραφο θα αναλυθεί η μέθοδος εξαγωγής του γενικευμένου αναλυτικού μοντέλου που παρουσιάστηκε περιληπτικά στην παράγραφο 7.4.1. Στο σχήμα 7.3 παρουσιάζεται η γενική τοπολογία του υπό μελέτη δικτύου, ενώ στον πίνακα 7.1 παρατίθενται οι συμβολισμοί για κάθε φυσικό μέγεθος το οποίο χρησιμοποιείται στο αναλυτικό μοντέλο.

Υπενθυμίζεται ότι τελικός στόχος είναι η διατύπωση ενός αναλυτικού μοντέλου που θα διασυνδέει το φυσικό στρώμα, το στρώμα ζεύξης (πιο συγκεκριμένα το υπόστρωμα MAC) και το στρώμα μεταφοράς (πρωτόκολλο TCP), ώστε να αποσαφηνιστούν οι παράγοντες που εν τέλει ορίζουν την επίδοση του δικτύου. Ουσιαστικά ζητείται η διατύπωση μίας μαθηματικής σχέσης που να περιγράφει τη χρήσιμη ρυθμοαπόδοση (goodput) στο στρώμα μεταφοράς, συναρτήσει γνωστών μεγεθών που προκύπτουν ή ορίζονται από τα κατώτερα στρώματα της στοίβας του OSI.

Σημειώνεται ότι η συμπεριφορά του στρώματος μεταφοράς ουσιαστικά καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τη φαινόμενη ποιότητα υπηρεσίας που αντιλαμβάνεται ο τελικός χρήστης. Ζητούμενο είναι επίσης η αναπτυσσόμενη τεχνική να είναι διασυστημική, υπό την έννοια ότι θα δύναται να αξιοποιηθεί άμεσα από ένα ευρύ φάσμα τεχνολογιών ευρυζωνικών ασυρμάτων δικτύων. Με αυτόν τον τρόπο θα καλύψει και την απαίτηση για υποστήριξη της κινητικότητας των χρηστών, αφού θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί εκτός των άλλων και ως κριτήριο διαπομπής, του οποίου άμεση γνώση θα έχει το πρωτόκολλο TCP. Για απλούστευση στην ανάλυση θεωρείται ότι ένα

Πίνακας 7.1: Βασικές παράμετροι αναλυτικού μοντέλου

Φυσικό Μέγεθος	Συμβολισμός
Σηματοθυροβικός λόγος	γ
Γάμμα συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας SNR, Nakagami- m μοντέλο	$p_\gamma(\gamma)$
Πλήθος δυνατών σχημάτων μετάδοσης	N_s
Σύνολο δυνατών σχημάτων μετάδοσης	$\{N_j\}_{j=1,\dots,N_s}$
Σύνολο πιθανοτήτων χρήσης κάθε σχήματος μετάδοσης για το i -οστό τερματικό	$\{k_{j,i}\}_{j=1,\dots,N_s}$
Σύνολο ρυθμών μετάδοσης κάθε σχήματος μετάδοσης	$\{r_j\}_{j=1,\dots,N_s}$
Επίπεδο εσφαλμένων bits	BER
Ολική πιθανότητα σφάλματος μετάδοσης πακέτου	p
Πιθανότητα σφάλματος μετάδοσης στο ενσύρματο μέσο	p_{wired}
Πιθανότητα σφάλματος μετάδοσης στο ασύρματο μέσο	p_{wl}^{tr}
Πιθανότητα σφάλματος μετάδοσης γνωστοποίησης στο ασύρματο μέσο	p_{wl}^{ACK}
Πιθανότητα απόρριψης πακέτου από την προσωρινή μνήμη στο ασύρματο τμήμα	p_{wl}^{buf}
Ολική πιθανότητα σφάλματος μετάδοσης σε επίπεδο TCP	p_{TCP}
Πιθανότητα σφάλματος στο TCP εξαιτίας συμφόρησης	$p_{TCP_{cong}}$
Πιθανότητα σφάλματος στο TCP εξαιτίας λήξης χρόνου	$p_{TCP_{to}}$
Πιθανότητα εξυπηρέτησης i -οστού τερματικού σε μία χρονοθυρίδα	τ_i
Δεσμευμένη πιθανότητα σωστής αποστολής πακέτου i -οστού τερματικού, υπό τη συνθήκη ότι αποστέλλει πακέτο	q_i
Μέγεθος segment του MAC σε bits	n_{seg}
Αύξων αριθμός προσπάθειας μετάδοσης ενός ορισμένου πακέτου	tr
Μέσος όρος μεταδόσεων πακέτου έως την επιτυχή εκπομπή	N_{tr}
Μέσος όρος μεταδόσεων γνωστοποίησης έως την επιτυχή εκπομπή	N_{ACK}
Πλήθος τερματικών στο δίκτυο	N_u
Μέσος ρυθμός μετάδοσης i -οστού τερματικού	$\{R_i\}_{i=1,\dots,N_u}$
Μέγεθος γνωστοποίησης (ACK) σε bits	n_{ACK}
Μέσος αριθμός μεταδόσεων γνωστοποίησης	N_{ACK}
Μέσος ρυθμός μετάδοσης γνωστοποίησης	R_{ACK}
Μέγιστο μέγεθος τμήματος (Maximum Segment Size)	MSS
Φόρτος ενσύρματου δικτύου	ρ
Χωρητικότητα ενσύρματου δικτύου	C
Μέγεθος προσωρινής μνήμης δρομολογητή ενσύρματου δικτύου	K
Παράμετρος μοντελοποίησης πρωτοκόλλου MAC	α
Συνάρτηση διασύνδεσης PHY - MAC	$\tau_i = h_i(q_i)$
Ρυθμοαπόδοση σε επίπεδο TCP (σε αριθμό πακέτων)	B
Αριθμός πακέτων TCP που αναγνωρίζονται από κάθε γνωστοποίηση	b
Χρονική διάρκεια πρώτης εκπνοής λήξης χρόνου (timeout) στο TCP	T_0

τμήμα TCP αποτελεί ένα πλήρες πακέτο TCP και οι δύο αυτοί ορισμοί θα χρησιμοποιούνται για να υποδηλώσουν ένα πακέτο TCP στη συνέχεια, εκτός αν ρητά αναφέρεται διαφορετικά.

Παρακάτω παρουσιάζεται η μέθοδος υπολογισμού των αναλυτικών σχέσεων της διαστρωματικής τεχνικής σε διακριτά βήματα. Παράλληλα, για να διευκολυνθεί η ανάγνωση, στο σχήμα 7.4 απεικονίζεται το διάγραμμα ροής της γενικευμένης μεθοδολογίας, όπου οι αριθμοί στους μικρούς κύκλους υποδεικνύουν σε ποιο βήμα της παρουσίασης αντιστοιχεί το κάθε στάδιο επίλυσης. Διευκρινίζεται ότι το διάγραμμα ροής απεικονίζει τον ευθύ τρόπο επίλυσης, ενώ κατά τη βηματική παρουσίαση του μοντέλου θα ακολουθηθεί μία ανάστροφη πορεία: εκκινώντας από το ζητούμενο, θα δομηθεί σταδιακά η πορεία προς την εξαγωγή του γενικευμένου μοντέλου. Τέλος, τονίζεται ότι η παρακάτω ανάλυση επιτελείται υπό την προϋπόθεση ότι το δίκτυο βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας (steady state).

1. Σύμφωνα με τις εργασίες [156, 157], η ρυθμοαπόδοση σε επίπεδο TCP μετρούμενη σε πακέτα δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$B = \frac{1}{E(RTT) \sqrt{\frac{2bp_{TCP}}{3}} + 3T_0 \sqrt{\frac{3bp_{TCP}}{8}} p_{TCP} (1 + 32p_{TCP}^2)}, \quad (7.1)$$

όπου b ο αριθμός των πακέτων TCP που αναγνωρίζονται από κάθε γνωστοποίηση, T_0 η χρονική διάρκεια πρώτης εκπνοής λήξης χρόνου (first timeout) στο TCP, RTT ο χρόνος διάδοσης μετ' επιστροφής για ένα πακέτο και p_{TCP} η πιθανότητα σφάλματος στο επίπεδο TCP. Οι παράμετροι b και T_0 καθορίζονται από το δίκτυο και θεωρούνται γνωστές, ενώ οι $E(RTT)$ και p_{TCP} συνδέονται με τη λειτουργία των κατώτερων στρωμάτων.

Συνεπώς, για να επιτευχθεί ο στόχος της εύρεσης της ζητούμενης μαθηματικής σχέσης, πρέπει να εκφραστούν οι παράμετροι RTT και p_{TCP} συναρτήσει γνωστών μεγεθών.

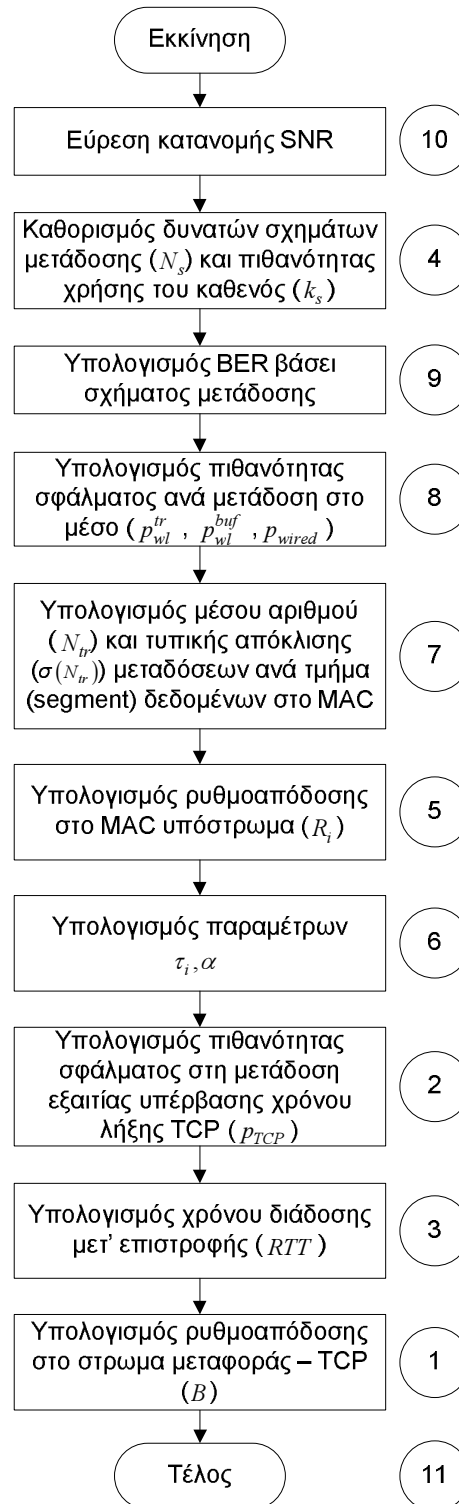
2. Αρχικά θα υπολογιστεί η πιθανότητα p_{TCP} . Η πιθανότητα σφάλματος σε επίπεδο TCP διαχωρίζεται σε μία πιθανότητα $p_{TCP_{cong}}$ εξαιτίας συμφόρησης στο ενσύρματο δίκτυο και σε μία πιθανότητα $p_{TCP_{to}}$ εξαιτίας υπέρβασης χρόνου λήξης του TCP segment. Ισχύει ότι:

$$p_{TCP} = p_{TCP_{cong}} + p_{TCP_{to}} - p_{TCP_{cong}} p_{TCP_{to}}$$

Δεδομένου ότι το ενδιαφέρον της μελέτης δεν επικεντρώνεται στο ενσύρματο τμήμα, θεωρείται ότι $\rho \rightarrow 0$ και επομένως για την πιθανότητα σφάλματος εξαιτίας συμφόρησης στο ενσύρματο δίκτυο ισχύει ότι $p_{TCP_{cong}} \rightarrow 0$. Επομένως:

$$p_{TCP} = p_{TCP_{to}} \quad (7.2)$$

Σημειώνεται ότι αν δεν είχε γίνει η υπόθεση ότι ένα τμήμα TCP αποτελεί ένα πλήρες πακέτο TCP, η πιθανότητα σφάλματος θα ήταν ίση με την πιθανότητα να χαθεί ένα οποιοδήποτε τμήμα του πακέτου και αυτό θα διαφοροποιούσε την προηγούμενη σχέση, χωρίς όμως βλάβη της γενικής πορείας της προτεινόμενης τεχνικής. Ακόμα,



Σχήμα 7.4: Διάγραμμα ροής προτεινόμενης διαστρωματικής τεχνικής και αντιστοιχία με τα βήματα κατά την εκτενή παρουσίαση του μοντέλου

θεωρώντας ότι ο αριθμός αναμεταδόσεων ενός τμήματος TCP ακολουθεί γκαουσιανή κατανομή [153], σύμφωνα με το Κεντρικό Οριακό Θεώρημα γκαουσιανή θα είναι και η κατανομή του χρόνου διάδοσης μετ' επιστροφής. Άρα είναι δυνατόν να υπολογιστεί η πιθανότητα $p_{TCP_{to}}$ ως εξής:

$$\begin{aligned} p_{TCP_{to}} &= \text{prob}(RTT > T_0) \Rightarrow \\ p_{TCP_{to}} &= Q\left(\frac{T_0 - E(RTT)}{\sigma(RTT)}\right) \end{aligned} \quad (7.3)$$

Επομένως το επόμενο βήμα που απαιτείται είναι ο υπολογισμός των στατιστικών μεγεθών $E(RTT)$ και $\sigma(RTT)$.

