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

Θέματα Διαχείρισης Πόρων, Έλεγχος Αποδοχής Κλήσεων και Αξιολόγηση Επίδοσης σε Ασύρματα Ευρυζωνικά Δίκτυα Επικοινωνιών

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Δημήτριος Γ. Στρατογιάννης

Αθήνα, Μάρτιος 2010

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

Θέματα Διαχείρισης Πόρων, Έλεγχος Αποδοχής Κλήσεων και Αξιολόγηση Επίδοσης σε Ασύρματα Ευρυζωνικά Δίκτυα Επικοινωνιών

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Δημήτριος, Γ. Στρατογιάννης

Συμβουλευτική Επιτροπή : Ιωάννης, Δ., Κανελλόπουλος
Παναγιώτης, Γ., Κωττής
Χρήστος, Ν., Καψάλης

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 12η Μαρτίου 2010.

..... Ιωάννης Κανελλόπουλος Καθηγητής Ε.Μ.Π.	..... Παναγιώτης Κωττής Καθηγητής Ε.Μ.Π.	..... Χρήστος Καψάλης Καθηγητής Ε.Μ.Π.
..... Αθανάσιος Παναγόπουλος Λέκτορας Ε.Μ.Π.	..... Μιχαήλ Θεολόγου Καθηγητής Ε.Μ.Π.	..... Κωνσταντίνος Παπαοδυσσεύς Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.
	..... Γεώργιος Κυριακού Αν. Καθηγητής Δ.Π.Θ.	

Αθήνα, Μάρτιος 2010

.....

Δημήτριος, Γ. Στρατογιάννης

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

Copyright © Δημήτριος, Γ. Στρατογιάννης, 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

Στην παρούσα διατριβή, κύριος στόχος αποτελεί η μελέτη των θεμάτων της Διαχείρισης Πόρων και του Ελέγχου Αποδοχής Κλήσεων σε συνδυασμό με την Αξιολόγηση Επίδοσης των σχετικών αλγορίθμων με στόχο την παροχή ποιότητας υπηρεσίας (QoS) σε ασύρματα ευρυζωνικά δίκτυα επικοινωνιών. Η έρευνα που παρουσιάζεται στην παρούσα διατριβή λαμβάνει υπόψη τις προδιαγραφές των τεχνικών προτύπων και τις εξελίξεις που δημιουργήθηκαν τα τελευταία χρόνια για τα ασύρματα δίκτυα δίνοντας έμφαση στα κυψελωτά τηλεπικοινωνιακά συστήματα που γνωρίζουν μεγάλη απήχηση.

Στο 1ο κεφάλαιο της διατριβής παρέχεται μια γενική παρουσίαση των τεχνολογιών ασυρμάτων επικοινωνιών με ειδικές αναφορές στα ειδικά προβλήματα διαχείρισης πόρων κάθε μιας. Στο 2ο κεφάλαιο δίνεται έμφαση στη μελέτη και περιγραφή των μηχανισμών παροχής ποιότητας υπηρεσίας με ιδιαίτερο βάρος στις παραμέτρους QoS που προδιαγράφονται, με στόχο τη βέλτιστη εκμετάλλευση του πόρων του δικτύου και την υποστήριξη των διαρκώς αναπτυσσόμενων πολλαπλών κλάσεων υπηρεσιών. Έπειτα παρουσιάζονται τα επικρατέστερα μοντέλα δικτυακών υπηρεσιών σε συνδυασμό με τις κατάλληλες αρχιτεκτονικές που αναμένονται να προσφέρουν τις αναγκαίες λύσεις για την παροχή QoS.

Στα πλαίσια του 3ου κεφαλαίου γίνεται εκτενής επισκόπηση και μελέτη στη διεθνή βιβλιογραφία για την επίλυση του σχετικών προβλημάτων και ειδικότερα των αλγορίθμων που έχουν ήδη προταθεί. Στη συνέχεια, προτείνονται αλγόριθμοι ελέγχου αποδοχής κλήσεων για ασύρματα ευρυζωνικά δίκτυα επικοινωνιών που βασίζονται στην ανάπτυξη των μοντέλων πιθανοτικού ελέγχου αποδοχής κλήσεων. Οι πιθανοτικοί αλγόριθμοι ελέγχου αποδοχής κλήσεων που προτείνονται έχουν ως στόχο τον προοδευτικό έλεγχο της ροής τηλεπικοινωνιακού φορτίου κάθε τύπου με σκοπό την αύξηση της απόδοσης του δικτύου και τη βέλτιστη χρήση των διατιθέμενων πόρων. Οι νέοι προτεινόμενοι αλγόριθμοι οι οποίοι λαμβάνουν υπόψη την τρέχουσα κατάσταση του δικτύου αποσκοπούν στην εξασφάλιση της παροχής QoS στις υποστηριζόμενες κλάσεις υπηρεσιών. Η μελέτη των προτεινόμενων αλγορίθμων πραγματοποιείται με χρήση Μαρκοβιανού μοντέλου και παρέχονται αναλυτικοί τύποι για τον υπολογισμό των πιθανοτήτων μη αποδοχής κλήσεων. Επιπλέον, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των σχετικών προσομοιώσεων για την επιβεβαίωση της

ακρίβειας του προτεινόμενου μοντέλου σε συνδυασμό με την εξέταση της περίπτωσης της λογαριθμοκανονικής κατανομής για το χρόνο εξυπηρέτησης των κλήσεων.

Στη συνέχεια, στο 4ο κεφαλαίο, ακολουθεί η περαιτέρω αξιολόγηση της επίδοσης των προτεινόμενων σχημάτων του πιθανοτικού ελέγχου αποδοχής κλήσεων με βάση νέα κριτήρια που αφορούν τις επιδόσεις του μηχανισμού απόδοσης προτεραιότητας, την αξιολόγηση της δικαιοσύνης του πιθανοτικου σχήματος ελέγχου αποδοχής κλήσεων στην εξυπηρέτηση των κλήσεων καθώς και τα επίπεδα απόδοσης του αλγορίθμου ως προς τη διεκπεραιωτικότητα των κλήσεων. Επίσης, στο 5ο κεφάλαιο επεκτείνοντας την αρχική προσέγγιση αναπτύσσονται τεχνικές βελτιστοποίησης των προτεινόμενων μοντέλων πιθανοτικου ελέγχου αποδοχής κλήσεων με χρήση θεωρίας παιγνίων και τεχνικών διαπραγμάτευσης τιμολόγησης σε συνδυασμό με την ενσωμάτωση τους στο υπάρχον μοντέλο. Μέσα από την βελτιστοποίηση, ενισχύονται ο δυναμικός χαρακτήρας του σχήματος και η λειτουργία του, παρουσιάζοντας σημαντικά βελτιωμένα αποτελέσματα επίδοσης. Τέλος, στο 6ο κεφάλαιο παρουσιάζονται συνοπτικά τα συμπεράσματα της όλης ερευνητικής εργασίας και τονίζονται τα σημεία στα οποία προάγεται η επιστήμη ενώ επιπλέον γίνονται και οι υποδείξεις για μελλοντική έρευνα.

Abstract

The present thesis, deals with a number of issues related to Resource Management, Call Admission Control and the Performance Evaluation of the proposed schemes in order to provide Quality of Service (QoS) in broadband wireless communication networks. The research work presented in this thesis, takes into account the technical standards and specifications that have been proposed during last years for wireless networks, emphasizing on cellular communication systems that are widely adopted.

Chapter 1 provides a general overview of the recent and future developments of wireless communications technologies, referring also to the relevant resource management issues of each one. The second chapter emphasizes on studying the QoS provision mechanisms, which are necessary for the optimum exploitation of the network resources and the support of emerging applications belonging to different service classes. Furthermore, the most widely accepted network services models are presented along with the appropriate resource management architectures that are expected to offer the required solutions for efficient QoS provision in wireless networks.

In chapter 3, a thorough survey of the schemes that have been proposed in the literature to deal with resource management and especially call admission control in wireless networks is performed. Subsequently, novel call admission control schemes for broadband wireless networks are presented, concentrating mainly to the models of the probabilistic call admission control schemes. The probabilistic call admission control schemes proposed, aim at controlling gradually the telecommunication traffic in order to enhance network performance and to improve resource utilization. The proposed schemes, that take into account the current network conditions, aim at providing and guaranteeing the requested QoS to the service classes supported. The study of the proposed schemes is performed employing the Markov chain theory, providing analytical expressions for the call blocking probabilities evaluation. Moreover, simulation results are provided to validate the accuracy of the proposed model, employing also different distributions for the channel holding time.

Then, in chapter 4 the performance evaluation of the proposed probabilistic call admission control schemes is performed. The evaluation is based on new criteria and metrics, in order to assess the performance of the priority assigning mechanism among the different service classes supported, fairness and network throughput. In the fifth

chapter, the probabilistic approach is extended by developing an appropriate optimization technique based on game theory. The game theoretic framework developed for resource allocation and price bargaining for the required resources is integrated to the call admission control scheme providing efficient dynamic operation and capability enhancement. The optimization ameliorates the dynamic structure and the performance of the proposed scheme, demonstrating significant improvement under heavy traffic load conditions. Finally, in chapter 6 the main conclusions of our research work are deduced, stressing out the most essential points of our contribution, providing also certain future research directions.

Αφιερώνεται στους δυο
σημαντικότερους ανθρώπους της ζωής μου,
στους γονείς μου

Πρόλογος

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Ασυρμάτου και Επικοινωνίας Μεγάλων Αποστάσεων που ανήκει στον τομέα Συστημάτων Μετάδοσης Πληροφορίας και Τεχνολογίας Υλικών στα πλαίσια των υποχρεώσεων που απορρέουν από το πρόγραμμα μεταπτυχιακών σπουδών της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Αντικείμενο της διατριβής αποτελεί η μελέτη θεμάτων διαχείρισης πόρων, ελέγχου αποδοχής κλήσεων και αξιολόγησης επίδοσης σε ασύρματα ευρυζωνικά δίκτυα επικοινωνιών. Στόχος της διατριβής είναι η παρουσίαση κατάλληλων τεχνικών για την αποτελεσματική διαχείριση των πόρων σε δίκτυα κινητών και σταθερών ασύρματων επικοινωνιών για την παροχή ποιότητας υπηρεσίας (QoS), δίνοντας κυρίως έμφαση σε θέματα ελέγχου αποδοχής κλήσεων. Στις σελίδες που ακολουθούν γίνεται μια λεπτομερής παρουσίαση των γνωστικών αντικειμένων που καλύπτονται από τη διατριβή.

Ειδικότερα, το πρώτο κεφάλαιο της διατριβής παρέχει μια γενική επισκόπηση των τεχνολογιών ασυρμάτων επικοινωνιών και των εξελίξεων σε αυτές τα τελευταία χρόνια, επισημαίνοντας παράλληλα τα ιδιαίτερα ζητήματα διαχείρισης πόρων και τα ειδικά χαρακτηριστικά κάθε τεχνολογίας. Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφονται οι μηχανισμοί διαχείρισης πόρων και παροχής QoS ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη εκμετάλλευση τους από το δίκτυο και η υποστήριξη πολλαπλών κλάσεων υπηρεσιών. Συγκεκριμένα παρουσιάζονται τα επικρατέστερα μοντέλα δικτυακών υπηρεσιών σε συνδυασμό με τις κατάλληλες αρχιτεκτονικές που αναμένονται να προσφέρουν τις αναγκαίες λύσεις για την παροχή QoS. Για τις ανάγκες αυτές προτείνονται δυο αρχιτεκτονικές, μια παραδοσιακή δικτυακή και μια διαστρωματική αρχιτεκτονική κατάλληλη για τα δίκτυα επόμενης γενιάς όπου ενσωματώνονται διαφορετικές τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης.

Τα επόμενα κεφάλαια μελετούν το πρόβλημα του ελέγχου αποδοχής κλήσεων σε δίκτυα πολλαπλών κλάσεων υπηρεσιών. Ύστερα από μια εκτενή επισκόπηση των σχετικών τεχνικών και των αλγορίθμων που έχουν προταθεί από τη διεθνή βιβλιογραφία, στο τρίτο κεφάλαιο προτείνονται τα πιθανοτικά σχήματα ελέγχου αποδοχής κλήσεων που επιτυγχάνουν τον προοδευτικό έλεγχο της ροής του τηλεπικοινωνιακού φορτίου με σκοπό την αύξηση της απόδοσης του δικτύου και τη βέλτιστη χρήση των διατιθέμενων πόρων για την εξυπηρέτηση μεγαλύτερου αριθμού χρηστών. Στο τέταρτο κεφάλαιο πραγματοποιείται η αξιολόγηση της επίδοσης του προτεινόμενου πιθανοτικου σχήματος λαμβάνοντας υπόψη νέα κριτήρια αλλά και δείκτες εκτός από τις πιθανότητες μη αποδοχής κλήσεων, εξετάζοντας

ζητήματα όπως η δικαιοσύνη στην εξυπηρέτηση των κλήσεων των διαφόρων κλάσεων υπηρεσιών και η διεκπεραιωτικότητα. Με τον τρόπο αυτό αξιολογείται η επίτευξη των στόχων σχεδιασμού του αλγόριθμου αλλά και η απόδοση των σχημάτων κάτω από διαφορετικές συνθήκες του δικτύου. Στο πέμπτο κεφάλαιο αναπτύσσονται τεχνικές βελτιστοποίησης των προτεινομένων μοντέλων πιθανοτικου ελέγχου αποδοχής κλήσεων με χρήση θεωρίας παιγνίων. Συγκεκριμένα, προτείνεται η ενσωμάτωση στο υπάρχον μοντέλο τεχνικών κατανομής πόρων με θεωρία παιγνίων και τεχνικών διαπραγμάτευσης τιμολόγησης για την πραγματοποίηση των κλήσεων. Μέσα από την βελτιστοποίηση και την επέκταση του προτεινόμενου σχήματος, ενισχύονται η δυναμική του λειτουργία παρουσιάζοντας σημαντικά βελτιωμένη επίδοση. Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται συνοπτικά τα συμπεράσματα της διδακτορικής διατριβής και τονίζονται τα σημεία στα οποία προάγεται η επιστήμη ενώ επιπλέον γίνονται και οι σχετικές υποδείξεις για μελλοντική έρευνα.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς και θερμές ευχαριστίες μου σε μια σειρά ανθρώπων των οποίων η συμβολή υπήρξε καθοριστική σε όλες τις φάσεις της εκπόνησης αυτής της διδακτορικής διατριβής. Καταρχήν, επιθυμώ να εκφράσω τη βαθιά ευγνωμοσύνη μου στο σεβαστό μου καθηγητή, επιβλέποντα της διατριβής μου, κ. Ιωάννη Δ. Κανελλόπουλο. Θα ήθελα να τον ευχαριστήσω από βάθους καρδίας και να εκφράσω την απεριόριστη εκτίμηση που τρέφω προς το πρόσωπο του για την απόλυτη εμπιστοσύνη που έδειξε προς εμένα όλα αυτά τα χρόνια, την αμέριστη συμπαράσταση του, την άψογη συνεργασία του, την πολύτιμη καθοδήγηση του καθώς και την υπομονή του. Οι υψηλές επαγγελματικές και επιστημονικές αξίες που μου μετέδωσε, η ακεραιότητα, το ήθος, η συνέπεια και η ευσυνειδησία που τον διακρίνουν αποτελούν για μένα εκτός από παράδειγμα, πολύτιμο οδηγό και παρακαταθήκη για τη μελλοντική σταδιοδρομία μου σε κάθε τομέα.

Ανάλογες ευχαριστίες αλλά και την εκτίμηση μου θα ήθελα να εκφράσω και προς τον αξιότιμο καθηγητή κ. Παναγιώτη Γ. Κωττή για την πολύτιμη συμβολή του και τη συνεργασία μας στην εκπόνηση της διδακτορικής μου διατριβής. Οι γνώσεις και η μεγάλη ερευνητική του εμπειρία στα αντικείμενα των τηλεπικοινωνιών, η άριστη γνώση της ελληνικής και αγγλικής γλώσσας, η εμπιστοσύνη του και η διεισδυτικότητα του συνέβαλλαν τα μέγιστα στην επίτευξη των στόχων της παρούσας διδακτορικής διατριβής. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω το λέκτορα κ. Αθανάσιο Δ. Παναγόπουλο που με τίμησε με τη φιλία του και την εμπιστοσύνη του καθώς και για τις πολύτιμες συμβουλές του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διδακτορικής διατριβής. Αποτέλεσε πολύτιμο συμπαραστάτη και αρωγό σε κάθε δύσκολή στιγμή και ιδιαίτερα στα πρώτα βήματα της διδακτορικής μου διατριβής. Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου στους αξιότιμους

καθηγητές κ.κ. Χρήστο Ν. Καψάλη, Μιχαήλ Ε. Θεολόγου, Κωνσταντίνο Ν. Παπαοδυσσέα και Γεώργιο Α. Κυριακού για τη συνεργασία τους καθώς και την τιμή που μου έκαναν με την αποδοχή της συμμέτοχης τους στην επταμελή εξεταστική επιτροπή της διατριβής μου.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω μου προς τον αδελφικό μου φίλο και συνάδελφο Γεώργιο Ι. Τσιρόπουλο. Θα ήθελα να τον ευχαριστήσω μέσα από τη καρδιά μου για την άριστη συνεργασία μας, την εμπιστοσύνη του, τη ψυχική στήριξη, τη βοήθεια του αλλά και την αλληλοσυμπαράσταση κατά τη κοινή μας πορεία στη διάρκεια της εκπόνησης των διατριβών μας. Η παράλληλη πορεία μας, τα τελευταία χρόνια, είναι γεμάτη από δυσκολίες και έντονες στιγμές που περάσαμε μαζί όπου στάθηκε ο ένας στον πλευρό του άλλου. Η κοινή μας ερευνητική πορεία μας έφερε δυσκολίες αλλά και ευχάριστες στιγμές που θα μείνουν αξέχαστες, όπως οι συνεδριακές ταξιδιωτικές μας περιπέτειες στην Ισλανδία και τη Ρωσία. Οι ατέλειωτες ώρες εργασίας, τα ξενύχτια, οι φρενήρεις ρυθμοί για να προλάβουμε τα πάντα μας έδεσαν με μια σπάνια φιλία που έκανε όλες τις ανυπέρβλητες δυσκολίες που συναντήσαμε πιο εύκολα αντιμετωπίσιμες και για τους δύο. Οι ερευνητικές αναζητήσεις μας αλλά ακόμα και η ανταλλαγή απόψεων σε έντονο ύφος που για τους γύρω έμοιαζε με «καυγά» για μας ήταν μια ιδιόμορφη παραγωγική επικοινωνία που κατέληγε σχεδόν πάντα σε βέλτιστες λύσεις. Εύχομαι αυτή η κοινή μας διαδρομή να αποτελέσει την αρχή για την περαιτέρω κοινή πορεία μας που θα στηρίζεται στις κοινές μας αξίες και ιδέες.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους συναδέλφους μου από το εργαστήριο (κατ' αλφαβητική σειρά): Μάρκο Αναστασόπουλο, Παντελή Αράπογλου, Άννα Βαζιντάρη, Αρτέμη Βουλκίδη, Θανάση Δρούγκα, Σωτήρη Κανελλόπουλο, Αγγελική Κορδαλή, Θανάση Λαζαρόπουλο, Διονυσία Πετράκη, Βασίλη Σακαρέλλο, Αγγελική Σαράφη, Δημήτρη Σκραπαρλή, Μαρία Χορτάτου για τη φιλία τους και τη συνεργασία τους.

Τέλος, σε άμεσα προσωπικό επίπεδο και από το στενότερο συγγενικό και φιλικό περιβάλλον θα ήθελα να εκφράσω την απεριόριστη ευγνωμοσύνη, πρώτα από όλους, προς τους γονείς μου Γρηγόρη και Φιλιώ για την αγάπη τους, την εμπιστοσύνη τους, την υπομονή τους, τις θυσίες τους, την ενθάρρυνση και τη στήριξη που μου παρείχαν απλόχερα κατά τη διάρκεια των σπουδών μου και της ζωής μου. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους προσωπικούς μου φίλους και τους ανθρώπους που ηταν κοντά μου στις ευχάριστες αλλά και στις δύσκολες στιγμές μου, καθώς και σε όλους τους ανθρώπους που συνέβαλλαν με κάθε τρόπο και μέσο στην εκπόνηση και επιτυχή ολοκλήρωση της παρούσας διατριβής.

Δημήτρης Στρατογιάννης

Αθήνα, Μάρτιος 2010

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα 15
Κατάλογος Σχημάτων 19
Κατάλογος Πινάκων 21
Κατάλογος Συντμήσεων 23
Κεφάλαιο 1ο 27
Αρχιτεκτονικές – Τοπολογίες και Πρότυπα Ασυρμάτων Ευρυζωνικών Δικτύων Επικοινωνιών 27
1.1. Εισαγωγή 27
1.2. Κυψελωτή Αρχιτεκτονική και Δίκτυα Επικοινωνιών 29
1.2.1. Τεχνικές Πολλαπλής Πρόσβασης 31
1.2.2. Τεχνικές Κατανομής Πόρων 33
1.3. Ιστορική Εξέλιξη Δικτύων Κυψελωτών Κινητών Επικοινωνιών 34
1.3.1. Τεχνολογίες 1ης Γενιάς (1G) 35
1.3.2. Τεχνολογίες 2ης Γενιάς (2G) 36
1.3.3. Τεχνολογίες 2.5ης Γενιάς (2.5G) 37
1.3.4. Τεχνολογίες 3ης Γενιάς (3G) 39
1.3.5. Τεχνολογίες 4ης Γενιάς (4G) 41
1.4. Η Τεχνολογία Κινητών Επικοινωνιών UMTS και η Μελλοντική Εξέλιξη της 42
1.4.1. Αρχιτεκτονική Δικτύου UMTS 43
1.4.2. Διαχείριση Πόρων στο UMTS 45
1.4.3. Το Πρότυπο HSPA 46
1.4.3.1. Τα πρωτόκολλα HSDPA και HSUPA 48
1.4.3.2. Διαχείριση Πόρων σε Δίκτυα HSDPA 49
1.4.4. Η Τεχνολογία Long Term Evolution (LTE) 51
1.5. Τεχνολογίες Ασυρμάτων Δικτύων Επικοινωνιών 52
1.5.1. Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα WLAN 52
1.5.2. Η Τεχνολογία WiMAX 54
1.6. Διαλειτουργικότητα και Σύζευξη Κυψελωτών Δικτύων Επικοινωνιών με WLAN 56
1.6.1. Αρχιτεκτονική Στενής Σύζευξης (Tight Coupling Architecture) 57
1.6.2. Αρχιτεκτονική Χαλαρής Σύζευξης (Loose Coupling Architecture) 59
1.7. Δομή και Συνοπτική Παρουσίαση της Διατριβής 61
Κεφάλαιο 2ο 65
Παροχή Ποιότητας Υπηρεσίας για Μεταφορά Δεδομένων σε Ασύρματα Δίκτυα Επικοινωνιών 65
2.1. Εισαγωγή 65
2.2. Παροχή Ποιότητας Υπηρεσίας 66
2.3. Παράμετροι Ποιότητας Υπηρεσίας 68
2.4. Μοντέλα Δικτυακών Υπηρεσιών 71
2.4.1. Αρχιτεκτονική Ολοκληρωμένων Υπηρεσιών (IntServ) 72
2.4.2. Αρχιτεκτονική Διαφοροποιημένων Υπηρεσιών (DiffServ) 74
2.4.3. Διαφορές μεταξύ IntServ και DiffServ 75

2.4.4. Αντιστοίχιση Κλάσεων Υπηρεσιών 3G σε IP Δικτυακά Μοντέλα 76
2.5. Κατηγορίες Εφαρμογών Πολυμέσων βάσει Απαιτήσεων Ποιότητας Υπηρεσίας 78
2.6. Αρχιτεκτονικές για παροχή Ποιότητας Υπηρεσίας 79
2.6.1. Δικτυακή Προσέγγιση - Αρχιτεκτονική 79
2.6.2. Διαστρωματική Προσέγγιση – Αρχιτεκτονική 82
Κεφάλαιο 3ο 87
Έλεγχος Αποδοχής Κλήσεων 87
3.1. Εισαγωγή 87
3.2. Αρχές Λειτουργίας Ελέγχου Αποδοχής Κλήσεων 89
3.3. Επισκόπηση Διεθνούς Βιβλιογραφίας 91
3.4. Περιγραφή Δικτύου και Κίνησης σε Κυψελωτά Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα 99
3.4.1. Κριτήρια Απόδοσης Δικτύου 102
3.4.2. Κατηγοριοποίηση Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης – Κλήσεων – σε Κλάσεις Υπηρεσιών για Κυψελωτά Δίκτυα 103
3.5. Πιθανοτικός Αλγόριθμος Δέσμευσης Πόρων 105
3.5.1. Περιγραφή Μοντέλου Δικτύου και Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης 107
3.5.2. Περιγραφή του Σχήματος Αποδοχής Κλήσεων με βάση τους Χρήστες 109
3.5.3. Αριθμητικά Αποτελέσματα και Ανάλυση 114
3.5.4. Συμπεράσματα 119
3.6. Πιθανοτικός Έλεγχος Αποδοχής Κλήσεων 119
3.6.1. Περιγραφή Απλού Σχήματος Πιθανοτικού Ελέγχου Αποδοχής Κλήσεων 121
3.6.1.1. Περιγραφή Μοντέλου Δικτύου και Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης 122
3.6.1.2. Ανάλυση του Σχήματος Αποδοχής Κλήσεων: Η περίπτωση των δύο κλάσεων υπηρεσιών 125
3.6.1.3. Ανάλυση του Σχήματος Αποδοχής Κλήσεων: Η περίπτωση των πολλαπλών κλάσεων υπηρεσιών 130
3.6.1.4. Αριθμητικά Αποτελέσματα και Ανάλυση 132
3.6.2. Περιγραφή Γενικευμένου – Πλήρους Σχήματος Πιθανοτικού Ελέγχου Αποδοχής Κλήσεων 138
3.6.2.1. Περιγραφή Μοντέλου Κίνησης και Δικτυακές Παραδοχές 140
3.6.2.2. Ανάλυση του Γενικευμένου Πιθανοτικού Σχήματος Αποδοχής Κλήσεων: Η περίπτωση της μιας κλάσης υπηρεσιών 141
3.6.2.3. Ανάλυση του Γενικευμένου Πιθανοτικού Σχήματος Αποδοχής Κλήσεων: Η περίπτωση των πολλαπλών κλάσεων υπηρεσιών 143
3.6.2.4. Λογαριθμοκανονική Κατανομή Χρόνου Συγκράτησης Καναλιού-Εξυπηρέτησης 145
3.6.2.5. Αριθμητικά Αποτελέσματα και Ανάλυση 147
3.6.2.6. Συμπεράσματα 152
Κεφάλαιο 4ο 155
Αξιολόγηση Επίδοσης Ελέγχου Αποδοχής Κλήσεων 155
4.1. Εισαγωγή 155
4.2. Επισκόπηση Διεθνούς Βιβλιογραφίας 156
4.3. Κριτήρια Αξιολόγησης Επίδοσης 159
4.3.1. Δείκτης Απόδοσης Προτεραιότητας στις Κλάσεις Υπηρεσιών SCPI 159
4.3.2. Δείκτης Δικαιοσύνης (Fairness Index) 160
4.3.3. Διεκπεραιωτικότητα κλήσεων (Throughput) 162
4.4. Αριθμητικά Αποτελέσματα και Ανάλυση 163
4.4.1. Αξιολόγηση Πιθανοτικού Ελέγχου Αποδοχής Κλήσεων με τον SCPI 164

4.4.2. Αξιολόγηση Πιθανοτικού Ελέγχου Αποδοχής Κλήσεων με το Δείκτη Δικαιοσύνης 166
4.4.3. Αξιολόγηση Πιθανοτικού Ελέγχου Αποδοχής Κλήσεων με το Δείκτη Διεκπεραιωτικότητας 169
4.4.4. Συνδυαστική Αξιολόγηση Πιθανοτικού Ελέγχου Αποδοχής Κλήσεων 171
Κεφάλαιο 5ο 177
Βελτιστοποίηση Πιθανοτικού Ελέγχου Αποδοχής Κλήσεων και Κατανομή Πόρων με χρήση Θεωρίας Παιγνίων 177
5.1. Εισαγωγή 177
5.2. Επισκόπηση Διεθνούς Βιβλιογραφίας 179
5.2.1. Στοιχεία Θεωρίας Παιγνίων 179
5.2.2. Θεωρία Παιγνίων σε Ασύρματα Δίκτυα Επικοινωνιών 182
5.3. Περιγραφή Αλγορίθμου Ελέγχου Αποδοχής Κλήσεων 184
5.3.1. Περιγραφή Μοντέλου Κίνησης και Δικτυακές Παραδοχές 184
5.3.2. Πιθανοτικός Έλεγχος Αποδοχής Κλήσεων 186
5.4. Ενσωμάτωση Σχήματος Τιμολόγησης στον Έλεγχο Αποδοχής Κλήσεων 189
5.5. Παίγνια Κατανομής Πόρων και Διαπραγμάτευσης Τιμών 192
5.5.1. Κατανομή Πόρων και Παίγνιο Ανταγωνισμού 192
5.5.2. Παίγνιο Διαπραγμάτευσης Nash και Δυναμική Τιμολόγηση 197
5.6. Αριθμητικά Αποτελέσματα και Αξιολόγηση Επίδοσης 199
Κεφάλαιο 6ο 207
Συμπεράσματα και Υποδείξεις για Μελλοντική Έρευνα 207
6.1. Συμπεράσματα 207
6.2. Υποδείξεις για Μελλοντική Έρευνα 210
Βιβλιογραφία - Αναφορές 213