3. Ο ολικός χρόνος RTT προκύπτει ως άθροισμα των επί μέρους χρόνων στο ασύρματο και στο ενσύρματο τμήμα του δικτύου:

$$RTT = RTT_{wl} + RTT_{wired} \quad (7.4)$$

Ο χρόνος διάδοσης μετ' επιστροφής για το ασύρματο τμήμα είναι:

$$RTT_{wl} = \frac{n_{seg}N_{tr}}{R_i} + \frac{n_{ACK}N_{ACK}}{R_{ACK}}, \quad (7.5)$$

όπου n_{seg} και n_{ACK} είναι το μέγεθος σε bits του πακέτου δεδομένων και της γνωστοποίησης αντίστοιχα, R_i και R_{ACK} ο μέσος ρυθμός μετάδοσης του i-οστού χρήστη και της γνωστοποίησης αντίστοιχα και N_{tr} και N_{ACK} οι αντίστοιχοι μέσοι όροι εκπομπών ανά πακέτο έως την επιτυχή λήψη. Θεωρώντας $N_{ACK} \approx 1$, η σχέση απλοποιείται. Ο χρόνος διάδοσης μετ' επιστροφής για το ενσύρματο τμήμα είναι:

$$RTT_{wired} = 2d_p + \frac{MSS}{C} \left(\frac{1}{1-\rho} - K \frac{\rho^K}{1-\rho^K} \right), \quad (7.6)$$

όπου d_p η καθυστέρηση διάδοσης, MSS το μέγιστο μέγεθος τμήματος, C η χωρητικότητα, ρ ο φόρτος και K το μέγεθος της ουράς της προσωρινής μνήμης στο ενσύρματο τμήμα. Αντικαθιστώντας την (7.5) και την (7.6) στην (7.4), προκύπτει η τελική σχέση υπολογισμού του χρόνου διάδοσης μετ' επιστροφής:

$$RTT = \frac{n_{seg}N_{tr}}{R_i} + \frac{n_{ACK}N_{ACK}}{R_{ACK}} + 2d_p + \frac{MSS}{C} \left(\frac{1}{1-\rho} - K \frac{\rho^K}{1-\rho^K} \right). \quad (7.7)$$

Πλέον είναι δυνατόν να υπολογιστούν τα μεγέθη $E(RTT)$ και $\sigma(RTT)$. Λαμβάνοντας υπόψη την (7.7), για το $E(RTT)$ ισχύει ότι:

$$E(RTT) = E \left[\frac{n_{seg}N_{tr}}{R_i} + \frac{n_{ACK}N_{ACK}}{R_{ACK}} + 2d_p + \frac{MSS}{C} \left(\frac{1}{1-\rho} - K \frac{\rho^K}{1-\rho^K} \right) \right]$$

Θεωρώντας ότι στην προηγούμενη σχέση $\rho \rightarrow 0$, $d_p \rightarrow 0$, καθώς και ότι η επιβάρυνση

εξαιτίας της γνωστοποίησης είναι αμελητέα, προκύπτει ότι:

$$E(RTT) = \frac{n_{seg}N_{tr}}{R_i} + \frac{MSS}{C} \quad (7.8)$$

Όσον αφορά στην τυπική απόκλιση του χρόνου διάδοσης μετ' επιστροφής ισχύει ότι:

$$\sigma(RTT) = \sigma\left(\frac{n_{seg}N_{tr}}{R_i} + \frac{n_{ACK}N_{ACK}}{R_{ACK}} + \frac{MSS}{C}\right)$$

Θεωρώντας ξανά ότι η επιβάρυνση εξαιτίας της γνωστοποίησης είναι αμελητέα, μέσω της σχέσης (7.15) προκύπτει ότι:

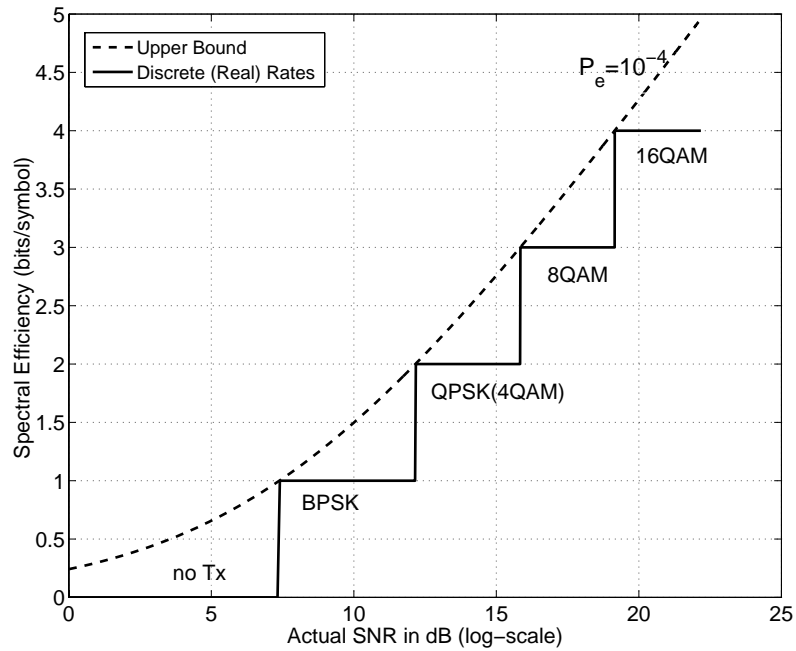
$$\begin{aligned} \sigma(RTT) &= \sigma\left(\frac{n_{seg}N_{tr}}{R_i}\right) \Rightarrow \\ \sigma(RTT) &= \frac{n_{seg}}{R_i}\sigma(N_{tr}) \end{aligned} \quad (7.9)$$

Στις σχέσεις (7.26) και (7.27) οι παράμετροι R_i , N_{tr} και $\sigma(N_{tr})$ που εκφράζουν το μέσο ρυθμό μετάδοσης του i -οστού χρήστη, το μέσο πλήθος εκπομπών ανά πακέτο έως την επιτυχή λήψη και την τυπική απόκλιση των εκπομπών αντίστοιχα, δεν είναι γνωστές και πρέπει να εκφραστούν συναρτήσει γνωστών μεγεθών.

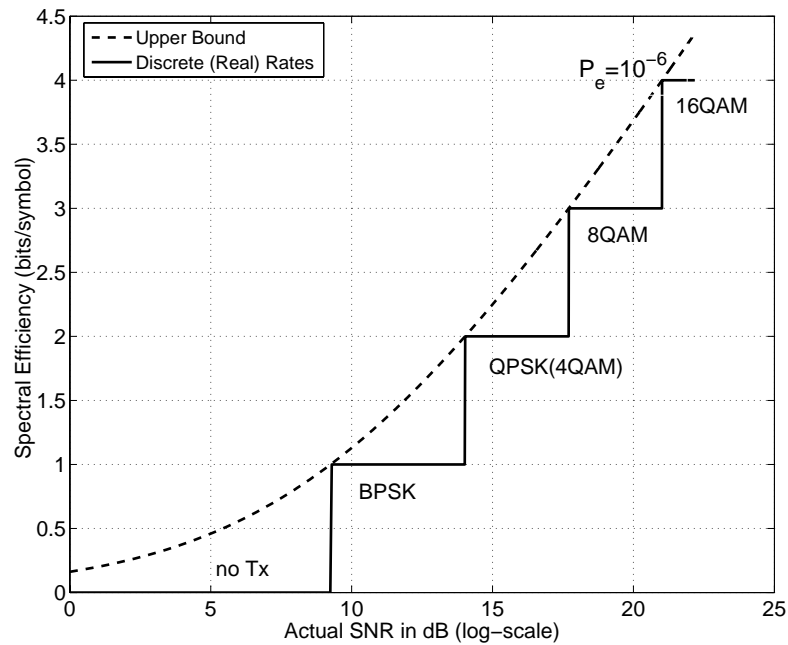
4. Μετά τον υπολογισμό ορισμένων απαραίτητων παραμέτρων στα προηγούμενα στάδια, το επόμενο βήμα είναι η μαθηματική διατύπωση της μέσης ρυθμοαπόδοσης στο υπόστρωμα MAC για κάθε τερματικό (παράμετρος R_i). Ορίζεται λοιπόν το σύνολο $\{N_j\}$ των δυνατών σχημάτων μετάδοσης, έστω N_s το πλήθος τους. Με προσεγγιστικές τεχνικές υπολογίζεται η πιθανότητα χρήσης $\{k_{j,i}\}_{j=1,\dots,N_s}$ κάθε ρυθμού μετάδοσης από το i -οστό τερματικό. Ο υπολογισμός του δεύτερου συνόλου πιθανοτήτων μπορεί να εκτελεστεί με απλές μεθόδους, όπως για είναι για παράδειγμα ο συσχετισμός σχήματος μετάδοσης με τη χωρική θέση του τερματικού γύρω από το σημείο ραδιοπρόσβασης (π.χ. σε κυψελωτά συστήματα με κατάτμηση του χώρου σε ομόκεντρους κύκλους γύρω από αυτό το σημείο και απόδοση πιθανοτήτων με βάση το εμβαδόν των σχηματιζόμενων δακτυλίων). Βέλτιστα, εάν είναι γνωστή η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας για το σηματοπαρεμβολικό λόγο (θα υπολογιστεί σε επόμενο βήμα), είναι δυνατόν να βρεθούν οι πιθανότητες χρήσης κάθε σχήματος μετάδοσης με αναφορά στις θεωρητικές καμπύλες συσχέτισης SNR με τα αντίστοιχα σχήματα μετάδοσης, δεδομένου του κατωφλίου BER που εξασφαλίζει την αξιοπιστία της μετάδοσης (βλ. ενδεικτικά το σχήμα 7.5).
5. Με γνωστά τα σύνολα $\{N_j\}$ και $\{k_{j,i}\}_{j=1,\dots,N_s}$, η μέση ρυθμοαπόδοση στο υπόστρωμα MAC για τον i -οστό χρήστη προκύπτει από τη σχέση:

$$R_i = \tau_i \sum_{j=1}^{j=N_s} (R_j k_{j,i}), \quad (7.10)$$

όπου τ_i είναι η πιθανότητα να εξυπηρετηθεί το i -οστό τερματικό στη σταθερή κατάσταση



(α') BER = 10^{-4}



(β') BER = 10^{-6}

Σχήμα 7.5: Προσεγγιστικές καμπύλες αντιστοίχισης σχημάτων μετάδοσης με BER

(steady state) του δικτύου. Αντίστοιχα, η ολική ρυθμοαπόδοση του δικτύου είναι ίση με $\sum_{i=1}^{i=N_u} R_i$, όπου N_u είναι το πλήθος των τερματικών στο δίκτυο.

Επομένως το επόμενο βήμα που απαιτείται είναι ο υπολογισμός της πιθανότητας τ_i , ώστε να υπολογιστεί η μέση ρυθμοαπόδοση R_i .

6. Έχει ήδη αναφερθεί ότι υπάρχει μία συναρτησιακή σχέση μεταξύ της δεσμευμένης πιθανότητας σωστής αποστολής πακέτου από το i -οστό τερματικό, υπό τη συνθήκη ότι αυτό αποστέλλει πακέτο (q_i) και της πιθανότητας εξυπηρέτησης του i -οστού τερματικού σε μία χρονοθυρίδα (τ_i), η οποία στη γενική της μορφή μπορεί να περιγραφεί ως $\tau_i = h_i(q_i)$. Είναι γεγονός ότι η λειτουργία του MAC είναι εξαρτημένη από το χρόνο [146]. Παρόλα αυτά, είναι δυνατόν να υποθεθεί ότι μακροχρόνια (δηλαδή στην σταθερή κατάσταση του συστήματος), η λειτουργία αυτή μπορεί να αναπαρασταθεί από μία συνάρτηση $h(\cdot)$, η οποία είναι ανεξάρτητη του χρόνου και καταλήγει στην προαναφερθείσα μορφή. Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί ότι η τ_i είναι συνάρτηση όχι μόνο της q_i , αλλά και της πιθανότητας να υπάρχει πακέτο προς αποστολή στο τερματικό. Θα υιοθετηθεί λοιπόν σε αυτό το σημείο η συχνή υπόθεση στη βιβλιογραφία ότι τα τερματικά είναι κορεσμένα, έχουν πάντα δηλαδή πακέτα να μεταδώσουν. Εφόσον η $h_i(q_i)$ είναι μία συνάρτηση με συνεχή n -οστή παράγωγο στο διάστημα $[0, 1]$, είναι δυνατόν να αναπτυχθεί κατά Taylor ως εξής:

$$h_i(q_i) = h_i(0) + q_i h_i'(0) + \dots + \frac{q_i^{n-1}}{(n-1)!} h_i^{(n-1)}(0) + R_n, \quad (7.11)$$

όπου $R_n = \frac{q_i^n}{n!} h_i^{(n)}(\epsilon)$, $0 \leq \epsilon \leq q_i$. Επιπλέον, έστω ότι $h_i(0) \approx 0$, δηλαδή η πιθανότητα να αποδοθούν πόροι σε ένα τερματικό το οποίο αποστέλλει δεδομένα με πιθανότητα επιτυχούς μετάδοσης που τείνει στο 0, τείνει και αυτή στο 0. Σε αυτήν την περίπτωση, μίας πρώτης τάξης προσέγγιση για την $h_i(q_i)$ είναι η παρακάτω:

$$\begin{aligned} \tau_i &= h_i(q_i) \Rightarrow \\ \tau_i &= \alpha q_i, \end{aligned} \quad (7.12)$$

όπου $\alpha = h_i'(0)$. Η παράμετρος α μοντελοποιεί πλήρως το εκάστοτε πρωτόκολλο MAC, και αποτελεί ουσιαστικά την πληροφορία για την πιθανότητα απόδοσης πόρων από το δίκτυο προς το τερματικό. Με αντικατάσταση της (7.12) στην (7.10), προκύπτει ότι η μέση ρυθμοαπόδοση για το i -οστό τερματικό είναι:

$$R_i = \alpha q_i \sum_{j=1}^{j=N_s} (R_j k_{j,i}), \quad (7.13)$$

Σημειώνεται σε αυτό το σημείο ότι για δίκτυα που υλοποιούν προσαρμοστικά σχήματα μετάδοσης, θεωρείται χωρίς σημαντικό σφάλμα ότι $q_i \rightarrow 1$. Στον πίνακα 7.2 δίνονται ενδεικτικά ορισμένες τυπικές εκφράσεις για την κρίσιμη παράμετρο α , οι οποίες αντιστοιχούν σε ευρέως διαδεδομένους συνδυασμούς δικτύων και αλγορίθμων δρομολόγησης.