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Η εξέλιξη των δικτύων κινητής τηλεφωνίας. 35
Σχήμα 1.2: Εξέλιξη τεχνολογιών δικτύων μετά τη δεύτερη γενιά. 37
Σχήμα 1.3: Ιεραρχική δομή κυψελών στα συστήματα 3G. 40
Σχήμα 1.4: Εξέλιξη ταχύτητας μεταφοράς δεδομένων στις κινητές επικοινωνίες..... 40
Σχήμα 1.5: Αρχιτεκτονική Δικτύου UMTS. 44
Σχήμα 1.6: Αρχιτεκτονική Στενής Σύζευξης (Tight Coupling)..... 57
Σχήμα 1.7: Αρχιτεκτονική Χαλαρής Σύζευξης (Loose Coupling). 59
Σχήμα 2.1: Στοιχεία δικτυακής προσέγγισης για την παροχή QoS..... 80
Σχήμα 2.2: Υλοποίηση παροχής QoS από άκρο σε άκρο. 82
Σχήμα 2.3: Διαστρωματική προσέγγιση παροχής QoS. 84
Σχήμα 3.1: Αλυσίδα Markov για το προτεινόμενο σχήμα αποδοχής κλήσεων. 111
Σχήμα 3.2:Πιθανότητα μη αποδοχής κλήσης μη πραγματικού χρόνου (delay tolerant) συναρτήσει φορτίου πραγματικού χρόνου..... 115
Σχήμα 3.3: Πιθανότητα μη αποδοχής κλήσης πραγματικού χρόνου (delay non tolerant) συναρτήσει φορτίου πραγματικού χρόνου..... 116
Σχήμα 3.4: Πιθανότητα μη αποδοχής κλήσης μη πραγματικού χρόνου (delay tolerant) συναρτήσει φορτίου μη πραγματικού χρόνου..... 117
Σχήμα 3.5: Πιθανότητα μη αποδοχής κλήσης πραγματικού χρόνου (delay non tolerant) συναρτήσει φορτίου μη πραγματικού χρόνου..... 118
Σχήμα 3.6: Αλυσίδα Markov για το σχήμα πιθανοτικού ελέγχου αποδοχής κλήσεων..... 127
Σχήμα 3.7: Πιθανότητα μη αποδοχής κλήσης μη πραγματικού χρόνου (delay tolerant) συναρτήσει φορτίου πραγματικού χρόνου..... 135
Σχήμα 3.8: Πιθανότητα μη αποδοχής κλήσης πραγματικού χρόνου (delay non tolerant) συναρτήσει φορτίου πραγματικού χρόνου..... 135
Σχήμα 3.9: Πιθανότητα μη αποδοχής κλήσης μη πραγματικού χρόνου (delay tolerant) συναρτήσει φορτίου μη πραγματικού χρόνου..... 136
Σχήμα 3.10: Πιθανότητα μη αποδοχής κλήσης πραγματικού χρόνου (delay non tolerant) συναρτήσει φορτίου μη πραγματικού χρόνου..... 137
Σχήμα 3.11: Πιθανότητες μη αποδοχής κλήσεων συναρτήσει μεταβαλλόμενου φορτίου υπηρεσίας SC1 για διάφορες τιμές της παραμέτρου $a_{i,j}$ 149
Σχήμα 3.12: Πιθανότητες μη αποδοχής κλήσεων συναρτήσει μεταβαλλόμενου φορτίου SC1 για διάφορες τιμές των παραμέτρων $a_{i,j}$ και $b_{i,j}$ 150
Σχήμα 3.13: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για τις πιθανότητες μη αποδοχής κλήσεων συναρτήσει μεταβαλλόμενου φορτίου SC1 για διάφορες τιμές της παραμέτρου $a_{i,j}$ 151
Σχήμα 3.14: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για τις πιθανότητες μη αποδοχής κλήσεων συναρτήσει μεταβαλλόμενου φορτίου SC1 για διάφορες τιμές των παραμέτρων $a_{i,j}$ και $b_{i,j}$ 152
Σχήμα 4.1: Δείκτης Δικαιοσύνης συναρτήσει φορτίου πραγματικού χρόνου για διάφορες τιμές του ζεύγους παραμέτρων f^d και f^a 166
Σχήμα 4.2: Δείκτης Δικαιοσύνης συναρτήσει φορτίου μη πραγματικού χρόνου για διάφορες τιμές του ζεύγους παραμέτρων f^d και f^a 167

Σχήμα 4.3: Δείκτης Διεκπεραιωτικότητας συναρτήσει φορτίου πραγματικού χρόνου για διάφορες τιμές του ζεύγους παραμέτρων f^d και f^a. 169
Σχήμα 4.4: Δείκτης Διεκπεραιωτικότητας συναρτήσει φορτίου πραγματικού χρόνου για διάφορες τιμές του ζεύγους παραμέτρων f^d και f^a. 170
Σχήμα 5.1: Γραφική παράσταση συνάρτησης χρησιμότητας 196
Σχήμα 5.2: Βέλτιστες τιμές πιθανοτικών παραμέτρων αποδοχής κλήσεων για μεταβαλλόμενο φορτίο δικτύου κάτω από διάφορα κατώφλια τιμών. 200
Σχήμα 5.3: Πιθανότητες μη αποδοχής κλήσεων και συγκριτική επίδοση των σχημάτων TPS και GTPS συναρτήσει μεταβαλλόμενου φορτίου. 202
Σχήμα 5.4: Μέσος αριθμός χρηστών-κλήσεων σε εξέλιξη- για μεταβλητό φορτίο τηλεπικοινωνιακής κίνησης Narrow Band. 205

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1: Χαρακτηριστικά Συστημάτων HIPERLAN 54
Πίνακας 2.1: Αντιστοίχηση κλάσεων υπηρεσιών 3G σε δικτυακά μοντέλα IP 77
Πίνακας 2.2: Κατηγορίες ποιότητας υπηρεσίας IP σύμφωνα με τη σύσταση της ITU.....78
Πίνακας 3.1: Κλάσεις Υπηρεσιών 3G και QoS Παράμετροι 104
Πίνακας 4.1: Τιμές δείκτη απόδοσης προτεραιότητας SCPI 165
Πίνακας 4.2: Τιμές Δείκτη Δικαιοσύνης 168
Πίνακας 4.3: Τιμές Διεκπεραιωτικότητας..... 171
Πίνακας 4.4: Μεταβολή Δείκτη SCPI..... 172
Πίνακας 4.5: Ποσοστιαία Βελτίωση Δείκτη Δικαιοσύνης..... 173
Πίνακας 4.6: Ποσοστιαία Βελτίωση Δείκτη Διεκπεραιωτικότητας..... 173

Κατάλογος Συντμήσεων

3GPP	3rd Generation Partnership Project
ACK	Acknowledgment
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
AF	Assured Forwarding
AMC	Adaptive Modulation and Coding
AMPS	Advanced Mobile Phone System
ATM	Asynchronous Transfer Mode
BCH	Broadcast Channel
BE	Best Effort
BER	Bit Error Rate
BMC	Broadcast/Multicast Control
BRAN	Broadband Radio Access Network
BS	Base Station
BSC	Base Station Controller
BU	Bandwidth Unit
BWA	Broadband Wireless Access
CAC	Call Admission Control
CBP	Call Blocking Probability
CBR	Constant Bit Rate
CDMA	Code Division Multiple Access
CDP	Call Dropping Probability
CL	Controlled Load
CN	Core Network
CP	Complete Partitioning
CRT	Cell Residence Time
CS	Complete Sharing
DCA	Dynamic Channel Allocation
DF	Default Forwarding
DFS	Dynamic Frequency Selection
DiffServ	Differentiated Services
DNT	Delay Non Tolerant

DS-CDMA	Direct Sequence - Code Division Multiple Access
DSCP	DiffServ Code Point
DT	Delay Tolerant
DTBR	Dual Threshold Bandwidth Reservation
DT-CAC	Dual Threshold Call Admission Control
ECN	Explicit Congestion Notification
E-DCH	Enhanced – Dedicated Channel
EDGE	Enhanced Datarates for Global Evolution
EF	Expedited Forwarding
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FCA	Fixed Channel Allocation
FCC	Federal Communications Commission
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FH-CDMA	Frequency Hoping - Code Division Multiple Access
FIFO	First In First Out
FTP	File Transfer Protocol
GGSN	Gateway GPRS Support Node
GMSC	Gateway Mobile Switching Centre
GPRS	General Packet Radio Service
GPS	Global Positioning System
GS	Guaranteed Service
GSM	Global System for Mobile Communications
GTPS	Game Theoretic Probabilistic Scheme
HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request
HCA	Hybrid Channel Allocation
HLR	Home Location Register
HSCSD	High Speed Circuit Switched Data
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
HS-DSCH	High Speed-Downlink Shared Channel
HSPA	High Speed Packet Access
HSUPA	High Speed Uplink Packet Access
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IETF	Internet Engineering Task Force
IMT-2000	International Mobile Telecommunications – 2000

IntServ	Intergrated Services
IP	Internet Protocol
ITU	International Telecommunication Union
JFI	Jain's Fairness Index
LAN	Local Area Network
LMDS	Local Multipoint Distribution Service
LTE	Long Term Evolution
MAC	Medium Access Control
ME	Mobile Equipment
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MMDS	Multichannel Multipoint Distribution Service
MMM	Mobility Management Module
MMS	Multimedia Messaging Service
MSC	Mobile Switching Center
NAS	Non Access Stratum
NB	Narrow Band
NRT	Non Real Time
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
PBRS	Probabilistic Bandwidth Reservation Scheme
PHB	Per Hop Behavior
PLR	Packet Loss Rate
PPM	Policy Provisioning Module
PRRS	Probabilistic Resource Reservation Scheme
PSTN	Public Switched Telephone Network
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service
RCCT	Requested Call Connection Time
RNC	Radio Network Controller
RRC	Radio Resource Control
RRM	Radio Resource Management
RSVP	Resource Reservation Protocol
RSVP-TE	Resource Reservation Protocol – Traffic Engineering
RT	Real Time

SC	Service Class
SCPI	Service Class Priority Index
SDMA	Space Division Multiple Access
SGSN	Serving GPRS Support Node
SIR	Signal to Interference Ratio
SLA	Service Level Agreement
SLS	Service Level Specifications
SMS	Short Messaging Service
TCP	Transport Control Protocol
TDMA	Time Division Multiple Access
TH-CDMA	Time Hoping - Code Division Multiple Access
TPS	Traditional Probabilistic Scheme
TTI	Transmission Time Interval
TV	Television
UE	User Equipment
USIM	UMTS Subscriber Identity Module
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UTRAN	UMTS Terrestrial Radio Access Network
VLR	Visitor Location Register
VoIP	Voice over Internet Protocol
WAP	Wireless Application Protocol
WB	Wide Band
W-CDMA	Wideband - Code Division Multiple Access
WLAN	Wireless Local Area Network
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access

Κεφάλαιο 1ο

Αρχιτεκτονικές – Τοπολογίες και Πρότυπα Ασυρμάτων Ευρυζωνικών Δικτύων Επικοινωνιών

1.1. Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια οι κοινωνικές και οικονομικές μεταβολές σε συνδυασμό με την αυξανόμενη ανάγκη για επίτευξη υψηλότερης παραγωγικότητας και αποδοτικότητας οδήγησαν σε αλματώδη ανάπτυξη την τεχνολογία των επικοινωνιών. Έτσι, στο σημερινό τοπίο δικτύων επικοινωνιών έχουμε την παρουσία δικτύων ευρείας και περιορισμένης κάλυψης, ασύρματα και ενσύρματα, ευρυζωνικά και μη, καθώς και συστήματα μικρής και μεγάλης κινητικότητας. Αυτές οι τεχνολογίες δικτύων μολονότι φαίνονται ανταγωνιστικές καθώς απευθύνονται στο ίδιο τμήμα της αγοράς τηλεπικοινωνιών, οι περιορισμοί και τα πλεονεκτήματα της καθεμίας τις καθιστούν συμπληρωματικές, με δυνατότητες παράλληλης ανάπτυξης και συνέργειας μεταξύ τους. Παράλληλα, η προσφορά σειράς καινοτόμων υπηρεσιών πέραν της τυπικής επικοινωνίας φωνής, μαζί με την εξάπλωση της χρήσης των υπηρεσιών διαδικτύου, αλλά και σε συνδυασμό με την ανάγκη άρσης των περιορισμών εγκατάστασης των ενσύρματων δικτύων οδήγησαν σε μια διαρκώς αυξανόμενη απαίτηση για ευρεία ασύρματη ευρυζωνική πρόσβαση.

Οι συνθήκες αυτές οδήγησαν σε μια μεγάλη εξάπλωση των ασύρματων δικτύων επικοινωνιών που συνοδεύεται από μια αντίστοιχη διεύρυνση της αγοράς αλλά και του επιστημονικού ενδιαφέροντος στους τομείς αυτούς. Τα ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών με την ποικιλία προτύπων, αρχιτεκτονικών και τεχνολογιών τους είναι σε θέση να προσφέρουν ένα πλήθος λύσεων για την παροχή ασύρματης ευρυζωνικής πρόσβασης με δυνατότητες

κινητικότητας των τελικών χρηστών προσαρμοζόμενα κατά απόλυτο τρόπο στις ανάγκες τόσο των παρόχων όσο και των τελικών χρηστών. Ειδικότερα, προσφέρουν τη δυνατότητα εξυπηρέτησης μεγάλων γεωγραφικών περιοχών χωρίς να απαιτούνται τεράστιες επενδύσεις σε υποδομές, σε αντίθεση με τις αντίστοιχες ενσύρματες τεχνολογίες. Αυτό έχει άλλωστε και άμεσο αντίκτυπο στο χρόνο απόσβεσης των επενδύσεων από την πλευρά των παρόχων. Επιπλέον, ένα πρόσθετο πλεονέκτημα των τεχνολογιών ασύρματης ευρυζωνικης πρόσβασης είτε κινητής είτε σταθερής είναι ότι η εγκατάσταση του δικτύου και των σχετικών υποδομών δε διαταράσσει το φυσικό και ανθρώπινο περιβάλλον ενώ η ανάπτυξη τους χαρακτηρίζεται ως κλιμακωτή αφού επεκτείνεται ανάλογα με τη ζήτηση. Παράλληλα με την εξέλιξη της δικτυακής υποδομής, οι τάσεις που επικρατούν σήμερα ευνοούν την ανάπτυξη εξελιγμένων υπηρεσιών. Έτσι, εκτός από τις κλασικές υπηρεσίες (φωνή, video κλήση, TV broadcasting, κτλ), παρατηρείται η ενσωμάτωση μηχανισμών για εφαρμογές πρωτοκόλλου διαδικτύου IP (Internet Protocol) και μεταφορά δεδομένων, από τις πιο απλές (πλοήγηση, e-mail, κτλ), μέχρι και εφαρμογές πολυμέσων.

Εκτός όμως από τα σημαντικά πλεονεκτήματα που έχει η υιοθέτηση της ασύρματης πρόσβασης για την επικοινωνία των χρηστών υπάρχουν και αρκετοί περιορισμοί που οφείλονται κατά κύριο λόγο στην έλλειψη πόρων με κυριότερο το ραδιοφάσμα, με αποτέλεσμα την αδυναμία ανάπτυξης ασύρματων δικτύων που να λειτουργούν ταυτόχρονα με πολύ μεγάλη χωρητικότητα, υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης αλλά και χαμηλούς ρυθμούς λαθών. Συνάμα, η επίτευξη της διαλειτουργικότητας των δικτύων απαιτεί και την υλοποίηση μηχανισμών που θα γεφυρώνουν το χάσμα μεταξύ των διαφορετικών τεχνολογιών. Για την αντιμετώπιση των ζητημάτων αυτών κρίνεται αναγκαία η έρευνα και ανάπτυξη προηγμένων τεχνικών διαχείρισης πόρων όπως είναι η υλοποίηση αποδοτικών μηχανισμών ελέγχου αποδοχής κλήσεων που θα προσφέρουν τις απαιτούμενες συνθήκες για την εξασφάλιση της παροχής ποιότητας υπηρεσίας QoS (Quality of Service) [1].

Στο πρώτο κεφάλαιο της παρούσας διατριβής, παρουσιάζονται οι βασικές τεχνολογίες που συνθέτουν την υποδομή πάνω στην οποία αναπτύσσονται οι κινητές και ασύρματές επικοινωνίες όπου βρίσκουν κύριο πεδίο εφαρμογής τα ερευνητικά αντικείμενα της διαχείρισης πόρων και του ελέγχου αποδοχής κλήσεων που αποτελούν και το θέμα της παρούσας διδακτορικής διατριβής. Στην αρχή εξετάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά της κυψελωτής αρχιτεκτονικής, των τεχνικών ασύρματης πρόσβασης και της κατανομής πόρων. Έπειτα, περιγράφονται οι τεχνολογίες κινητών επικοινωνιών αναλύοντας την εξέλιξη τους μέσα από την περιγραφή των διαφόρων γενεών (generations). Στη συνέχεια, παρουσιάζονται αναλυτικά οι πιο σύγχρονες τεχνολογίες κινητών επικοινωνιών και ασύρματων δικτύων που

παρέχουν αυξημένες δυνατότητες μεταφοράς πακέτων δεδομένων. Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στα θέματα διαχείρισης πόρων για τα δίκτυα αυτά. Στις τεχνολογίες που εξετάζουμε περιλαμβάνονται κυρίως η τεχνολογία 3ης γενιάς UMTS καθώς και τα σημαντικότερα πρότυπα εξέλιξης της, το HSPA και LTE. Τα πρότυπα αυτά καθώς και τα σχετικά πρωτόκολλα που τα συνοδεύουν προσφέρουν σημαντικές βελτιώσεις στην επίδοση των δικτύων. Επίσης περιγράφονται τα βασικότερα ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών εστιάζοντας κυρίως στα τοπικά δίκτυα WLAN και το πρότυπο IEEE 802.11 και τέλος τα ασύρματα δίκτυα ευρυζωνικής πρόσβασης που αξιοποιούν τα πρωτόκολλα WiMAX IEEE 802.16. Στο τέλος του κεφαλαίου, εξετάζονται τα ζητήματα της σύζευξης και διαλειτουργικότητας των υφιστάμενων τεχνολογιών ασύρματων και κινητών επικοινωνιών που αποτελεί και το συστατικό στοιχείο για την υλοποίηση των δικτύων επόμενης γενιάς. Η συνοπτική παρουσίαση των στοιχείων αυτών είναι αναγκαία διότι μέσα από την κατανόηση της τεχνικής λειτουργίας των συστημάτων είναι καταρχήν πληρέστερη η μελέτη που πραγματοποιούμε αλλά επιπλέον μας βοηθά στην παρουσίαση και την ανάλυση των εξειδικευμένων θεμάτων διαχείρισης πόρων με κατανόηση των δυνατοτήτων εφαρμογής τους στις διάφορες χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες ασυρμάτων επικοινωνιών.

1.2. Κυψελωτή Αρχιτεκτονική και Δίκτυα Επικοινωνιών

Τα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα χρησιμοποιούν υψηλές συχνότητες για την επικοινωνία με αποτέλεσμα τη δημιουργία προβλημάτων κατά τη διαχείριση του διαθέσιμου φάσματος. Επίσης, η φύση της διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στο χώρο, περιορίζει γεωγραφικά την περιοχή ραδιοκάλυψης και επομένως την έκταση της περιοχής εξυπηρέτησης των χρηστών των κινητών υπηρεσιών. Για την αντιμετώπιση των δύο αυτών προβλημάτων, εφαρμόστηκε η κυψελοειδής μέθοδος ραδιοκάλυψης, όπου μια μεγάλη γεωγραφικά περιοχή προκειμένου να καλυφθεί τηλεπικοινωνιακά χωρίζεται σε υποπεριοχές που ονομάζονται κυψέλες.

Οι κυψελωτές επικοινωνίες στηρίζονται στην ύπαρξη ενός κατάλληλου δικτύου σταθμών βάσης. Οι κόμβοι του δικτύου αυτού χρησιμοποιούνται ως πομποί και δέκτες σημάτων. Οι κυψέλες είναι οργανωμένες κατά τέτοιο τρόπο ώστε κάθε κόμβος να χρησιμοποιεί διαφορετική ραδιοσυχνότητα από τους γειτονικούς του. Καθώς ένα κινητό μετακινείται στο χώρο μπορεί να αλλάζει κυψέλες, οπότε η κλήση του μεταβιβάζεται αυτόματα στη συχνότητα της νέας κυψέλης. Εντός των κυψελών γίνεται μια εκπομπή μιας ομάδας συχνοτήτων ή καναλιών/ραδιοδιαύλων με συγκεκριμένη μέθοδο πολυπλεξίας και

μικρή ισχύ, ώστε το σήμα να περιορίζεται κατά το δυνατόν και να καλύπτει μόνο το εμβαδόν της συγκεκριμένης κυψέλης. Για το λόγο αυτό, είναι δυνατόν η ίδια συχνότητα να ξαναχρησιμοποιηθεί για να καλύψει μια άλλη κυψέλη, η οποία βρίσκεται σε ορισμένη απόσταση από την πρώτη (επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων, frequency reuse). Για να περιορισθεί στο ελάχιστο η παρεμβολή μεταξύ τους, οι κυψέλες οργανώνονται σε ομάδες ή δομές των τεσσάρων, επτά, δώδεκα ή περισσότερων κυψελών, εντός των οποίων γίνεται η εκμετάλλευση όλων των διαθέσιμων καναλιών επικοινωνίας. Όσο πιο πολλά είναι τα διαθέσιμα κανάλια μέσα σε μια κυψέλη, τόσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των συνδρομητών που μπορούν να εξυπηρετηθούν.

Η κινητικότητα είναι ένα από τα βασικότερα χαρακτηριστικά των σύγχρονων ασύρματων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων. Οι χρήστες μετακινούνται σε διαφορετικές κυψέλες και αλλάζουν τα κανάλια που χρησιμοποιούν. Η διαδικασία της μεταγωγής σε ένα άλλο κανάλι σε μια διαφορετική κυψέλη του συστήματος ονομάζεται μεταπομπή (handoff). Για την υποστήριξη της διαδικασίας αυτής και κατ' επέκταση της κινητικότητας του χρήστη υπάρχουν κατάλληλες τεχνικές σηματοδοσίας και διαχείρισης των κλήσεων.

Απαραίτητες προϋποθέσεις από τις οποίες εξαρτάται η επιτυχημένη λειτουργία ενός κυψελωτού συστήματος ασυρμάτων επικοινωνιών είναι οι ακόλουθες:

- **Μεγάλη συνδρομητική χωρητικότητα**: Το κυψελωτό σύστημα πρέπει να σχεδιάζεται, έτσι ώστε να επιτρέπει τη διαχείριση μεγάλης τηλεπικοινωνιακής κίνησης (μεγάλου αριθμού κινητών συνδρομητών) εντός και εκτός κατοικημένων περιοχών.
- **Μεγάλη απόδοση του διαθέσιμου φάσματος ραδιοσυχνοτήτων**: Οι συχνότητες λειτουργίας πρέπει να διαχειρίζονται με βέλτιστο τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή απόδοση του διαθέσιμου φάσματος ραδιοσυχνοτήτων.
- **Συμβατότητα**: Τα συστήματα πρέπει να είναι συμβατά μεταξύ τους αναφορικά με το υλικό και το λογισμικό που χρησιμοποιούν σε διεθνές επίπεδο.
- **Προσαρμογή στην εκάστοτε πυκνότητα τηλεπικοινωνιακής κίνησης**: Τα κυψελωτά συστήματα κινητών επικοινωνιών πρέπει να προσαρμόζονται ανάλογα με την εμφανιζόμενη τηλεπικοινωνιακή κίνηση, η οποία είναι δυνατό να μεταβάλλεται σημαντικά, τόσο από περιοχή σε περιοχή, όσο και εντός της ίδιας περιοχής σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα.
- **Ποιότητα επικοινωνίας**: Τα κυψελωτά συστήματα πρέπει να παρέχουν μεταδιδόμενο σήμα υψηλής ποιότητας στους κινητούς συνδρομητές, ώστε οι

αντίστοιχες παρεχόμενες υπηρεσίες να είναι τουλάχιστον ισοδύναμες με αυτές των σταθερών δικτύων.

- **Προσιτό κόστος**: Η σχεδίαση, η υλοποίηση και η εγκατάσταση των κυψελωτών συστημάτων επικοινωνιών θα πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε οι προσφερόμενες υπηρεσίες να είναι προσιτές στο ευρύ κοινό.

Τα κυψελωτά δίκτυα αναπτύχθηκαν αρχικά προκειμένου να αναπτύξουν υπηρεσίες φωνητικής επικοινωνίας και είχαν βασιστεί σε τεχνολογία μεταγωγής κυκλώματος (circuit switching), γεγονός που σημαίνει ότι για την επικοινωνία δυο μερών δεσμεύεται συνεχώς ένα επικοινωνιακό κανάλι, το οποίο τα δυο μέρη χρησιμοποιούν αποκλειστικά και συνεχώς για την επικοινωνία τους ανεξάρτητα από το αν πραγματικά ανταλλάσσουν δεδομένα συνεχώς ή όχι. Η τεχνολογία αυτή είναι κατάλληλη για φωνητική επικοινωνία στην οποία χρειάζεται να υπάρχει συνεχής σύνδεση μεταξύ των ομιλούντων, αλλά όχι και για τις επικοινωνίες δεδομένων, όπου το κανάλι υπό-χρησιμοποιείται όταν δεν υπάρχει ανταλλαγή πληροφορίας (π.χ. όταν ο χρήστης διαβάζει τα δεδομένα που παρέλαβε). Με την πάροδο του χρόνου και λόγω της αυξανόμενης ανάγκης για υπηρεσίες μεταφοράς δεδομένων εκτός φωνής αναδείχθηκαν νέες γενιές κυψελωτών δικτύων, οι οποίες παρέχουν υπηρεσίες μεταφοράς δεδομένων και πολυμέσων χρησιμοποιώντας τεχνολογίες μεταγωγής πακέτων (packet switching). Στις τεχνολογίες αυτές, τα δεδομένα, που πρόκειται να μεταφερθούν μέσω του δικτύου, χωρίζονται σε πακέτα, τα οποία μεταφέρονται ανεξάρτητα στο δίκτυο και επανασυντίθενται στον προορισμό τους. Έτσι γίνεται καλύτερη χρήση του δικτύου και οι χρήστες μπορούν να χρεώνονται με βάση τον όγκο των δεδομένων που ανταλλάσσουν (ογκοχρέωση), αντί για το χρόνο που επικοινωνούν (χρονοχρέωση).

1.2.1. Τεχνικές Πολλαπλής Πρόσβασης

Η πολλαπλή πρόσβαση είναι από τις βασικότερες τεχνικές που επιτρέπει το διαμοιρασμό ενός τηλεπικοινωνιακού μέσου, ώστε να αυξηθεί η συνολική χωρητικότητα του συστήματος [2]. Υπάρχουν τέσσερις βασικές τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης οι οποίες είναι οι πιο διαδεδομένες σε χρήση:

- Πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης συχνότητας FDMA (Frequency Division Multiple Access): Στην τεχνική αυτή το διαθέσιμο εύρος ζώνης διαιρείται σε τμήματα σε προκαθορισμένες ζώνες συχνοτήτων και σε κάθε κλήση εκχωρείται συγκεκριμένο τμήμα για πρόσβαση καθ' όλη τη διάρκεια της. Μεταξύ δυο

γειτονικών τμημάτων θα πρέπει να υπάρχουν ζώνες προστασίας για την αποφυγή παρεμβολών και την εξασφάλιση της εύρυθμης λειτουργίας.

- Πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης χρόνου TDMA (Time Division Multiple Access): Στην τεχνική αυτή οι χρήστες χρησιμοποιούν την ίδια ζώνη συχνοτήτων. Η χρονική χρήση του συνολικού εύρους ζώνης διαιρείται σε χρονοθυρίδες, που οργανώνονται έπειτα σε μια περιοδική δομή που ονομάζεται πλαίσιο. Κάθε χρονοθυρίδα χρησιμοποιείται για τη μεταφορά πακέτου πληροφορίας. Σε κάθε χρήστη κατανέμονται μια ή περισσότερες χρονοθυρίδες ανάλογα με τις απαιτήσεις των κλήσεων.
- Πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης κώδικα CDMA (Code Division Multiple Access): Στην τεχνική αυτή, τα δεδομένα που στέλνονται κωδικοποιούνται με ένα κώδικα διεύρυνσης ψευδοτυχαίας ακολουθίας σε πολύ υψηλότερο ρυθμό, αυξάνοντας με τον τρόπο αυτό το εύρος ζώνης του σήματος εκπομπής. Για το λόγο αυτό, και η τεχνική πρόσβασης CDMA αναφέρεται και ως τεχνική διευρυμένου φάσματος (spread spectrum). Στο δέκτη για την ανάκτηση του σήματος απαιτείται η εκτέλεση της αντίστροφης διαδικασίας με τη χρήση της ίδιας ψευδοτυχαίας ακολουθίας που μόνο ο αποστολέας και ο παραλήπτης του σήματος γνωρίζουν. Το πλεονέκτημα της τεχνικής CDMA έναντι των FDMA και TDMA είναι ότι η επικοινωνία των χρηστών γίνεται ταυτόχρονα στην ίδια περιοχή συχνοτήτων. Η δημιουργία και η χρήση των ψευδοτυχαίων ακολουθιών είναι πολύ σημαντική για το διαχωρισμό των μεταδόσεων στην ίδια ζώνη συχνότητας. Για τη δημιουργία και τη κωδικοποίηση των μεταδιδόμενων σημάτων υπάρχουν οι εξής τρόποι:
    - CDMA Ευθείας ακολουθίας DS-CDMA (Direct Sequence –CDMA) όπου το μεταδιδόμενο σήμα κωδικοποιείται απευθείας με την ψευδοτυχαία ακολουθία.
    - CDMA Αναπήδησης συχνότητας FH-CDMA (Frequency Hopping – CDMA) όπου χρησιμοποιείται ένας ταλαντωτής για την παραγωγή πολλαπλών διακριτών φέρουσων συχνοτήτων. Έχουμε την επαναλαμβανόμενη αλλαγή των συχνοτήτων κατά τη μετάδοση με σκοπό τον περιορισμό και την αποφυγή των παρεμβολών [3].
    - CDMA Αναπήδησης χρόνου TH-CDMA (Time Hopping – CDMA) όπου χρησιμοποιείται όλο το ευρύ φάσμα για μικρά διαστήματα αντί για τμήματα του φάσματος για όλο το χρονικό διάστημα [3].

- Πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση χώρου SDMA (Space Division Multiple Access): Στην τεχνική αυτή έχουμε τη χρήση προσαρμοζόμενων και ευφυών κεραιών πολλαπλών δεσμών, με σκοπό να ξεπεραστεί το πρόβλημα των παρεμβολών από τη χρήση του ιδίου καναλιού. Ο χώρος διαιρείται βάσει της κάλυψης από τις δέσμες της κεραίας. Με τη χρήση κεραιών πολλαπλών δεσμών είναι εφικτή η επικοινωνία με τη χρήση του ίδιου καναλιού συχνότητας από περισσότερους χρήστες υπό την προϋπόθεση ότι οι παρεμβολές από τους πλευρικούς λοβούς είναι αμελητέες.