7. Το επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός του στατιστικού μέσου (N_{tr}) και της τυπικής απόκλισης ($\sigma(N_{tr})$) του πλήθους των μεταδόσεων ανά πακέτο στο υπόστρωμα MAC:

$$N_{tr} = \sum_{tr=1}^{tr=\infty} tr * p_{wl}^{tr-1} * (1 - p_{wl}^{tr}) = \frac{1}{1 - p_{wl}^{tr}}, \quad (7.14)$$

όπου p_{wl}^{tr} είναι η πιθανότητα σφάλματος κατά τη μετάδοση στο ασύρματο μέσο. Για την τυπική απόκλιση ισχύει:

$$\begin{aligned} \sigma^2(N_{tr}) &= \sum_{tr=1}^{tr=\infty} tr^2 * p_{wl}^{tr-1} * (1 - p_{wl}^{tr}) \\ &= (1 - p_{wl}^{tr}) \sum_{tr=1}^{tr=\infty} tr^2 * p_{wl}^{tr-1} \\ &= (1 - p_{wl}^{tr}) \frac{(1 + p_{wl}^{tr})}{(1 - p_{wl}^{tr})^3} \Rightarrow \\ \sigma(N_{tr}) &= \sqrt{\frac{1 + p_{wl}^{tr}}{(1 - p_{wl}^{tr})^2}} \Rightarrow \\ \sigma(N_{tr}) &= \frac{1}{(1 - p_{wl}^{tr})} * \sqrt{(1 + p_{wl}^{tr})} \end{aligned} \quad (7.15)$$

Παρόμοια είναι η διαδικασία για περικομμένη αυτόματη αίτηση επανεκπομπής (truncated ARQ), καθώς και για αυξητική πλεοναστική επανάληψη (Incremental Redundancy). Η διαφορά στην πρώτη περίπτωση είναι ότι μεταβάλλεται το άνω όριο του αθροίσματος, ενώ στη δεύτερη περίπτωση οι πιθανότητες ορθής λήψης σε κάθε επανεκπομπή δεν είναι ανεξάρτητες των προηγούμενων επανεκπομπών.

Στις σχέσεις (7.14) και (7.15) η πιθανότητα p_{wl}^{tr} δεν είναι γνωστή και πρέπει να εκφραστεί συναρτήσει γνωστών μεγεθών.

8. Η πιθανότητα σφάλματος κατά τη μετάδοση ενός πακέτου είναι:

$$p = 1 - (1 - p_{wl}^{tr})(1 - p_{wired}), \quad (7.16)$$

όπου p_{wl}^{tr} και p_{wired} οι πιθανότητες σφάλματος κατά τη μετάδοση στο ασύρματο και στο ενσύρματο μέσο αντίστοιχα. Αν n_{seg} το μέγεθος του πακέτου σε bits, η πιθανότητα p_{wl}^{tr} υπολογίζεται ως εξής:

$$p_{wl}^{tr} = 1 - (1 - E(BER))^{n_{seg}} \quad (7.17)$$

Η πιθανότητα p_{wl}^{tr} είναι το άγνωστο μέγεθος του προηγούμενου βήματος και στην (7.17) εκφράστηκε συναρτήσει του επιπέδου BER. Επισημαίνεται ότι το επίπεδο BER δεν θεωρείται θεμελιώδες μέγεθος της ραδιοζεύξης και θα υπολογιστεί στο επόμενο βήμα συναρτήσει του σηματοπαρεμβολικού λόγου.

Πίνακας 7.2: Παράμετρος α για συχνούς συνδυασμούς δικτύων και αλγορίθμων δρομολόγησης

Δίκτυο και αλγόριθμος	Τύπος για την παράμετρο α	Επεξήγηση συμβολισμών
802.11 DCF	$\frac{2W_{min}}{(W_{min} + 1)^2}$	W_{min} : ελάχιστο παράθυρο συμφόρησης κατά την υποχώρηση (TCP backoff)
HSPA BC	$prob(\gamma_i > \gamma_j), \forall j \neq i$	γ_i : ο σηματοθορυβικός λόγος του i -οστού τερματικού
HSPA RR	$1/N_u$	N_u : αριθμός τερματικών στο δίκτυο
HSPA FT	$prob((d_i/r_i) > (d_j/r_j)),$ που μετασχηματίζεται σε $prob(\gamma_i > (r_i/r_j)\gamma_j), \forall j \neq i$	d_i : στιγμιαίος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων του i -οστού τερματικού, r_i : δεδομένα του i -οστού τερματικού που έχουν μεταδοθεί εντός ορισμένου χρονικού παραθύρου
LTE BC	$prob(\gamma_{i,k} > \gamma_{j,k}), \forall j \neq i$	$\gamma_{i,k}$: ο σηματοθορυβικός λόγος του i -οστού τερματικού στο υποκανάλι k
LTE Max-Thr	$prob(M_{i,k}(n) > M_{j,k}(n)), \forall j \neq i,$ όπου είναι $M_{i,k}(n) = r_i(n) d_{i,k}(n)$	n : η n -οστή χρονοθυρίδα, $r_i(n)$: δεδομένα στην προσωρινή μνήμη του i -οστού τερματικού, $d_{i,k}(n)$: στιγμιαίος επιτεύξιμος ρυθμός μετάδοσης του i -οστού τερματικού στο υποκανάλι k
LTE PF	$prob(M_{i,k}(n) > M_{j,k}(n)), \forall j \neq i,$ όπου είναι $M_{i,k}(n) = \frac{d_{i,k}(n)}{T_{i,k}(n)}$ και $T_{i,k}(n) = \begin{cases} \left(1 - \frac{1}{t_c}\right) T_{i,k}(n-1) + \frac{1}{t_c} d_{i,k}(n-1) \\ (1 - 1/t_c) T_{i,k}(n-1) \end{cases}$	n : η n -οστή χρονοθυρίδα, $d_{i,k}(n)$: στιγμιαίος επιτεύξιμος ρυθμός μετάδοσης του i -οστού τερματικού στο υποκανάλι k , $T_{i,k}(n)$: Εξομαλυμένη ρυθμοαπόδοση του i -οστού τερματικού για τα δεδομένα που έχουν μεταδοθεί εντός ορισμένου χρονικού παραθύρου στο υποκανάλι k , t_c : η διάρκεια του ορισμένου χρονικού παραθύρου

Για λόγους πληρότητας, συνεχίζεται η ανάλυση για την πιθανότητα σφάλματος κατά τη μετάδοση ενός πακέτου, αν και δεν παρουσιάζει περαιτέρω άμεσο ενδιαφέρον στην περίπτωση που η μελέτη είναι επικεντρωμένη στο ασύρματο τμήμα του δικτύου. Αν ρ το φορτίο του ενσύρματου δικτύου και K το μέγεθος της προσωρινής μνήμης του δρομολογητή στο ενσύρματο δίκτυο, η πιθανότητα p_{wired} υπολογίζεται ως εξής:

$$p_{wired} = \rho^K \frac{1 - \rho}{1 - \rho^{K-1}} \quad (7.18)$$

Αντικαθιστώντας τις εκφράσεις (7.17) και (7.18) στην (7.16), προκύπτει ο τελικός τύπος για την πιθανότητα σφάλματος κατά τη μετάδοση ενός πακέτου MAC:

$$\begin{aligned} p &= 1 - (1 - p_{wl}^{tr}) (1 - p_{wired}) \\ &= 1 - (1 - (1 - (1 - E(BER))^{n_{seg}})) \left(1 - \rho^K \frac{1 - \rho}{1 - \rho^{K-1}}\right) \Rightarrow \\ p &= 1 - (1 - E(BER))^{n_{seg}} \left(1 - \rho^K \frac{1 - \rho}{1 - \rho^{K-1}}\right) \end{aligned} \quad (7.19)$$

Η πιθανότητα p_{wl}^{tr} θα μπορούσε να περιλαμβάνει και την πιθανότητα λάθους για τη γνωστοποίηση, ωστόσο συνήθως στη βιβλιογραφία αυτή η πιθανότητα θεωρείται αμελητέα (αντίστοιχα στα επόμενα βήματα, όπου χρειαστεί, θα θεωρήσουμε ότι $N_{ACK} \approx 1$). Ακόμα, θεωρείται ότι $\rho = 0$, αφού το δίκτυο ενδιαφέροντος σε αυτήν την περίπτωση είναι το ασύρματο. Επομένως προκύπτει μία απλοποίηση της σχέσης (7.16) στην κάτωθι σχέση:

$$p = 1 - (1 - E(BER))^{n_{seg}} \quad (7.20)$$

Αναφέρεται ακόμα ότι θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι υφίσταται και στο ασύρματο κομμάτι προσωρινή μνήμη, με αντίστοιχη πιθανότητα απόρριψης πακέτων p_{wl}^{buf} , οπότε η ολική πιθανότητα σφάλματος κατά τη μετάδοση ενός πακέτου θα ήταν τότε:

$$p = 1 - \left(1 - p_{wl}^{buf}\right) (1 - p_{wl}^{tr}) (1 - p_{wired}). \quad (7.21)$$

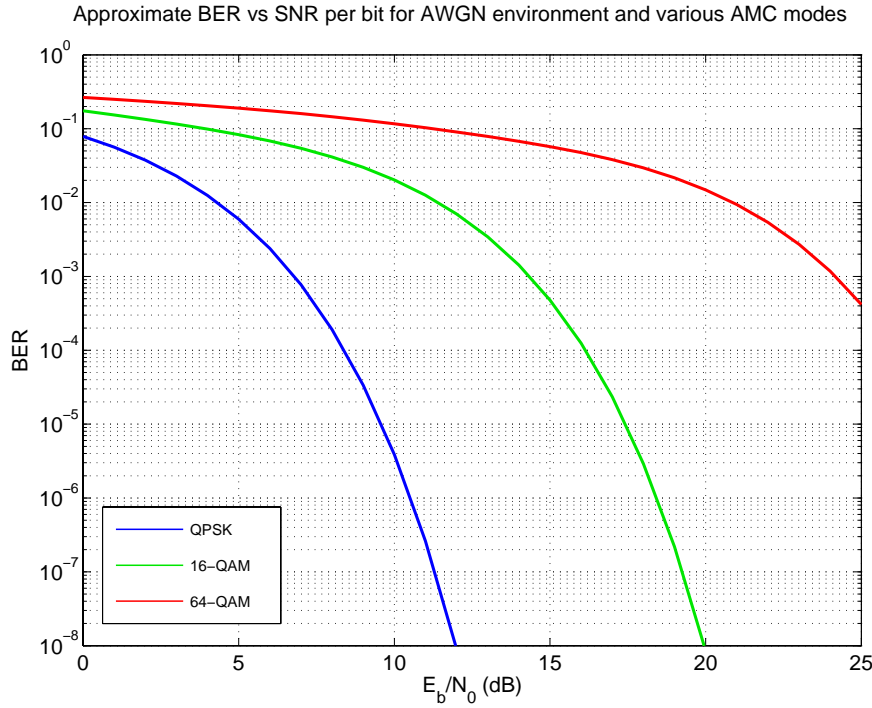
9. Υπολογίζεται το επίπεδο BER ανά σχήμα μετάδοσης από βιβλιογραφικές καμπύλες BER-SNR (βλ. ενδεικτικά το σχήμα 7.6), ή από τις αντίστοιχες αναλυτικές εκφράσεις [20, 150, 151, 152]. Για τον υπολογισμό μέσω αναλυτικών εκφράσεων, θεωρώντας ότι:

$$Q(z) = \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{z}{\sqrt{2}}\right)\right] = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{z}{\sqrt{2}}\right)\right] \quad (7.22)$$

και ότι:

$$\frac{E_b}{N_o} = \gamma \frac{W}{R}, \quad (7.23)$$

μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι παρακάτω αναλυτικές σχέσεις για τη διασύνδεση BER



Σχήμα 7.6: Προσεγγιστικές καμπύλη αντιστοίχισης BER με SNR

με το SNR, ανάλογα με την εκάστοτε διαμόρφωση:

$$E(BER_{BPSK}) = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\sqrt{\bar{\gamma}} \frac{W}{R_i} \right) \right], \text{ για } BPSK \quad (7.24\alpha')$$

$$E(BER_{QPSK}) = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\sqrt{\bar{\gamma}} \frac{W}{R_i} \right) \right], \text{ για } QSPK \quad (7.24\beta')$$

$$E(BER_{M-QAM}) = \frac{1 - \left[1 - \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{1.5}{M-1}} \bar{\gamma} \frac{W}{R_i} \right) \right]^2}{\log_2 M}, \text{ για } M - QAM \quad (7.24\gamma')$$

10. Τελευταίο βήμα είναι η εκτίμηση της ποιότητας της ζεύξης για το υπό εξέταση τερματικό, η οποία χρειάζεται τόσο για τον υπολογισμό του συνόλου των πιθανοτήτων $\{k_{j,i}\}_{j=1,\dots,N_s}$, όσο και για τον υπολογισμό του επιπέδου BER. Για κανάλι επίπεδων διαλείψεων (flat fading channel), η ποιότητα της ζεύξης είναι δυνατόν να αναπαρασταθεί από μία παράμετρο, το σηματοπαρεμβολικό λόγο (SNR) γ . Για να περιγραφεί στατιστικά αυτό το μέγεθος υιοθετείται το γενικό Nakagami- m μοντέλο. Επομένως το SNR σε κάθε πλαίσιο είναι μία μεταβλητή με συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας Γάμμα, η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$p_\gamma(\gamma) = \frac{m^m \gamma^{m-1}}{\bar{\gamma}^m \Gamma(m)} \exp\left(-\frac{m\gamma}{\bar{\gamma}}\right), \quad (7.25)$$

όπου $\bar{\gamma} = E\{\gamma\}$ το μέσο επίπεδο SNR, $\Gamma(m) = \int_0^\infty t^{m-1} e^{-t} dt$ και m είναι η παράμετρος διαλείψεων στο μοντέλο Nakagami ($m \geq 1/2$) [147, 148, 149].

11. Πλέον έχουν υπολογιστεί όλα τα απαραίτητα μεγέθη, ώστε να είναι δυνατή η διατύπωση της σχέσης B-TCP συναρτήσει γνωστών υπολογίσιμων μεγεθών. Τα άγνωστα μεγέθη RTT και p_{TCP} υπολογίζονται μέσω των παρακάτω αντικαταστάσεων:

- RTT : Για το $E(RTT)$, από τις (7.8), (7.13) και (7.14) ισχύει ότι:

$$E(RTT) = \frac{1}{\alpha q_i \sum_{j=1}^{j=N_s} (R_j k_{j,i})} + \frac{MSS}{C} \quad (7.26)$$

Για το $\sigma(RTT)$, από τις (7.9), (7.13) και (7.15) ισχύει ότι:

$$\sigma(RTT) = \frac{n_{seg}}{\alpha q_i \sum_{j=1}^{j=N_s} (R_j k_{j,i})} \frac{\sqrt{1 + p_{wl}^{tr}}}{1 - p_{wl}^{tr}} \quad (7.27)$$

- p_{TCP} : Βάσει των σχέσεων (7.26) και (7.27), υπολογίζεται η (7.3):

$$p_{TCP_{t_0}} = Q \left[\frac{T_0 - E(RTT)}{\sigma(RTT)} \right] \Rightarrow$$

$$p_{TCP_{t_0}} = Q \left[\frac{(T_0 - \frac{MSS}{C}) \left[\alpha q_i \sum_{j=1}^{j=N_s} (R_j k_{j,i}) (1 - p_{wl}^{tr}) \right] - n_{seg}}{n_{seg} \sqrt{1 + p_{wl}^{tr}}} \right] \quad (7.28)$$

Εισάγοντας τις (7.26) και (7.28) στην (7.1), εξάγεται η αρχικά ζητούμενη μαθηματική διατύπωση που περιγράφει τη χρήσιμη ρυθμοαπόδοση στο στρώμα μεταφοράς, συναρτήσει γνωστών μεγεθών που προκύπτουν ή ορίζονται από τα κατώτερα στρώματα της στοίβας του OSI.

Η σχέση (7.1), με την ενσωμάτωση των (7.26) και (7.28), εμπεριέχει πλέον όλη την αλληλεξάρτηση μεταξύ παραμέτρων και φυσικών μεγεθών ανάμεσα στο φυσικό στρώμα, στο στρώμα ζεύξης και στο στρώμα μεταφοράς. Επομένως, με την ενσωμάτωση των κατάλληλων διεπαφών μεταξύ των τριών αυτών στρωμάτων, είναι δυνατόν το στρώμα μεταφοράς να αποκτήσει άμεση γνώση της συνολικής κατάστασης της ζεύξης και να λειτουργήσει πλέον όχι βάσει εκτιμήσεων, αλλά βάσει γνώσης των πραγματικών συνθηκών. Με αυτόν τον τρόπο θα υπερκεραστούν διάφορα θέματα που ταλανίζουν τη λειτουργία του πρωτοκόλλου TCP κατά την εφαρμογή του σε ασύρματα δίκτυα, όπως για παράδειγμα η λανθασμένη εκτίμηση για συμφόρηση, οι επανειλημμένες εισαγωγές στη φάση αργής εκκίνησης (slow start) που υποβαθμίζουν την ποιότητα υπηρεσίας κ.τ.λ. Ταυτόχρονα, είναι δυνατόν να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα που προκαλούνται από την κινητικότητα των χρηστών και αφορούν σε διαπομπές. Μάλιστα, εξαιτίας της διασυστημικής φύσης της προτεινόμενης τεχνικής, με την ενσωμάτωση στις πληροφορίες δικτύου ορισμένων απλών μετρικών (π.χ. εκτιμώμενος μέσος χρόνος

διάδοσης μετ' επιστροφής, τιμή παραμέτρου α), είναι εφικτή η εξεύρεση του βέλτιστου δικτύου εξυπηρέτησης (από άποψη παρεχόμενης ποιότητας υπηρεσίας) για σενάρια κατακόρυφης διαπομπής σε ετερογενή περιβάλλοντα.

7.5 Σύνοψη

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάστηκαν τα θεωρητικά αποτελέσματα της ερευνητικής εργασίας που έχει συντελεστεί όσον αφορά στη διαστρωματική (cross layer) βελτιστοποίηση της επίδοσης ενός ασυρμάτου τηλεπικοινωνιακού δικτύου. Λαμβάνοντας υπόψη τα στρώματα 1 (φυσικό - PHY), 2 (ζεύξης - MAC) και 4 (μεταφοράς - πρωτόκολλο TCP) της στοίβας του OSI, περιγράφηκαν μέσω αναλυτικών σχέσεων οι κύριες παράμετροι μέσω των οποίων αυτά αλληλεπιδρούν. Η διαστρωματική τεχνική που αναπτύχθηκε είναι και διασυστημική, καθώς μέσω μίας και μόνο παραμέτρου (της α) ενσωματώνει τη διαφοροποίηση της λειτουργικότητας μεταξύ διαφορετικών τεχνολογιών MAC.

□

Κεφάλαιο 8

Συμπεράσματα και Προοπτικές

8.1 Σύνοψη της Διατριβής

Στόχος της παρούσας διδακτορικής διατριβής υπήρξε η μελέτη μηχανισμών για τη βέλτιστη διαχείριση πόρων σε σύγχρονα δίκτυα κινητών επικοινωνιών πέραν της 3ης γενιάς. Η ολοκλήρωση της ερευνητικής αυτής προσπάθειας, όπως παρουσιάστηκε στα κύρια κεφάλαια της διατριβής (κεφάλαια 4 έως 7), στηρίχθηκε σε μία αρθρωτή κλιμακούμενη δομή τεσσάρων αξόνων:

1. Στην προσέγγιση των εν λόγω δικτύων μέσω προσομοιώσεων, με σκοπό την εις βάθος κατανόηση των χαρακτηριστικών τους και την εξαγωγή συμπερασμάτων ως προς τη λειτουργία τους, τα οποία αποτέλεσαν τη βάση για τη συνέχιση της εργασίας.
2. Στη μελέτη δικτύων απλωμένου φάσματος μονής φέρουσας, από την οποία προέκυψε μία οικογένεια αλγορίθμων δρομολόγησης δεδομένων, με έμφαση στο πρόβλημα της ταυτόχρονης εξυπηρέτησης πολλαπλών υπηρεσιών πραγματικού χρόνου στους χρήστες της άνω ζεύξης ενός δικτύου HSPA.
3. Στη μελέτη δικτύων πολλαπλών φερόντων, στα οποία απαιτείται βελτιστοποίηση της διαχείρισης των υπάρχοντων ραδιοπόρων τόσο στο πεδίο του χρόνου, όσο και στο πεδίο της συχνότητας. Από αυτήν την έρευνα προέκυψαν μηχανισμοί διαχείρισης ραδιοπόρων που υποστηρίζουν προφίλ δίκαιης απόδοσης πόρων, συνυπάρχουσες ετερογενείς τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες καθώς και διαφορετικά σχήματα μετάδοσης και οι οποίοι μπορούν να εφαρμοστούν σε δίκτυα LTE και WiMAX.
4. Στη θεωρητική ανάλυση με στόχο τη συνολική διαστρωματική και διασυστημική βελτιστοποίηση των ασυρμάτων δικτύων, με έμφαση στο φυσικό στρώμα, στο στρώμα ζεύξης και στο στρώμα μεταφοράς. Αποτέλεσμα αυτής της ανάλυσης υπήρξε η δημιουργία ενός αναλυτικού μοντέλου που εκφράζει τις παραμετρικές σχέσεις που διασυνδέουν τη λειτουργία και επίδοση των επί μέρους στρωμάτων της στοίβας.

8.2 Ευρήματα και Συμβολή της Διατριβής

Παρουσιάζουμε στη συνέχεια συνοπτικά τα κυριότερα ευρήματα που προέκυψαν στην πορεία της διδακτορικής διατριβής, τα οποία συνέβαλαν στην εξέλιξη του ερευνητικού χώρου. Εκτενής συζήτηση για τα επιμέρους συμπεράσματα καθώς και η πλήρης μεθοδολογία εξαγωγής τους μπορεί να βρεθεί στα τέσσερα κεντρικά κεφάλαια της διατριβής (κεφάλαια 4 έως 7). Παράλληλα για κάθε ομάδα ευρημάτων παρατίθενται και οι αντίστοιχες ερευνητικές δημοσιεύσεις που έχουν προκύψει.

Εκτίμηση Επίδοσης Ασυρμάτων Τηλεπικοινωνιακών Συστημάτων

Στο 4^ο κεφάλαιο εξετάστηκαν αναλυτικά μέσω προσομοιώσεων βασικές λειτουργίες τυπικών σύγχρονων δικτύων ασυρμάτων τηλεπικοινωνιών. Σκοπός ήταν η απόκτηση βαθύτερης και τεκμηριωμένης γνώσης όσον αφορά στις υπηρεσίες που καλείται το δίκτυο να εξυπηρετήσει και στις δομικές μονάδες που ελέγχουν την επίδοσή του. Αυτή η προσέγγιση κρίθηκε απαραίτητη για να επιτευχθεί μία ορθή εκτίμηση του τρόπου λειτουργίας των δικτύων ασυρμάτων τηλεπικοινωνιών, ώστε να προταθούν στα επόμενα κεφάλαια ουσιαστικές μέθοδοι βελτίωσης της χρήσης των διαθέσιμων ραδιοπόρων. Το σύστημα που μελετήθηκε ως αντιπροσωπευτικός εκπρόσωπος της νέας γενιάς δικτύων είναι το HSPA.

Η συμβολή αυτού του κεφαλαίου της διατριβής στην επιστημονική κοινότητα συνοψίζεται στα κάτωθι:

- Υλοποιήθηκε ένα πλήρες μοντέλο προσομοίωσης για δίκτυα HSPA.
- Εκτιμήθηκε εκτενώς μέσω προσομοιώσεων η επίδοση ενός μονοκύψελου δικτύου HSPA, με έμφαση στην κάτω ζεύξη. Συγκεκριμένα μελετήθηκε το δίκτυο αυτό βήμα προς βήμα, μέσω της σταδιακής ενσωμάτωσης των υφιστάμενων μηχανισμών ελέγχου του.
- Εκτιμήθηκε εκτενώς μέσω προσομοιώσεων η επίδοση ενός μονοκύψελου δικτύου HSPA, με έμφαση στην άνω ζεύξη.
- Και στις δύο παραπάνω περιπτώσεις παρήχθησαν αποτελέσματα, τόσο σε επίπεδο επίδοσης συστήματος, όσο και σε επίπεδο εντοπισμού προβληματικών περιοχών και γενικών θεμάτων που χρήζουν περαιτέρω μελέτης και ανάλυσης στον τομέα των ασυρμάτων δικτύων. Αυτά τα αποτελέσματα δημοσιοποιήθηκαν στην επιστημονική κοινότητα και αποτέλεσαν τη βάση για τη συνέχιση της διδακτορικής διατριβής.

Τμήματα της ερευνητικής αυτής προσπάθειας συμπεριλαμβάνονται στις παρακάτω δημοσιευμένες εργασίες:

- D. Komnakos, D. Vouyioukas, I. Maglogiannis, and P. Constantinou, “Performance evaluation of an Enhanced Uplink 3.5G system for mobile healthcare applications”, *International Journal of Telemedicine and Applications*, vol. 2008, Article ID 417870, 11 pages, 2008, doi:10.1155/2008/417870.

- D. Vouyioukas, D. Komnakos, I. Maglogiannis, and P. Constantinou, “Emergency M-health Services through High-Speed 3G systems: Simulation and Performance Evaluation”, Simulation: Transactions of the Society for Modelling and Simulation International, vol. 83, issue 4, pp. 329-345, SAGE Publications, April 2007.
- D. Komnakos, D. Vouyioukas, I. Maglogiannis, and P. Constantinou, “Feasibility Study of a Joint E-health Mobile High-Speed and Wireless Sensor System”, 1st PETRA Conference, July 2008, Athens, Greece.

Διαχείριση Ραδιοπόρων σε Δίκτυα Φασματικής Εξάπλωσης WCDMA

Στο 5^ο κεφάλαιο μελετήθηκε το πρόβλημα της ταυτόχρονης εξυπηρέτησης πολλαπλών υπηρεσιών πραγματικού χρόνου στους χρήστες της άνω ζεύξης, καθώς και η πολυπλεξία τυπικών υπηρεσιών σε δίκτυο HSPA. Παρ’ όλο που έχουν προταθεί αρκετοί αλγόριθμοι δρομολόγησης δεδομένων για τις ασύρματες υπηρεσίες δεδομένων υψηλής ταχύτητας τόσο για την κάτω, όσο και για την άνω ζεύξη, εν τούτοις η αλληλεπίδραση των προτεραιοτήτων ανάμεσα στα δεδομένα των υπηρεσιών του κάθε χρήστη και στα πακέτα που βρίσκονται σε αναμονή στην προσωρινή μνήμη δεν είχε μελετηθεί επαρκώς στη βιβλιογραφία. Προτάθηκε επομένως μία νέα οικογένεια αλγορίθμων δρομολόγησης, η οποία λαμβάνει υπόψη την ευαισθησία ως προς την καθυστέρηση της κάθε ροής δεδομένων, καθώς και την πραγματική καθυστέρηση των υπό αναμονή δεδομένων στην ουρά των τερματικών. Η εκτίμηση της επίδοσης των προτεινόμενων αλγορίθμων έγινε μέσω προσομοιωτικών σεναρίων για διάφορους τύπους υπηρεσιών πραγματικού χρόνου, με κύριο στόχο τη βελτίωση του μέσου και μέγιστου χρόνου καθυστέρησης στη μετάδοση των πακέτων.

Η συμβολή αυτού του κεφαλαίου της διατριβής στην επιστημονική κοινότητα συνοψίζεται στα κάτωθι:

- Διαπιστώθηκε η ανεπάρκεια των υπαρχόντων αλγορίθμων δρομολόγησης όσον αφορά στην ευχέρεια χρήσης δεδομένων σχετικών με την ευαισθησία ως προς την καθυστέρηση κάθε ροής δεδομένων, καθώς και στον επαρκή συνυπολογισμό της πραγματικής καθυστέρησης στην οποία υπόκεινται τα προσωρινά αποθηκευμένα πακέτα στις ουρές των τερματικών.
- Σχεδιάστηκε και μελετήθηκε ένας νέος αλγόριθμος δρομολόγησης δεδομένων, ο οποίος λαμβάνει υπόψη την ευαισθησία της κάθε υπηρεσίας ως προς την καθυστέρηση μετάδοσης (Dynamic Priority Scheduler – DPS).
- Προτάθηκε έπειτα ένας αλγόριθμος δρομολόγησης δεδομένων, ο οποίος λαμβάνει υπόψη όχι μόνο την ευαισθησία της υπηρεσίας με την υψηλότερη προτεραιότητα κατά τη λήψη της απόφασης δρομολόγησης, αλλά τη συνολική κατάσταση των υπηρεσιών πραγματικού χρόνου του κάθε τερματικού (Mean logical channel priority Dynamic Priority Scheduler – MDPS).
- Η οικογένεια των νέων αλγορίθμων κλείνει με τον Delay Aware Channel Prioritization - based packet Scheduler – DACP-S, ο οποίος έχει ως στόχο (i) την ελαχιστοποίηση της

καθυστερήσης στην οποία υπόκεινται τα πακέτα δεδομένων έως ότου δρομολογηθούν και (ii) τη δυνατότητα διαφοροποίησης στην παρεχόμενη ποιότητα υπηρεσίας για υπηρεσίες πραγματικού χρόνου.