Εκτός των παραπάνω βασικών τεχνικών πρόσβασης έχουν αναπτυχθεί και υβριδικές τεχνικές μεικτών σχημάτων πρόσβασης που συνδυάζουν τα χαρακτηριστικά των αρχικών τεχνικών, αξιοποιώντας τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η καθεμία με απώτερο στόχο την επίτευξη βέλτιστης λειτουργίας.

1.2.2. Τεχνικές Κατανομής Πόρων

Μια από τις βασικότερες λειτουργίες της διαχείρισης πόρων στα ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών είναι η κατανομή πόρων. Η σημασία της καθίσταται ακόμα πιο μεγάλη δεδομένης της περιορισμένης χωρητικότητας των ασύρματων δικτύων που οφείλεται στην έλλειψη πόρων, όπως το φάσμα, το οποίο θα πρέπει να εκχωρείται κατά τρόπο αποτελεσματικό ώστε να βελτιώνεται η εξυπηρέτηση των χρηστών από το δίκτυο [4]. Η συνύπαρξη πολλών τεχνολογιών ασυρμάτων επικοινωνιών περιορίζει το διαθέσιμο προς χρήση φάσμα συχνοτήτων που είναι ο πιο βασικός πόρος σε έλλειψη. Τα βασικότερα σχήματα κατανομής πόρων χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- Στατική κατανομή καναλιών FCA (Fixed Channel Allocation): Στο σχήμα κατανομής πόρων FCA ο πάροχος υπηρεσιών διαχωρίζει το διαθέσιμο φάσμα σε ζώνες συχνοτήτων. Η κατανομή των καναλιών στις κυψέλες γίνεται βάσει συγκεκριμένου σχεδίου αναχρησιμοποίησης με στόχο την αποφυγή της ομοκαναλικής παρεμβολής όταν γειτονικές κυψέλες χρησιμοποιούν το ίδιο κανάλι. Από τη στιγμή που η κατανομή των καναλιών είναι στατική, το δίκτυο δεν μπορεί να προσαρμοστεί σε διακυμάνσεις ή απότομες μεταβολές της τηλεπικοινωνιακής κίνησης. Συνεπώς, είναι αναγκαία η ανάπτυξη αρκετών σχεδίων αναχρησιμοποίησης συχνοτήτων που να ανταποκρίνονται σε διάφορα σενάρια τηλεπικοινωνιακής κίνησης, όμως παρόλα αυτά το δίκτυο δεν είναι σε θέση να ανταποκριθεί σε μη αναμενόμενα υψηλά φορτία. Για την αντιμετώπιση των διακυμάνσεων της κίνησης

έχει προταθεί η τεχνική του δανεισμού καναλιών, όμως η προσέγγιση αυτή έχει αρκετούς περιορισμούς λόγω πιθανών παρεμβολών. Παρόλα αυτά λόγω της απλότητας στην εφαρμογή της η τεχνική FCA είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη σε χρήση.

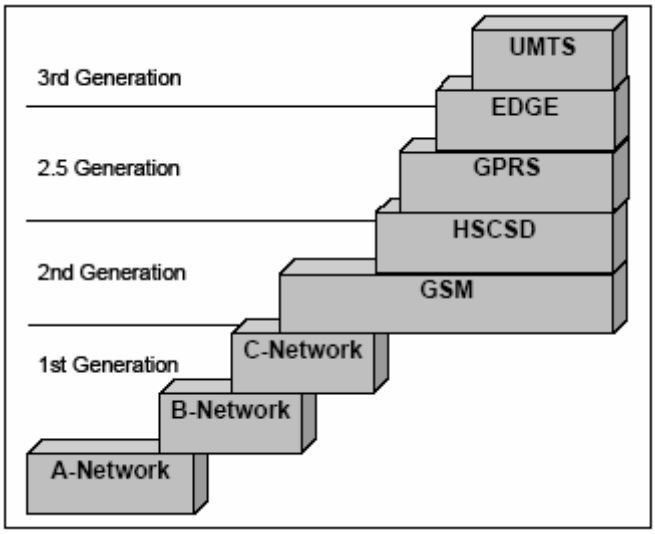
- Δυναμική κατανομή καναλιών DCA (Dynamic Channel Allocation): Στα σχήματα δυναμικής κατανομής όλα τα διαθέσιμα κανάλια συγκεντρώνονται σε μια κοινή «δεξαμενή» και στη συνέχεια κατανέμονται δυναμικά βάσει των αναγκών. Τα σχήματα αυτά έχουν τη δυνατότητα να προσαρμόζονται στις μεταβαλλόμενες συνθήκες της κίνησης όπως η εκρηκτικότητα, καλύτερα από τη στατική κατανομή. Με την τεχνική DCA οι διαθέσιμοι πόροι αξιοποιούνται καλύτερα. Όμως, η πολυπλοκότητα της καθώς και ο συγκεντρωτικός κεντρικός έλεγχος της κατανομής των πόρων αποτελούν τα βασικά μειονεκτήματα της τεχνικής.
- Υβριδική κατανομή καναλιών HCA (Hybrid Channel Allocation): Με την τεχνική αυτή, επιχειρείται να ξεπεραστούν τα μειονεκτήματα των δυο παραπάνω σχημάτων. Στο σχήμα HCA, τα κανάλια χωρίζονται σε δυο ομάδες ανάλογα με τον τρόπο κατανομής τους: στατικής και δυναμικής . Τα κανάλια της στατικής κατανομής χρησιμοποιούνται υπό κανονικές συνθήκες κίνησης και τα κανάλια της δυναμικής κατανομής χρησιμοποιούνται από το δίκτυο για την προσαρμογή του σε περιπτώσεις διακυμάνσεων της κίνησης.

Οι παραπάνω τεχνικές κατανομής καναλιών προορίζονται κατά κύριο λόγο για τεχνολογίες ασυρμάτων επικοινωνιών που αξιοποιούν τις τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης FDMA και TDMA. Στα κυψελωτά δίκτυα που αξιοποιούν την τεχνική πολλαπλής πρόσβασης CDMA το πρόβλημα της κατανομής καναλιών συχνοτήτων επιλύεται, ως ένα βαθμό, λόγω της χρήσης των τεχνικών ευρέος φάσματος.

1.3. Ιστορική Εξέλιξη Δικτύων Κυψελωτών Κινητών Επικοινωνιών

Η ανάπτυξη και εξέλιξη των δικτύων ασυρμάτων κινητών επικοινωνιών χωρίζεται σε τρεις βασικές γενιές συστημάτων και τεχνολογιών. Ανάμεσα στις τρεις γενιές αναπτύχθηκαν και κάποιες υβριδικές τεχνολογίες οι οποίες σαν κύριο στόχο είχαν τη γεφύρωση μεταξύ των γενεών αλλά και την εξασφάλιση της διαλειτουργικότητας των συστημάτων κατά τη μετάβαση από τη μια τεχνολογία στην άλλη. Επίσης θα πρέπει να αναφέρουμε ότι αυτή τη

στιγμή βρίσκεται υπό ανάπτυξη η τέταρτη γενιά δικτύων, η οποία θα φέρει μια πραγματική επανάσταση στο χώρο των ασυρμάτων επικοινωνιών αφού θα γίνει πράξη η σύζευξη των ασυρμάτων τεχνολογιών και προτύπων κάτω από μία ενιαία βάση. Στο σχήμα 1.1, εμφανίζεται η εξέλιξη των τεχνολογιών κινητών επικοινωνιών:



Σχήμα 1.1: Η εξέλιξη των δικτύων κινητής τηλεφωνίας.

1.3.1. Τεχνολογίες 1ης Γενιάς (1G)

Η βασική ιδέα για τα κυψελωτά συστήματα ξεκίνησε το 1947, όταν ερευνητές συνειδητοποίησαν ότι χρησιμοποιώντας μικρές κυψέλες με επαναχρησιμοποίηση συχνότητας μπορούσαν να αναπτύξουν ένα υποτυπώδες σύστημα κινητής επικοινωνίας σύμφωνα με την πρόταση των AT&T Bell Labs. Τα πρώτα εμπορικά συστήματα κυψελωτής κινητής τηλεφωνίας (συστήματα πρώτης γενιάς) εμφανίστηκαν πολύ αργότερα στις Η.Π.Α. (1977), στην Ιαπωνία (1979) και στις Σκανδιναβικές χώρες (1981). Τα συστήματα αυτά βασίζονταν στην αναλογική τεχνολογία και είχαν αρκετούς περιορισμούς, όπως ανεπαρκή χρήση του περιορισμένου φάσματος συχνοτήτων, έλλειψη ή περιορισμένη ικανότητα κρυπτογράφησης και έλλειψη παροχής υποστήριξης για παροχή προηγμένων υπηρεσιών [2]. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιου συστήματος είναι το AMPS (Advanced Mobile Phone System). Τα αναλογικά συστήματα κινητής τηλεφωνίας αποτέλεσαν μεγάλη εμπορική επιτυχία στο χώρο των τηλεπικοινωνιών στη δεκαετία του ’80, με ρυθμούς ανάπτυξης που ξεπέρασαν κατά πολύ τις αρχικές προβλέψεις. Ιδιαίτερα υψηλοί ρυθμοί ανάπτυξης παρατηρήθηκαν στις σκανδιναβικές χώρες αλλά και στη Μ. Βρετανία, όπου ο ανταγωνισμός ανάμεσα στους φορείς εκμετάλλευσης των δικτύων ήταν έντονος. Η απότομη όμως ανάπτυξη

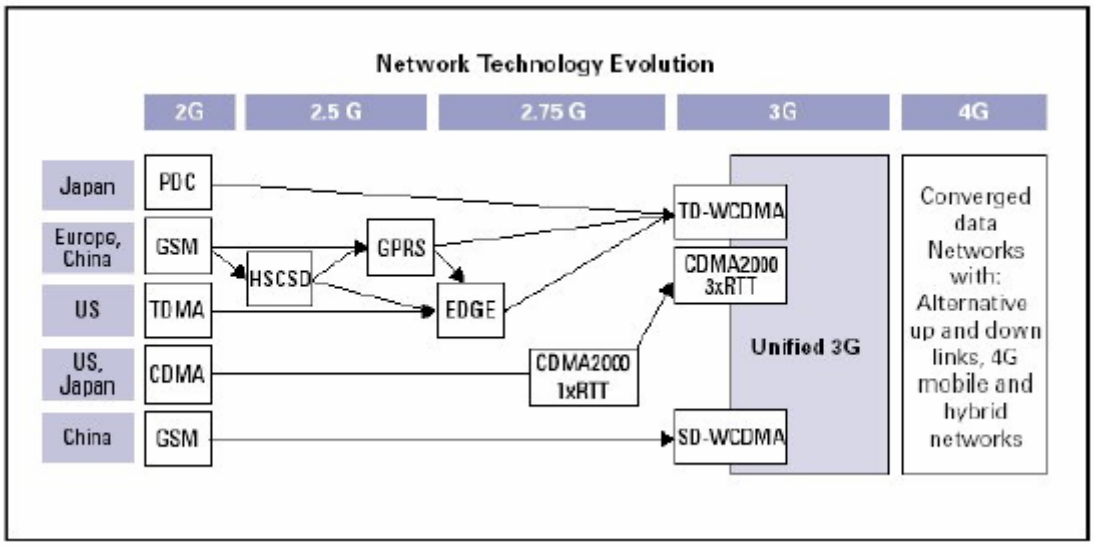
δημιούργησε σταδιακά προβλήματα συμφόρησης στα δίκτυα εξαιτίας των λόγων που προαναφέραμε, δηλαδή λόγω της έλλειψης συχνοτήτων και της μη βέλτιστης χρήσης του φάσματος. Από την άλλη πλευρά, η ανεξάρτητη ανάπτυξη πολλών και διαφορετικών συστημάτων κινητής τηλεφωνίας δημιούργησε προβλήματα ασυμβατότητας μεταξύ των δικτύων. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα ο συνδρομητής ενός δικτύου να μη μπορεί να χρησιμοποιήσει τις υπηρεσίες άλλων δικτύων έξω από τη χώρα του. Βέβαια η εμπειρία από τα συστήματα αυτά ήταν θετική και έδειξε την ανάγκη της αγοράς για παροχή υπηρεσιών κινητών επικοινωνιών.

1.3.2. Τεχνολογίες 2ης Γενιάς (2G)

Προκειμένου να ξεπεραστούν τα προβλήματα της πρώτης γενιάς δικτύων κινητών επικοινωνιών τη δεκαετία του 1980 αναπτύχθηκε η τεχνολογία των ψηφιακών δικτύων κινητών επικοινωνιών. Τα πρώτα τέτοια δίκτυα έγιναν εμπορικά διαθέσιμα στις αρχές της δεκαετίας του 1990. Τα ψηφιακά αυτά δίκτυα είναι γνωστά και ως δίκτυα δεύτερης γενιάς (δίκτυα 2G). Αρχικά αυτά σχεδιάστηκαν μόνο για υπηρεσίες φωνητικής επικοινωνίας. Ωστόσο, με τη συνεχώς αυξανόμενη δημοτικότητα των υπηρεσιών μεταφοράς δεδομένων, οι οποίες μέχρι τότε παρέχονταν από κλειστά ενσύρματα δίκτυα προστιθέμενης αξίας και το επίσης ενσύρματο Διαδίκτυο, οι διαχειριστές δικτύων κινητών επικοινωνιών άρχισαν να χρησιμοποιούν τα κανάλια των δικτύων αυτών για την αποστολή δεδομένων μέσω τεχνολογίας μεταγωγής κυκλώματος.

Τα δίκτυα κινητών επικοινωνιών δεύτερης γενιάς βασίζονται σε τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης με βασικότερες τις TDMA και CDMA στις οποίες θα αναφερθούμε στη συνέχεια. Η χρήση των ψηφιακών τεχνικών πρόσβασης επιτρέπει τη μεταφορά μέσα από το δίκτυο όχι μόνο φωνής αλλά και δεδομένων. Παράλληλα στα συστήματα δεύτερης γενιάς γίνεται χρήση τεχνικών κωδικοποίησης και κρυπτογράφησης με σκοπό την αύξηση της ασφάλειας και της εμπιστευτικότητας των μεταδιδόμενων δεδομένων. Έτσι τα συστήματα δεύτερης γενιάς προσέφεραν καλύτερη ποιότητα επικοινωνίας, καλύτερη ασφάλεια και καλύτερη απόδοση στη διαχείριση του ραδιοφάσματος σε σχέση με τα συστήματα πρώτης γενιάς. Τα στοιχεία αυτά σε συνδυασμό με τη βελτίωση της ποιότητας επικοινωνίας και το χαμηλό σχετικά κόστος έδωσαν τεράστια ώθηση στην αγορά της κινητής τηλεφωνίας. Το βασικότερο πρότυπο συστημάτων δεύτερης γενιάς το οποίο έχει επικρατήσει σε όλο τον κόσμο είναι το GSM (Global System for Mobile Communications) [5]. Επιπλέον για την υποστήριξη της πρόσβασης σε διαδικτυακό περιεχόμενο και τις

εφαρμογές πάνω σε δίκτυα δεύτερης γενιάς αναπτύχθηκε επίσης ένα πρωτόκολλο ασυρμάτων εφαρμογών, που είναι γνωστό ως WAP (Wireless Application Protocol). Στο σχήμα 1.2 εμφανίζεται η εξέλιξη των τεχνολογιών δικτύων κινητής τηλεφωνίας μετά τη δεύτερη γενιά:



Σχήμα 1.2: Εξέλιξη τεχνολογιών δικτύων μετά τη δεύτερη γενιά.

1.3.3. Τεχνολογίες 2.5ης Γενιάς (2.5G)

Τα δίκτυα δεύτερης γενιάς δεν ήταν ικανά να ικανοποιήσουν τη ζήτηση για νέες υπηρεσίες στα πρότυπα αυτών του Διαδικτύου, καθώς βασιζόντουσαν σε χαμηλούς ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων επειδή η φύση τέτοιων υπηρεσιών βασίζεται στην τεχνολογία μεταγωγής πακέτων, όπου η πληροφορία μεταδίδεται σε πακέτα δεδομένων. Αυτό ερχόταν σε αντίθεση με τη χρησιμοποιούμενη τεχνολογία μεταγωγής κυκλώματος, όπου η πληροφορία μεταφερόταν ολόκληρη χάρη σε μια σύνδεση αφιερωμένη αποκλειστικά σε αυτή τη μεταφορά. Για να ικανοποιηθούν οι αυξανόμενες απαιτήσεις των κινητών συνδρομητών δημιουργήθηκε ένα μεταβατικό στάδιο ανάμεσα στη δεύτερη και τη τρίτη γενιά. Επιπλέον, λόγω των αρκετά μεγάλων δυσκολιών και του υψηλού κόστους ανάπτυξης δικτύων τρίτης γενιάς πολλοί διαχειριστές δικτύων επέλεξαν να διευκολύνουν το δρόμο μετάβασης από τη δεύτερη στη τρίτη γενιά κινητής τηλεφωνίας, αναπτύσσοντας τη μεταβατική τεχνολογία 2.5G η οποία παρέχει υπηρεσίες υψηλής ταχύτητας μεταφοράς δεδομένων (της τάξης των 144 Kbps) σε ζώνες συχνοτήτων που ήδη υπάρχουν και λειτουργούν στα δίκτυα 2G.

Η βασική επέκταση του συστήματος GSM για την υποστήριξη μεταφοράς δεδομένων έγινε με την υιοθέτηση του πρωτοκόλλου HSCSD (High Speed Circuit Switched Data) το οποίο επιτρέπει ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων αρκετά υψηλότερους σε σχέση με το GSM. Με το πρωτόκολλο HSCSD μπορούμε να έχουμε πιο σύνθετες εφαρμογές, όπως αυτές του δικτυακού περιεχομένου αφού η μέγιστη δυνατή θεωρητική δυνατότητα μεταφοράς δεδομένων είναι ανάλογη αυτής των χρονοθυρίδων που είναι ίση με 14,4 Kbps/χρονοθυρίδα. Μέσα από το πρωτόκολλο αυτό είχαμε για πρώτη φορά την ανάπτυξη του κινητού Διαδικτύου. Το βασικό μειονέκτημα αυτού του πρωτοκόλλου είναι το γεγονός ότι ο μηχανισμός χρέωσης που χρησιμοποιείται βασίζεται στο χρόνο σύνδεσης. Δηλαδή ακόμα και αν δεν μεταφέρονται δεδομένα ο χρήστης χρεώνεται για το χρόνο σύνδεσης.

Η τεχνολογία 2.5G περιλαμβάνει επίσης πρότυπα όπως είναι το CDMA 2000 1x που είναι ο προκάτοχος του CDMA 2000 3x που χρησιμοποιείται στα δίκτυα τρίτης γενιάς καθώς και το πρότυπο GPRS (General Packet Radio Service) που είναι ο προκάτοχος του W-CDMA (Wideband – Code Division Multiple Access) [6]. Η εισαγωγή του GPRS αποτελεί ένα σταθμό στην εξέλιξη του συστήματος GSM. Με την ανάπτυξη του GPRS έχουμε την εισαγωγή στα υπάρχοντα δίκτυα GSM της δυνατότητας μεταφοράς πακέτων, την επίτευξη υψηλών ρυθμών μεταφοράς δεδομένων καθώς και τη δυνατότητα παροχής αδιάλειπτης σύνδεσης μεταφοράς δεδομένων στα κινητά τηλέφωνα. Αυτό σημαίνει ότι ο χρήστης μπορεί να είναι συνεχώς συνδεδεμένος στο κινητό Διαδίκτυο και να χρεώνεται μόνο όταν στέλνει ή λαμβάνει δεδομένα με μορφή πακέτων.

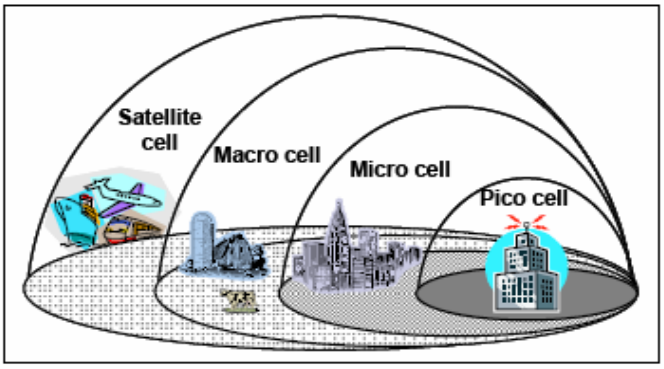
Ένα άλλο πρότυπο δικτύων αυτής της γενιάς είναι το EDGE (Enhanced Datarates for Global Evolution), το οποίο παρέχει ταχύτητες 384 Kbps. Το πρωτόκολλο EDGE είναι η τεχνολογία που δίνει στα δίκτυα GSM την απαιτούμενη χωρητικότητα και ταχύτητα ώστε να επιτρέπεται η χρήση τους για την παροχή υπηρεσιών τρίτης γενιάς. Με τη χρήση του EDGE επιτυγχάνονται σημαντικές βελτιώσεις στα χρησιμοποιούμενα πρωτόκολλα κάνοντας πιο αποτελεσματική τη χρήση του ραδιοφάσματος. Ουσιαστικά παρέχονται υπηρεσίες πολυμέσων παρόμοιες με αυτές των δικτύων τρίτης γενιάς [5]. Συγκεκριμένα, η τεχνολογία EDGE επιτρέπει ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων τρεις φορές μεγαλύτερες από το GPRS, οπότε μπορούν να εξυπηρετηθούν τρεις φορές περισσότεροι συνδρομητές ανά περιοχή. Με τον τρόπο αυτό, γίνεται εφικτή η παροχή υπηρεσιών πολυμέσων, τηλεσυνδιάσκεψης, αναπαραγωγής video, καθώς και η πλοήγηση στο κινητό Διαδίκτυο με υψηλές ταχύτητες. Τα σημαντικά αυτά πλεονεκτήματα έχουν κάνει κάποιους επιστήμονες να χαρακτηρίζουν τα δίκτυα αυτά 2.75G. Τυπικά, όλα τα πρότυπα δικτύων 2.5G σε σχέση με

τα δίκτυα 2G παρέχουν υψηλότερες ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων, επιτρέποντας στους χρήστες να χρησιμοποιούν περισσότερα από ένα φωνητικά κανάλια, δυνατότητα μεταγωγής πακέτων για τη μεταφορά δεδομένων και επιπλέον παρέχεται η δυνατότητα ευέλικτης χρέωσης. Φυσικά η εξέλιξη προχώρησε στα δίκτυα τρίτης γενιάς με ακόμα μεγαλύτερες δυνατότητες όπως θα δούμε στη συνέχεια.

1.3.4. Τεχνολογίες 3ης Γενιάς (3G)

Στο πλαίσιο της άρσης των περιορισμών των δικτύων κινητών επικοινωνιών δεύτερης γενιάς και την αποτελεσματικότερη χρήση τους από δικτυακές εφαρμογές η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU) ανακοίνωσε μια σειρά προδιαγραφών για την επόμενη γενιά κυψελωτών δικτύων με την ονομασία IMT-2000 (International Mobile Telecommunications – 2000). Οι προδιαγραφές αυτές προέβλεπαν: ποιότητα φωνής συγκρίσιμη με το δημόσιο τηλεφωνικό δίκτυο, 144 Kbps ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων διαθέσιμη για χρήστες υψηλής κινητικότητας (οχήματα), 384 Kbps ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων διαθέσιμη για χρήστες με μικρή κινητικότητα (πεζούς), 2 Mbps για σταθερούς χρήστες. Επιπλέον, προέβλεπαν συμμετρικούς και ασύμμετρους ρυθμούς εκπομπής, υποστήριξη δυνατότητας μεταγωγής κυκλώματος και πακέτων, προσαρμόσιμη διασύνδεση με το Διαδίκτυο, αποτελεσματικότερη χρήση του διαθέσιμου εύρους ζώνης, υποστήριξη ποικιλίας εξοπλισμού κινητής τηλεφωνίας και τέλος ελαστικότητα στην εισαγωγή νέων υπηρεσιών και τεχνολογιών.

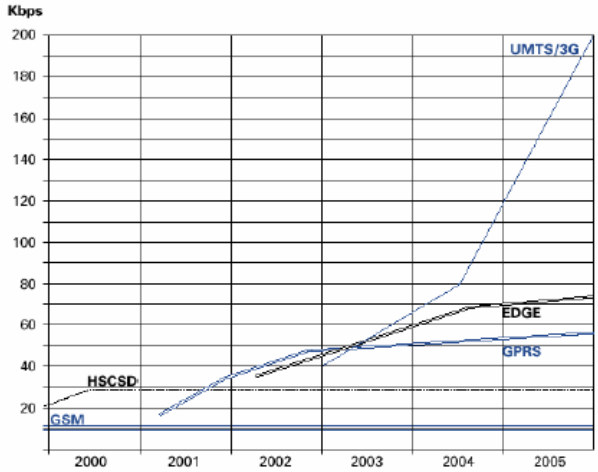
Τα δίκτυα αυτά είναι γνωστά ως δίκτυα τεχνολογίας τρίτης γενιάς, έχουν σχεδιαστεί για την παροχή παγκόσμιας επικοινωνίας με ολοκληρωμένες υπηρεσίες μετάδοσης φωνής και δεδομένων, εικόνας, γραφικών, βίντεο και γενικά υπηρεσιών με μεγάλες απαιτήσεις εύρους ζώνης όπως οι υπηρεσίες πολυμέσων. Τα δίκτυα τρίτης γενιάς αξιοποιούν τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας μεταγωγής πακέτων που περιλαμβάνουν τη δυνατότητα για συνεχή σύνδεση και την εξάλειψη του σταδίου εγκατάστασης σύνδεσης, το οποίο απαιτείται στην περίπτωση δικτύων με μεταγωγή κυκλώματος. Επιπλέον, οι χρήστες χρεώνονται βάσει της ποσότητας των δεδομένων που ανταλλάσσουν (ογκοχρέωση) και όχι βάσει της διάρκειας σύνδεσης (χρονοχρέωση). Το ευρωπαϊκό πρότυπο τρίτης γενιάς είναι γνωστό ως UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) και βασίζεται στην τεχνολογία πρόσβασης W – CDMA. Η υψηλή ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων καθιστά τα δίκτυα αυτά κατάλληλα για εφαρμογές πραγματικού χρόνου καθώς και για εφαρμογές που ο χρόνος είναι κρίσιμης σημασίας (time-critical applications).



Σχήμα 1.3: Ιεραρχική δομή κυψελών στα συστήματα 3G.

Τα δίκτυα UMTS βασίζονται σε μια ιεραρχική δομή κυψελών όπου έχουμε: α) πικοκυψέλες (picocells) όπου παρέχονται ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων 2048 Kbps με την προϋπόθεση ότι η ασύρματη συσκευή παραμένει σε γεωγραφική εμβέλεια 50 μέτρων (π.χ. εντός ενός κτιρίου), β) μικροκυψέλες (microcells) όπου παρέχονται ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων 384 Kbps και αναφέρονται κυρίως σε αστικές περιοχές για χρήστες περιορισμένης κινητικότητας μέσα σε μια γεωγραφική εμβέλεια από 50 έως 350 μέτρα, γ) μακροκυψέλες (macrocells) όπου παρέχονται ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων 144 Kbps και αναφέρονται κυρίως σε ημιαστικές περιοχές και την ύπαιθρο για χρήστες αυξημένης κινητικότητας μέσα σε μια γεωγραφική εμβέλεια από 350 μέτρα έως 20 χιλιόμετρα ανάλογα με την τοπολογία της περιοχής και την πληθυσμιακή πυκνότητα και τέλος δ) δορυφορικές κυψέλες (satellite cells) με τις ποιες υποστηρίζεται η παγκόσμια κάλυψη και η δυνατότητα παγκόσμιας περιαγωγής. Στο σχήμα 1.3 παρουσιάζεται η ιεραρχική δομή των κυψελών των συστημάτων τρίτης γενιάς.

Στο σχήμα 1.4. μπορούμε να δούμε την εξέλιξη της ταχύτητας μεταφοράς δεδομένων μέσα από τις διάφορες τεχνολογίες που αναφέραμε:



Σχήμα 1.4: Εξέλιξη ταχύτητας μεταφοράς δεδομένων στις κινητές επικοινωνίες.

Η τεχνολογία τρίτης γενιάς με τις πολύ υψηλές ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων αναμένεται να προσφέρει σημαντικά οφέλη όπως: α) γρήγορη πρόσβαση στο Διαδίκτυο με ταχύτητες παρόμοιες με αυτές της τεχνολογίας ενσύρματων επικοινωνιών ADSL, β) εφαρμογές πολυμέσων σε πραγματικό χρόνο όπου σε αυτές περιλαμβάνονται υψηλής ποιότητας ήχος, εικόνα ακόμη και δυνατότητα τηλεδιάσκεψης από το κινητό γ) υψηλής ταχύτητας μετάδοση μηνυμάτων, συμπεριλαμβανομένων και των MMS αλλά και μηνυμάτων e-mail, τα οποία πλέον θα αποστέλλονται και θα λαμβάνονται σε ελάχιστο χρόνο και δ) υπηρεσίες εύρεσης θέσεως, σε συνδυασμό με την τεχνολογία GPS. Μετά την ευρεία διείσδυση της τεχνολογίας 3G αναμένεται να διατεθούν ακόμη περισσότερες υπηρεσίες, όπως μετάδοση τηλεοπτικών εκπομπών και υπηρεσίες παγκόσμιας περιαγωγής.

1.3.5. Τεχνολογίες 4ης Γενιάς (4G)

Οι υπηρεσίες τρίτης γενιάς αρχίζουν να επεκτείνονται σταδιακά και να κερδίζουν ολοένα και περισσότερους χρήστες με τις καινοτόμες υπηρεσίες τους. Παράλληλα η επιστημονική κοινότητα προχωρά και εστιάζει στην ανάπτυξη των συστημάτων τέταρτης γενιάς που θα είναι διαθέσιμα στους χρήστες στο προσεχές μέλλον. Στην ενότητα αυτή, θα προσπαθήσουμε να παρουσιάσουμε σύντομα τις βασικές διαστάσεις της τεχνολογίας επικοινωνιών τέταρτης γενιάς.

Απώτερος στόχος είναι η ανάπτυξη ενός ενιαίου ολοκληρωμένου συστήματος επικοινωνιών το οποίο θα επιτρέπει έναν πάντα ενεργό και πάντα βέλτιστα συνδεδεμένο τρόπο επικοινωνίας. Αυτή η βασική ευρέως αποδεκτή ιδέα σκιαγραφεί ένα ετερογενές τοπίο επικοινωνίας το οποίο θα περιλαμβάνει διάφορα συστήματα ενσύρματης και ασύρματης πρόσβασης (PSTN/ADSL, GSM/GPRS, UMTS, WLAN, WiMAX) με έναν ολοκληρωμένο τρόπο, όπου ο χρήστης θα μπορεί να απολαμβάνει απρόσκοπτη συνδεσιμότητα μέσω πολλών διαφορετικών δικτύων επικοινωνιών και συνεχή πρόσβαση σε εφαρμογές, αξιοποιώντας τον πιο αποτελεσματικό συνδυασμό των διαθέσιμων ασύρματων και ενσύρματων συστημάτων και δικτύων επικοινωνιών [7]. Τα μελλοντικά συστήματα επικοινωνιών θα είναι ετερογενή στη φύση τους σχηματίζοντας ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον το οποίο θα συνδυάζει διάφορες ασύρματες τεχνολογίες και συστήματα πρόσβασης με έναν ολοκληρωμένο τρόπο. Αυτά τα ανεξάρτητα δίκτυα πρόσβασης θα συνδέονται σε στοιχεία στον πυρήνα του δικτύου και θα στηρίζονται στο πρωτόκολλο IP. Η χρήση του πρωτοκόλλου αυτού γίνεται προκειμένου να εξασφαλιστεί μια κοινή βάση και να διασφαλιστεί η διαλειτουργικότητα με τις υπάρχουσες επικοινωνιακές υποδομές.

Ανεξάρτητα από τις εσωτερικές τεχνικές λεπτομέρειες τους όπως οι χρησιμοποιούμενες συχνότητες, το πρωτόκολλο σηματοδοσίας, τα πρότυπα διεπαφών, τα ετερογενή δίκτυα ασύρματης πρόσβασης αναμένεται να έχουν ορισμένα στοιχεία που θα επιτρέπουν την ενοποίηση τους, όπως ο μηχανισμός δυναμικής ανάθεσης διευθύνσεων, η δυνατότητα ασφαλούς και διαφανούς μεταγωγής και τέλος η επαναδιαμόρφωση οντοτήτων του τερματικού και του δικτύου. Επιπλέον, τα δίκτυα τέταρτης γενιάς θα προσφέρουν μια πληθώρα από διαφορετικές υπηρεσίες και εφαρμογές πολυμέσων λόγω των υψηλών ρυθμών μεταφοράς δεδομένων της τάξης των 100 Mbps.

Στα δίκτυα επικοινωνιών τέταρτης γενιάς ο χρήστης θα προσδοκά να μπορεί να έχει πρόσβαση στις ίδιες υπηρεσίες από μια ποικιλία τερματικών με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Για να επιτευχθεί η ανάπτυξη των δικτύων αυτών απαιτείται η εξασφάλιση της διαφανούς κινητικότητας του χρήστη ανάμεσα στις διάφορες τεχνολογίες πρόσβασης με ελάχιστη ή μηδενική μεσολάβηση του χρήστη. Για το λόγο αυτό, αναπτύσσονται νέες τεχνικές και μηχανισμοί διαχείρισης κινητικότητας εξασφαλίζοντας την αποτελεσματική λειτουργία των ενοποιημένων δικτύων και τη διαχείριση πόρων. Επιπλέον, στα συστήματα αυτά η παροχή απαιτήσεων ποιότητας υπηρεσίας είναι ουσιαστικά συνδεδεμένη με την εφαρμογή διαφορετικών σχημάτων τιμολόγησης και έκδοσης λογαριασμού.

Τα χαρακτηριστικά που προαναφέραμε θα δώσουν μια σημαντική ώθηση στην τεχνολογία επικοινωνιών αφού αναμένεται να δημιουργήσουν νέες τεχνολογικές και επιχειρηματικές ευκαιρίες για όλους τους εμπλεκόμενους. Τα δίκτυα επικοινωνιών τέταρτης γενιάς αποτελούν λοιπόν το επόμενο βήμα εξέλιξης και αναμένεται να είναι μαζικά διαθέσιμα γύρω στο 2015.

1.4. Η Τεχνολογία Κινητών Επικοινωνιών UMTS και η Μελλοντική Εξέλιξη της

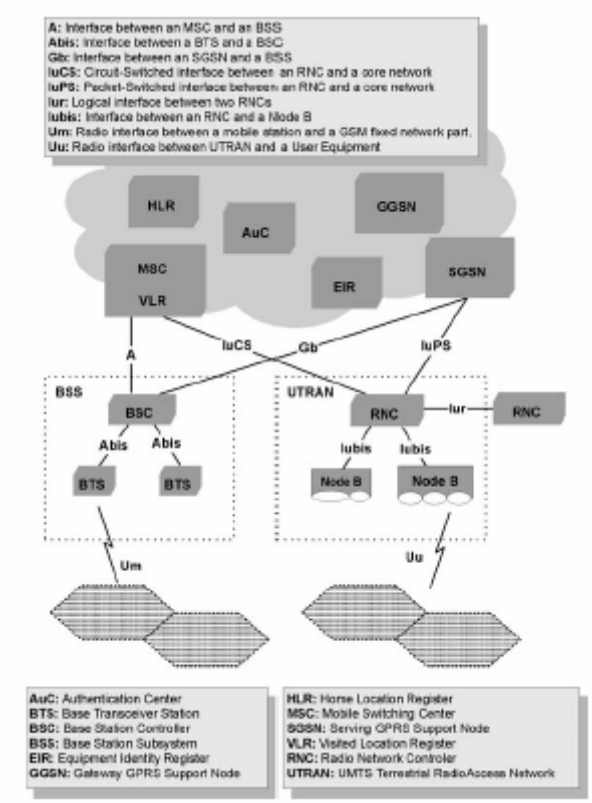
Η τεχνολογία UMTS αποτελεί την τρίτη γενιά της εξέλιξης των δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Η τεχνολογία αυτή είναι σήμερα η πιο διαδεδομένη σε χρήση από ασύρματα δίκτυα κινητών επικοινωνιών. Η τεχνολογία αυτή παρέχει ευρυζωνικές δυνατότητες μετάδοσης πακέτων δεδομένων με ρυθμούς της τάξης των 2 Mbps προσφέροντας στους χρήστες των κινητών τηλεφώνων ή σε υπολογιστές συνδεδεμένους στο κινητό Διαδίκτυο ψηφιακές υπηρεσίες υψηλής ποιότητας. Το UMTS προσφέρει πολύ πιο γρήγορη πρόσβαση στο κινητό διαδίκτυο από οτιδήποτε γνωρίζαμε ως σήμερα και ενοποιεί τις τεχνολογίες μεταγωγής πακέτων και κυκλώματος στη μετάδοση δεδομένων και επομένως προσφέρει

προηγμένη και ευέλικτη παροχή QoS. Αυτή η τεχνολογία θα οδηγεί τις επικοινωνίες του 21ου αιώνα, παρέχοντας καθολική πρόσβαση σε υπηρεσίες πολυμέσων, ανεξάρτητα τοποθεσίας, δικτύου και τερματικού που χρησιμοποιείται [8]. Οι υπηρεσίες αυτές περιλαμβάνουν εφαρμογές πραγματικού χρόνου όπως δυνατότητα τηλεσυνδιάσκεψης, υπηρεσίες ελεγχόμενης μεταβλητότητας στην καθυστέρηση (streaming) κ.α. Βέβαια, για τη βελτίωση των ρυθμών μετάδοσης δεδομένων που υπόσχεται η τεχνολογία UMTS έχουν αναπτυχθεί κατάλληλα πρότυπα όπως είναι το HSPA το οποίο στηρίζεται στη βελτίωση του W-CDMA και επιτυγχάνει σημαντικά ανώτερη επίδοση.

1.4.1. Αρχιτεκτονική Δικτύου UMTS

Η τεχνολογία UMTS βασίζεται στο πρότυπο GSM, το οποίο άλλωστε πρόκειται να αντικαταστήσει. Όπως ήδη αναφέρθηκε, η τεχνολογία UMTS απαιτεί την εγκατάσταση ενός νέου δικτύου με ανεξάρτητους σταθμούς βάσης και ελεγκτές δικτύου. Το σύστημα τρίτης γενιάς λειτουργεί στη ζώνη συχνοτήτων των 2 GHz. Η επιλογή της συχνότητας αυτής έγινε προκειμένου να επιτευχθεί μεγαλύτερη χωρητικότητα, καθώς και καλύτερη ποιότητα επικοινωνίας [8]. Το UMTS πετυχαίνει τη χρήση του επικοινωνιακού καναλιού με τρόπο πολύ αποδοτικό, με την ανάμειξη ενός πλήθους υπηρεσιών πολυμέσων, ώστε να παρέχει μειωμένο κόστος. Ένας παράγοντας που καθιστά το UMTS ανώτερο των συστημάτων δεύτερης γενιάς είναι η δυνατότητά του να παρέχει διαδραστικές υπηρεσίες πολυμέσων και άλλες υπηρεσίες μεγάλου εύρους. Το UMTS θα έχει τη δυνατότητα μετάδοσης κινούμενης εικόνας αλλά και πολλαπλής εικονοσυνεδρίας. Το τελευταίο θα δώσει τη δυνατότητα για πρωτοποριακές υπηρεσίες, όπως είναι η ιατρική διάγνωση από απόσταση και η υποστήριξη συστημάτων ασφαλείας και παρακολούθησης. Οι τερματικές συσκευές θα εμφανίζονται σε πολλές μορφές και συχνά προσαρμοσμένες σε ειδικές περιπτώσεις. Με την πλήρη ανάπτυξη του δικτύου οι συνδρομητές θα μπορούν να βρίσκονται συνεχώς συνδεδεμένοι στο διαδίκτυο ακόμα και όταν ταξιδεύουν οπουδήποτε. Για την υποστήριξη των μεταπομπών χρησιμοποιείται η ιεραρχική οργάνωση των κυψελών, στην οποία αναφερθήκαμε στις τεχνολογίες τρίτης γενιάς, αλλά και μια πληθώρα ασυρμάτων επίγειων και δορυφορικών ζεύξεων. Τα δίκτυα UMTS απαιτούν σημαντικές επενδύσεις για την ανάπτυξή τους. Αναφέρεται μάλιστα ότι το κόστος ανάπτυξης του δικτύου είναι είκοσι φορές μεγαλύτερο από την αναβάθμιση του υπάρχοντος δικτύου GSM με τις τεχνολογίες GPRS και EDGE.

Η αρχιτεκτονική του δικτύου UMTS παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα 1.5:



Σχήμα 1.5: Αρχιτεκτονική Δικτύου UMTS.

Τα κύρια στοιχεία του δικτύου UMTS είναι το δίκτυο πρόσβασης ραδιοσυχνοτήτων UTRAN (UMTS Terrestrial Radio Access Network), το οποίο χειρίζεται όλες τις ραδιοκυματικές λειτουργίες καθώς και το κεντρικό δίκτυο CN (Core Network), το οποίο είναι υπεύθυνο για τη μεταγωγή και τη δρομολόγηση των συνδέσεων προς τα εξωτερικά δίκτυα κλήσεων και δεδομένων. Τέλος, το σύστημα συμπληρώνεται από τον εξοπλισμό χρήστη UE (User Equipment). Πιο συγκεκριμένα, το δίκτυο πρόσβασης ραδιοσυχνοτήτων UTRAN αποτελείται από τον κόμβο B (node B) και τον ελεγκτή ραδιοδικτύου RNC (Radio Network Controller). Ο RNC είναι το σημείο πρόσβασης για όλες τις υπηρεσίες που παρέχει το UTRAN στο κεντρικό δίκτυο (CN), για παράδειγμα τη διαχείριση των συνδέσεων με τον εξοπλισμό χρήστη. Ουσιαστικά ο RNC στα δίκτυα UMTS έχει τον ίδιο ρόλο με τον ελεγκτή σταθμού βάσης BSC (Base Station Controller) στα δίκτυα δεύτερης γενιάς. Η διαφορά τους έγκειται στο ότι ενώ στα δίκτυα δεύτερης γενιάς οι BSC δεν είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους, στο UMTS οι RNC συνδέονται απ' ευθείας. Οι βασικές μονάδες του κεντρικού δικτύου CN περιλαμβάνουν: τον καταχωρητή θέσης συνδρομητών δικτύου HLR, το κινητό κέντρο μεταγωγής MSC, τον καταχωρητή θέσης επισκεπτών VLR, την πύλη κέντρου κινητής μεταγωγής GMSC, τον κόμβο υποστήριξης πελατών GPRS GGSN και τον εξυπηρετούντα GPRS κόμβο υποστήριξης SGSN, που λειτουργούν όπως περιγράφηκε σε

προηγούμενες ενότητες. Τέλος, ο εξοπλισμός χρήστη UE αποτελείται από τον κινητό εξοπλισμό ME (Mobile Equipment) που είναι το τερματικό (κινητό τηλέφωνο, φορητός υπολογιστής κ.α.) και το δομοστοιχείο ταυτότητας συνδρομητή USIM (UMTS Subscriber Identity Module). Το USIM περιέχει την ταυτότητα του συνδρομητή, υλοποιεί αλγορίθμους πιστοποίησης γνησιότητας και κρυπτογράφησης. Από πλευράς τέλος προτύπων και ειδικών χαρακτηριστικών θα πρέπει να αναφέρουμε ότι η τεχνολογία UMTS αποτελείται από καινούρια πρωτόκολλα.

Σήμερα, η κυρίαρχη προτεινόμενη αρχιτεκτονική για το UMTS είναι αυτή που προτείνεται από τη 3GPP για IP-based δίκτυα κινητών επικοινωνιών. Οι βασικές λειτουργικές οντότητες είναι δανεισμένες από το GPRS, ενώ υπάρχουν και οι απαραίτητες πύλες (gateways) προς άλλα δίκτυα, όπως το κλασικό δίκτυο Internet, το τηλεφωνικό δίκτυο PSTN (Public Switched Telephone Network) και τα δίκτυα 2ης γενιάς. Η υποστήριξη των υπηρεσιών δεύτερης γενιάς αποτελεί σοβαρή απαίτηση, αφού οι συνδρομητές που έχουν συνηθίσει να χρησιμοποιούν τις υπηρεσίες του GSM ενδέχεται να μην είναι διατεθειμένοι να τις εγκαταλείψουν όταν θα κάνουν χρήση του καινούργιου συστήματος UMTS ή όταν θα μετασχηματισθούν σ' ένα τέτοιο σύστημα.

Σε γενικές γραμμές, οι απαιτήσεις από το βασισμένο στην τεχνολογία IP δίκτυο κορμού του UMTS συνοψίζονται στα εξής:

- Υποστήριξη περιαγωγής και μεταπομπής σε δίκτυα δεύτερης γενιάς (π.χ. GSM, GPRS).
- Υποστήριξη τερματικών τρίτης γενιάς που χρησιμοποιούν μεταγωγή κυκλώματος, σε ένα δίκτυο κορμού UMTS ολοκληρωτικά βασισμένο σε IP.
- Υποστήριξη καινούριων (π.χ. IP και πολυμέσα) αλλά και υπαρχόντων υπηρεσιών, όπως η ομιλία, τα μηνύματα SMS (Short Message Service) και κάποιες συμπληρωματικές υπηρεσίες ευφυών δικτύων.

1.4.2. Διαχείριση Πόρων στο UMTS

Στην περίπτωση των δικτύων UMTS, η διαχείριση πόρων γίνεται από τον έλεγχο ραδιοπόρων RRC (Radio Resource Control) [4]. Ο RRC διαχειρίζεται επίσης τη σηματοδοσία μεταξύ των τερματικών και του UTRAN σε δικτυακό επίπεδο. Η βασική λειτουργία του RRC αφορά τη διαχείριση των συνδέσεων και των κλήσεων δηλαδή την πραγματοποίηση, τη διατήρηση και τον τερματισμό τους. Ο RRC επίσης πραγματοποιεί τον έλεγχο αποδοχής κλήσεων επιλέγοντας παράλληλα τις κατάλληλες παραμέτρους που

περιγράφουν τη ραδιοζεύξη και τις συνθήκες δικτύου. Για κάθε κλήση που γίνεται αποδεκτή ο RRC κατανέμει του πόρους βάσει των απαιτήσεων ποιότητας υπηρεσίας QoS (Quality of Service). Η σύνδεση αλλά και η κλήση τερματίζεται είτε μετά από αίτημα από το NAS (Non Access Stratum) είτε εξαιτίας σφάλματος. Ο RRC είναι υπεύθυνος για την επαναπραγματοποίηση της σύνδεσης σε περίπτωση διακοπής. Μετά την ολοκλήρωση της κλήσης και τον τερματισμό της σύνδεσης , όλοι οι πόροι που είχαν εκχωρηθεί στην κλήση αυτή αποδεσμεύονται. Ο RRC είναι επίσης υπεύθυνος για την παροχή της αναγκαίας σηματοδοσίας στο τερματικό σχετικά με την κατανομή των ραδιοπόρων [4].

Το τερματικό μπορεί να βρίσκεται σε δυο καταστάσεις: αναμονής και σύνδεσης. Το τερματικό μόλις μπει σε κατάσταση λειτουργίας ανιχνεύει και συνδέεται με το BCH (Broadcast Channel). Μόλις αυτό ανιχνευτεί, το τερματικό συνδέεται και τίθεται σε κατάσταση αναμονής, όπου παραμένει σε περίπτωση κάποιας μεταβολής στην κυψέλη. Στη συνέχεια, το τερματικό συνδέεται με το UTRAN ώστε αυτό να μπορεί να επικοινωνήσει μέσω της πραγματοποίησης μιας κλήσης. Το κινητό τερματικό μεταδίδει τα χαρακτηριστικά σήματος και τις σχετικές μετρήσεις του στο UTRAN. Το RRC είναι αυτό που αποφασίζει για τη μέτρηση των απαραίτητων στοιχείων καθώς και πώς αυτές οι μετρήσεις θα αναφέρονται στο δίκτυο, ώστε να αποφασίσει για τις μεταπομπές βάσει της κινητικότητας του χρήστη. Επίσης στις περιπτώσεις αυτές θα αποφασίσει σε ποια κυψέλη θα συνδεθεί το τερματικό κατά τη μεταπομπή φροντίζοντας για την παροχή της κατάλληλης QoS στον τελικό χρήστη.

Το RRC που είναι υπεύθυνο για τη διαχείριση πόρων στο σύστημα UMTS, αλληλεπιδρά με τον έλεγχο ευρυεκπομπής/πολυεκπομπής BMC (Broadcast/Multicast Control). Αυτό είναι απαραίτητο για την εξασφάλιση σημαντικών δυνατοτήτων εκπομπής στα δίκτυα. Ειδικότερα, αν είναι επιθυμητή η μετάδοση σε περισσότερες κυψέλες τότε το RRC ρυθμίζει το BMC για παροχή υπηρεσιών ευρυεκπομπής. Επιπλέον κατανέμει τους απαιτούμενους πόρους ανάλογα για την εξασφάλιση της παραπάνω λειτουργίας ευρυεκπομπής. Τέλος το RRC και η διαχείριση πόρων είναι υπεύθυνα για θέματα όπως είναι ο έλεγχος ισχύος, η προστασία των δεδομένων και η κρυπτογράφηση [4].

1.4.3. Το Πρότυπο HSPA

Η τεχνολογία HSPA (High Speed Packet Access) αποτελείται από δύο επιμέρους πρωτόκολλα, τα HSDPA (Downlink) και HSUPA (Uplink) και είναι επίσης γνωστή ως 3.5G. Η τεχνολογία αυτή αναπτύχθηκε ως η εξέλιξη της τεχνολογίας UMTS που υλοποιεί

τις επικοινωνίες τρίτης γενιάς, με σκοπό τη διεύρυνση των δυνατοτήτων σε θέματα μεταφοράς δεδομένων και την κάλυψη των αναγκών των νέων εφαρμογών υψηλών απαιτήσεων που υποστηρίζονται [9]. Οι υπηρεσίες των ασύρματων κυψελωτών δικτύων τρίτης γενιάς (3G), όπως η video και VoIP τηλεφωνία, τα παιχνίδια, το 'κατέβασμα' αρχείων και ο διαμοιρασμός εικόνων και video, απαιτούν διαφορετικό επίπεδο ποιότητας υπηρεσίας (QoS) ως προς το ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων, την καθυστέρηση, ρυθμό σφαλμάτων, την χωρητικότητα και την κάλυψη.

Για αυτό το σκοπό, το 3rd Generation Partnership Project (3GPP) ανέπτυξε την τεχνολογία HSPA, μια εξέλιξη του UMTS βασισμένη στην τεχνολογία W-CDMA. Τα πρωτόκολλα HSDPA και HSUPA παρέχουν βελτιωμένη απόδοση μέσα από τη χρήση βελτιωμένων σχημάτων κωδικοποίησης αλλά και τον επανακαθορισμό των πρωτοκόλλων με τα οποία οι σταθμοί βάσης και τα τερματικά επικοινωνούν. Τα παραπάνω στοιχεία οδηγούν σε καλύτερη χρησιμοποίηση του εύρους ζώνης που παρέχεται από το W-CDMA. Η τεχνολογία HSPA βελτιώνει τους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων αλλά και την εμπειρία του χρήστη ως προς την ποιότητα παροχής υπηρεσιών με την επίτευξη 14 Mbps για την κάτω ζεύξη και 5.8 Mbps για την άνω ζεύξη. Επιπλέον, μειώνει την καθυστέρηση και αυξάνει τη χωρητικότητα τόσο της κάτω ζεύξης κατά πέντε φορές αλλά και της άνω ζεύξης κατά δύο φορές σε σχέση με τα παραδοσιακά συστήματα W-CDMA. Τα χαρακτηριστικά αυτά επιτυγχάνονται με διάφορους τρόπους όπως:

- Μετάδοση καταμερισμένου καναλιού που έχει σαν αποτέλεσμα την αποτελεσματικότερη χρήση των πόρων ισχύος στο W-CDMA.
- Μικρότερα διαστήματα μεταξύ μεταδόσεων TTI (Transmission Time Interval) με αποτέλεσμα τη μείωση της καθυστέρησης χρόνου μετ' επιστροφής (round trip delay) αλλά και τη βελτίωση του εντοπισμού των μεταβολών των συνθηκών καναλιού.
- Προσαρμογή της Ζεύξης (Link Adaptation) που μεγιστοποιεί τη χρήση του καναλιού και δίνει τη δυνατότητα στο σταθμό βάσης να λειτουργεί στις μέγιστες δυνατότητες του.
- Ταχύ χρονοπρογραμματισμό (Fast Scheduling) που αποδίδει προτεραιότητα στους χρήστες με κριτήριο τις συνθήκες καναλιού.
- Ταχύτερη επαναμετάδοση που επιτρέπει περαιτέρω αύξηση της χωρητικότητας.
- Διαμορφώσεις τύπου QAM (Quadrature Amplitude Modulation), όπως 16QAM και ανώτερες για την επίτευξη υψηλών ρυθμών μετάδοσης δεδομένων.

Η τεχνολογία αυτή βρίσκεται ήδη σε χρήση σε περισσότερους από 200 τηλεπικοινωνιακούς παρόχους σε 80 χώρες.

1.4.3.1. Τα πρωτόκολλα HSDPA και HSUPA

Η τεχνολογία HSPA βασίζεται στην εξέλιξη του W-CDMA και στοχεύει σε αυξημένη χωρητικότητα, μειωμένη καθυστέρηση χρόνου μετ' επιστροφής (round trip delay), υψηλότερη ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων, υψηλότερη ρυθμοαπόδοση (throughput) κυψέλης και χρήστη και μειωμένη καθυστέρηση [1]. Για να πετύχει τους στόχους της, η τεχνολογία του πρωτοκόλλου HSDPA εισήγαγε νέες τεχνικές βελτιώνοντας πρώτα την κάτω ζεύξη, επιτυγχάνοντας ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων για αυτή που φτάνουν μέχρι τα 14Mbps. Το πρωτόκολλο HSDPA βασίζεται κυρίως σε νέες τεχνικές διαμόρφωσης και κωδικοποίησης [9]. Συγκεκριμένα, το νέο κανάλι HS-DSCH (High Speed-Downlink Shared Channel) επιτυγχάνει βελτιωμένη απόδοση κάτω ζεύξης εφαρμόζοντας:

- Προσαρμοστική Διαμόρφωση και Κωδικοποίηση AMC (Adaptive Modulation and Coding): Ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν στο κανάλι και συγκεκριμένα ανάλογα με την τιμή του λόγου σήματος προς παρεμβολή, χρησιμοποιείται το κατάλληλο σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης για τα δεδομένα επιτυγχάνοντας τη μέγιστη δυνατή απόδοση.
- Ταχεία Δρομολόγηση κίνησης: Ο αλγόριθμος δρομολόγησης κίνησης αποφασίζει ανά TTI (που είναι ίσο με 0.002 sec) σε ποιόν/ποιούς χρήστη/χρήστες θα αποστείλει πακέτα δεδομένων. Τα κριτήρια με βάση τα οποία λαμβάνεται η απόφαση είναι ο λόγος σήματος προς παρεμβολή του κάθε χρήστη, το είδος της συνόδου και ο αριθμός των πακέτων που είναι σε αναμονή. Κάθε αλγόριθμος δρομολόγησης κίνησης αξιολογεί με διαφορετική βαρύτητα τα παραπάνω δεδομένα και κινείται ανάμεσα στην επίτευξη υψηλής απόδοσης για το δίκτυο και στη δικαιοσύνη ανάμεσα στους χρήστες.
- Ταχεία Υβριδική Επανεκπομπή Πακέτων HARQ (Hybrid Automatic Repeat Request): Στην τεχνική αυτή, τα δεδομένα διατηρούνται σε καταχωρητή στον σταθμό βάσης. Αν το κινητό τερματικό δεν αποστείλει επιβεβαίωση ορθής παράδοσης (acknowledgment, ACK), για το λαμβανόμενο πακέτο, τότε αυτό θεωρείται χαμένο. Σε αυτήν την περίπτωση, τα δεδομένα επανεκπέμπονται από το σταθμό βάσης και ο χρήστης συνδυάζει όλες τις λήψεις των συγκεκριμένων δεδομένων (soft combining of multiple transmissions), αυξάνοντας τις

πιθανότητες να αποκωδικοποιήσει επιτυχώς το μήνυμα. Έτσι έχουμε μειωμένη καθυστέρηση μετάδοσης και βελτιωμένη απόδοση.

Αξιοποιώντας τις τεχνικές που περιγράφηκαν παραπάνω, το πρωτόκολλο HSDPA παρέχει σημαντικές βελτιώσεις στους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων, μειώνοντας παράλληλα την καθυστέρηση για όλες τις εφαρμογές μεταφοράς πακέτων δεδομένων. Η περαιτέρω εξέλιξη του πρωτοκόλλου από το 3GPP οδήγησε στην ανάπτυξη του HSDPA+ που επιτυγχάνει ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων στην κάτω ζεύξη μέχρι 42 Mbps, αξιοποιώντας την τεχνική διαμόρφωσης 64QAM και την τεχνολογία κεραιών MIMO.

Το δεύτερο στάδιο της εξέλιξης του W-CDMA με τη χρήση του προτύπου HSPA αναφέρεται στην βελτίωση της άνω ζεύξης μέσω του πρωτοκόλλου HSUPA για την επίτευξη ρυθμών μετάδοσης που φτάνουν τα 5.8 Mbps. Το πρωτόκολλο αυτό χρησιμοποιεί το ενισχυμένο αφιερωμένο κανάλι E-DCH (Enhanced - Dedicated Channel) το οποίο αξιοποιεί τεχνικές προσαρμογής της ζεύξης παρόμοιες αυτές του πρωτοκόλλου κάτω ζεύξης HSDPA, όπως τα μικρότερα διαστήματα μεταξύ μεταδόσεων, η ταχεία υβριδική επανεκπομπή πακέτων και ο ταχύς προγραμματισμός. Αυτές οι βελτιώσεις έχουν σαν αποτέλεσμα μεγαλύτερες ρυθμοαποδόσεις, μειωμένες καθυστερήσεις και αυξημένη φασματική απόδοση. Το HSUPA προβλέπεται να οδηγήσει στην αύξηση περίπου 85% στη γενική ρυθμοαπόδοση άνω ζεύξης κυψελών και ένα κέρδος περίπου 50% στη ρυθμοαπόδοση χρηστών. Ακόμα θα μειώσει την καθυστέρηση πακέτων. Τέτοια βελτίωση της άνω ζεύξης θα ωφελήσει τους χρήστες με ποικίλους τρόπους. Για παράδειγμα, ωφελούνται οι χρήστες των εφαρμογών κατά τις οποίες μεταδίδεται μεγάλος όγκος δεδομένων από τον κινητό σταθμό, όπως η αποστολή βίντεο ή μεγάλων αρχείων δεδομένων. Το HSUPA μπορεί να λειτουργήσει με ή χωρίς την παρουσία του HSDPA στην κάτω ζεύξη, αν και είναι πιο αποδοτικό για τα δίκτυα η ταυτόχρονη χρήση των δύο πρωτοκόλλων. Οι βελτιωμένοι μηχανισμοί της άνω ζεύξης επιτρέπουν ακόμα καλύτερη κάλυψη και σε περιοχές όπου έχουμε τη χρήση μεγαλύτερων κυψελών.