- Η προτεινόμενη οικογένεια αλγορίθμων αναπτύχθηκε με ιδιαίτερη προσοχή, ώστε να είναι άμεσα εφαρμόσιμη σε πραγματικά ασύρματα δίκτυα HSPA, με ελάχιστες τροποποιήσεις επί των υπάρχοντων προτύπων της 3GPP.

Τμήματα της ερευνητικής αυτής προσπάθειας συμπεριλαμβάνονται στις παρακάτω δημοσιευμένες εργασίες:

- D. Komnakos, D. Skoutas, D. Vouyioukas, and A. Rouskas, “A Delay Optimal Scheduling Policy for Real Time Services in WCDMA Systems”, *Wireless Personal Communications*, Springer, DOI: 10.1007/s11277-010-0031-7.
- D. Komnakos, D. Skoutas, D. Vouyioukas, and A. Rouskas, “Scheduling Optimization for Real Time Services in WCDMA”, *Future Network & Mobile Summit 2010*, June 2010, Florence, Italy.
- D. Skoutas, D. Komnakos, D. Vouyioukas and A. Rouskas, “Enhanced Dedicated Channel Scheduling Optimization in WCDMA”, *European Wireless Conference 2008*, June 2008, Prague, Czech Republic.

Διαχείριση Ραδιοπόρων σε Δίκτυα Ορθογωνικής Πρόσβασης Πολλαπλών Φερόντων OFDMA

Στο 6^ο κεφάλαιο επεκτάθηκε η προηγούμενη προσέγγιση στη συχνοτική διάσταση και καταγράφηκε η ερευνητική εργασία που έχει συντελεστεί όσον αφορά στην ανάπτυξη ενός αλγορίθμου δρομολόγησης κίνησης με εξειδίκευση σε OFDMA δίκτυα, όπως το LTE και το WiMAX. Συγκεκριμένα, ελήφθησαν υπόψη παράγοντες όπως η διαφορικότητα συχνότητας (frequency diversity), η διαφορικότητα χρόνου (time diversity), η δικαιοσύνη μεταξύ των χρηστών κ.τ.λ. Το περιβάλλον για το οποίο αναπτύχθηκε ο δρομολογητής είναι ετερογενές και αποτελείται τόσο από υπηρεσίες πραγματικού, όσο και μη πραγματικού χρόνου. Το κεφάλαιο κατέληξε με την εκτίμηση της επίδοσης του προτεινόμενου αλγορίθμου μέσω προσομοιωτικών μεθόδων.

Η συμβολή αυτού του κεφαλαίου της διατριβής στην επιστημονική κοινότητα συνοψίζεται στα κάτωθι:

- Το υπό μελέτη ζήτημα της διαχείρισης των ραδιοπόρων του δικτύου διατυπώθηκε ως μαθηματικό πρόβλημα βελτιστοποίησης, όπου η αντικειμενική συνάρτηση εκφράζει το μετρικό επίδοσης από την πλευρά του συστήματος και οι περιοριστικές εξισώσεις εκφράζουν τους δείκτες ικανοποίησης από την πλευρά των χρηστών.
- Αναπτύχθηκε ένας ιδεατός δρομολογητής πακέτων για δίκτυα OFDMA, ο οποίος στοχεύει στην ταυτόχρονη μεγιστοποίηση της ρυθμοαπόδοσης σε επίπεδο κυψέλης και στη δίκαιη απόδοση QoS σε επίπεδο χρηστών.

- Σχεδιάστηκε εξ αρχής και εκτιμήθηκε ως προς την επίδοσή του ένας υπολογιστικά αποδοτικός δυναμικός αλγόριθμος δρομολόγησης πακέτων για δίκτυα OFDMA, ο οποίος υποστηρίζει την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλαπλών υπηρεσιών σταθερής ροής μετάδοσης και ελαστικής φύσης.

Τμήματα της ερευνητικής αυτής προσπάθειας συμπεριλαμβάνονται στις παρακάτω δημοσιευμένες εργασίες:

- A. G. Gotsis, D. Komnakos, and Ph. Constantinou, “Dynamic Subchannel and Slot Allocation for OFDMA Networks Supporting Mixed Traffic: Upper Bound and a Heuristic Algorithm”, *IEEE Communications Letters*, vol. 13, no. 8, pp. 576-578, August 2009.
- A. G. Gotsis, D. Komnakos, and Ph. Constantinou, “Linear Modeling and Performance Evaluation of Resource Allocation and User Scheduling for LTE-like OFDMA networks”, 6th IEEE International Symposium on Wireless Communication Systems, ISWCS’09, pp. 196-200, 2009-Sept 10, 2009.
- A. G. Gotsis, D. Komnakos, and Ph. Constantinou, “Joint Resource Allocation and User Scheduling for Single-Cell OFDMA Networks Supporting Multiple Data Traffic Classes”, TD(09) 828 - COST2100 8th MCM, Valencia, Spain, May 2009.

Διαστρωματική και Διασυστημική Βελτιστοποίηση Επίδοσης Δικτύων

Στο 7^ο Κεφάλαιο παρουσιάστηκαν τα θεωρητικά αποτελέσματα της ερευνητικής εργασίας που έχει συντελεστεί όσον αφορά στην διαστρωματική βελτιστοποίηση της επίδοσης ενός ασυρμάτου τηλεπικοινωνιακού δικτύου. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στα στρώματα 1 (PHY), 2 (MAC υπόστρωμα) και 4 (μεταφοράς - πρωτόκολλο TCP) της στοίβας του OSI. Περιγράφηκε μέσω αναλυτικών μεθόδων η αλληλεπίδραση των ανωτέρω στρωμάτων, και ανεδείχθησαν οι κρίσιμες παράμετροι που συντελούν στην τελική επίδοση ενός ασυρμάτου δικτύου. Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική χαρακτηρίζεται επίσης ως διασυστημική, καθώς μέσω μίας και μόνο παραμέτρου επιτυγχάνεται η ένταξη της λειτουργίας του MAC υποστρώματος του εκάστοτε δικτύου στο σύστημα των σχέσεων του αναλυτικού μοντέλου.

Η συμβολή αυτού του κεφαλαίου της διατριβής στην επιστημονική κοινότητα συνοψίζεται στα κάτωθι:

- Αναλύθηκε η αλληλεπίδραση μεταξύ του PHY, του MAC και του στρώματος μεταφοράς της στοίβας του OSI και προσδιορίστηκαν οι παράμετροι που την καθορίζουν, με έμφαση στα ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών.
- Αναπτύχθηκε ένα αναλυτικό μοντέλο διαστρωματικής αρχιτεκτονικής, το οποίο επιτρέπει την αναβάθμιση της επίδοσης των ασυρμάτων δικτύων, μέσω της κατακόρυφης ρύθμισης και της από κοινού βελτιστοποίησης των εν λόγω στρωμάτων.

- Η διαστρωματική τεχνική που αναπτύχθηκε είναι και διασυστημική, καθώς μέσω μίας και μόνο παραμέτρου ενσωματώνει τη διαφοροποίηση της λειτουργικότητας μεταξύ διαφορετικών τεχνολογιών MAC.

Η ερευνητική αυτή προσπάθεια προς το παρόν δεν έχει δημοσιευθεί.

8.3 Προτάσεις για Συνέχιση της Έρευνας

Η ερευνητική προσπάθεια της παρούσας διατριβής στα πλαίσια της βελτιστοποίησης των ασυρμάτων τηλεπικοινωνιακών δικτύων ήταν εκτενής και διεξοδική. Αποτέλεσμα ήταν να προταθούν νέοι μηχανισμοί διαχείρισης πόρων για σύγχρονα δίκτυα επικοινωνιών πέραν της 3^{ης} γενιάς. Παρόλα αυτά, στη συγκεκριμένη θεματική ενότητα παραμένουν ανοιχτά πεδία έρευνας, τα οποία προκύπτουν είτε ως φυσική συνέχεια αυτής της διατριβής, είτε ως απόρροια γενικότερων σχετικών ζητημάτων που ανήκουν σε αυτόν τον τομέα. Συγκεκριμένα, αντικείμενο μελλοντικής ερευνητικής δραστηριότητας μπορούν να αποτελέσουν τα παρακάτω:

Θέματα Εμπλουτισμού των Προβλημάτων της Διδακτορικής Διατριβής

- Στους προτεινόμενους μηχανισμούς βελτιστοποίησης έχει γίνει η υπόθεση ότι η ποιότητα των ραδιοδιαύλων μεταξύ των σημείων ραδιοπρόσβασης και των τερματικών είναι άμεσα γνωστή με ακρίβεια. Αυτή η υπόθεση, αν και συνήθης στη βιβλιογραφία, εν τούτοις δεν αντικατοπτρίζει τις πραγματικές συνθήκες σε ένα δίκτυο, στο οποίο η πληροφορία αυτή μεταδίδεται πολλές φορές κβαντισμένη σε κάποιες στάθμες, ενώ απαιτείται και κάποιο (μικρό, ωστόσο μη αμελητέο) χρονικό διάστημα για τη μετάδοσή της. Επομένως παρουσιάζει ενδιαφέρον η εκ νέου μελέτη των προτεινόμενων αλγορίθμων, υπό το πρίσμα της μη τέλει γνώσης των συνθηκών του ραδιοδιαύλου.
- Η οικογένεια αλγορίθμων δρομολόγησης που προτάθηκε στο 5^ο κεφάλαιο αφορά στο πρόβλημα της ταυτόχρονης εξυπηρέτησης πολλαπλών υπηρεσιών πραγματικού χρόνου στους χρήστες της άνω ζεύξης ενός δικτύου HSPA. Προτείνεται η μελέτη και ρύθμιση των αλγορίθμων αυτών για τη βελτιστοποίηση της επίδοσής τους υπό την ταυτόχρονη παρουσία υπηρεσιών πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου.
- Ο αλγόριθμος δρομολόγησης που αναπτύχθηκε στο 6^ο κεφάλαιο στηρίζεται σε κάποιες λειτουργικές παραμέτρους, οι οποίες έχουν σημαντική επίδραση στην τελική επίδοσή του. Είναι σημαντικό να εκτελεστεί μία διεξοδική μελέτη για την ρύθμισή τους και την εύρεση του βέλτιστου σημείου λειτουργίας του αλγορίθμου, σε σχέση με τη σύσταση του φορτίου του δικτύου, τον τύπο των χρηστών, τις κλάσεις των εξυπηρετούμενων υπηρεσιών κ.τ.λ.
- Ο αλγόριθμος δρομολόγησης που περιγράφηκε στο 6^ο κεφάλαιο βασίζεται στο σχήμα ομοιόμορφης κατανομής της ισχύος. Το επόμενο λογικό βήμα στην ανάπτυξή του είναι η υιοθέτηση του προφίλ δυναμικής κατανομής ισχύος για τα (υπο)φέροντα.

- Η διαστρωματική και διασυστημική αρχιτεκτονική που αναπτύχθηκε στο 7^ο κεφάλαιο είναι μία μέθοδος που βελτιστοποιεί τη ρυθμοαπόδοση (και επομένως την ποιότητα υπηρεσίας που αντιλαμβάνεται ο τελικός χρήστης) στο στρώμα μεταφοράς. Είναι μία πολλά υποσχόμενη προσέγγιση, η οποία βρίσκεται σε ένα ώριμο στάδιο ανάπτυξης, επιβάλλεται ωστόσο να επαληθευθεί μέσω της σύγκρισης με τα αποτελέσματα κατάλληλων σεναρίων προσομοιώσεων. Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί ότι η διαδικασία αυτή είναι εξαιρετικά περίπλοκη και χρονοβόρα, καθώς προϋποθέτει την ακριβή υλοποίηση των αντίστοιχων προσομοιωτικών μοντέλων, τόσο όσον αφορά στα εξεταζόμενα ασύρματα δίκτυα, όσο και στην ίδια την θεωρητική ανάλυση που διεξήχθη.

Μακροπρόθεσμα Ανοικτά Ερευνητικά Θέματα

- Η εκτίμηση επίδοσης των προτεινόμενων μηχανισμών στην παρούσα διατριβή (αλλά και γενικά στη βιβλιογραφία) επιτελείται συνήθως μέσω προσομοιώσεων ή/και συγκρίσεων με αναλυτικά μοντέλα. Αν και αδιαμφισβήτητα τα αποτελέσματα αυτών των μεθόδων αποτελούν σημαντικές ενδείξεις για την ορθότητα και αποτελεσματικότητα της εκάστοτε τεχνικής, παρόλα αυτά εισάγουν αποκλίσεις σε σχέση με τη λειτουργία σε πραγματικές συνθήκες. Επομένως θα ήταν ιδιαίτερα χρήσιμη η υλοποίηση μίας πλατφόρμας υλικού (testbed), ή η συγχρότηση ενός ραδιοσυστήματος οριζόμενου από λογισμικό (Software Defined Radio), με σκοπό την εξέταση των προτεινόμενων και των μελλοντικών αλγορίθμων σε συστήματα που αποτυπώνουν όσο το δυνατόν πιο πιστά τις πραγματικές συνθήκες που επικρατούν σε ένα ασύρματο δίκτυο τηλεπικοινωνιών.
- Τελευταία κερδίζει όλο και μεγαλύτερο έδαφος η έρευνα πάνω σε τεχνικές συντονισμένης μετάδοσης από πολλαπλά σημεία, με στόχο την βελτίωση της ποιότητας της παρεχόμενης υπηρεσίας κυρίως σε χρήστες που βρίσκονται στα όρια των κυψελών [158, 159]. Δεδομένου ότι σε αυτές τις τεχνικές περιλαμβάνονται συντονισμένες μέθοδοι για τη λήψη των αποφάσεων δρομολόγησης των δεδομένων μεταξύ γειτονικών κυψελών, αναγκαία κρίνεται η από κοινού εξέταση αυτών των τεχνικών με τα σχήματα δρομολόγησης στο υπόστρωμα MAC.
- Όσον αφορά στη διαστρωματική αρχιτεκτονική, αν και είναι γεγονός ότι αποτελεί μία άμεση και απαραίτητη λύση για την άμεση βελτίωση της επίδοσης των ασυρμάτων δικτύων, εν τούτοις διακρίνεται στην επιστημονική κοινότητα μία αυξανόμενη τάση για συνολική απόρριψη της επικρατούσας αρχιτεκτονικής [160, 161, 162]. Ανάμεσα στις εναλλακτικές αρχιτεκτονικές διακρίνονται οι προτάσεις για (i) μείωση του αριθμού των στρωμάτων, (ii) χαλάρωση των ορίων μεταξύ των στρωμάτων, (iii) δομή απαλλαγμένη από τα στρώματα (clean slate layer-less approach). Ειδικά αυτή η τελευταία περίπτωση αποτελεί ένα εξαιρετικά ενδιαφέρον ερευνητικό πεδίο, καθώς αυτή η ζύμωση θα καταλήξει μεσομακροπρόθεσμα σε μία από τις μεγαλύτερες επαναστάσεις τις τελευταίες δεκαετίες στη δομή των δικτύων επικοινωνιών.