1.4.3.2. Διαχείριση Πόρων σε Δίκτυα HSDPA

Στην αξιοποίηση του πρωτοκόλλου HSDPA πολύ σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η αποτελεσματική διαχείριση των διαθέσιμων πόρων μέσα από κατάλληλους αλγορίθμους, οι οποίοι εξασφαλίζουν την απρόσκοπτη και αποδοτική λειτουργία του δικτύου. Οι βασικότεροι από αυτούς τους αλγορίθμους πάνω στους οποίους βασίζεται το πρωτόκολλο HSDPA είναι οι εξής [10]:

- Έλεγχος μεταπομπών: Οι αλγόριθμοι διαχείρισης ραδιοπόρων στο HSDPA επιτρέπουν μόνο μεταπομπές ανάμεσα σε δύο κυψέλες (hard handoff) καθώς και μεταπομπές ανάμεσα σε δύο συστήματα, π.χ. από UMTS σε GSM δίκτυο. Η μεταπομπή λόγω ταυτόχρονης σύνδεση σε δύο γειτονικές κυψέλες εξαιτίας της αλληλοεπικάλυψης (soft handoff) δεν υποστηρίζεται και έχει αντικατασταθεί από την Ταχεία Επιλογή Κυψέλης (Fast Cell Selection).
- Αλγόριθμος επιλογής διαμόρφωσης και κωδικοποίησης: Όπως προαναφέρθηκε η επιλογή της κατάλληλης διαμόρφωσης και κωδικοποίησης γίνεται με βάση τις συνθήκες που επικρατούν κάθε δεδομένη χρονική στιγμή στο κανάλι για κάθε χρήστη, ώστε να μεγιστοποιηθεί η απόδοση δεδομένης της σταθερής εκπομπής ισχύος. Ο αλγόριθμος αυτός έχει αντικαταστήσει τον παραδοσιακό έλεγχο ισχύος.
- Έλεγχος πρόσβασης στο δίκτυο: Ο αλγόριθμος αυτός είναι υπεύθυνος για την αποδοχή ή απόρριψη μιας νέας αίτησης για σύνδεση στο δίκτυο διασφαλίζοντας την τήρηση των εγγυήσεων παροχής υπηρεσίας για τις υποστηριζόμενες κλάσεις υπηρεσιών (πραγματικού χρόνου και μη πραγματικού χρόνου). Επίσης, ο αλγόριθμος αυτός αποδίδει προτεραιότητα στην εξυπηρέτηση των κλήσεων πραγματικού χρόνου. Πρόκειται στην ουσία για τον αλγόριθμο που εκτελεί τον έλεγχο αποδοχής κλήσεων στο δίκτυο.
- Έλεγχος φορτίου και αποφυγή συμφόρησης: Βασική μέριμνα της διαχείρισης πόρων είναι ο έλεγχος φορτίου (load control) και ο έλεγχος συμφόρησης (congestion control) με στόχο την αποφυγή της τελευταίας. Εφόσον λειτουργεί σωστά ο έλεγχος αποδοχής κλήσεων (admission control) και έχει επιλεχθεί ο κατάλληλος δρομολογητής, το δίκτυο σπάνια εισέρχεται σε κατάσταση συμφόρησης. Ωστόσο, αν υπάρξει συμφόρηση, το δίκτυο πρέπει να επανέλθει σε μία ευσταθή κατάσταση λειτουργίας, εκτελώντας έλεγχο φορτίου. Οφείλουμε να σημειώσουμε ότι στα πλαίσια αυτού του ελέγχου υπολογίζεται και μεταβάλλεται μόνο το φορτίο των χρηστών μη πραγματικού χρόνου, αφού μόνο αυτό μπορεί να ελεγχθεί. Ακόμα, ο αλγόριθμος ελέγχου φορτίου έχει ένα πλήθος επιλογών για να επιτύχει αποσυμφόρηση, όπως μεταπομπές ή ακόμα και τον ανεπιθύμητο τερματισμό κάποιων κλήσεων (call drop).
- Αλγόριθμος δρομολόγησης πακέτων: Το HSDPA εκτελεί ταχεία δρομολόγηση με σκοπό την μείωση των νεκρών χρόνων στο δίκτυο και τη μεγιστοποίηση του ρυθμού διέλευσης. Η δρομολόγηση γίνεται όσο το δυνατόν πιο κοντά στην

ασύρματη διεπαφή με βάση διάφορα κριτήρια για την απόδοση του διαύλου όπως ο μέγιστος λόγος σήματος προς παρεμβολή λόγου, η δίκαιη χρονική κατανομή και ο δίκαιος ρυθμός διέλευσης. Ο επιλεγμένος δρομολογητής συνδέεται στενά με τον ελεγκτή φορτίου (load controller), αφού είναι υπεύθυνος για την διαχείριση του φορτίου όλων των κλήσεων.

1.4.4. Η Τεχνολογία Long Term Evolution (LTE)

Η τεχνολογία LTE αποτελεί το επόμενο στάδιο εξέλιξης προς ένα ολοκληρωμένο σύστημα ασυρμάτων επικοινωνιών 4^{ης} γενιάς. Σε σχέση με τις υπάρχουσες τεχνολογίες GSM, GPRS, EDGE, W-CDMA και το HSPA προσφέρει μια σημαντική αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου, του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων αλλά και μείωση των καθυστερήσεων [11]. Όλα αυτά βελτιώνουν σημαντικά την αντίληψη του τελικού χρήστη Το 3GPP συγκεκριμενοποιεί τις προδιαγραφές του LTE στο Release 8 και υπόσχεται ρυθμούς μετάδοσης μέχρι και 300 Mbps στην κάτω ζεύξη με χρήση κεραιών MIMO 4x4 και 75Mbps στην άνω ζεύξη με απλή κεραία για κάθε 20 MHz του ταξινομημένου κατά ζεύγος φάσματος. Πάντως, οι ελάχιστες παροχές σε ρυθμούς μετάδοσης που έχουν προδιαγράφει για το LTE είναι τουλάχιστον 100Mbps για την κάτω ζεύξη και 50Mbps για την άνω ζεύξη ενώ η ανεκτή καθυστέρηση με επιστροφή έχει προδιαγραφεί στα 10 ms [12]. Παράλληλα, για την επίτευξη πλήρους απόδοσης των δυνατοτήτων του LTE σε δικτυακό επίπεδο είναι αναγκαία η μετατροπή των σημερινών υβριδικών δικτύων (κυκλώματος/πακέτου) σε δίκτυα πλήρως βασισμένα σε IP (Internet Protocol). Από την πλευρά των παρόχων, ανταμοιβή θα αποτελέσουν τα μειωμένα κόστη μεταφοράς συνδυασμού υπηρεσιών φωνής, βίντεο και δεδομένων, όπως επίσης και η απλοποιημένη συνεργασία με σταθερά και ασύρματα δίκτυα που υποστηρίζουν άλλες τεχνολογίες.

Το LTE με βάση τις οικογένειες προτύπων UMTS/HSPA στοχεύει στην ενίσχυση των ικανοτήτων των τρεχουσών τεχνολογιών δικτύου με σκοπό την ικανοποίηση των αναγκών πελατών που είναι ήδη εξοικειωμένοι με τις ευρυζωνικές υπηρεσίες. Με αυτό τον τρόπο, συγχωνεύει το προσανατολισμένο στη φωνή σημερινό περιβάλλον των κινητών επικοινωνιών με τις δυνατότητες υπηρεσιών του σταθερού διαδικτύου. Ένας άλλος στόχος του προγράμματος είναι η αρμονική συνύπαρξη του LTE με τα υφιστάμενα δίκτυα μεταγωγής κυκλώματος. Αυτό θα επιτρέψει στους παρόχους κινητής τηλεφωνίας να εισάγουν την έννοια των δικτύων πλήρως βασισμένων σε IP σταδιακά και η εξέλιξη των συστημάτων αυτών να οδηγήσει σε υποστήριξη της διαλειτουργικότητας.

1.5. Τεχνολογίες Ασυρμάτων Δικτύων Επικοινωνιών

Στη συνέχεια, θα προχωρήσουμε σε μια συνοπτική παρουσίαση των δυο σημαντικότερων και πιο διαδεδομένων τεχνολογιών σταθερής ευρυζωνικής πρόσβασης: των ασύρματων τοπικών δικτύων που καλύπτουν τις ανάγκες διασύνδεσης σε μια περιορισμένη γεωγραφική περιοχή. Τα συστήματα αυτά εξασφαλίζουν ασύρματη επικοινωνία για την ανταλλαγή δεδομένων και τον διαμοιρασμό υπολογιστικών όρων με κυριότερο εκπρόσωπο το πρότυπο IEEE 802.11 και τη τεχνολογία ασύρματης ευρυζωνικής πρόσβασης WiMAX που βασίζεται στο πρότυπο IEEE 802.16 και προορίζεται για την κάλυψη αναγκών ασύρματης επικοινωνίας και μεταφοράς δεδομένων σε μεγαλύτερες περιοχές (δίκτυα ευρείας περιοχής και μητροπολιτικά) οι οποίες δε μπορούν να καλυφθούν από τοπικά ασύρματα δίκτυα.

1.5.1. Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα WLAN

Τα ασύρματα τοπικά δίκτυα WLAN (Wireless Local Area Networks) αποτελούν τα πιο απλής μορφής ασύρματα δίκτυα, υψηλού βαθμού συμβατότητας με όλα σχεδόν τα υπόλοιπα και ειδικά με το διαδίκτυο και είναι στην ουσία μια εύκολα υλοποιήσιμη λύση για ασύρματη πρόσβαση στο διαδικτυο. Το βασικό πρότυπο και οι διάφορες εκδόσεις του που χρησιμοποιούνται για τα ασύρματα δίκτυα έχουν αναπτυχθεί και εγκριθεί από το Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών IEEE. Το πρότυπο αυτό είναι το IEEE 802.11 και θεωρείται το επικρατέστερο μέχρι στιγμής για τα τοπικά ασύρματα δίκτυα. Το χαμηλό κόστος του εξοπλισμού αλλά και η ενσωμάτωση του σε αρκετούς φορητούς υπολογιστές και υπολογιστές παλάμης σε συνδυασμό με την εύκολη εγκατάσταση του οδήγησε στη μεγάλη εξάπλωση του. Επίσης η ύπαρξη προτύπων και προβλέψεων για λειτουργία σε συχνότητες χωρίς άδεια, η ανάπτυξη πολλών παραλλαγών, καθώς και η παραγωγή πολλών εμπορικών προϊόντων συνέβαλλε στην επικράτηση του. Έτσι, ο σχεδιαστής ενός WLAN δικτύου μπορεί να προσαρμόσει πολλές παραμέτρους στις ιδιαιτερότητες του χώρου που θέλει να καλύψει, χωρίς μεγάλους περιορισμούς και δυσκολίες

Τα ασύρματα δίκτυα 802.11 είναι γνωστά και ως Wi-Fi και έχουν αναπτυχθεί οι παρακάτω εκδόσεις του προτύπου:

- Πρότυπο **IEEE 802.11b**: Δημοσιεύθηκε το Σεπτέμβριο του 1999 και είναι το πιο δημοφιλές πρότυπο ασύρματου δικτύου. Λειτουργεί σε συχνότητα των 2.4 GHz παρέχοντας στους χρήστες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων έως 11 Mbps

ανάλογα με την απόσταση του εξοπλισμού χρήστη από την κοντινότερη κεραία του δικτύου, τον αριθμό των συνδεδεμένων στην κεραία χρηστών και την ποιότητα σήματος.

- Πρότυπο **IEEE 80.11g**: Το πρότυπο αυτό λειτουργεί στη συχνότητα 2.4 GHz και προσφέρει μεγαλύτερη ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων η οποία έχει φτάσει τα 54 Mbps. Το πρότυπο αυτό είναι απόλυτα συμβατό με το 802.11b και σήμερα τείνει να το αντικαταστήσει.
- Πρότυπο **IEEE 80.11a**: Το πρότυπο αυτό λειτουργεί στη συχνότητα 5 GHz και προσφέρει ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων 54 Mbps. Η λειτουργία του όμως δεν είναι συμβατή με τα υπόλοιπα λόγω της διαφορετικής συχνότητας λειτουργίας.
- Πρότυπο **IEEE 80.11e**: Το πρότυπο αυτό παρέχει εγγυήσεις για το επίπεδο ποιότητας της παρεχόμενης υπηρεσίας.
- Πρότυπο **IEEE 80.11f**: Η έκδοση αυτή του προτύπου προσφέρει κινητικότητα σταθμών μέσα σε δίκτυο IP.
- Πρότυπο **IEEE 80.11i**: Η έκδοση αυτή του προτύπου μελετά θέματα ασφάλειας στα WLAN.
- Πρότυπο **IEEE 80.11h**: Στην έκδοση αυτή του πρότυπου επιχειρείται η εισαγωγή καλύτερου ελέγχου συγκρούσεων στο βασικό πρότυπο 802.11a.

Η ακτίνα κάλυψης ενός WLAN δικτύου μπορεί θεωρητικά να εκτείνεται έως κάποια χιλιόμετρα, πρακτικά όμως δεν ξεπερνά μερικές εκατοντάδες μέτρα. Ειδικά σε περιπτώσεις ανάπτυξης εντός κτιρίων (που είναι και οι πιο πιθανές) η ακτίνα κάλυψης περιορίζεται σε μερικές δεκάδες μέτρα. Για να μην υπάρχει παρεμβολή από το ένα σημείο πρόσβασης στο άλλο, το φάσμα συχνοτήτων διαιρείται σε επιμέρους κανάλια (11 στον αριθμό), η κατανομή των οποίων στα σημεία πρόσβασης γίνεται με λογική ανάλογη της αναχρησιμοποίησης συχνότητας που έχουμε στα δίκτυα GSM. Οι ρυθμοί μετάδοσης εξαρτώνται από το συγκεκριμένο τύπο του πρωτοκόλλου αλλά και από την ισχύ του σήματος στο τερματικό. Ανάλογα με την ποιότητα της σύνδεσης, επιλέγεται και η κατάλληλη τεχνική διαμόρφωσης, έτσι ώστε ο ρυθμός να προσαρμόζεται στον εκάστοτε αριθμό λαθών διάδοσης. Η λειτουργία αυτή ονομάζεται προσαρμογή ζεύξης (link adaptation).

Στο σημείο αυτό, πρέπει να τονιστεί ότι εκτός από ελάχιστες εξαιρέσεις, τα WLAN δίκτυα δεν έχουν μηχανισμούς παροχής QoS, με αποτέλεσμα οι χρήστες να οδηγούνται σε πολύ μικρούς ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων σε περιπτώσεις συμφόρησης. Με άλλα λόγια, ένα δίκτυο WLAN δεν περιορίζει τον αριθμό των χρηστών που εισέρχονται σε αυτό, αλλά

απλά κατανέμει τους πόρους του ανάλογα με αυτούς. Ο τρόπος αυτός λειτουργίας αναφέρεται ως βέλτιστης προσπάθειας BE (Best Effort). Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι και στο WLAN υπάρχουν μηχανισμοί για διαχείριση των πόρων του δικτύου, με πιο γνωστές τον έλεγχο ισχύος (power control) και τη δυναμική ανακατανομή συχνοτήτων (dynamic frequency selection).

Μια άλλη οικογένεια προδιαγραφών τοπικών δικτύων, εκτός αυτών που ανήκουν στο πρότυπο IEEE 802.11 είναι αυτή των HIPERLAN, η οποία ξεκίνησε το 1991 στους κόλπους του ETSI και οδήγησε το 1997 στην πρώτη προδιαγραφή με υψηλό ρυθμό μετάδοσης, το HIPERLAN Type 1, που υποστήριζε μέχρι 23.5Mbps. Κατά την ανάπτυξη της προδιαγραφής, δόθηκε μεγάλο βάρος σε εφαρμογές τοπικών δικτύων LANs και για το λόγο αυτό θεωρείται ένα μοντέρνο ασύρματο Ethernet. Λόγω του υπερβολικού φορτίου στην περιοχή των 2.4GHz, το HIPERLAN Type 1 σχεδιάστηκε για την περιοχή των 5.2GHz. Τον Απρίλιο του 1997 το ETSI αποφάσισε ότι οι ανάγκες της αγοράς επέβαλαν την επέκταση της προδιαγραφής, ώστε να περιλάβει εφαρμογές ασύρματου ATM (Wireless ATM). Δημιούργησε λοιπόν το έργο ETSI BRAN (Broadband Radio Access Networks), από το οποίο έχουν προκύψει άλλες τρεις προτάσεις, το HIPERLAN Type 2, το HIPERLAN Type 3 (HiperACCESS) και το HIPERLAN Type 4 (HiperLINK). Στον πίνακα 1.1 που ακολουθεί εμφανίζονται οι τέσσερις τύποι HIPERLAN με τα κυριότερα χαρακτηριστικά τους. Ιδιαίτερα, το HIPERLAN Type 2 είναι μια προδιαγραφή με έμφαση στην κυψελωτή αρχιτεκτονική και τη διασυνεργασία με άλλα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα.

Πίνακας 1.1: Χαρακτηριστικά Συστημάτων HIPERLAN

Τύπος	**Ζώνη Συχνοτήτων**	**Εύρος Κάλυψης**	**Ρυθμός Μετάδοσης**	**Περιγραφή**
HIPERLAN 1	5.2 GHz	50-100 m	23.5 Mbps	Wireless LAN
HIPERLAN 2	5.2 GHz	50-100 m	54 Mbps	Wireless IP-ATM
HiperACCESS	>11 GHz	5 km	25 Mbps	Wireless IP-ATM
HiperLINK	17 GHz	150 m	155 Mbps	Wireless Broadband

1.5.2. Η Τεχνολογία WiMAX

Μια από τις σημαντικότερες τεχνολογίες ασύρματης ευρυζωνικής με σημαντικό πεδίο έρευνας είναι η τεχνολογία WiMAX [13]. Τα ασύρματα τοπικά δίκτυα που περιγράφηκαν προηγουμένως μπορούν να δώσουν υψηλές ταχύτητες και συνεχή δικτυακή

σύνδεση, όμως σε μικρή εμβέλεια. Προκύπτει, λοιπόν, η ανάγκη για την ανάπτυξη τεχνολογιών ασύρματης ευρυζωνικής πρόσβασης με μεγαλύτερη εμβέλεια και περισσότερες δυνατότητες. Με τον όρο αυτό εννοούμε τη δυνατότητα πρόσβασης στο διαδίκτυο και σε άλλα δίκτυα δεδομένων με υψηλή ταχύτητα σε μια ευρεία περιοχή. Συγκεκριμένα, πρέπει να υποστηρίζεται η δυνατότητα για εύρος ζώνης μεγαλύτερο από 1MHz και ρυθμό δεδομένων τουλάχιστον 1.5Mbit/s. Έτσι, η ασύρματη ευρυζωνική πρόσβαση σημαίνει την παροχή υπηρεσιών αντιστοίχων με άλλες ενσύρματες τεχνολογίες, όπως το ADSL και η καλωδιακή σύνδεση. Για την ικανοποίηση αυτών των προδιαγραφών έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορες τεχνολογίες, όπως η LMDS (Local Multipoint Distribution Service) και η MMDS (Multichannel Multipoint Distribution Service). Ειδικά, η δεύτερη χρησιμοποιήθηκε σαν την εναλλακτική υλοποίηση για την καλωδιακή τηλεόραση.

Για την επίτευξη του στόχου της ασύρματης ευρυζωνικής πρόσβασης αναπτύχθηκε και έγινε αποδεκτό το πρότυπο με την ονομασία IEEE 802.16 το οποίο είναι ευρύτερα γνωστό και ως WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) [14]. Το πρότυπο αυτό σχεδιάστηκε να λειτουργεί σε μια ευρεία ζώνη συχνοτήτων η οποία εκτείνεται από 2 έως 66 GHz. Υποστηρίζει ταχύτητες μετάδοσης έως 70 Mbps και μπορεί να καλύψει ένα εύρος έως και 50 km [15]. Η τεχνολογία WiMAX βασίζεται και αυτή στη κυψελωτή δομή την οποία αναλύσαμε στην προηγούμενη ενότητα για τις τεχνολογίες κινητών επικοινωνιών. Το τυπικό εύρος κυψέλης που συναντάμε στα ασύρματα δίκτυα ευρείας περιοχής είναι 1,5 έως 10 km. Το πρότυπο αυτό απευθύνεται κυρίως για τη δημιουργία δικτύων μαζικής κάλυψης χρηστών σε εξωτερικούς χώρους, συνεπώς παρουσιάζει μεγάλο βαθμό κλιμάκωσης. Παράλληλα το πρότυπο είναι σχεδιασμένο κατά τέτοιο τρόπο ώστε να προσφέρει εγγενείς μηχανισμούς εξασφάλισης ελάχιστης ποιότητας υπηρεσίας αναφορικά με τη μεταφορά πολυμεσικού περιεχομένου και φωνής [16].

Σύμφωνα με το πρότυπο IEEE 802.16-2004, περιγράφεται η διασύνδεση για σταθερά ασύρματα ευρυζωνικά συστήματα πρόσβασης (Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems). Αργότερα, με το πρότυπο IEEE 802.16e-2005 επεκτάθηκε συμπεριλαμβάνοντας κάλυψη κινητών χρηστών. Το WiMAX παρέχει ευρυζωνική σύνδεση σε δίκτυα μητροπολιτικής περιοχής. Καθώς μπορεί να μεταδώσει σήματα μέχρι και 30 μίλια, δίνει μια εναλλακτική λύση στο πρόβλημα της τελικής πρόσβασης (last-mile) προς οικιακούς χρήστες και επιχειρήσεις. Το πρότυπο ομαδοποιεί ένα σύνολο τεχνολογιών που στοχεύουν στη γρήγορη και επικερδή ανάπτυξη διαλειτουργικών προϊόντων από διάφορους παρόχους για την ασύρματη ευρυζωνική πρόσβαση. Οι συχνότητες που περιγράφονται ως κατάλληλες μπορούν να διαχωριστούν σε δυο κατηγορίες. Το εύρος 10-66 GHz μπορεί να

χρησιμοποιηθεί για επικοινωνίες οπτικής επαφής (line-of-sight) και να παρέχει point-to-multipoint υπηρεσίες σε οικιακούς χρήστες και μέτριες έως μεγάλες επιχειρήσεις. Το εύρος ζώνης είναι τυπικά 25-28MHz και υποστηρίζονται ρυθμοί 120 Mbit/s. Για τη λειτουργία σε αυτές τις ζώνες συχνοτήτων απαιτείται αδειοδότηση. Η δεύτερη μεγάλη κατηγορία είναι οι συχνότητες χαμηλότερες από 11 GHz, όπου δεν είναι απαραίτητη η οπτική επαφή καθώς το μήκος κύματος είναι αρκετά μεγάλο ώστε να εξασφαλίζεται ζεύξη και μέσω της πολύοδης διάδοσης. Σε αυτό το εύρος υπάρχουν και συστήματα που μπορούν να λειτουργήσουν χωρίς άδεια, και για αυτό χρησιμοποιούνται μέθοδοι για την αντιμετώπιση παρεμβολών από τη συνύπαρξη με παρόμοια συστήματα, όπως η δυναμική επιλογή συχνότητας (Dynamic Frequency Selection – DFS).

1.6. Διαλειτουργικότητα και Σύζευξη Κυψελωτών Δικτύων Επικοινωνιών με WLAN

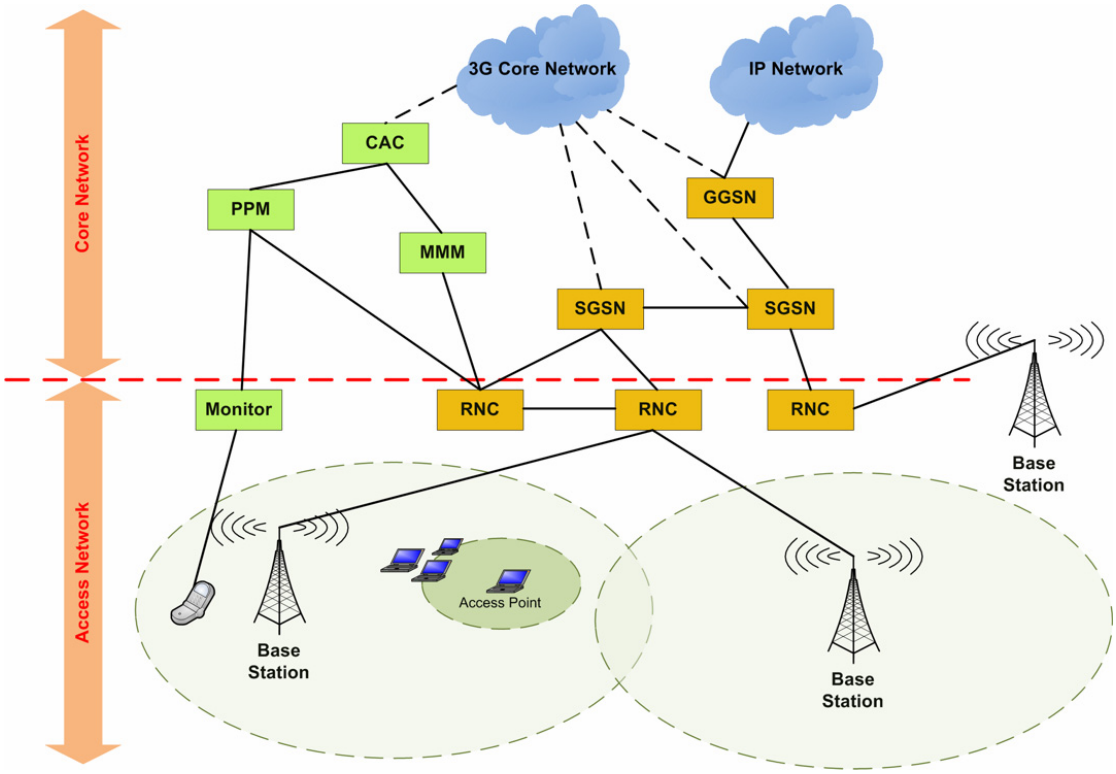
Ένα από τα βασικότερα στοιχεία που συνθέτουν τις προδιαγραφές των δικτύων επικοινωνιών επόμενης γενιάς (next generation networks) είναι η επίτευξη της διαλειτουργικότητας και της σύζευξης μεταξύ των κυψελωτών δικτύων κινητών επικοινωνιών και των τεχνολογιών τοπικών ασυρμάτων δικτύων LAN [17]. Οι προδιαγραφές αυτές επιτάσσονται από το πλαίσιο της παροχής υπηρεσιών επικοινωνιών "οπουδήποτε και οποτεδήποτε", το οποίο αποτελεί την κύρια ιδέα για την υλοποίηση των επικοινωνιών 4^{ης} γενιάς (4G). Τα δίκτυα επόμενης γενιάς θα ενσωματώνουν διάφορες ασύρματες τεχνολογίες σε ένα ενιαίο περιβάλλον για την παροχή αδιάκοπης πρόσβασης σε κινητούς και μη χρήστες κάτω από ένα περιβάλλον το οποίο θα στηρίζεται στο πρωτόκολλο IP. Τα κυψελωτά δίκτυα και τα ασύρματα τοπικά δίκτυα LAN τα οποία έχουν ήδη αναπτυχθεί και λειτουργούν θα πρέπει να διασυνδεθούν κατάλληλα. Μια μεγάλη πρόκληση είναι η επίτευξη της διαλειτουργικότητας μεταξύ των δυο παραπάνω τεχνολογιών, ώστε να εκμεταλλευτούμε τα πλεονεκτήματα τους και τα μοναδικά χαρακτηριστικά τους [18], [19] και [20].

Ειδικότερα, τα ασύρματα τοπικά δίκτυα προσφέρουν υψηλούς ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων σε περιοχές μικρής έκτασης και με περιορισμένες όμως ικανότητες κινητικότητας. Από την άλλη πλευρά, όμως τα κυψελωτά δίκτυα κινητών επικοινωνιών προσφέρουν κάλυψη σε ευρείες γεωγραφικές περιοχές, παρέχοντας υποστήριξη σε κινητούς χρήστες αλλά και δυνατότητες παγκόσμιας περιαγωγής και υποστήριξης. Η επίτευξη της διαλειτουργικότητας μεταξύ των δυο αυτών τύπων δικτύων που σήμερα είναι οι δυο δημοφιλέστερες και πιο διαδεδομένες τεχνολογίες θα προσφέρει σημαντικά διευρυμένες

δυνατότητες. Βασιζόμενοι στη συσχέτιση αυτών των δύο τεχνολογιών πρόσβασης έχουν αναπτυχθεί δυο κύριες αρχιτεκτονικές διαλειτουργικότητας: η αρχιτεκτονική στενής σύζευξης (tight coupling) και η αρχιτεκτονική χαλαρής σύζευξης (loose coupling).

1.6.1. Αρχιτεκτονική Στενής Σύζευξης (Tight Coupling Architecture)

Στην αρχιτεκτονική στενής σύζευξης, το ασύρματο δίκτυο τοπικής περιοχής WLAN (Wireless Local Area Network) συνδέεται με το κυψελωτό δίκτυο που αποτελεί το κεντρικό δίκτυο (πυρήνα) CN σαν ένα επιπλέον δίκτυο ασύρματης πρόσβασης, το οποίο μπορεί να λειτουργήσει και σαν εναλλακτικό του UTRAN, με σκοπό να γίνει επαναχρησιμοποίηση του κεντρικού δικτύου 3G τόσο σε επίπεδο ελέγχου όσο και σε επίπεδο χρήστη. Η δομή της αρχιτεκτονικής αυτής φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 1.6: Αρχιτεκτονική Στενής Σύζευξης (Tight Coupling).

Για παράδειγμα, το σημείο σύζευξης του WLAN με το κεντρικό δίκτυο UMTS μπορεί να είναι ένας κόμβος εξυπηρέτησης GPRS SGSN (Serving GPRS Support Node) [21] ή η πύλη υποστήριξης του GPRS GGSN (Gateway GPRS Support Node) [22]. Εναλλακτικά, η ολοκλήρωση μπορεί να γίνει συνδέοντας το σημείο πρόσβασης του WLAN απ' ευθείας

στον ελεγκτή του δικτύου RNC (Radio Network Controller). Η μεταγωγή ενός χρήστη ανάμεσα στους δύο τομείς βασίζεται στα πρωτόκολλα διαχείρισης κινητικότητας των κυψελωτών δικτύων.

Τα βασικά μειονεκτήματα της αρχιτεκτονικής tight coupling είναι τα εξής [20]:

- Αναγκαιότητα ανάπτυξης πλατφόρμας διασύνδεσης από την πλευρά του κυψελωτού δικτύου προς το δίκτυο WLAN, κάτι που είναι αρκετά σύνθετη διαδικασία.
- Ένα μεγάλο μέρος της τηλεπικοινωνιακής κίνησης των WLAN θα περνάει μέσα από το κυψελωτό δίκτυο που είναι το κεντρικό δίκτυο πυρήνα, οπότε πιθανώς να έχουμε την εμφάνιση φαινομένων συμφόρησης (bottleneck).
- Τα πρωτόκολλα που θα χρησιμοποιηθούν από το WLAN θα πρέπει να είναι συμβατά με αυτά των κυψελωτών δικτύων. Η αυξημένη πολυπλοκότητα και το κόστος αυτών παρακωλύουν την ανάπτυξη αυτής της αρχιτεκτονικής.