□

Βιβλιογραφία

- [1] J. De Vriendt, P. Laine, C. Lerouge, and X. Xu, “Mobile Network Evolution: a Revolution on the Move,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 40, no. 4, pp. 104–111, Apr. 2002.
- [2] “GSM World: The Website of the GSM Association.” [Online]. Available: <http://www.gsmworld.com>
- [3] H. Holma and A. Toskala, *WCDMA for UMTS*, 2nd ed. John Wiley & Sons, 2002.
- [4] H. Holma and A. Toskala, Eds., *HSDPA/HSUPA for UMTS: High Speed Radio Access for Mobile Communications*. John Wiley & Sons, 2006.
- [5] “UMTS Forum.” [Online]. Available: <http://www.umts-forum.org>
- [6] *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2 (Release 8)*, 3GPP Std. TR 36.300, v.8.11.0, Dec. 2009. [Online]. Available: <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/36300.htm>
- [7] “TeliaSonera First Global 4G Network.” [Online]. Available: <http://www.teliasonera.com/4g/index.htm>
- [8] J. Andrews, A. Ghosh, and R. Muhamed, *Fundamentals of WiMAX: Understanding Broadband Wireless Networking*, ser. Prentice Hall Communications Engineering and Emerging Technologies Series. Prentice Hall, 2007.
- [9] *IEEE 802.16e Standard for Local and metropolitan area networks. Part 16: Air Interface For Fixed Broadband Wireless Access Systems. Amendment 2: Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands*, IEEE Std., 2005.
- [10] S. Ahmadi, “An Overview of Next-Generation Mobile WiMAX Technology,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 47, no. 6, pp. 84–98, June 2009.
- [11] D. Astely, E. Dahlman, P. Frenger, R. Ludwig, M. Meyer, S. Parkvall, P. Skillermark, and N. Wiberg, “A Future Radio-access Framework,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 24, no. 3, pp. 693–706, Mar. 2006.

- [12] “Defining 4G: Understanding the ITU Process for the Next Generation of Wireless Technology,” White Paper, June 2007. [Online]. Available: http://3gamericas.com/English/Technology_Center/WhitePapers/
- [13] W. Bolton, Y. Xiao, and M. Guizani, “IEEE 802.20: Mobile Broadband Wireless Access,” *IEEE Wireless Communications Magazine*, vol. 14, no. 1, pp. 84–95, Feb. 2007.
- [14] D. Tse and P. Viswanath, *Fundamentals of Wireless Communication*. Cambridge University Press, 2004.
- [15] J. Cioffi, “A Multicarrier Primer,” Amati Communications Corporation and Stanford University, Tech. Rep., 1991.
- [16] Y. Li and G. Stüber, Eds., *Orthogonal Frequency Division Multiplexing for Wireless Communications*. Springer, 2006.
- [17] H. Arslan, *Adaptation Techniques and Enabling Parameter Estimation Algorithms for Wireless Communications Systems*. CRC Press, 2005, ch. 28, in *Signal Processing for Mobile Communications Handbook*.
- [18] S. Nanda, K. Balachandran, and S. Kumar, “Adaptation Techniques in Wireless Packet Data Services,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 38, no. 1, pp. 54–64, Jan. 2000.
- [19] L. Hanzo, C. Wong, and M. Yee, *Adaptive Wireless Transceivers: Turbo-Coded, Turbo-Equalized and Space-Time Coded TDMA, CDMA and OFDM Systems*. John Wiley & Sons, 2002.
- [20] T. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*. Prentice Hall, 1996, ch. 4.
- [21] J. Bingham, “Multicarrier Modulation for Data Transmission: An Idea whose Time has Come,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 28, no. 5, pp. 5–14, May 1990.
- [22] R. van Nee and R. Prasad, *OFDM for Wireless Multimedia Communications*. Artech House, 2000.
- [23] R. Murch and K. Letaief, “Antenna Systems for Broadband Wireless Access,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 40, no. 4, pp. 76–83, Apr. 2002.
- [24] D. Gesbert, M. Shafi, D. shan Shiu, P. Smith, and A. Naguib, “From Theory to Practice: An Overview of MIMO Space-Time Coded Wireless Systems,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 21, no. 3, pp. 281–302, Apr. 2003.
- [25] H. Bolcskei, “MIMO-OFDM Wireless Systems: Basics, Perspectives, and Challenges,” *IEEE Wireless Communications Magazine*, vol. 13, no. 4, pp. 31–37, Aug. 2006.

- [26] A. Lozano, F. Farrokhi, and R. Valenzuela, “Lifting the Limits on High Speed Wireless Data Access using Antenna Arrays,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 39, no. 9, pp. 156–162, Sept. 2001.
- [27] *Multiple Input Multiple Output in UTRA; (Release 7)*, 3GPP Std. TR 25.876, v.7.0.0, Mar. 2007. [Online]. Available: <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/25-series.htm>
- [28] *Technical Specifications and Technical Reports for a UTRAN-based 3GPP system (Release 7)*, 3GPP Std. TR 21.101, v.7.0.0, Oct. 2007. [Online]. Available: <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/21101.htm>
- [29] P. Wang, J. Xiao, and L. Ping, “Comparison of Orthogonal and Non-orthogonal Approaches to Future Wireless Cellular Systems,” *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 1, no. 3, pp. 4–11, Sept. 2006.
- [30] A. Jamalipour, T. Wada, and T. Yamazato, “A Tutorial on Multiple Access Technologies for Beyond 3G Mobile Networks,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 43, no. 2, pp. 128–137, Feb. 2005.
- [31] *IEEE 802.16 Standard for Local and metropolitan area networks. Part 16: Air Interface For Fixed Broadband Wireless Access Systems*, IEEE Std., 2004.
- [32] H. Jiang, W. Zhuang, X. Shen, and Q. Bi, “Quality-of-service Provisioning and Efficient Resource Utilization in CDMA Cellular Communications,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 24, no. 1, pp. 4–15, Jan. 2006.
- [33] H. Fattah and C. Leung, “An Overview of Scheduling Algorithms in Wireless Multimedia Networks,” *IEEE Wireless Communications Magazine*, vol. 9, no. 5, pp. 76–83, Oct. 2002.
- [34] Y. Cao and V. Li, “Scheduling Algorithms in Broadband Wireless Networks,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 89, no. 1, pp. 76–87, Jan. 2001.
- [35] D. Wu, “QoS Provisioning in Wireless Networks,” *Wireless Communications & Mobile Computing*, vol. 5, no. 8, pp. 957–969, Dec. 2005.
- [36] M. Andrews, K. Kumaran, K. Ramanan, A. Stolyar, P. Whiting, and R. Vijayakumar, “Providing Quality of Service over a Shared Wireless Link,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 39, no. 2, pp. 150–154, Feb. 2001.
- [37] G. Song, “Cross-Layer Resource Allocation and Scheduling in Wireless Multicarrier Networks,” Ph.D. dissertation, Georgia Institute of Technology, Aug. 2005.
- [38] S. Shakkottai, T. Rappaport, and P. Karlsson, “Cross-layer Design for Wireless Networks,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 41, no. 10, pp. 74–80, Oct. 2003.

- [39] W. Tranter, K. Shanmugan, T. Rappaport, and K. Kosbar, *Principles of Communication Systems Simulation with Wireless Applications*, ser. Prentice Hall Communications Engineering and Emerging Technologies Series. Prentice Hall, 2004.
- [40] *UMTS: Selection Procedures for the Choice of Radio Transmission Technologies of the UMTS*, ETSI Std. TR 101 112, v.3.2.0, Apr. 1998.
- [41] M. Andrews, “A survey of Scheduling Theory in Wireless Data Networks,” in *Proc. IMA 2005 Summer Workshop in Wireless Communications*, Univ. of Minnesota, June 2005. [Online]. Available: <http://cm.bell-labs.com/who/andrews/pub.html>
- [42] *Quality of Service (QoS) Concept and Architecture*, 3GPP Std. TS 23.107, v8.0.0, Dec. 2008. [Online]. Available: <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/23107.htm>
- [43] A. Molisch, *Wireless Communications*. John Wiley & Sons, 2005, appendix 7d.
- [44] J. Parsons, *The Mobile Radio Propagation Channel*, 2nd ed. John Wiley & Sons, 2000.
- [45] M. Patzold, *Mobile Fading Channels*. John Wiley & Sons, 2002.
- [46] H. Yaghoobi, “Scalable OFDMA Physical Layer in IEEE 802.16 WirelessMAN,” Intel Technology Journal, 2004. [Online]. Available: ftp://download.intel.com/technology/itj/2004/volume08issue03/art03_scalableofdma/vol8_art03.pdf
- [47] I. Wong, Z. Shen, and B. Evans, “Resource Allocation for Mobile Multiuser OFDM Systems,” Tutorial, The University of Texas at Austin, Dept. of Electrical and Computer Engineering, Embedded Signal Processing Laboratory, Feb. 2006. [Online]. Available: <http://users.ece.utexas.edu/~bevans/projects/ofdm/>
- [48] H. Zhang, “Service Disciplines for Guaranteed Performance Service in Packet-switching Networks,” *IEEE Proceedings*, vol. 83, no. 10, pp. 1374–1396, Oct. 1995.
- [49] X. Liu, “Opportunistic Scheduling in Wireless Communication Networks,” Ph.D. dissertation, Purdue University, Dec. 2002.
- [50] P. Gutiérrez, “Packet Scheduling and Quality of Service in HSDPA,” Ph.D. dissertation, Aalborg University, Oct. 2003.
- [51] P. Viswanath, D. Tse, and R. Laroia, “Opportunistic Beamforming using Dumb Antennas,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 48, no. 6, pp. 1277–1294, June 2002.
- [52] R. Knopp and P. Humblet, “Information Capacity and Power Control in Single-cell Multiuser Communications,” in *Proc. IEEE International Conference on Communications, ICC 95*, vol. 1, Seattle, USA, June 1995, pp. 331–335.

- [53] J. H. Rhee, T. H. Kim, and D. K. Kim, “A Wireless Fair Scheduling Algorithm for 1xEV-DO System,” in *Proc. Vehicular Technology Conference, 2001. VTC 2001 Fall. IEEE VTS 54th*, Atlantic City, NJ, USA, 2001.
- [54] K. Frank, “Charging and Rate Control for Elastic Traffic,” *European Transactions on Telecommunications*, vol. 8, pp. 33–37, 1997.
- [55] G. Barriac and J. Holtzman, “Introducing Delay Sensitivity into the Proportional Fair Algorithm for CDMA Downlink Scheduling,” in *Proc. IEEE Seventh International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications*, vol. 3, 2002, pp. 652–656.
- [56] P. Hosein, “QoS Control for WCDMA High Speed Packet Data,” in *Proc. 4th International Workshop on Mobile and Wireless Communications Network, 2002*, Sept. 2002, pp. 169–173.
- [57] K. Deb, *Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*. John Wiley & Sons, 2001.
- [58] T. Nandagopal, S. Lu, and Bharghavan, “A Unified Architecture for the Design and Evaluation of Wireless Fair Queueing Algorithms,” *Kluwer, Wireless Networks Journal*, vol. 8, no. 2-3, pp. 231–247, Mar. 2002.
- [59] M. Andrews, “Instability of the Proportional Fair Scheduling Algorithm for HDR,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 3, no. 5, pp. 1422–1426, Sept. 2004.
- [60] L. Tassiulas and A. Ephremides, “Stability Properties of Constrained Queueing Systems and Scheduling Policies for Maximum Throughput in Multihop Radio Networks,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 37, no. 12, pp. 1936–1948, Dec. 1992.
- [61] S. Shakkottai and A. Stolyar, “Scheduling Algorithms for a Mixture of Real-Time and Non-real-time Data in HDR,” in *Proc. 17th International Teletraffic Conference (ITC-17)*, Salvador da Bahia, Brazil, 2001.
- [62] —, “Scheduling for Multiple flows Sharing a Time-Varying Channel: The Exponential Rule,” *American Mathematical Society Translations*, vol. 207, 2002.
- [63] S. Shakkottai and R. Srikant, “Scheduling Real-time Traffic With Deadlines Over a Wireless Channel,” *ACM/Baltzer Wireless Networks Journal*, vol. 8, no. 1, pp. 13–26, Jan. 2002.
- [64] M. Andrews, K. Kumaran, K. Ramanan, A. Stolyar, R. Vijayakumar, and P. Whiting, “CDMA Data QoS Scheduling on the Forward Link with Variable Channel Conditions,” Bell Labs Technical Report, 2000. [Online]. Available: <http://citeseer.ist.psu.edu/article/andrews00cdma.html>