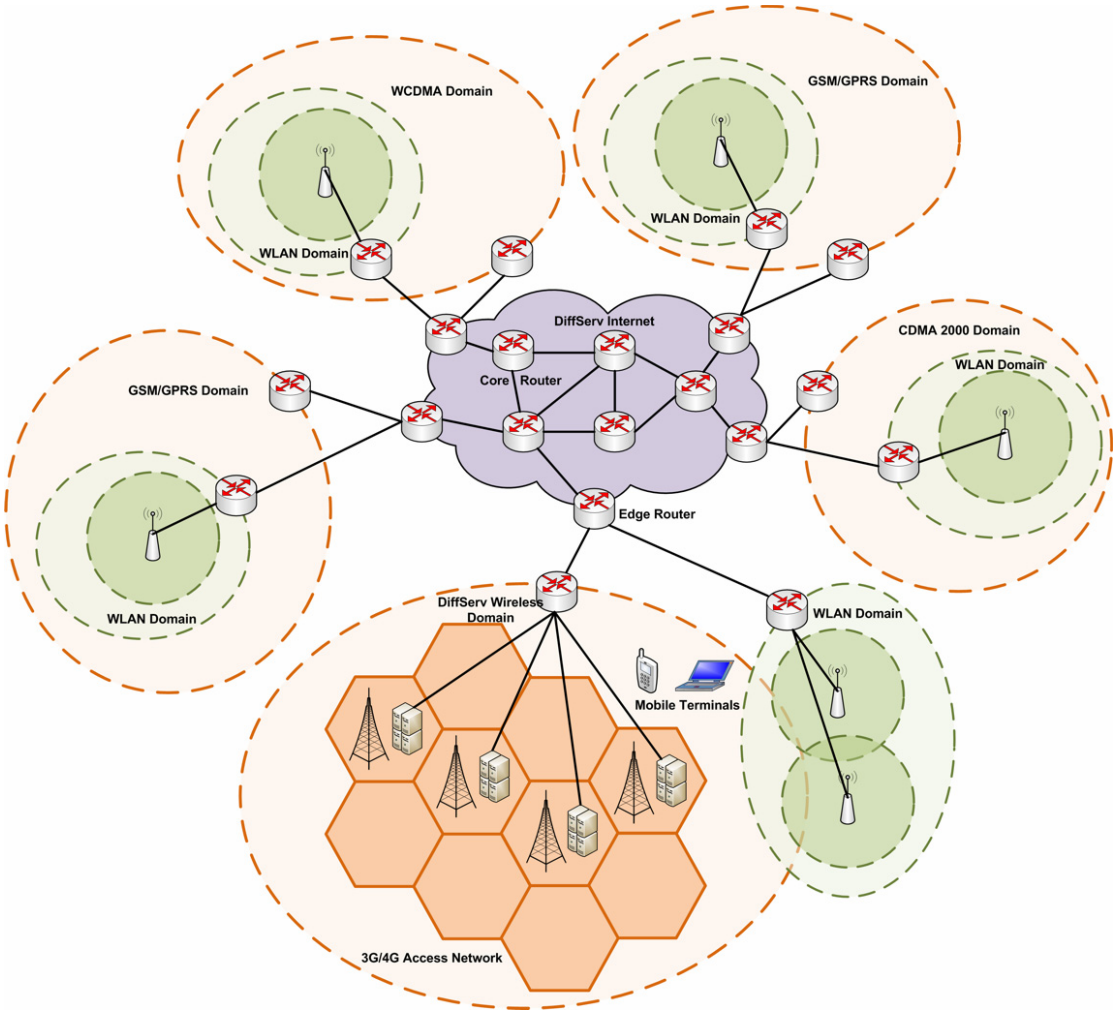
Για την παροχή ποιότητας υπηρεσίας QoS (Quality of Service) στην αρχιτεκτονική tight coupling έχει προταθεί ένα κατάλληλο μοντέλο το οποίο αποτελείται από τα εξής στοιχεία: Μια μονάδα παροχής πολιτικής PPM (Policy Provisioning Module) που είναι υπεύθυνη για την κατηγοριοποίηση των χρηστών, αποφασίζοντας σε ποια κλάση υπηρεσιών εντάσσεται η εφαρμογή της κλήσης που πραγματοποιεί ένας χρήστης και την αντιστοιχεί στο κατάλληλο επίπεδο προτεραιότητας διαχειριζόμενη τα αιτήματα σύνδεσης προς τη μονάδα ελέγχου αποδοχής κλήσεων CAC (Call Admission Control). Μια μονάδα CAC είναι αυτή που διαχειρίζεται της ροές τηλεπικοινωνιακής κίνησης κάνοντας αποδεκτές τις κλήσεις κατανέμοντας το εύρος ζώνης, διατηρώντας παράλληλα τα επίπεδα QoS. Μια μονάδα διαχείρισης κινητικότητας MMM (Mobility Managenent Module) που επιθεωρεί την κατάσταση που βρίσκονται τα τερματικά (συνδεδεμένο, ανενεργό, σε αναμονή) και μια μονάδα παρακολούθησης QoS που ελέγχει την ικανοποίηση των κριτηρίων QoS παρέχοντας ανάδραση στο δίκτυο για τις επιδόσεις του [23].

Η μονάδα ελέγχου αποδοχής κλήσεων και συνδέσεων λαμβάνει πρώτα το αίτημα από τη μονάδα PPM και έπειτα συμβουλεύεται το MMM ώστε να γνωρίζει την κατάσταση κινητικότητας και την πληροφορία για τους κόμβους. Έπειτα χρησιμοποιεί κατάλληλα πρωτόκολλα όπως το πρωτόκολλο δέσμευσης πόρων RSVP (Resource Reservation Protocol) για την εξυπηρέτηση των αιτημάτων σύνδεσης. Το RSVP είναι ένα πρωτόκολλο του στρώματος μεταφοράς (transport layer) που σχεδιάστηκε για τη δέσμευση πόρων σε όλο το δίκτυο [24]. Το RSVP παρέχει τη δυνατότητα τόσο σε ξενιστές (hosts) αλλά και σε δρομολογητές να αιτούνται αλλά και να παρέχουν τα αναγκαία επίπεδα QoS. Παράλληλα, έχει αναπτυχθεί και η εξέλιξη του RSVP, το πρωτόκολλο RSVP-TE το οποίο ενσωματώνει

σημαντικά νέα χαρακτηριστικά για τη δέσμευση πόρων [25] και είναι ευρέως πιο αποδεκτό για τα σύγχρονα δίκτυα που είναι προσανατολισμένα στην παροχή QoS (QoS-oriented).

1.6.2. Αρχιτεκτονική Χαλαρής Σύζευξης (Loose Coupling Architecture)

Στην αρχιτεκτονική χαλαρής σύζευξης, η πύλη (gateway) συνδέει απ' ευθείας τα WLANs στην υπόλοιπη υποδομή του διαδικτύου. Τα διάφορα δίκτυα αναπτύσσονται ανεξάρτητα το καθένα και δεν υπάρχει ενσωμάτωση των τοπικών δικτύων μέσα στο κεντρικό κυψελωτό δίκτυο [22]. Η αρχιτεκτονική χαλαρής δέσμευσης παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 1.7: Αρχιτεκτονική Χαλαρής Σύζευξης (Loose Coupling).

Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης για την επίτευξη της διαλειτουργικότητας είναι η ανεξάρτητη ανάπτυξη και εγκατάσταση των δύο δικτύων πρόσβασης, και έτσι το ένα

δε μπορεί να δημιουργεί φαινόμενα μείωσης ρυθμού bottleneck στο άλλο κατά τη ροή της τηλεπικοινωνιακής κίνησης που είναι με τη μορφή πακέτων. Το βασικό και πιο σοβαρό μειονέκτημα είναι ότι η μεταπομπή μεταξύ των δικτύων είναι δύσκολη, καθώς οι δύο τομείς είναι διακριτοί, έτσι η σηματοδοσία περιαγωγής που συνδέεται με την κινητικότητα μπορεί να χρειαστεί να μεταδοθεί σε μεγάλη διαδρομή, προκαλώντας μεγάλη καθυστέρηση στις μεταπομπές.

Για τη διασύνδεση των διαφορετικών τεχνολογιών πρόσβασης και την επίτευξη της διαλειτουργικότητας τους με τη χρήση του κοινού πρωτοκόλλου διαδικτύου IP, η χρήση της πλατφόρμας διαφοροποιημένων υπηρεσιών DiffServ (Differentiated Services) είναι η πλέον κατάλληλη [26]. Η αρχιτεκτονική χαλαρής σύζευξης για την επίτευξη της συνεργασίας των τεχνολογιών πρόσβασης σε ένα κοινό περιβάλλον επικοινωνιών μπορεί να συνεργαστεί άψογα με το μοντέλο δικτυακών υπηρεσιών DiffServ, οδηγώντας σε μια εύρωστη αρχιτεκτονική για την παροχή αδιάκοπης ευρυζωνικής πρόσβασης μέσω τεχνολογιών ασύρματων δικτύων. Οι βασικότεροι λόγοι για την υιοθέτηση του μοντέλου αυτού είναι ότι:

- Το μοντέλο δικτυακών υπηρεσιών DiffServ είναι ένας κλιμακούμενος μηχανισμός που βασίζεται στον αριθμό των υποστηριζόμενων κλάσεων υπηρεσιών και δεν απαιτεί κάποια επεξεργασία ανά ροή φορτίου στο κεντρικό δίκτυο.
- Η κατηγοριοποίηση των υπηρεσιών μεταξύ των δικτύων πρόσβασης σε ενιαία δομή είναι σημαντική καθώς τα μοντέλα υπηρεσιών ίδιας κατηγορίας έχουν παρόμοιες απαιτήσεις QoS.
- Η πλατφόρμα των διαφοροποιημένων υπηρεσιών DiffServ υιοθετεί μια αρχιτεκτονική, όπου κάθε τομέας ασύρματης πρόσβασης αναπτύσσεται ανεξάρτητα και ταιριάζει απόλυτα με τη λογική της τοπολογίας χαλαρής σύζευξης για την ενοποίηση των δικτύων.
- Η δυνατότητα ταχείας μεταπομπής εντός του δικτύου πρόσβασης αλλά και μεταξύ των διαφορετικών δικτύων παρέχεται με την υιοθέτηση του πρωτοκόλλου κινητού IP (Mobile IP) για τις μεταπομπές μεταξύ τομέων (μακρό-κινητικότητα) και πρωτοκόλλων μεταπομπής μικρό-κινητικότητας για τις μεταπομπές εντός του τομέα.

Συνεπώς, η υιοθέτηση της αρχιτεκτονικής χαλαρής σύζευξης για τη διαλειτουργικότητα μεταξύ κυψελωτών δικτύων και WLANs, ταιριάζει καλύτερα με την εξέλιξη προς μια ενοποιημένη πλατφόρμα δικτύων 4^{ης} γενιάς που θα βασίζεται στη μεταφορά πακέτων δεδομένων με τη χρήση του πρωτοκόλλου IP.

1.7. Δομή και Συνοπτική Παρουσίαση της Διατριβής

Η παρούσα διδακτορική διατριβή με τίτλο "Θέματα Διαχείρισης Πόρων, Έλεγχος Αποδοχής Κλήσεων και Αξιολόγηση Επίδοσης σε Ασύρματα Ευρυζωνικά Δίκτυα Επικοινωνιών" αποτελείται από έξι κεφάλαια, ενώ στο τέλος ακολουθεί η συγκεντρωτική ενιαία βιβλιογραφία παρέχοντας τις σχετικές αναφορές που χρησιμοποιήθηκαν.

Στο πρώτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται οι κυριότερες τεχνολογίες κινητών και ασυρμάτων επικοινωνιών, όπου βρίσκουν πεδίο εφαρμογής τα ερευνητικά αντικείμενα της διαχείρισης πόρων και του ελέγχου αποδοχής κλήσεων, τα οποία αποτελούν το θέμα της παρούσας διατριβής. Στην αρχή εξετάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά της κυψελωτής αρχιτεκτονικής, των τεχνικών ασύρματης πρόσβασης και των κυρίων μεθόδων κατανομής πόρων. Έπειτα, περιγράφονται οι τεχνολογίες κινητών επικοινωνιών μέσα από την εξέλιξη τους και τη διάκριση τους σε γενιές. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται αναλυτικά οι πιο σύγχρονες τεχνολογίες κινητών επικοινωνιών και ασύρματων δικτύων που παρέχουν αυξημένες δυνατότητες μεταφοράς πακέτων δεδομένων και αξιοποιούνται κατά κόρον σήμερα. Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στα θέματα διαχείρισης πόρων για τα δίκτυα αυτά. Στις τεχνολογίες που εξετάζουμε, περιλαμβάνονται κυρίως η τεχνολογία 3^{ης} γενιάς UMTS καθώς και τα σημαντικότερα πρότυπα εξέλιξης της HSPA και LTE. Σε επόμενη ενότητα, παρουσιάζονται τα βασικότερα ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών, εστιάζοντας κυρίως στα τοπικά δίκτυα WLAN που βασίζονται στο πρότυπο IEEE 802.11 και στα ασύρματα δίκτυα ευρυζωνικής πρόσβασης που αξιοποιούν τις εκδόσεις του προτύπου WiMAX IEEE 802.16. Κλείνοντας, εξετάζεται η σύζευξη και η επίτευξη διαλειτουργικότητας μεταξύ των κυψελωτών δικτύων και των δικτύων WLAN με τη χρήση κατάλληλων αρχιτεκτονικών σύζευξης, αφού η επίτευξη της αποτελεί το βασικότερο στοχεύω για την ανάπτυξη των δικτύων επικοινωνιών της επόμενης γενιάς.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, εξετάζονται τα ζητήματα παροχής ποιότητας υπηρεσίας σε ασύρματα κινητά δίκτυα επικοινωνιών και ειδικά ως προς τη δυνατότητα μεταφοράς δεδομένων που υλοποιείται μέσα από την υιοθέτηση του πρωτοκόλλου IP. Η έννοια της ποιότητας υπηρεσίας μελετάται σε συνάρτηση με τις παραμέτρους που έχουν οριστεί, ώστε να υποδηλώνονται τα επίπεδα ποιότητας υπηρεσίας, αλλά και να επιτυγχάνεται η υποστήριξη από το δίκτυο πολλαπλών υπηρεσιών με διαφορετικές απαιτήσεις. Επίσης, παρουσιάζονται τα επικρατέστερα μοντέλα δικτυακών υπηρεσιών, τα οποία αναμένονται να προσφέρουν τις αναγκαίες λύσεις για την παροχή ποιότητας υπηρεσίας στη εξυπηρέτηση κλάσεων υπηρεσιών μεταφοράς δεδομένων σε ασύρματα δίκτυα. Επιπλέον, στο κεφάλαιο αυτό, προτείνονται δύο

πλήρεις αρχιτεκτονικές για την παροχή QoS, μια δικτυακή και μια διαστρωματική, όπου η μεν πρώτη είναι κατάλληλη κυρίως για υφιστάμενα δίκτυα και η δεύτερη ως επί το πλείστον για δίκτυα επόμενης γενιάς.

Στο τρίτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα ζητήματα διαχείρισης πόρων που σχετίζονται κυρίως με τον έλεγχο αποδοχής κλήσεων σε ασύρματα κυψελωτά δίκτυα επικοινωνιών, που αποτελεί άλλωστε το βασικό θέμα της παρούσας διατριβής. Συγκεκριμένα, αφού παρουσιαστούν συνοπτικά τα βασικά ζητήματα μοντελοποίησης της τηλεπικοινωνιακής κίνησης στα κυψελωτά δίκτυα επικοινωνιών, παρουσιάζεται και αναλύεται ο πιθανοτικός έλεγχος αποδοχής κλήσεων, που προτάθηκε για δίκτυα πολλαπλών κλάσεων υπηρεσιών με βάση την εξέλιξη και στάδια ανάπτυξης του. Για τη μοντελοποίηση και τη μελέτη του προβλήματος χρησιμοποιείται η θεωρία αλυσίδων Markov, βάσει της οποίας προκύπτουν και οι αναλυτικοί τύποι υπολογισμού των πιθανοτήτων μη αποδοχής κλήσεων. Τέλος, παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν για το προτεινόμενο σχήμα αποδοχής κλήσεων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο πραγματοποιείται η πιο αναλυτική μελέτη και αξιολόγηση της επίδοσης των αλγορίθμων ελέγχου αποδοχής κλήσεων που αναφέρθηκαν προηγουμένως, όσον αφορά τα ειδικά χαρακτηριστικά τους όπως η απόδοση προτεραιότητας, η δικαιοσύνη στην εξυπηρέτηση των κλήσεων και τη κατανομή των πόρων καθώς και ο ρυθμός διεκπεραίωσης κλήσεων (διεκπεραιωτικότητα - throughput) στο δίκτυο. Από τα βασικότερα ζητήματα τα οποία μελετώνται στην παρούσα ενότητα είναι το πώς επηρεάζεται η λειτουργία του σχήματος, και ειδικά τα χαρακτηριστικά της απόδοσης προτεραιότητας, της δικαιοσύνης και της διεκπεραιωτικότητας κλήσεων από τη μεταβολή της πιθανοτικής παραμέτρου, κάτω από συνθήκες μεταβαλλόμενου φορτίου τηλεπικοινωνιακής κίνησης, που αποτελεί και την κύρια λειτουργική καινοτομία του προτεινόμενου σχήματος.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, μελετάται η βελτιστοποίηση και επέκταση του πιθανοτικού ελέγχου αποδοχής κλήσεων, μέσα από την ενσωμάτωση ενός κατάλληλου μηχανισμού κατανομής πόρων μεταξύ των κλήσεων των υποστηριζόμενων κλάσεων υπηρεσιών από το δίκτυο. Η επέκταση του πιθανοτικού σχήματος ελέγχου αποδοχής κλήσεων γίνεται με την ανάπτυξη ενός πλαισίου που βασίζεται στη θεωρία παιγνίων για την κατανομή πόρων και τη διαπραγμάτευση των τιμών για τους απαιτούμενους πόρους, παρέχοντας στον αλγόριθμο δυναμική λειτουργία και ενίσχυση των δυνατοτήτων και της επίδοσης του. Για την κατανομή πόρων χρησιμοποιείται ένα παίγνιο ανταγωνισμού για τους απαιτούμενους πόρους μεταξύ των αιτημάτων κλήσεων και του παρόχου. Η ισορροπία Nash για το παίγνιο παρέχει μια κατανομή πόρων που μεγιστοποιεί την χρησιμότητα των χρηστών. Παράλληλα, βάσει της

κατανομής πόρων, διαμορφώνεται και ένα παίγνιο διαπραγμάτευσης τιμών κλήσεων για την εξαγωγή των βέλτιστων τιμών και τη μεγιστοποίηση των εσόδων. Με την ενσωμάτωση του μηχανισμού τιμολόγησης παρέχονται οι τιμές των πιθανοτήτων αποδοχής για τη βελτιστοποίηση του σχήματος σύμφωνα με τις συνθήκες του δικτύου και τη συμπεριφορά του χρήστη έναντι των τιμών. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν τη σημαντική βελτίωση της επίδοσης του πιθανοτικού ελέγχου αποδοχής κλήσεων μέσα από τη βελτιστοποίηση του υπολογισμού των πιθανοτικών παραμέτρων αποδοχής κλήσεων.

Στη συνέχεια, στο έκτο και τελευταίο κεφάλαιο γίνεται μια ανασκόπηση της διατριβής και αναφέρονται τα συμπεράσματα τα οποία προκύπτουν από την έρευνα που διεξήχθη πάνω στα θέματα της διαχείρισης πόρων και τον έλεγχο αποδοχής κλήσεων σε ασύρματα ευρυζωνικά δίκτυα επικοινωνιών. Τα συμπεράσματα εστιάζονται κυρίως στα αποτελέσματα της αξιολόγησης επίδοσης και στα σημεία που προάγεται η επιστήμη από την εφαρμογή του καινοτόμου προτεινόμενου μοντέλου ελέγχου αποδοχής κλήσεων σε σύγχρονα κυψελωτά δίκτυα κινητών και ασυρμάτων επικοινωνιών. Τέλος, παρατίθενται οι βιβλιογραφικές αναφορές οι οποίες καλύπτουν όσο γίνεται καλύτερα το γνωστικό αντικείμενο της διαχείρισης πόρων και του ελέγχου αποδοχής κλήσεων σε ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών.

Κεφάλαιο 2ο

Παροχή Ποιότητας Υπηρεσίας για Μεταφορά Δεδομένων σε Ασύρματα Δίκτυα Επικοινωνιών

2.1. Εισαγωγή

Η μεγάλη ανάπτυξη των τηλεπικοινωνιών επιφέρει στην παγκόσμια αγορά αλλαγές σχετικά με τον τρόπο επικοινωνίας όσο και τη διαχείριση ενός συστήματος επικοινωνιών. Ειδικότερα, η σύγκλιση των τεχνολογιών πληροφορικής και επικοινωνιών και η ανάπτυξη του κινητού υπολογισμού δημιουργεί νέες προοπτικές στα ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών. Πλέον, εκτός από τις εφαρμογές κλασσικής τηλεφωνίας στις κινητές επικοινωνίες έχουμε τη δυνατότητα μεταφοράς δεδομένων και φυσικά με τον τρόπο αυτό την ανάπτυξη και υποστήριξη σημαντικών ευρυζωνικών εφαρμογών. Ένα σημαντικό βήμα αποτελεί η σύγκλιση των διαφόρων τεχνολογιών ασύρματων δικτύων γύρω από ένα ενιαίο δίκτυο πυρήνα, το οποίο είναι βασισμένο στην τεχνολογία του πρωτοκόλλου Διαδικτύου IP (Internet Protocol). Μέσα από την αξιοποίηση του πρωτοκόλλου IP είναι εφικτή η μεταφορά δεδομένων και η υποστήριξη σημαντικών ευρυζωνικών εφαρμογών μέσα από τα δίκτυα κινητών και προσωπικών επικοινωνιών. Πολλές τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης επιτυγχάνουν την απρόσκοπτη και αδιάλειπτη σύνδεση των χρηστών χωρίς χρονικούς ή χωρικούς περιορισμούς. Έχοντας, σαν βάση αυτό το μοντέλο συστήματος, οι μελλοντικές προσπάθειες για παροχή τηλεπικοινωνιών φιλοδοξούν να παρέχουν ένα σύνολο έξυπνων και ανεπτυγμένων υπηρεσιών προς όφελος του χρήστη. Για την υποστήριξη των ευρυζωνικών εφαρμογών και τις αυξημένες δυνατότητες μεταφοράς δεδομένων στα σύγχρονα δίκτυα κινητών επικοινωνιών είναι αναγκαία η μελέτη της Ποιότητας Υπηρεσίας (QoS) η οποία τα τελευταία χρόνια αποκτά βαρύνουσα σημασία.

Στο κεφάλαιο αυτό της παρούσας διατριβής θα εξετάσουμε τα ζητήματα παροχής ποιότητας υπηρεσίας σε ασύρματα κινητά δίκτυα επικοινωνιών και ειδικά τη δυνατότητα μεταφοράς δεδομένων όπου ως πιο φιλόδοξη και αποτελεσματική λύση για την επίτευξη του στόχου αυτού αποτελεί η υιοθέτηση του πρωτοκόλλου IP. Η έννοια της ποιότητας υπηρεσίας θα μελετηθεί σε συνάρτηση με τις παραμέτρους που έχουν οριστεί, ώστε να υποδηλώνονται τα επίπεδα ποιότητας υπηρεσίας, αλλά και να επιτυγχάνεται η υποστήριξη από το δίκτυο πολλαπλών υπηρεσιών με διαφορετικές απαιτήσεις. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν τα επικρατέστερα μοντέλα δικτυακών υπηρεσιών σε συνδυασμό με τις κατάλληλες αρχιτεκτονικές που αναμένονται να προσφέρουν τις αναγκαίες λύσεις για την παροχή ποιότητας υπηρεσίας στη εξυπηρέτηση κλάσεων υπηρεσιών μεταφοράς δεδομένων σε ασύρματα δίκτυα.

2.2. Παροχή Ποιότητας Υπηρεσίας

Η παροχή ποιότητας υπηρεσίας Quality of Service (QoS) αναφέρεται στην ικανότητα ενός στοιχείου αλλά και ολόκληρου του δικτύου να παρέχει ένα ικανοποιητικό επίπεδο υπηρεσίας με βάση κάποια κριτήρια παρέχοντας παράλληλα και τις ανάλογες εγγυήσεις. Στα ασύρματα ευρυζωνικά δίκτυα επικοινωνιών η παροχή QoS καθορίζεται από δυο βασικά πλαίσια που αφορούν αφ' ενός τη διαχείριση ραδιοπόρων RRM (radio resource management) και αφετέρου τη διαχείριση κινητικότητας. Η διαχείριση πόρων είναι η λειτουργία του δικτύου που είναι υπεύθυνη για την αποτελεσματική κατανομή των διαθέσιμων πόρων δικτύου. Επίσης εγγυάται την ποιότητα υπηρεσίας με βάση συγκεκριμένους παραμέτρους όπως το εύρος ζώνης, η καθυστέρηση και η αξιοπιστία. Από την άλλη η διαχείριση κινητικότητας αντιμετωπίζει ζητήματα μεταπομπής, καταγραφής θέσης, περιαγωγής κ.α.

Δύο είναι οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν την QoS στα δίκτυα ασύρματης πρόσβασης είναι δυο. Ο πρώτος σχετίζεται με τη σύζευξη της διασφάλισης της QoS με τη διαχείριση κινητικότητας, καθώς βασικός στόχος είναι η διατήρηση του ίδιου επιπέδου QoS κατά τη διάρκεια λειτουργίας και μετά τη μεταπομπή. Καθώς το ασύρματο κανάλι είναι χρονικά μεταβαλλόμενο, ο δεύτερος στόχος είναι η δυναμική διαχείριση των διαθέσιμων ραδιοπόρων. Τεχνικές προσαρμοστικής διαμόρφωσης μπορούν να προσαρμόσουν τα χαρακτηριστικά του τερματικού λαμβάνοντας υπ' όψη το φυσικό επίπεδο ως προς τις μεταβαλλόμενες συνθήκες του καναλιού καθώς και την κατανομή των πόρων με βάση τις ιδιαίτερες απαιτήσεις κάθε κλάσης υπηρεσιών. Για την προσαρμογή της λειτουργίας του

δικτύου στις συνθήκες του μεταβαλλόμενου καναλιού, κατάλληλες διαστρωματικές αρχιτεκτονικές και αλγόριθμοι χρησιμοποιούνται για την εύρυθμη λειτουργία του δικτύου, προσαρμόζοντας και τη λειτουργία των τμημάτων του δικτύου με βάση τις απαιτήσεις των χρηστών και τις σχετικές επιδόσεις των συστημάτων με βάση τις καθορισμένες παραμέτρους QoS.

Η διαχείριση πόρων ως ένα βασικό στοιχείο για την παροχή ποιότητας υπηρεσίας υλοποιείται σε δύο επίπεδα: α) μακροεπίπεδο που περιλαμβάνει τον έλεγχο αποδοχής κλήσεων, την κατηγοριοποίηση των κλάσεων υπηρεσιών, την κατανομή εύρους ζώνης και β) σε μικροεπίπεδο περιλαμβάνει μηχανισμούς που ασχολούνται με το επίπεδο MAC (Medium Access Control), τον χρονοπρογραμματισμό πακέτων (packet scheduling) σε επίπεδο χρονοθυρίδων που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο των παραμέτρων QoS [27]. Φυσικά υπάρχουν και μηχανισμοί παροχής QoS και στο φυσικό επίπεδο που περιλαμβάνουν την κωδικοποίηση καναλιού και τον έλεγχο ισχύος σαν τμήματα της διαχείρισης πόρων σε μικροεπίπεδο. Στην παρούσα διατριβή το πρόβλημα της διαχείρισης πόρων τίθεται στο μακροεπίπεδο εξετάζοντας τον έλεγχο αποδοχής κλήσεων και την παροχή ποιότητας υπηρεσίας σε ασύρματα ευρυζωνικά δίκτυα επικοινωνιών που υποστηρίζουν πολλαπλές κλάσεις υπηρεσιών με διαφορετικές απαιτήσεις QoS.

Η παροχή QoS στα ασύρματα δίκτυα μπορεί να εφαρμοστεί μέσα από δυο διαφορετικές προσεγγίσεις. Η πρώτη βασίζεται στον ειδικό χειρισμό των ροών τηλεπικοινωνιακού φορτίου. Κάθε ροή αντιστοιχεί στις διάφορες υποστηριζόμενες κλάσεις υπηρεσιών με διαφορετικές απαιτήσεις και προδιαγραφές ως προς τους αναγκαίους πόρους και το επίπεδο QoS. Για το λόγο αυτό, οι διάφορες κλάσεις υπηρεσιών θα πρέπει να αντιμετωπιστούν ανεξάρτητα, με βάση δηλαδή μόνο τα ποιοτικά χαρακτηριστικά τους. Για παράδειγμα, διαφορετικά επίπεδα προτεραιότητας μπορούν να αποδοθούν σε κάθε κλάση υπηρεσίας μέσα από ένα μηχανισμό ελέγχου αποδοχής κλήσεων με ενσωματωμένα κατάλληλα κριτήρια. Η δεύτερη προσέγγιση είναι ποσοτική και στοχεύει στη διασφάλιση των ικανοτήτων μετάδοσης όπως αυτές εκφράζονται μέσα από κατάλληλες παραμέτρους όπως ο ρυθμός διέλευσης δεδομένων, η καθυστέρηση κ.α. , τις οποίες θα αναλύσουμε στη συνέχεια. Για παράδειγμα μια εφαρμογή video-streaming απαιτεί έναν εγγυημένο ρυθμό μετάδοσης 32kbps ώστε η αναπαραγωγή στο τερματικό να γίνεται χωρίς διακοπές σε ανεκτό επίπεδο ποιότητας. Αυτή η προσέγγιση βασίζεται στη διαπραγμάτευση του QoS και μέσα από τις συμφωνίες επιπέδου υπηρεσίας SLA (Service Level Agreement). Η λογική πίσω από την προσέγγιση αυτή είναι ότι η υπηρεσία παρέχεται με βάση κάποιες παραμέτρους οι οποίες έχουν συμφωνηθεί ανάμεσα στους παρόχους και στους τελικούς

χρήστες. Η SLA είναι στην ουσία ένα συμβόλαιο παροχής υπηρεσίας ανάμεσα στο χρήστη και στο πάροχο που προσδιορίζει το λαμβανόμενο επίπεδο ποιότητας [28]. Μια SLA μπορεί να περιέχει τόσο τεχνικούς όσο και μη τεχνικούς όρους και συνθήκες. Οι τεχνικές προδιαγραφές και οι συμφωνημένες τιμές τους που αφορούν τη συνδεσιμότητα IP υπηρεσιών καθορίζεται από τις προδιαγραφές επιπέδου υπηρεσίας SLS (Service Level Specifications) [26], [29], [30]. Οι SLS σχετίζονται με διάφορα χαρακτηριστικά όπως η αναγνώριση των ροών τηλεπικοινωνιακής κίνησης μέσα από την κατηγοριοποίηση τους όπως περιγράφεται από τις FlowSpec που αποτελούν τη βάση για τις διαπραγματεύσεις των SLA.

2.3. Παράμετροι Ποιότητας Υπηρεσίας

Στο περιβάλλον των ασυρμάτων ευρυζωνικών επικοινωνιών θα πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν οι προδιαγραφές παροχής ποιότητας υπηρεσίας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα διάφορα είδη υποστηριζόμενων εφαρμογών ποικίλουν ως προς τις προδιαγραφές της QoS. Ειδικότερα θα πρέπει να εξεταστούν τα κριτήρια και οι παράμετροι QoS που καθορίζουν τα επίπεδα ποιότητας και διαφοροποιούν τις παρεχόμενες υπηρεσίες. Ανάμεσα στα κριτήρια αυτά συμπεριλαμβάνονται: η ποιότητα μετάδοσης της φωνής στις φωνητικές κλήσεις, η ισχύς του σήματος, το υψηλό επίπεδο αποδοχής κλήσεων καθώς και ο υψηλός ρυθμός μετάδοσης σε εφαρμογές πολυμέσων και υπηρεσίες μεταφοράς δεδομένων. Ένας αποτελεσματικός σχεδιασμός στην παροχή ποιότητας υπηρεσίας θα πρέπει να μεταχειρίζεται τις διάφορες υπηρεσίες με εξειδικευμένο και αποτελεσματικό από πλευράς κόστους τρόπο, στοχεύοντας στην προσφορά μιας καλής εμπειρίας στο χρήστη της συγκεκριμένης υπηρεσίας. Λαμβάνοντας υπ' όψιν το γεγονός ότι η αντίληψη της ποιότητας υπηρεσίας από το χρήστη ποικίλει ανάλογα με την εφαρμογή, είναι πολύ σημαντικό να ορίσουμε μια σειρά κοινών παραμέτρων οι οποίες θα μεταφράζουν τις απαιτήσεις των υπηρεσιών διαφόρων τύπων στα υποκείμενα διαθέσιμα πρωτόκολλα επικοινωνιών. Οι παράμετροι αυτές θα ενσωματώνουν την προσαρμογή του συστήματος στις απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας των τελικών χρηστών. Οι βασικότερες προκλήσεις όσον αφορά την ποιότητα παροχής υπηρεσίας σε ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών περιλαμβάνουν την αποτελεσματική κατανομή και χρήση των ραδιοπόρων όπως η ισχύς, το φάσμα, η προσαρμοζόμενη λειτουργία στα μεταβλητά χαρακτηριστικά του ασύρματου καναλιού, η αξιοπιστία των συστημάτων, η υποστήριξη των δυνατοτήτων μεταγωγής κ.α.. Οι προκλήσεις αυτές πολλαπλασιάζονται στα ετερογενή δίκτυα $4^{ης}$ γενιάς όπου η παροχή ποιότητας υπηρεσίας θα πρέπει να υλοποιεί συγκεκριμένες απαιτήσεις που προέρχονται από την ενσωμάτωση διαφορετικών τεχνολογιών στις

αρχιτεκτονικές δικτύου όπως: ανεξαρτησία από τις διάφορες τεχνολογίες ραδιοπρόσβασης, διαλειτουργικότητα και υποστήριξη κινητικότητας για τη δυνατότητα αδιάλειπτης μεταγωγής και ανεξαρτησία από συγκεκριμένες τεχνικές παροχής ποιότητας υπηρεσίας.

Στα σταθερά και κινητά ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών η έννοια της ποιότητας υπηρεσίας μεταφράζεται σε μια καλή ποιότητα λήψης σήματος, στη διαθεσιμότητα της υπηρεσίας και στην ελάχιστη καθυστέρηση. Στις υπηρεσίες όπου έχουμε μετάδοση δεδομένων σε μορφή πακέτων όπως στις υπηρεσίες διαδικτύου ορίζονται νέες επιπλέον παράμετροι. Ειδικότερα η παροχή ποιότητας υπηρεσίας σε δίκτυα μεταφοράς δεδομένων και η υποστήριξη πολλαπλών υπηρεσιών με διαφορετικές απαιτήσεις QoS είναι από τα σημαντικά χαρακτηριστικά των σύγχρονων δικτύων επικοινωνιών. Τα χαρακτηριστικά βάσει των οποίων μπορούμε να ορίσουμε την ποιότητα υπηρεσίας σε επίπεδο δικτύου είναι:

- Ρυθμός Διέλευσης Δεδομένων ή Ρυθμοαπόδοση ή Διεκπεραιωτικότητα (Throughput): Αντιστοιχεί στον μέσο ρυθμό επιτυχούς μετάδοσης πακέτων ή κλήσεων γενικά μηνυμάτων μέσα από το τηλεπικοινωνιακό κανάλι σε ένα δίκτυο.
- Καθυστέρηση (Delay): Πρόκειται για το χρόνο που απαιτείται για την μεταφορά ενός πακέτου από τον αποστολέα στον παραλήπτη.
- Διακύμανση της καθυστέρησης (Jitter): Πρόκειται για τη χρονική αστάθεια που προκαλείται από τη διακύμανση στο χρόνο της καθυστέρησης μετάδοσης των πακέτων. Αντιστοιχεί σε μια διαστρέβλωση του χρόνου άφιξης διαδοχικών πακέτων έναντι του αντίστοιχου χρόνου της αρχικής μετάδοσης, η οποία είναι ιδιαίτερα καταστρεπτική στη κίνηση πακέτων υπηρεσιών πολυμέσων.
- Εύρος ζώνης Δικτύου (Bandwidth): Είναι ένα μέτρο της ικανότητας μετάδοσης δεδομένων πάνω από ένα συγκεκριμένο δίκτυο, που εκφράζεται συνήθως σε kilobits ανά δευτερόλεπτο (kbps) ή megabits ανά δευτερόλεπτο (Mbps). Το εύρος ζώνης δείχνει τη θεωρητικά μέγιστη ικανότητα του δικτύου να υποστηρίξει μία ή πολλαπλές συνδέσεις. Περιορίζεται μόνο από τα φυσικά χαρακτηριστικά του διαύλου αλλά και από το πλήθος των ροών που μοιράζονται τον ίδιο δίαυλο. Μπορεί περαιτέρω να αναλυθεί σε:
    - Ρυθμό μετάδοσης δεδομένων συστήματος: που είναι ο ελάχιστος απαιτούμενος ρυθμός για τη σωστή μετάδοση δεδομένων σε επίπεδο συστήματος (σε bits/bytes per second) και
    - Ρυθμό μετάδοσης δεδομένων εφαρμογής: που είναι ο ελάχιστος απαιτούμενος ρυθμός για τη σωστή μετάδοση δεδομένων σε επίπεδο εφαρμογής. Η παράμετρος αυτή εξαρτάται από την εκάστοτε εφαρμογή και

μπορεί να συνοδεύει το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων συστήματος ή ακόμα και να τον υποκαθιστά.

- Ρυθμός απώλειας πακέτων (Packet Loss Rate – PLR): Πρόκειται για τον ανεκτό ρυθμό απώλειας δεδομένων κατά τη μετάδοση πακέτων. Οι απώλειες δημιουργούνται, αφενός λόγω της καθυστέρησης μετάδοσης και αφετέρου λόγω των δυσμενών συνθηκών που επικρατούν στο κανάλι, οπότε πακέτα αλλοιώνονται. Η απώλεια πακέτων οδηγεί σε μείωση της δυνατότητας ανάκτησης των δεδομένων, ιδιαίτερα σε υπηρεσίες που είναι ευάλωτες στην καθυστέρηση (π.χ. μετάδοση φωνής ή video) και δε μπορούν να ανεχθούν την καθυστερημένη επαναμετάδοση των χαμένων πακέτων.
- Αξιοπιστία (Reliability): Πρόκειται για ένα μέτρο διαθεσιμότητας του συστήματος ή του δικτύου. Η αξιοπιστία μπορεί να αφορά το χρόνο λειτουργίας του συστήματος πέρα από τον οποίο μπορεί να παρουσιαστεί μια αποτυχία στην επικοινωνία ή στο χρόνο που χρειάζεται το σύστημα για να ανακάμψει από αυτή.

Τα χαρακτηριστικά βάσει των οποίων μπορούμε να ορίσουμε την ποιότητα υπηρεσίας σε επίπεδο χρήστη είναι:

- Προτεραιότητα (Priority): είναι ένα μέτρο της διαφοροποίησης των χρηστών όσον αφορά τη σπουδαιότητά τους στη διατήρησή τους στο σύστημα.
- Λαμβανόμενη ποιότητα υπηρεσίας (Perceived Level of QoS): είναι ένα μέτρο της υποκειμενικότητας του χρήστη στη λήψη της υπηρεσίας. Το χαρακτηριστικό αυτό μπορεί να διαιρεθεί σε πολλές παραμέτρους, ανάλογα με το είδος της προσφερόμενης υπηρεσίας.
- Κόστος: (Cost): εκφράζει το μέγιστο κόστος, το οποίο ο χρήστης είναι διατεθειμένος να πληρώσει για τη λήψη μίας υπηρεσίας.
- Ασφάλεια (Security): είναι ένα μέτρο της ασφάλειας στην επικοινωνία του χρήστη με το σύστημα, το οποίο μπορεί να περιλαμβάνει την εμπιστευτικότητα και την ακεραιότητα στη μετάδοση δεδομένων.

Για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του δικτύου πρέπει να λαμβάνεται πρόνοια ώστε όλοι οι προαναφερθέντες παράγοντες να εξισορροπούνται μεταξύ τους τόσο σε επίπεδο δικτύου όσο και σε επίπεδο χρήστη.

Η επιλογή κατάλληλων τιμών για τα μεγέθη αυτά είναι πολύ κρίσιμη για την εύρυθμη λειτουργία του δικτύου. Ειδικότερα στις υπηρεσίες μεταφοράς δεδομένων σε μορφή πακέτων, τυχόν συμφόρηση στο δίκτυο θα προκαλέσει καθυστέρηση και χρονική αστάθεια. Επιπλέον τα επίπεδα του ρυθμού διέλευσης δεδομένων μπορεί να φτάσουν σε μη αποδεκτά

επίπεδα. Για τους λόγους αυτούς θα πρέπει σε όλους τους παραπάνω παράγοντες ποιότητας υπηρεσίας να οριστούν τα ελάχιστα επίπεδα επίδοσης. Επιπλέον, δεδομένου ότι στα σύγχρονα δίκτυα ασυρμάτων επικοινωνιών έχουμε την υποστήριξη πολλαπλών υπηρεσιών, θα πρέπει για κάθε μία να οριστούν κατάλληλα επίπεδα καθυστέρησης, διακύμανσης της καθυστέρησης και ρυθμού απώλειας πακέτων τα οποία απαιτούνται για την κατάλληλη παροχή ποιότητας υπηρεσίας. Οι προδιαγραφές αυτές μπορούν να αποτελέσουν ακόμα και κριτήρια ελέγχου αποδοχής κλήσεων.

2.4. Μοντέλα Δικτυακών Υπηρεσιών

Η εισαγωγή νέων υπηρεσιών με διαφορετικές απαιτήσεις QoS απαιτεί την περιγραφή των προδιαγραφών και την ταξινόμηση τους σε κατάλληλα μοντέλα δικτυακών υπηρεσιών. Ενδεικτικά οι απαιτήσεις QoS που αναφέρονται στο εύρος ζώνης και στη ανεκτή καθυστέρηση της κίνησης πολυμέσων ποικίλουν και διαφοροποιούνται σημαντικά ανάλογα με την υπηρεσία, λαμβάνοντας ένα μεγάλο εύρος τιμών. Για παράδειγμα, η υπηρεσία φωνής απαιτεί ένα εύρος ζώνης μόνο 10-20 kb/s ενώ η υπηρεσία βίντεο υψηλής ποιότητας απαιτεί 500 – 1000 kb/s. Από την άλλη πλευρά, οι υπηρεσίες φωνής και βίντεο δεν έχουν ανοχή στη καθυστέρηση, ενώ οι εφαρμογές Διαδικτύου όπως η μεταφορά αρχείων μπορεί να είναι ανεκτές στη καθυστέρηση. Η σύγκλιση και η διαλειτουργικότητα των υπηρεσιών όπου έχουμε την υλοποίηση δικτύων με διάφορες τεχνολογίες πρόσβασης γίνεται μέσα από μια ενοποιημένη πλατφόρμα πρωτοκόλλου Διαδικτύου IP (Internet Protocol). Η ευελιξία της πλατφόρμας IP δίνει τη δυνατότητα να αντιστοιχηθούν οι κλάσεις των υπηρεσιών των κινητών και ασυρμάτων δικτύων των κυψελοειδών συστημάτων επικοινωνιών σε αντίστοιχες κλάσεις IP υπηρεσιών προσφέροντας ευελιξία, διαλειτουργικότητα και τελικά αποτελεσματική λειτουργία δικτύων υπολογιστών και επικοινωνιών.

Για το λόγο αυτό αναπτύχθηκαν κατάλληλοι μηχανισμοί ελέγχου των απαιτήσεων QoS για το ζεύγος πρωτοκόλλων TCP/IP. Ειδικότερα ανάμεσα στα διάφορα μοντέλα και μηχανισμούς που προτάθηκαν από την IETF (Internet Engineering Task Force), δυο προσεγγίσεις, η αρχιτεκτονική ολοκληρωμένων υπηρεσιών – Integrated Services (IntServ) και η αρχιτεκτονική διαφοροποιημένων υπηρεσιών – Differentiated Services (DiffServ), αποτελούν τις πιο επικρατέστερες [31]. Από την άλλη πλευρά το 3rd Generation Partnership Project (3GPP) περιέγραψε αναλυτικά τις κλάσεις υπηρεσιών για τα ασύρματα δίκτυα κινητών επικοινωνιών τρίτης γενιάς [32]. Η χρήση των μοντέλων αυτών και ειδικά ο συνδυασμός τους θα βοηθήσει στην επίτευξη της διαλειτουργικότητας μεταξύ των

ασύρματων δικτύων και της αρχιτεκτονικής IP, δίνοντας ώθηση στην ανάπτυξη των δικτύων 4ης γενιάς.

2.4.1. Αρχιτεκτονική Ολοκληρωμένων Υπηρεσιών (IntServ)

Η αρχιτεκτονική IntServ στοχεύει στην παροχή ποιότητας υπηρεσίας βασιζόμενη στη δέσμευση πόρων. Το πλαίσιο IntServ παρουσιάστηκε το 1994 σαν μια προσπάθεια να υποστηριχθούν διαφορετικοί τύποι τηλεπικοινωνιακής κίνησης μέσα στο ίδιο δίκτυο [33]. Μετά την εισαγωγή του, πραγματοποιήθηκαν αρκετές βελτιώσεις σε αυτό. Η αρχιτεκτονική IntServ χρησιμοποιεί μηχανισμούς ελέγχου αποδοχής (admission control), ελέγχου ροής εισόδου τηλεπικοινωνιακής κίνησης στο δίκτυο (rate control) και δέσμευσης πόρων με σκοπό την παροχή ποιότητας υπηρεσίας. Το πλαίσιο IntServ λαμβάνει υπ' όψιν τις διαφορετικές απαιτήσεις QoS των υποστηριζόμενων υπηρεσιών. Η εφαρμογή θα πρέπει να επιλέξει τη διαδρομή που θα ακολουθήσει η ροή της και να δεσμεύσει τους απαραίτητους πόρους πριν τη μετάδοση των δεδομένων. Η αρχιτεκτονική IntServ βασίζεται στην παροχή υπηρεσίας ανά ροή, ενημερώνοντας τους δρομολογητές (routers) για την διαδρομή των δεδομένων και τις απαιτήσεις τους σε πόρους. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω του πρωτοκόλλου RSVP (Resource Reservation Protocol), που αποτελεί ένα πρωτόκολλο σηματοδοσίας και δέσμευσης πόρων το οποίο ενημερώνει τους δρομολογητές ώστε με τη σειρά τους να παρέχουν τους απαιτούμενους πόρους [24]. Σήμερα το RSVP σπάνια αναπτύσσεται αφού έχει αναπτυχθεί η επέκταση του, το RSVP-TE, το οποίο τυγχάνει ευρύτερης αποδοχής [34].

Στην αρχική μορφή της αρχιτεκτονικής IntServ δεν είχαν προσδιοριστεί οι υποστηριζόμενες κλάσεις υπηρεσιών. Το 1997 η ομάδα εργασίας της IETF για την αρχιτεκτονική IntServ καθόρισε τρεις τύπους υπηρεσιών με διακριτές απαιτήσεις και προδιαγραφές QoS: την εγγυημένη υπηρεσία GS (Guaranteed Service), την υπηρεσία ελεγχόμενου φορτίου CL (Controlled Load service) καθώς και την υπηρεσία βέλτιστης προσπάθειας BE (Best Effort service) [35], [36]. Η σημαντικότερη διαφοροποίηση τους έγκειται στο επίπεδο ανοχής της καθυστέρησης.

Η κλάση GS εγγυάται ότι τα πακέτα θα φτάνουν μέσα στον εγγυημένο χρόνο αποστολής και δε θα έχουμε απώλεια εξαιτίας υπερχείλισης των μονάδων προσωρινής αποθήκευσης, δεδομένου ότι η κίνηση της ροής συμμορφώνεται με τις παραμέτρους κίνησης. Αυτή η κλάση υπηρεσιών χρησιμοποιείται για εφαρμογές μη ανεκτής καθυστέρησης DNT (Delay Non-Tolerant), όπου απατούνται εγγυήσεις ότι τα πακέτα θα φτάσουν σε συγκεκριμένη χρονική περίοδο μετά την εκπομπή τους. Εδώ θα πρέπει να

σημειωθεί ότι η καθυστέρηση αποτελείται από δυο συνιστώσες, τη σταθερή καθυστέρηση (fixed delay) και τη καθυστέρηση αναμονής στην ουρά (queuing delay). Η σταθερή καθυστέρηση εξαρτάται από τη διαδρομή μετάδοσης που θα επιλεγεί. Η κλάση GS δεν ελέγχει την ελάχιστη ή τη μέση καθυστέρηση ενός πακέτου, αλλά την περιορίζει θέτοντας άνω όριο στην καθυστέρηση αναμονής στην ουρά. Όμως δεν δίνεται η δυνατότητα ελέγχου της διακύμανσης καθυστέρησης. Η κλάση GS υποστηρίζει εφαρμογές πραγματικού χρόνου όπως ευρυζωνικες εφαρμογές πολυμέσων.

Η κλάση CL προορίζεται για την υποστήριξη προσαρμοστικών εφαρμογών πραγματικού χρόνου οι οποίες αναπτύχθηκαν για το Διαδίκτυο και είναι ευαίσθητες στις συνθήκες υψηλού τηλεπικοινωνιακού φορτίου. Οι εφαρμογές αυτές λειτουργούν αξιόπιστα παρέχοντας το απαιτούμενο επίπεδο QoS κάτω από συνθήκες χαμηλού τηλεπικοινωνιακού φορτίου, οι οποίες όμως υποβαθμίζονται κάτω από υψηλά φορτία. Στην ουσία η υπηρεσία CL προσφέρει QoS ιδίου επιπέδου με την υπηρεσία BE υπό συνθήκες χαμηλού φορτίου του δικτύου με μηδενικές απώλειες και καθυστέρηση, ενώ υπό συνθήκες υπερφόρτωσης, στοχεύει στην ελεγχόμενη κατανομή του συνολικού εύρους ζώνης σε πολλαπλές ροές κίνησης. Τόσο η υπηρεσία GS όσο και η CL έχουν σχεδιαστεί να υποστηρίζουν εφαρμογές πραγματικού χρόνου οι οποίες έχουν διαφορετικές απαιτήσεις QoS στο δίκτυο.

Η κλάση υπηρεσιών BE προσφέρει τον ίδιο τύπο υπηρεσιών κάτω από την τρέχουσα αρχιτεκτονική του Διαδικτύου. Η κλάση BE δεν περιλαμβάνει κανένα είδος ελέγχου ποιότητας ή διαπραγμάτευσης. Στην ουσία το δίκτυο προσπαθεί να παραδώσει πακέτα δεδομένων χωρίς εγγυήσεις. Η υπηρεσία θα παρέχεται όσο το τηλεπικοινωνιακό φορτίο και η συμφόρηση στο δίκτυο βρίσκεται κάτω από συγκεκριμένα επίπεδα. Αυτή η κλάση υπηρεσίας είναι επαρκής για εφαρμογές μη πραγματικού χρόνου NRT (Non Real Time) οι οποίες θα χρησιμοποιούσουν ένα πρωτόκολλο TCP (Trasmission Control Protocol) με σκοπό να διασφαλιστεί η παράδοση των πακέτων. Ανάμεσα στις δημοφιλείς NRT εφαρμογές είναι: FTP (File Transfer Protocol), ηλεκτρονικό ταχυδρομείο (e-mail) και η πλοήγηση στο Διαδίκτυο. Όλες αυτές οι εφαρμογές μπορούν να λειτουργήσουν χωρίς εγγυήσεις που να αφορούν την έγκαιρη παράδοση των πακέτων δεδομένων. Το σημαντικό στοιχείο στις εφαρμογές αυτές είναι ότι μπορούν να επωφελούνται από μικρότερες διαδρομές, όμως σε περίπτωση που αυξηθεί η καθυστέρηση δε θα καταστούν άχρηστες.

Συνοψίζοντας, η αρχιτεκτονική υπηρεσιών IntServ παρέχει εγγυήσεις QoS μέσω δέσμευσης πόρων και θεωρείται καταλληλότερη για εφαρμογές με απαιτήσεις υψηλού εύρους ζώνης. Όμως η αρχιτεκτονική IntServ παρουσιάζει σημαντικά προβλήματα

κλιμάκωσης και για το λόγο αυτό η IETF προχώρησε στην ανάπτυξη της αρχιτεκτονικής διαφοροποιημένων υπηρεσιών (DiffServ).

2.4.2. Αρχιτεκτονική Διαφοροποιημένων Υπηρεσιών (DiffServ)

Οι κλάσεις υπηρεσιών που υποστηρίζονται από τα ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών μπορούν να αντιστοιχηθούν σε αυτές της αρχιτεκτονικής DiffServ, προχωρώντας σε μια ενοποίηση των ασυρμάτων δικτύων με μια ενιαία IP αρχιτεκτονική. Η αρχιτεκτονική DiffServ είναι από τα βασικότερα μοντέλα για την παροχή QoS στο Διαδίκτυο, η οποία όμως μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα δίκτυα επόμενης γενιάς. Η αρχιτεκτονική DiffServ κατηγοριοποιεί τις διάφορες εφαρμογές διαφοροποιώντας αυτές στη βάση της επίδοσης των χρηστών. Η αρχιτεκτονική DiffServ βασίζεται σε ένα μηχανισμό απόδοσης σχετικής προτεραιότητας μέσω της απόδοσης ετικετών στα πακέτα δεδομένων ώστε αυτά να αντιστοιχηθούν σε κλάσεις υπηρεσιών. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω του κώδικα διαφοροποίησης υπηρεσιών DSCP (DiffServ Code Point), ο οποίος ενσωματώνεται στην επικεφαλίδα κάθε IP πακέτου. Οι ετικέτες στα πακέτα ενεργοποιούνται μέσω συγκεκριμένων ψηφίων στην επικεφαλίδα τους ώστε κάθε πακέτο να αντιστοιχηθεί στην ανάλογη κλάση υπηρεσιών. Στα πακέτα που ανήκουν στις διάφορες κλάσεις υπηρεσιών αποδίδονται διαφορετικά επίπεδα QoS. Στην επικεφαλίδα καταγράφεται στην ουσία το είδος της υπηρεσίας. Μέσα από κατάλληλο σχεδιασμό η αρχιτεκτονική DiffServ μπορεί να προσφέρει μεγάλη ευελιξία και κλιμάκωση μαζί με την ικανοποίηση των απαιτήσεων ποιότητας υπηρεσίας για όλες τις υποστηριζόμενες εφαρμογές. Στην αρχιτεκτονική DiffServ η παροχή ποιότητας υπηρεσίας δε γίνεται σε βάση ροής τηλεπικοινωνιακού φορτίου, όπως συμβαίνει στην αρχιτεκτονική IntServ. Στην DiffServ έχουμε συνένωση των IP – ροών φορτίου του ίδιου επιπέδου QoS στην ίδια ομάδα. Οι DiffServ δρομολογητές αναγνωρίζουν την ομάδα στην οποία ανήκουν τα IP πακέτα μέσω του αντίστοιχου πεδίου τύπου που υπάρχει στην επικεφαλίδα των πακέτων. Κάθε ομάδα ροών με τις ίδιες απαιτήσεις QoS χαρακτηρίζεται από το ίδια DSCP στην IP επικεφαλίδα η οποία πληροφορεί τους δρομολογητές για τους πόρους που απαιτούνται. Η εφαρμογή της αρχιτεκτονικής DiffServ για τη διαχείριση της IP τηλεπικοινωνιακής κίνησης επιτυγχάνει την ικανοποίηση των απαιτήσεων QoS.

Στο μοντέλο DiffServ έχουμε τρεις κλάσεις υπηρεσιών: η κλάση επίσπευσης προώθησης EF (Expedited Forwarding), η κλάση διασφαλισμένης προώθησης AF (Assured Forwarding) και η κλάση δεδομένης απλής προώθησης DF (Default Forwarding).

Μέσα από την κατάλληλη συνένωση πακέτων, κάθε ροή λαμβάνει την ανάλογη διαδικασία χειρισμού PHB (Per Hop Behaviour) σε κάθε κόμβο δικτύου. Οι εναλλακτικοί τρόποι αντιμετώπισης από το δίκτυο αφορούν τη διαδικασία προώθησης πακέτων, όπως για παράδειγμα, τη σχετική προτεραιότητα κατά την απόρριψη ή την αποδοχή ενός αιτήματος εύρους ζώνης. Ειδικότερα, η προνομιακή διαχείριση των κλάσεων υπηρεσιών EF και AF εξασφαλίζει την παροχή των ζητούμενων QoS [37], [38]. Η ομάδα εργασίας της IETF για τις DiffServ όρισε τις προδιαγραφές για τη AF PHB η οποία έχει ως στόχο να παρέχει διάφορα επίπεδα QoS στα προωθούμενα IP πακέτα σε ένα κόμβο, χειριζόμενη παράλληλα κλάσεις υπηρεσιών με πολλαπλές προτεραιότητες.

Η κλάση υπηρεσιών EF προορίζεται για την περιγραφή εφαρμογών-υπηρεσιών με χαμηλό ρυθμό απώλειας πακέτων, χαμηλή καθυστέρηση και χαμηλή διακύμανση της καθυστέρησης. Αυτή η κλάση υπηρεσιών είναι παρόμοια με την υπηρεσία CBR (Constant Bit Rate στα δίκτυα ATM (Asynchronous Transfer Mode). Μέσα από βελτιωμένες τεχνικές αναμονής, η καθυστέρηση και η διακύμανση της περιορίζονται σημαντικά. Επιπλέον στην κλάση EF περιορίζονται τα σφάλματα λόγω μετάδοσης και λόγω αλλαγών δρομολόγησης. Συνεπώς η κλάση υπηρεσιών EF περιγράφει τη μεταφορά φωνής και δεδομένων που απαιτούν υψηλά επίπεδα QoS. Η κλάση υπηρεσιών AF παρέχει λιγότερες εγγυήσεις όσον αφορά το ρυθμό απώλειας πακέτων, την καθυστέρηση και τη διακύμανση της. Προορίζεται για δίκτυα που προσφέρουν μέτριες εγγυήσεις και περιορισμένες συμφωνίες παροχής υπηρεσίας. Η αρχιτεκτονική DiffServ αποτελεί μια από τις πιο αξιόπιστες λύσεις για τη διαχείριση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης, την υποστήριξη πολλαπλών κλάσεων υπηρεσιών και την παροχή QoS.

2.4.3. Διαφορές μεταξύ IntServ και DiffServ

Η κύρια διαφορά μεταξύ των αρχιτεκτονικών IntServ και DiffServ είναι ο διαφορετικός τρόπος αντιμετώπισης των ροών πακέτων δεδομένων. Η αρχιτεκτονική IntServ εστιάζει στην παροχή εγγυήσεων ανά ροή απαιτώντας ξεχωριστή σηματοδοσία για τη δέσμευση των απαιτούμενων πόρων. Όμως παρά την αποτελεσματικότητα της η αρχιτεκτονική IntServ παρουσιάζει προβλήματα κλιμάκωσης. Από την άλλη πλευρά, η αρχιτεκτονική DiffServ αποδίδει προτεραιότητα σε ροές σε μια ενοποιημένη βάση. Για παράδειγμα, ροές τηλεπικοινωνιακής κίνησης ίδιων απαιτήσεων εξυπηρέτησης αντιμετωπίζονται με τον ίδιο τρόπο με βάση το σημείο κώδικα στην επικεφαλίδα των πακέτων δεδομένων. Η αρχιτεκτονική DiffServ εφαρμόζεται σε δίκτυα μεγάλης κλίμακας

και παρουσιάζει κάποιες αδυναμίες στην παροχή QoS από άκρο σε άκρο (end-to-end QoS). Σε μια προσπάθεια εύρεσης μιας συμβιβαστικής λύσης, η IETF πρότεινε ένα συνδυασμό των δυο αρχιτεκτονικών [39]. Η ιδέα πίσω από αυτή τη προσέγγιση είναι να συνδυαστούν τα πλεονεκτήματα κάθε αρχιτεκτονικής. Ειδικότερα μπορεί να χρησιμοποιηθεί η IntServ όπου αυτό είναι εφικτό παρέχοντας αυστηρές εγγυήσεις QoS ενώ η DiffServ στις περιπτώσεις όπου δεν είναι εφικτή η δέσμευση πόρων, όπως για παράδειγμα στο ιεραρχικό δίκτυο υποδομής. Πάνω σε αυτή τη συνδυασμένη προσέγγιση, παρέχεται ένα πολλά υποσχόμενο πλαίσιο για την παροχή QoS.