- [65] K. Letaief and Y. J. Zhang, “Dynamic Multiuser Resource Allocation and Adaptation for Wireless Systems,” *IEEE Wireless Communications Magazine*, vol. 13, no. 4, pp. 38–47, Aug. 2006.
- [66] S. Pietrzyk, *OFDMA for Broadband Wireless Access*. Artech House, 2006.
- [67] L. Hoo, J. Tellado, and J. Cioffi, “Multiuser Transmit Optimization for Multicarrier Broadcast Channels: Asymptotic FDMA Capacity Region and Algorithms,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 52, no. 6, pp. 922–930, June 2004.
- [68] J. Campello and J. Cioffi, “Optimal Discrete Loading,” Information Systems Laboratory, Stanford University, Tech. Rep., 1998. [Online]. Available: <http://citeseer.ist.psu.edu/campello98optimal.html>
- [69] Hughes-Hartogs, “Ensemble Modem Structure for Imperfect Transmission Media,” U.S. Patent 4,679,227, July, 1987.
- [70] J. Li, H. Kim, Y. Lee, and Y. Kim, “A Novel Broadband Wireless OFDMA Scheme for Downlink in Cellular Communications,” in *Proc. IEEE Wireless Communications and Networking, 2003, WCNC 2003*, vol. 3, Amsterdam, The Netherlands, Mar. 2003, pp. 1907–1911.
- [71] C. Wong, R. Cheng, K. Letaief, and R. Murch, “Multiuser OFDM with Adaptive Subcarrier, Bit, and Power Allocation,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 17, no. 10, pp. 1747–1758, Oct. 1999.
- [72] S. Rao, *Engineering Optimization: Theory and Practice*, 3rd ed. John Wiley & Sons, 1996.
- [73] A. Ravindran, K. Ragsdell, and G. Reklaitis, *Engineering Optimization: Methods and Applications*, 2nd ed. John Wiley & Sons, 2006.
- [74] P. Venkataraman, *Applied Optimization with MATLAB Programming*. John Wiley & Sons, 2002.
- [75] J. Nocedal and S. Wright, *Numerical Optimization*, ser. Springer Series in Operations Research. Springer, 1999.
- [76] C. Wong, C. Tsui, R. Cheng, and K. Letaief, “A Real-time Sub-carrier Allocation Scheme for Multiple Access Downlink OFDM Transmission,” in *Proc. IEEE Vehicular Technology Conference, VTC’99-Fall*, vol. 2, Amsterdam, The Netherlands, Sept. 1999, pp. 1124–1128.
- [77] D. Kivanc, G. Li, and H. Liu, “Computationally Efficient Bandwidth Allocation and Power Control for OFDMA,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 2, no. 6, pp. 1150–1158, Nov. 2003.

- [78] I. Kim, “Use of Linear Programming for Dynamic Subcarrier and Bit Allocation in OFDMA Systems and Its Extension to MIMO-OFDMA Systems,” Ph.D. dissertation, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Nov. 2002.
- [79] I. Kim, I.-S. Park, and Y. Lee, “Use of Linear Programming for Dynamic Subcarrier and Bit Allocation in Multiuser OFDM,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 55, no. 4, pp. 1195–1207, July 2006.
- [80] J. Jang and K. Lee, “Transmit Power Adaptation for Multiuser OFDM Systems,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 21, no. 2, pp. 171–178, Feb. 2003.
- [81] H. Yin and H. Liu, “An Efficient Multiuser Loading Algorithm for OFDM-based Broadband Wireless Systems,” in *Proc. IEEE Global Telecommunications Conference, Globecom’00*, vol. 1, Tokyo, Japan, Dec. 2000, pp. 103–107.
- [82] W. Rhee and J. Cioffi, “Increase in Capacity of Multiuser OFDM System using Dynamic Subchannel Allocation,” in *Proc. IEEE Vehicular Technology Conference, VTC’00-Spring*, vol. 2, Tokyo, Japan, May 2000, pp. 1085–1089.
- [83] Z. Shen, J. Andrews, and B. Evans, “Adaptive Resource Allocation in Multiuser OFDM Systems with Proportional Rate Constraints,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 4, no. 6, pp. 2726–2737, Nov. 2005.
- [84] H. Kim and Y. Han, “A Proportional Fair Scheduling for Multicarrier Transmission Systems,” *IEEE Communications Letters*, vol. 9, no. 3, pp. 210–212, Mar. 2005.
- [85] T.-D. Nguyen and Y. Han, “A Proportional Fairness Algorithm with QoS Provision in Downlink OFDMA Systems,” *IEEE Communications Letters*, vol. 10, no. 11, pp. 760–762, Nov. 2006.
- [86] M. Kaneko, P. Popovski, and J. Dahl, “Proportional Fairness in Multi-Carrier System: Upper Bound and Approximation Algorithms,” *IEEE Communications Letters*, vol. 10, no. 6, pp. 462–464, June 2006.
- [87] G. Song, Y. Li, J. Cimini, L.J., and H. Zheng, “Joint Channel-aware and Queue-aware Data Scheduling in Multiple Shared Wireless Channels,” in *Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2004(WCNC’04)*, vol. 3, Mar. 2004, pp. 1939–1944.
- [88] G. Song and Y. Li, “Cross-layer Optimization for OFDM Wireless Networks – Part I: Theoretical Framework,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 4, no. 2, pp. 614–624, Mar. 2005.
- [89] —, “Cross-layer Optimization for OFDM Wireless Networks – Part II: Algorithm Development,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 4, no. 2, pp. 625–634, Mar. 2005.

- [90] —, “Utility-based Resource Allocation and Scheduling in OFDM-based Wireless Broadband Networks,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 43, no. 12, pp. 127–134, Dec. 2005.
- [91] J. Huang, V. Subramanian, R. Agrawal, and R. Berry, “Downlink Scheduling and Resource Allocation for OFDM Systems,” in *Proc. Conference on Information Sciences and Systems (CISS’06)*, Mar. 2006, pp. 1272–1279.
- [92] A. Todini, M. Moretti, A. Valletta, and A. Baiocchi, “A Modular Cross-Layer Scheduling and Resource Allocation Architecture for OFDMA Systems,” in *Proc. IEEE Global Telecommunications Conference, Globecom’06*, San Francisco, CA, USA, Nov. 2006, pp. 1–6.
- [93] L. Badia, A. Baiocchi, A. Todini, S. Merlin, S. Pupolin, A. Zanella, and M. Zorzi, “On the Impact of Physical Layer Awareness on Scheduling and Resource Allocation in Broadband Multicellular IEEE 802.16 Systems,” *IEEE Wireless Communications Magazine*, vol. 14, no. 1, pp. 36–43, Feb. 2007.
- [94] J. Cai, X. Shen, and J. Mark, “Downlink Resource Management for Packet Transmission in OFDM Wireless Communication Systems,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 4, no. 4, pp. 1688–1703, July 2005.
- [95] Y. J. Zhang and K. Letaief, “Energy-efficient MAC-PHY Resource Management with Guaranteed QoS in Wireless OFDM Networks,” in *Proc. IEEE 2005 IEEE International Conference on Communications, (ICC’05)*, vol. 5, May 2005, pp. 3127–3131.
- [96] —, “Cross-Layer Adaptive Resource Management for Wireless Packet Networks With OFDM Signaling,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 5, no. 11, pp. 3244–3254, Nov. 2006.
- [97] K. Seong, R. Narasimhan, and J. Cioffi, “Queue Proportional Scheduling via Geometric Programming in Fading Broadcast Channels,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 24, no. 8, pp. 1593–1602, Aug. 2006.
- [98] “OPNET Modeler.” [Online]. Available: <http://www.opnet.com>
- [99] C. Pattichis, E. Kyriacou, S. Voskarides, M. Pattichis, R. Istepanian, and C. Schizas, “Wireless Telemedicine Systems: an Overview,” *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 44, no. 2, pp. 143–153, Apr. 2002.
- [100] S. Tachakra, X. Wang, R. Istepanian, and Y. Song, “Mobile e-Health: The Unwired Evolution of Telemedicine,” *Telemedicine Journal and e-Health*, vol. 9, no. 3, pp. 247–257, July 2004.
- [101] . Ackerman, R. Craft, F. Ferrante, M. Kratz, S. Mandil, and H. Sapci, “Telemedicine Technology,” *Telemedicine Journal and e-Health*, vol. 8, no. 1, pp. 71–78, July 2004.

- [102] C. LeRouge, M. Garfield, and A. Hevner, “Quality Attributes in Telemedicine Video Conferencing,” in *Proc. 35th Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS’02)*, vol. 6, 2002, p. 159.
- [103] I. Maglogiannis, K. Delakouridis, and L. Kazatzopoulos, “Enabling Collaborative Medical Diagnosis over the Internet via peer to peer Distribution of Electronic Health Records,” *Journal of Medical Systems Springer*, vol. 30, no. 2, pp. 107–116, 2006.
- [104] I. Maglogiannis, C. Doukas, G. Kormentzas, and T. Pliakas, “Wavelet based Compression with ROI Coding Support for Mobile Access to DICOM Images over Heterogeneous Radio Networks,” *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, vol. 13, no. 4, pp. 458–466, July 2009.
- [105] B. Al-Manthari, H. Hassanein, and N. Nasser, “Packet Scheduling in 3.5G High-Speed Downlink Packet Access Networks: Breadth and Depth,” *IEEE Network*, vol. 21, no. 1, pp. 41–46, Jan.–Feb. 2007.
- [106] J. A. Lee, A. Rao, and S. Nagaraj, “A Rate Control Algorithm for Uplink High-Speed Packet Data Transmission in UMTS,” in *Proc. IEEE 6th Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications*, June 2005, pp. 730–734.
- [107] C. Rosa, J. Outes, T. B. Sorensen, J. Wigard, and P. E. Mogensen, “Combined Time and Code Division Scheduling for Enhanced Uplink Packet Access in WCDMA,” in *Proc. IEEE 60th Vehicular Technology Conference, VTC-2004 Fall*, Sept. 2004, pp. 851–855.
- [108] A. Demers, S. Keshav, and S. Shenker, “Analysis and Simulation of a Fair Queuing Algorithm,” in *Proc. SIGCOMM ’89: Symposium on Communications Architectures and Protocols*, New York, 1989, pp. 1–12.
- [109] Y. Wang, L. Fan, D. He, and R. Tafazolli, “Performance Comparison of Scheduling Algorithms in Network Mobility Environment,” *Computer Communications*, vol. 31, no. 9, pp. 1727–1738, June 2008.
- [110] P. Ramanathan and P. Agrawal, “Adapting Packet Fair Queuing Algorithms to Wireless Networks,” in *Proc. MobiCom ’98: 4th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking*, New York, 1998, pp. 1–9.
- [111] A. Parekh and R. Gallager, “A Generalized Processor Sharing Approach to Flow Control in Integrated Services Networks: the Single-Node Case,” *IEEE/ACM ToN*, vol. 1, pp. 344–357, June 1993.
- [112] A. C. Kam, T. Minn, and K. Siu, “Supporting Rate Guarantee and Fair Access for Bursty Data Traffic in W-CDMA,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 19, pp. 2121–2130, Nov. 2001.

- [113] Sallent, O. and Perez-Romero, J. and Agusti, R. and Casadevall, F., “Provisioning multimedia wireless networks for better qos: Rrm strategies for 3g w-cdma,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 41, no. 2, pp. 100–106, Feb. 2003.
- [114] S. Shakkottai and R. Srikant, “Scheduling Real-Time Traffic with Deadlines over a Wireless Channel,” *Wirel. Netw.*, vol. 8, no. 1, pp. 13–26, 2002.
- [115] K. Teh, P. Kong, and S. Jiang, “Proactive Earliest due Date Scheduling in Wireless Packet Networks,” *Proc. International Conference on Communication Technology, 2003 (ICCT 2003)*, vol. 2, pp. 816–820, April 2003.
- [116] P. Kong and K. Teh, “Performance of Proactive Earliest due Date Packet Scheduling in Wireless Networks,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 53, no. 4, pp. 1224–1234, July 2004.
- [117] Y. Kang, J. Kim, D. Sung, and S. Lee, “Hybrid Scheduling Algorithm for Guaranteeing QoS of Real-time Traffic in High Speed Uplink Packet Access (HSUPA),” in *Proc. 18th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC 2007*, Athens, Greece, Sept. 2007.
- [118] M. Andrews, K. Kumaran, K. Ramanan, A. Stolyar, and P. Whiting, “Providing Quality of Service over a Shared Wireless Link,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 39, pp. 150–154, Feb. 2001.
- [119] *Enhanced Uplink; Overall Description; Stage 2 (Release 7)*, 3rd Generation Partnership Project (3GPP) Std. TS 25.319, v7.2.0, Mar. 2007.
- [120] *Medium Access Control (MAC) Protocol Specification (Release 7)*, 3rd Generation Partnership Project (3GPP) Std. TS 25.321, v7.5.0, June 2007.
- [121] W. Jakes, *Microwave Mobile Communications*. John Wiley & Sons, 1992.
- [122] *Pulse Code Modulation (PCM) of voice frequencies*, ITU-T Std. Recommendation G.711, Nov. 1988. [Online]. Available: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.711/en>
- [123] *3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; Service aspects; Services and Service Capabilities (Release 9)*, 3GPP Std. TS 22.105 V9.0.0, Dec. 2008.
- [124] *Advanced Video Coding for Generic Audiovisual Services*, ITU-T Std. Recommendation H.264, Nov. 2007. [Online]. Available: <http://www.itu.int/rec/T-REC-H.264/en>
- [125] G. Van der Auwera, P. David, and M. Reisslein, “Bit Rate-Variability of H.264/AVC FRExt,” Arizona State University, Tech. Rep., 2006.
- [126] H. Holma and A. Toskala, Eds., *LTE for UMTS – OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access*. John Wiley & Sons, 2009.

- [127] A. Pokhariyal, T. Kolding, and P. Mogensen, “Performance of Downlink Frequency Domain Packet Scheduling for the UTRAN Long Term Evolution,” in *Proc. IEEE 17th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2006 (PIMRC’06)*, Helsinki, Finland, Sept. 2006, pp. 1–5.
- [128] Y. Zhang and K. Letaief, “Multiuser Adaptive Subcarrier-and-bit Allocation with Adaptive Cell Selection for OFDM Systems,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 3, no. 5, pp. 1566–1575, Sept. 2004.
- [129] H.-W. Lee and S. Chong, “Downlink Resource Allocation in Multi-Carrier Systems: Frequency-Selective vs. Equal Power Allocation,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 7, pp. 3738–3747, Oct. 2008.
- [130] G. Yu, Z. Zhang, and P. Qiu, “Adaptive Subcarrier and Bit Allocation in OFDMA Systems Supporting Heterogeneous Services,” *Journal of Wireless Personal Communications, Springer, Netherlands*, vol. 43, no. 4, pp. 1057–1070, Dec. 2007, d.o.i. 10.1007/s11277-007-9283-2.
- [131] H. Seo and B. G. Lee, “Proportional-Fair Power Allocation with CDF-Based Scheduling for Fair and Efficient Multiuser OFDM Systems,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 5, no. 5, pp. 978–983, May 2006.
- [132] I. Wong, “A Unified Framework for Optimal Resource Allocation in Multiuser Multicarrier Wireless Systems,” Ph.D. dissertation, The University of Texas at Austin, May 2007.
- [133] T. Ali-Yahija, A.-L. Beylot, and G. Pujolle, “Downlink Resource Allocation Strategies for OFDMA Based Mobile WiMAX,” *Springer Journal of Telecommunication Systems*, vol. 44, no. 1–2, pp. 29–37, June 2010.
- [134] A. Pokhariyal, K. Pedersen, G. Monghal, I. Kovacs, C. Rosa, T. Kolding, and P. Mogensen, “HARQ Aware Frequency Domain Packet Scheduler with Different Degrees of Fairness for the UTRAN Long Term Evolution,” in *Proc. IEEE Vehicular Technology Conference, 2007. VTC Spring 2007*, Dublin, Ireland, Apr. 2007, pp. 2761–2765.
- [135] P. Kela, J. Puttonen, N. Kolehmainen, T. Ristaniemi, T. Henttonen, and M. Moision, “Dynamic Packet Scheduling Performance in UTRA Long Term Evolution downlink,” in *Proc. 3rd International Symposium on Wireless Pervasive Computing (ISWPC’08)*, May 2008, pp. 308–313.
- [136] G. Monghal, K. Pedersen, I. Kovacs, and P. Mogensen, “QoS Oriented Time and Frequency Domain Packet Schedulers for The UTRAN Long Term Evolution,” in *Proc. IEEE Vehicular Technology Conference, 2008. VTC Spring 2008*, Singapore, May 2008, pp. 2532–2536.

- [137] L. A. Wolsey and G. L. Nemhauser, *Integer and Combinatorial Optimization*. John Wiley & Sons, 1999.
- [138] Hentilä, L. and Kyösti, P. and Käske, M. and Narandzic, M. and Alatosava, M., “MATLAB implementation of the WINNER Phase II Channel Model ver1.1,” IST-WINNERII Project, Dec. 2007. [Online]. Available: {http://www.ist-winner.org/phase\2_model.html}
- [139] “CPLEX Mixed Integer Optimizer,” Software, ILOG. [Online]. Available: {<http://www.ilog.com/products/cplex/product/mip.cfm>}
- [140] Holmström, K., “The TOMLAB Optimization Environment in Matlab,” *Journal of Advanced Modeling and Optimization*, vol. 1, no. 1, pp. 47–69, 1999. [Online]. Available: {<http://tomopt.com/docs/TOMLAB.pdf>}
- [141] V. Srivastava and M. Motani, “Cross-layer Design: A Survey and the Road Ahead,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 43, no. 12, pp. 112–119, Dec. 2005.
- [142] A. Burr, “Cross-layer Issues in COST 2100: a WG1 View,” Dept. of Electronics, University of York, Tech. Rep., 2007.
- [143] S. Shakkottai, T. Rappaport, and P. Karlsson, “Cross-layer Design for Wireless Networks,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 41, no. 10, pp. 74–80, Oct. 2003.
- [144] G. Carneiro, J. Ruela, and M. Ricardo, “Cross-layer Design in 4G Wireless Terminals,” *IEEE Wireless Communications Magazine*, vol. 11, no. 2, pp. 7–13, Apr. 2004.
- [145] V. Jacobson, “Congestion Avoidance and Control,” in *Proc. ACM Comp. Commun. Rev., Sigcomm '88 Symp.*, Stanford, CA, Aug. 1988, pp. 314–329.
- [146] M. Carvalho and J. J. Garcia-Luna-Aceves, “A Scalable Model for Channel Access Protocols in Multihop ad hoc Networks,” in *Proc. 10th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, Philadelphia, PA, USA, Mar. 2000, pp. 330–344.
- [147] M. Assaad and D. Zeghlache, “Cross-layer Design in HSDPA System to Reduce the TCP Effect,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 24, pp. 614–625, Mar. 2006.
- [148] Q. Liu, S. Zhou, and G. Giannakis, “TCP Performance in Wireless Access with Adaptive Modulation and Coding,” in *Proc. IEEE Conference on Communications 2004*, Paris, France, June 2004.
- [149] —, “Cross-layer Combining of Adaptive Modulation and Coding with Truncated ARQ over Wireless Links,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 3, pp. 1746–1755, Sept. 2004.

- [150] J. Del Prado Pavon and S. Choi, “Link Adaptation Strategy for IEEE 802.11 WLAN via Received Signal Strength Measurement,” in *Proc. IEEE Conference on Communications 2003*, Anchorage, Alaska, USA, May 2003, pp. 1108–1113.
- [151] R. Kortebi, Y. Gourhant, and N. Agoulmine, “On the Use of SINR for Interference-Aware Routing in Wireless Multi-Hop Networks,” in *Proc. 10th ACM Symposium on Modeling, Analysis, and Simulation of Wireless and Mobile Systems*, Singapore, Dec. 2007, pp. 395–399.
- [152] J. Proakis, *Digital Communications*, 4th ed. McGraw-Hill, 2001.
- [153] M. Assaad and D. Zeghlache, “How to Minimize the TCP Effect in a UMTS-HSDPA System,” *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 5, pp. 473–485, 2005.
- [154] A. Haider and R. Harris, “A note on the Performance of TCP over HSDPA,” in *Proc. 6th International Conference on Information, Communications & Signal Processing*, Chania, Crete Island, Greece, Oct. 2007.
- [155] K. Avrachenkov, U. Ayesta, E. Altman, P. Nain, and C. Barakat, “The Effect of Router Buffer Size on the TCP Performance,” in *Proc. LONIS Workshop on Telecommunication Networks and Teletraffic Theory*, St.Petersburg, Russia, Jan. 2002, pp. 116–121.
- [156] J. Mathis, M. Semke, J. Mahdavi, and T. Ott, “The Macroscopic Behavior of the TCP Congestion Avoidance Algorithm,” *ACM SIGCOMM Computer Communications Review*, vol. 27, pp. 67–82, July 1997.
- [157] J. Padhye, V. Firoiu, D. Towsley, and J. Kurose, “Modeling TCP Throughput: a Simple Model and its Empirical Validation,” *ACM SIGCOMM Computer Communications Review*, vol. 28, pp. 303–314, Sept. 1998.
- [158] S. Brueck, J. Giese, L. Zhao, and A. Dekorsy, “On MAC Layer Throughput Enhancements in LTE-A by Downlink Macro Diversity,” in *Proc. IEEE Communications Workshops, International Conference on Communications, ICC’09*, Dresden, Germany, Sept. 2009, pp. 1–5.
- [159] M. Sawahashi, Y. Kishiyama, A. Morimoto, D. Nishikawa, and M. Tanno, “Coordinated Multipoint Transmission/Reception Techniques for LTE-Advanced,” *IEEE Wireless Communications Magazine*, vol. 17, no. 3, pp. 26–34, June 2010.
- [160] EIFFEL initiative, “A White Paper from the EIFFEL Think-Tank,” EIFFEL initiative, 7th Framework Programme Support Action. [Online]. Available: <http://www.fp7-eiffel.eu/>

- [161] I. Baldine, M. Vellala, A. Wang, G. Rouskas, R. Dutta, and D. Stevenson, “A unified software architecture to enable cross-layer design in the future internet,” in *Proc. 16th International Conference on Computer Communications and Networks, 2007. ICCCN 2007.*, Aug. 2007, pp. 26–32.
- [162] A. Greenberg, G. Hjalmtysson, D. A. Maltz, A. Myers, J. Rexford, G. Xie, H. Yan, J. Zhan, and H. Zhang, “A clean slate 4d approach to network control and management,” *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, vol. 35, no. 5, pp. 41–54, 2005.

Κατάλογος δημοσιεύσεων του συγγραφέα

Δημοσιεύσεις του συγγραφέα σε επιστημονικά περιοδικά

1. D. Komnakos, D. Skoutas, D. Vouyioukas and A. Rouskas “A Delay Optimal Scheduling Policy for Real Time Services in WCDMA Systems” *Wireless Personal Communications*, DOI: 10.1007/s11277-010-0031-7
2. A.G. Gotsis, D. Komnakos and P. Constantinou “Dynamic Subcarrier and Slot Allocation for OFDMA Networks Supporting Mixed Traffic: Upper Bound and a Heuristic Algorithm”, *IEEE Communications Letters*, Vol. 13, Issue 8, pp. 576-578, August 2009.
3. D. Komnakos, D. Vouyioukas, I. Maglogiannis and P. Constantinou “Performance evaluation of an Enhanced Uplink 3.5G system for mobile healthcare applications”, *International Journal of Telemedicine and Applications*, Vol. 2008, Hindawi Publishing Corporation
4. A.G. Gotsis, N. Papanikolaou, D. Komnakos, A. Yalofas and P. Constantinou “Non-ionizing Electromagnetic Radiation Monitoring in Greece”, *Special issue of Annals of Telecommunications*, Vol. 63, 109-123, Springer, January 2008
5. D. Vouyioukas, D. Komnakos, I. Maglogiannis and P. Constantinou “Emergency M-health Services through High-Speed 3G systems: Simulation and Performance Evaluation”, *Simulation: Transactions of the Society for Modelling and Simulation International*, Vol. 83, Issue 4, pp. 329-345, SAGE Publications, April 2007.

Δημοσιεύσεις του συγγραφέα σε επιστημονικά συνέδρια

1. D. Komnakos, D. Skoutas, D. Vouyioukas and A. Rouskas “Scheduling Optimization for Real-Time Services in WCDMA” *Future Network & Mobile Summit 2010*, June 2010, Florence, Italy
2. A.G. Gotsis, D. Komnakos and P. Constantinou, “Linear Modeling and Performance Evaluation of Resource Allocation and User Scheduling for LTE-like OFDMA

networks”, *6th International Symposium on Wireless Communication Systems 2009 (ISWCS’09)*, September 2009, Siena, Italy

3. A.G. Gotsis, D. Komnakos and P. Constantinou, “Joint Resource Allocation and User Scheduling for Single-Cell OFDMA Networks Supporting Multiple Data Traffic Classes”, *COST 2100*, May 2009, Valencia, Spain
4. D. Komnakos, D. Vouyioukas, I. Maglogiannis and P. Constantinou, “Feasibility Study of a Joint E-health Mobile High-Speed and Wireless Sensor System”, *1st PETRA Conference*, July 2008, Athens, Greece
5. D. Skoutas, D. Komnakos, D. Vouyioukas and A. Rouskas, “Enhanced Dedicated Channel Scheduling Optimization in WCDMA”, *European Wireless Conference 2008*, June 2008, Prague, Czech Republic
6. D. Komnakos, P. Constantinou, D. Vouyioukas and I. Maglogiannis, “QoS Study Performance of an Integrated Satellite Telemedicine Platform”, *18th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC’07)*, September 2007, Athens, Greece
7. D. Komnakos, A. Gotsis, N. Koutsianas , A. Yalofas and P. Constantinou, “Design, Development and Operation of an Electromagnetic Radiation Monitoring Network in Greece: Hermes Project”, *4th International Workshop on Biological Effects of Electromagnetic Fields*, October 2006, Crete, Greece

Υποβληθείσες δημοσιεύσεις σε επιστημονικά περιοδικά και βιβλία (υπό κρίση)

1. A. G. Gotsis, D. I. Komnakos, and Ph. Constantinou, “The 3GPP-LTE Cellular System”, submitted as a chapter for inclusion in the forthcoming book “OFDM/OFDMA Wireless Communication Systems” by Bentham Science Publishers (submitted May 2010, expected book publication: Nov/Dec 2010).
2. A. G. Gotsis, D. I. Komnakos, and Ph. Constantinou, “Optimization Techniques for Radio Resource Allocation over OFDMA Wireless Access Networks”, submitted for publication at the Elsevier, *European Journal of Operational Research*, 26 Feb 2010 (paper ID: EJOR-D-10-00383).

□

Βιογραφικό Σημείωμα

Ο Δημήτρης Ι. Κομνάκος είναι διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός ΕΜΠ από το καλοκαίρι του 2005. Από τον Σεπτέμβριο του 2005 είναι μέλος του Εργαστηρίου Κινητών Ραδιοεπικοινωνιών του Ε.Μ.Π., έχοντας συμμετάσχει σε πλήθος έργων που σχετίζονται με μελέτες και μετρήσεις μη ιοντίζουσας Η/Μ ακτινοβολίας, μετρήσεις ποιότητας σε τηλεπικοινωνιακά συστήματα και μελέτες για την εναρμόνιση σταθμών βάσης με την ισχύουσα νομοθεσία. Στο αντικείμενο της μέτρησης και της προστασίας του κοινού από τις εκπομπές ακτινοβολίας έχει δημοσιεύσει σε διεθνή συνέδρια και περιοδικά. Από το Δεκέμβριο του 2006 είναι Υ.Δ. στη Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π. και ασχολείται με τη διδακτορική του διατριβή που αφορά σε θέματα *Μηχανισμών Διαχείρισης Πόρων για Σύγχρονα Δίκτυα Κινητών Επικοινωνιών πέραν της 3^{ης} γενιάς*. Για την εκπόνηση της διδακτορικής διατριβής έλαβε υποτροφία από το Ινστιτούτο Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών του ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος. Συμμετείχε επίσης ως ερευνητής σε δύο ευρωπαϊκά ερευνητικά προγράμματα (FP6 UNITE Project και FP7 HURRICANE Project). Ακόμα συμμετείχε ως επιστημονικός συνεργάτης σε έργο που χρηματοδοτείται από τη Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας στα πλαίσια του προγράμματος ΠΕΝΕΔ '03. Στο ερευνητικό αντικείμενο της διατριβής έχει τέσσερις δημοσιεύσεις σε διεθνούς κύρους περιοδικά, τέσσερις δημοσιεύσεις σε διεθνή συνέδρια με κριτές και μία παρουσίαση στη 8^η συνάντηση της ερευνητικής δράσης COST2100, στην οποία συμμετέχει ενεργά. Είναι μέλος του ΤΕΕ και της IEEE από το 2006.

□