2.4.4. Αντιστοίχιση Κλάσεων Υπηρεσιών 3G σε IP Δικτυακά Μοντέλα

Όπως προαναφέρθηκε τα τελευταία χρόνια η σύγκλιση της πληροφορικής και των τηλεπικοινωνιών οδηγεί σε μια διεύρυνση της εφαρμογής του πρωτοκόλλου IP στις ασύρματες επικοινωνίες. Μάλιστα η ανάπτυξη των ετερογενών δικτύων 4^{ης} γενιάς (4G) βασίζεται στην επίτευξη της διαλειτουργικότητας μεταξύ των κινητών δικτύων 3^{ης} (3G) με τα IP δίκτυα. Στα δίκτυα κινητών επικοινωνιών τρίτης γενιάς, οι υποστηριζόμενες κλάσεις υπηρεσιών περιγράφονται από το 3GPP, το οποίο έχει ορίσει και τις τεχνικές προδιαγραφές τους [32]. Οι τέσσερις κλάσεις υπηρεσιών είναι οι κλάσεις conversational, streaming, interactive και background [32]. Το βασικό χαρακτηριστικό το οποίο διακρίνει τις κλάσεις υπηρεσιών μεταξύ τους είναι η ευαισθησία της τηλεπικοινωνιακής κίνησης όσον αφορά την καθυστέρηση. Για παράδειγμα η κλάση conversational περιλαμβάνει κίνηση ευαίσθητη στην καθυστέρηση ενώ η κλάση background είναι η λιγότερο ευαίσθητη κλάση υπηρεσιών στην καθυστέρηση. Κάθε μια από τις κλάσεις υπηρεσιών που έχουν προδιαγραφεί από το 3GPP μπορεί να αντιστοιχηθεί στις κλάσεις δικτυακών υπηρεσιών IP με βάση τις αρχιτεκτονικές που περιγράψαμε στις προηγούμενες ενότητες. Η χαρτογράφηση των κλάσεων υπηρεσιών είναι τεράστιας σημασίας για την ανάπτυξη των δικτύων τέταρτης γενιάς.

Οι conversational και streaming κλάσεις υπηρεσιών προορίζονται για εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Η διαφορά μεταξύ τους είναι το επίπεδο ευαισθησίας στην καθυστέρηση. Η πραγματικού χρόνου conversational κλάση υπηρεσιών είναι η πιο ευαίσθητη κλάση στην καθυστέρηση. Η τηλεφωνία, η μεταφορά φωνής πάνω από το πρωτόκολλο IP, η βιντεοδιάσκεψη και άλλες ανάλογες εφαρμογές ανήκουν σε αυτή την κλάση υπηρεσιών. Η μέγιστη ανοχή στην καθυστέρηση στην κλάση αυτή καθορίζεται από την ανθρώπινη αντίληψη της συνομιλίας κατά τη διάρκεια μια τηλεφωνικής κλήσης ή βιντεοκλήσης. Η ανοχή αυτή είναι πολύ μικρή και εξαιρετικά αυστηρή. Η κλάση υπηρεσιών

streaming σχετίζεται με την παρακολούθηση βίντεο ή την ακρόαση μουσικής σε πραγματικό χρόνο. Αυτό το είδος κίνησης είναι ασύμμετρο και θα πρέπει να ρυθμίζεται ώστε ο ενδιάμεσος χρόνος άφιξης μεταξύ των πακέτων θα πρέπει να διατηρείται.

Οι κλάσεις υπηρεσιών interactive και background περιλαμβάνουν παραδοσιακές εφαρμογές Διαδικτύου όπως η πλοήγηση, το ηλεκτρονικό ταχυδρομείο e-mail, η μεταφορά αρχείων κ.α. Αυτές οι εφαρμογές είναι λιγότερο ευαίσθητες στην καθυστέρηση συγκρινόμενες με τις conversational και streaming κλάσεις υπηρεσιών. Όμως, το περιεχόμενο τους θα πρέπει να παραδίδεται με χαμηλό ρυθμό σφαλμάτων, ο οποίος επιτυγχάνεται μέσα από την εφαρμογή κατάλληλης κωδικοποίησης και μέσα από την επαναμετάδοση. Η κύρια διαφορά μεταξύ interactive και background κλάσεων υπηρεσιών είναι ότι πρώτη αφορά υπηρεσίες όπως η πλοήγηση στο Διαδικτυο, η αναζήτηση σε βάσεις δεδομένων, η πρόσβαση σε εξυπηρετητές, ενώ η δεύτερη προορίζεται για εφαρμογές όπως το ηλεκτρονικό ταχυδρομείο ή λήψη αρχείων. Επίσης, η interactive κλάση υπηρεσιών έχει υψηλότερη προτεραιότητα χρονοπρογραμματισμού των πακέτων σε σχέση με τη background κλάση υπηρεσιών. Η background κλάση υπηρεσιών δεσμεύει πόρους όταν οι interactive εφαρμογές δεν τους χρειάζονται.

Οι κλάσεις υπηρεσιών στις κινητές επικοινωνίες τρίτης γενιάς μπορούν να αντιστοιχηθούν με τα δικτυακά μοντέλα υπηρεσιών τα οποία περιγράφηκαν στην ενότητα αυτή. Στον παρακάτω πίνακα περιγράφεται η αντιστοίχηση των κλάσεων υπηρεσιών:

Πίνακας 2.1: Αντιστοίχηση κλάσεων υπηρεσιών 3G σε δικτυακά μοντέλα IP

3GPP Classes	IntServ SCs	DiffServ SCs	Characteristics	Applications
Conversational	**Guaranteed Service**	**Expedited (Premium Forwarding**)	Intolerant Real Time Preserve time relation between entities Stringent low delay Minimize delay variation	Voice Calls Video Conference
Streaming	**Controlled-Load**	**Assured Forwarding**	Tolerant Real Time Minimize delay variation Preserve time relation between entities	Audio Streaming Video Streaming
Interactive	**Best-Effort**	**Best Effort (Default Forwarding)**	Non Real Time Minimize bit error rate Request response pattern Preserve payload content	Web browsing WAP browsing Server Access Data Bases
Background	**Best-Effort**	**Best Effort (Default Forwarding)**	Non Real Time Preserve payload content Minimize bit error rate Less delay sensitive than the interactive class	E-mail File Download

Η παραπάνω βασική κατηγοριοποίηση των κλάσεων υπηρεσιών αποτελεί ένα σημείο αναφοράς για την ανάπτυξη μιας σειράς μηχανισμών και πρωτοκόλλων που προσανατολίζονται να κατηγοριοποιήσουν, να διαφοροποιήσουν και να παρέχουν QoS σε όλες τις υποστηριζόμενες υπηρεσίες στα ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών.

2.5. Κατηγορίες Εφαρμογών Πολυμέσων βάσει Απαιτήσεων Ποιότητας Υπηρεσίας

Η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών ITU (International Telecommunications Union) προχώρησε στην έκδοση μιας σχετικής σύστασης η οποία αφορά την κατηγοριοποίηση των εφαρμογών πολυμέσων βάσει των απαιτήσεων ποιότητας υπηρεσίας. Πρόκειται για τη σύσταση Y.1541 η οποία αφορά την επίδοση ποιότητας υπηρεσίας από άκρο σε άκρο για τις εφαρμογές IP. Στη σύσταση αυτή η τηλεπικοινωνιακή κίνηση για τις διάφορες υποστηριζόμενες εφαρμογές χωρίζεται σε οκτώ κατηγορίες με βάση δυο παραμέτρους ποιότητας υπηρεσίας: την ανοχή στα σφάλματα και την καθυστέρηση. Στον παρακάτω πίνακα μπορούμε να δούμε τις κατηγορίες ποιότητας υπηρεσίας IP.

Πίνακας 2.2: Κατηγορίες ποιότητας υπηρεσίας IP σύμφωνα με τη σύσταση της ITU

ΚΡΙΤΗΡΙΑ	**ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ**			
Καθυστέρηση	**Διαδραστικές**	**Με απόκριση**	**Με χρονικό περιορισμό**	**Μη κρίσιμες**
Ανοχή στα σφάλματα	Μετάδοση φωνής και video	Μηνύματα φωνής και video	Audio and Video Streaming	Fax
Μη ανοχή στα σφάλματα	Telnet Παιχνίδια	Συναλλαγές	Μηνύματα κειμένου, download	e-mail

Ειδικότερα, οι υποστηριζόμενες εφαρμογές που αξιοποιούν το πρωτόκολλο IP με βάση την ανοχή τους στην καθυστέρηση μπορούν να χωριστούν σε τέσσερις βασικές κατηγορίες: τις διαδραστικές με ανεκτή καθυστέρηση μικρότερη του 1 sec, τις κλάσεις με απόκριση όπου η ανεκτή καθυστέρηση είναι 2 sec, τις κλάσεις με χρονικό περιορισμό όπου η καθυστέρηση είναι ανεκτή μέχρι 10 sec και τέλος οι μη κρίσιμες όπου το επίπεδο της καθυστέρησης είναι ανεκτό και σε επίπεδα μεγαλύτερα από 10 sec.

Επιπλέον η ITU προχώρησε στον καθορισμό τεσσάρων παραμέτρων επίδοσης του πρωτοκόλλου IP, οι οποίες αποτελούν τη βάση διαπραγμάτευσης μεταξύ παρόχων και χρηστών και αναφέρονται στα δυο βασικά κριτήρια με τα οποία έγινε παραπάνω η κατηγοριοποίηση. Οι παράμετροι επίδοσης του δικτύου είναι: η καθυστέρηση μετάδοσης

πακέτων, η μεταβολή της καθυστέρησης των πακέτων, το ποσοστό απωλειών πακέτων δεδομένων και τέλος το ποσοστό λανθασμένων πακέτων.

2.6. Αρχιτεκτονικές για παροχή Ποιότητας Υπηρεσίας

Στην παρούσα ενότητα θα παρουσιάσουμε δύο βασικές αρχιτεκτονικές για την παροχή ποιότητας υπηρεσίας: Η πρώτη αποτελεί μια δικτυακή προσέγγιση όπου υλοποιείται μέσω διαφόρων ανεξάρτητων τμημάτων – λειτουργιών με σκοπό την παροχή QoS σε ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών και η δεύτερη αποτελεί μια διαστρωματική αρχιτεκτονική όπου η παροχή QoS αντιμετωπίζεται σε κάθε στρώμα ανεξάρτητα και προορίζεται για ετερογενή ασύρματα δίκτυα.

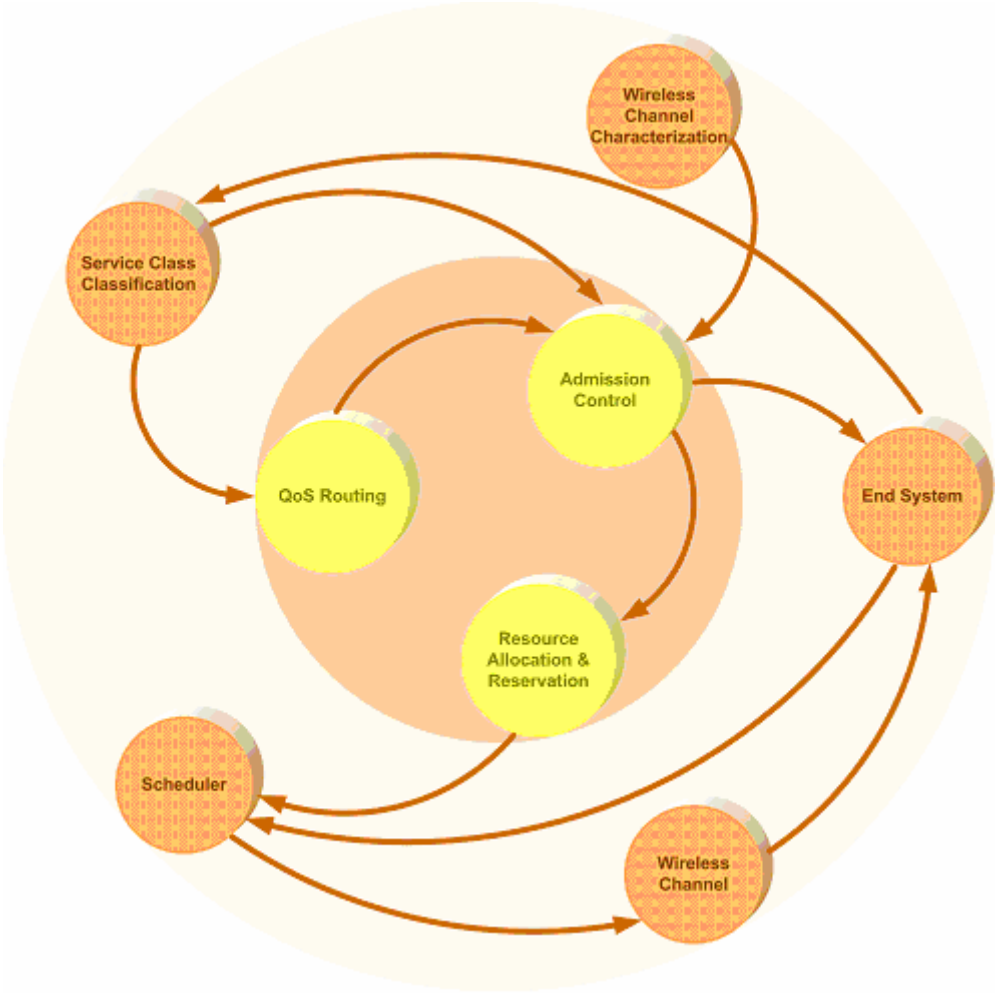
2.6.1. Δικτυακή Προσέγγιση - Αρχιτεκτονική

Για την ικανοποίηση των απαιτήσεων για παροχή ποιότητας υπηρεσίας, παρουσιάζουμε μια νέα προσέγγιση η οποία βασίζεται σε μια νέα δικτυακή αρχιτεκτονική. Στις υφιστάμενες δικτυακές αρχιτεκτονικές τα διάφορα τμήματα του δικτύου όπως οι δρομολογητές και οι σταθμοί βάσης συμμετέχουν στην παροχή QoS [27]. Κάθε τμήμα του δικτύου, συνεισφέρει στην παροχή QoS με το δικό του τρόπο βάσει της αρχής λειτουργίας του. Η νέα προσέγγιση που προτείνεται στην ενότητα αυτή, θεωρείται ως πιο κατάλληλη για τα σύγχρονα κινητά ευρυζωνικά δίκτυα επικοινωνιών, αφού καθιστά εφικτή τη διαλειτουργικότητα μεταξύ διαφορετικών τεχνολογιών πρόσβασης, πρωτοκόλλων και μοντέλων κινητικότητας καθώς και για αδιάλειπτες μεταπομπές ανεξάρτητα από τις υπηρεσίες και τις εφαρμοζόμενες τεχνικές παροχής QoS.

Οι τεχνικές αυτές θα πρέπει να ικανοποιούν τις απαιτήσεις κάθε υποστηριζόμενης κλάσης υπηρεσιών ως προς τις παραμέτρους του ρυθμού μετάδοσης, της καθυστέρησης και του ρυθμού απώλειας πακέτων. Για την επίτευξη των στόχων αυτών ακολουθείται η νέα δικτυακή αρχιτεκτονική η οποία θα έχει ως βασικό στόχο την εξασφάλιση του QoS από άκρο σε άκρο στο δίκτυο. Τα βασικότερα χαρακτηριστικά της δικτυακής αρχιτεκτονικής περιγράφονται στη συνέχεια.

Καταρχήν, στο πλαίσιο της υλοποίησης της δικτυακής αρχιτεκτονικής οι υποστηριζόμενες εφαρμογές θα πρέπει να κατηγοριοποιηθούν σε κλάσεις υπηρεσιών με βάση τα χαρακτηριστικά κίνησης του τηλεπικοινωνιακού φορτίου και των απαιτήσεων QoS

που έχει η καθεμιά. Η διαδικασία αυτή καθίσταται πολύ σημαντική στα ασύρματα δίκτυα επόμενης γενιάς λόγω της υλοποίησης διαφορετικών τεχνολογιών πρόσβασης κάτω από μία ενοποιημένη IP υποδομή. Ειδικότερα τα δικτυακά μοντέλα για τα IP δίκτυα θα πρέπει να είναι πλήρως διαλειτουργικά με τις κατοχυρωμένες κλάσεις υπηρεσιών των κινητών επικοινωνιών τρίτης γενιάς. Οι κλάσεις υπηρεσιών που υποστηρίζει το δίκτυο θα πρέπει να αντιστοιχίζονται στις ροές κίνησης IP, όπως περιγράφηκε πριν, με βάση τις απαιτήσεις QoS. Για το λόγο αυτό στην υλοποίηση της δικτυακής αρχιτεκτονικής απαιτείται ένα τμήμα το οποίο θα ακολουθεί μια διαδικασία χαρτογράφησης και κατάταξης των εφαρμογών σε αντίστοιχες κλάσεις υπηρεσιών.



Σχήμα 2.1: Στοιχεία δικτυακής προσέγγισης για την παροχή QoS.

Στη συνέχεια το δίκτυο για την παροχή QoS χρησιμοποιεί τη δρομολόγηση ώστε να υποδείξει κατάλληλες διαδρομές για τα δεδομένα όπου υπάρχουν επαρκείς πόροι για την υποστήριξη των αιτημάτων QoS. Ειδικά στα δίκτυα που υποστηρίζονται πολλαπλές κλάσεις υπηρεσιών, η δρομολόγηση που βασίζεται στον προορισμό πραγματοποιείται με βάση ένα αυστηρό μηχανισμό απόδοσης προτεραιότητας μέσα από τους δρομολογητές. Οι

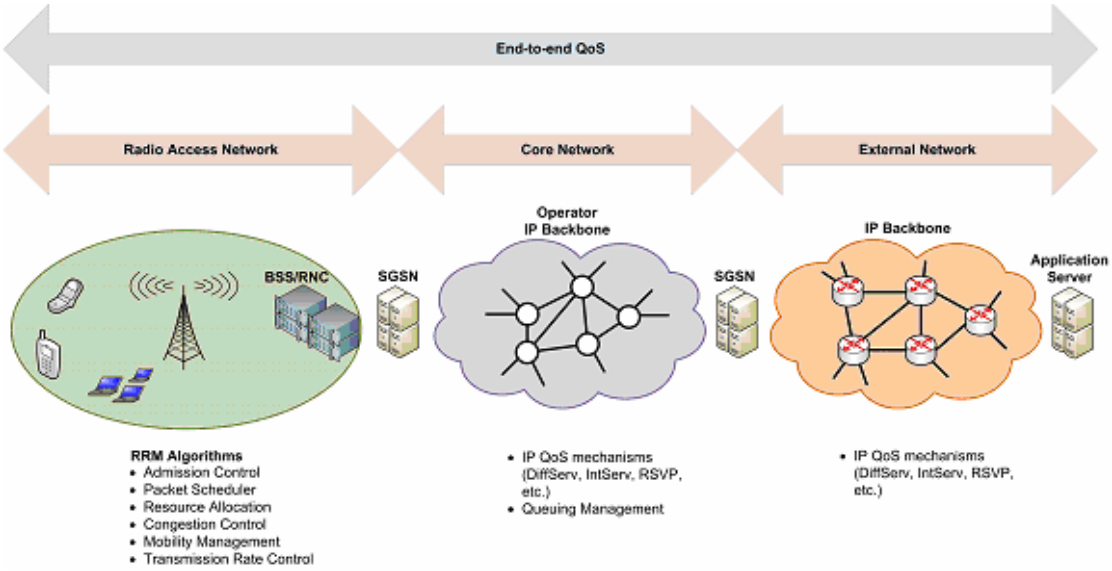
στρατηγικές δρομολόγησης που χρησιμοποιούνται στοχεύουν κατά κύριο λόγο στην παροχή καλύτερης ποιότητας υπηρεσίας.

Ένα επιπλέον συστατικό της παροχής QoS μέσα από τη δικτυακή προσέγγιση που αναλύουμε στην παρούσα προσέγγιση είναι ο έλεγχος αποδοχής κλήσεων που είναι το βασικό ζήτημα στην παρούσα διατριβή. Σε κάθε κόμβο δικτύου μέσα από το τμήμα ελέγχου αποδοχής κλήσεων αποφασίζεται από το διαχειριστή του δικτύου αν μια σύνδεση/κλήση θα γίνει αποδεκτή ή θα απορριφθεί, με βάση το αιτούμενο QoS και τις συνθήκες του δικτύου όπως αυτές καθορίζονται από την ποιότητα σήματος, τη χωρητικότητα του καναλιού και της παραμέτρους σε επίπεδο πακέτων. Ο δυναμικός έλεγχος αποδοχής κλήσεων στα ασύρματα δίκτυα θεωρείται ως ο πλέον επαρκής διότι ανταποκρίνεται στις μεταβαλλόμενες συνθήκες δικτύου των σύγχρονων ασυρμάτων δικτύων.

Στα δίκτυα αυτά ο έλεγχος αποδοχής κλήσεων συνδυάζεται με το τμήμα διαχείρισης πόρων, το οποίο κατανέμει τους πόρους του δικτύου – κανάλια, εύρος ζώνης και μονάδες προσωρινής αποθήκευσης – που απαιτούνται για την παροχή εγγυήσεων QoS. Στις περισσότερες περιπτώσεις ο δυναμικός έλεγχος αποδοχής κλήσεων υλοποιείται μέσα από τη δυναμική δέσμευση πόρων, ειδικότερα εύρους ζώνης, που είναι από τις βασικότερες παραμέτρους για την υποστήριξη πολλαπλών κλάσεων υπηρεσιών. Επιπρόσθετα, για την αποτελεσματικότερη κατανομή πόρων και τον έλεγχο αποδοχής κλήσεων υπάρχει και το στοιχείο χαρακτηρισμού καναλιού (channel characterization) μέσα από το οποίο συλλέγονται στοιχεία για την κατάσταση και την ποιότητα του ασύρματου καναλιού, που είναι ιδιαίτερα χρήσιμα για την εξαγωγή QoS στοιχείων που αφορούν το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και τη καθυστέρηση.

Τέλος, κατά τη σύνδεση υπάρχει το τμήμα προγραμματισμού πακέτων το οποίο χρησιμοποιείται για τον προγραμματισμό μετάδοσης των πακέτων με βάση τις απαιτήσεις QoS κάθε σύνδεσης. Ουσιαστικά ρυθμίζει την αποτελεσματική χρήση των πόρων όταν μεταδίδονται τα πακέτα δεδομένων με βάση τις πληροφορίες για το κανάλι και τις απαιτήσεις QoS. Ο προγραμματισμός πακέτων είναι βασικό τμήμα της δικτυακής προσέγγισης-αρχιτεκτονικής για την παροχή QoS διότι τα ασύρματα κανάλια χαρακτηρίζονται από χαμηλή αξιοπιστία, περιορισμένη χωρητικότητα, χρονικά μεταβαλλόμενες αποσβέσεις οι οποίες μπορεί να προκαλέσουν σημαντικές αποκλίσεις στην παροχή ποιότητας υπηρεσίας. Συνοψίζοντας λοιπόν όλα τα παραπάνω, στο παρακάτω σχήμα μπορούμε να δούμε την υλοποίηση της αρχιτεκτονικής για την παροχή από άκρο σε άκρο ποιότητας υπηρεσίας, μέσα σε κάθε τμήμα του δικτύου, για την υποστήριξη

πολλαπλών κλάσεων υπηρεσιών από ασύρματα ευρυζωνικά δίκτυα επικοινωνιών όπου έχουμε μεταφορά δεδομένων.



Σχήμα 2.2: Υλοποίηση παροχής QoS από άκρο σε άκρο.

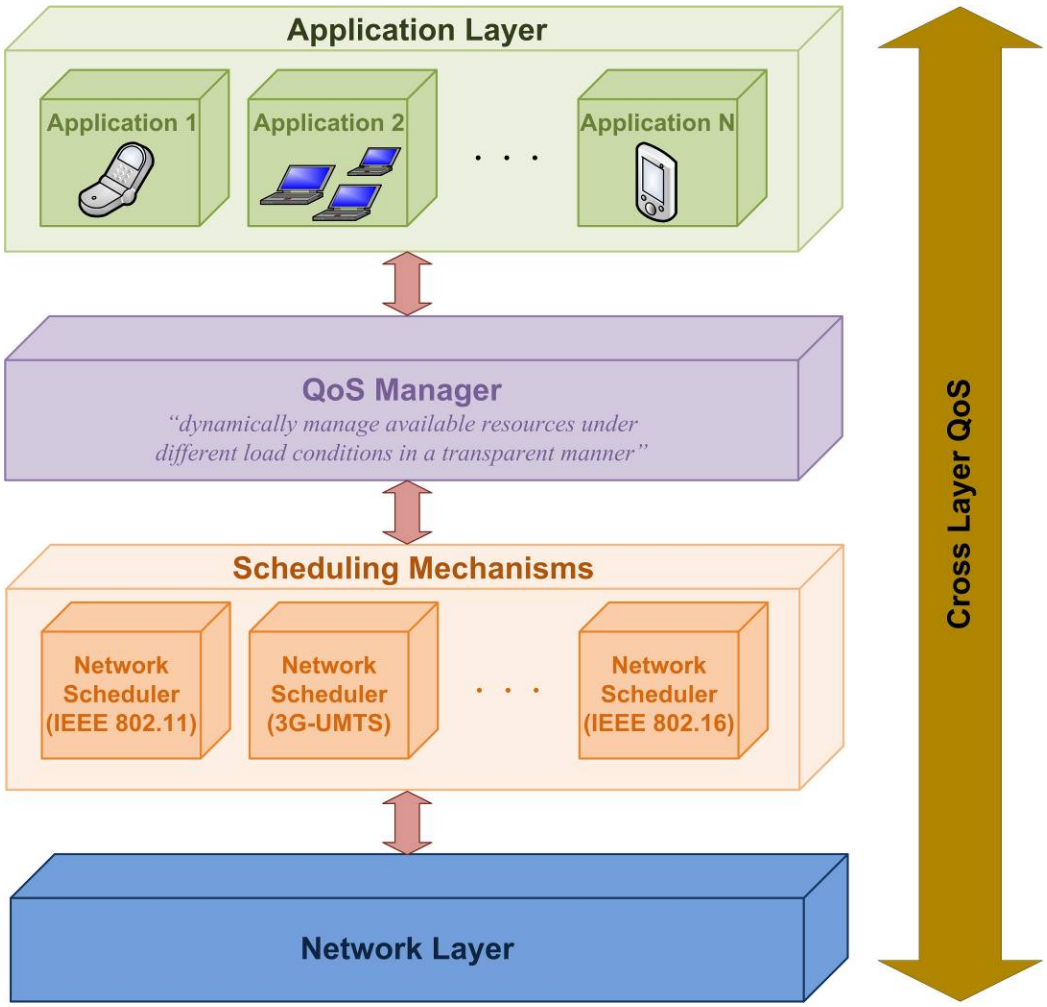
2.6.2. Διαστρωματική Προσέγγιση – Αρχιτεκτονική

Μια διαφορετική προσέγγιση για την παροχή ποιότητας υπηρεσίας υλοποιείται μέσα από τη θεώρηση ότι η παροχή QoS θα πρέπει να αντιμετωπίζεται σε όλα τα στρώματα του μοντέλου OSI (φυσικό, MAC, IP, TCP και εφαρμογών), εφόσον επιδιώκεται η παροχή QoS από άκρο σε άκρο. Ειδικότερα, η παροχή QoS με βάση μια διαστρωματική προσέγγιση θα πρέπει να προσφέρει εγγυήσεις για την παροχή υπηρεσίας σε κάθε επίπεδο, ώστε η λειτουργία του δικτύου να καθίσταται πιο ευέλικτη. Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί διάφορα πλαίσια διαστρωματικής αρχιτεκτονικής. Μια τέτοια διαστρωματική σχεδίαση έχει προταθεί για προγραμματισμό πολλαπλών χρηστών στο επίπεδο ζεύξης δεδομένων, όπου κάθε δέκτης χρησιμοποιεί προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση AMC (Adaptive Modulation and Coding) στο φυσικό επίπεδο [40]. Στην πύλη υπάρχει μια πεπερασμένη ουρά για κάθε δέκτη όπου λειτουργεί σε διαμόρφωση FIFO (First-in-First-Out). Ο ελεγκτής AMC ακολουθεί την ουρά και ο επιλογέας AMC υλοποιείται σε κάθε δέκτη. Στην εργασία [16] προτείνεται ένας μηχανισμός ειδοποίησης σε περίπτωση συμφόρησης ECN (Explicit Congestion Notification) με την οποία παρέχεται μια απόκριση πραγματικού χρόνου στο δικτυακό επίπεδο με βάση την πληροφόρηση από το περιβάλλον του φυσικού επιπέδου, ενισχύοντας το πρωτόκολλο TCP το οποίο είναι προσανατολισμένο στις συνδέσεις

για αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων. Στην εργασία [42] έχει προταθεί ένα νέο αυτό-οργανωμένο πρωτόκολλο χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης, μέσα από μια διαστρωματική οπτική, με στόχο τη διαχείριση της αλληλεπίδρασης μεταξύ του επιπέδου εφαρμογών και του MAC επιπέδου για να χειριστεί τον αντιπραγματισμό μεταξύ του σφάλματος εντοπισμού και της κατανάλωσης ενέργειας, προοριζόμενο κυρίως για δίκτυα αισθητήρων. Επίσης έχει προταθεί ένα διαστρωματικό μοντέλο για πολυμεσικές εφαρμογές multicast/broadcast που θα μπορεί να υποστηρίξει τις διαιρετικές απαιτήσεις QoS πάνω από κινητά δίκτυα επικοινωνιών [43]. Για το σκοπό αυτό, έχει σχεδιαστεί ένας δυναμικός αλγόριθμος προσαρμογής για το φυσικό επίπεδο που αναπτύχθηκε για τη βελτιστοποίηση του ρυθμού διέλευσης δεδομένων με βάση τον QoS περιορισμό για το ρυθμό απώλειας πακέτων δεδομένων όπως αυτός καθορίζεται από τα πρωτόκολλα ανωτέρων επιπέδων για τους χρήστες. Στην εργασία [44] προτείνεται ένας διαστρωματικός αλγόριθμος ανάμεσα στο φυσικό και το επίπεδο ζεύξης δεδομένων για την κατανομή πόρων για την παροχή εγγυήσεων QoS σε ασύρματα δίκτυα. Η πληροφορία για την καθυστέρηση παρέχεται μέσα από τον αλγόριθμο για την επίτευξη δυναμικής κατανομής πόρων με αυστηρές εγγυήσεις QoS για την καθυστέρηση. Για τον έλεγχο της επίδρασης του ρυθμού απώλειας πακέτων σε φυσικό επίπεδο και την πιθανότητα απώλειας πακέτων στο MAC επίπεδο, στην εργασία [45] προτάθηκε μια λειτουργία αποτελεσματικής κατανομής εύρους ζώνης. Τέλος, στην εργασία [46] παρουσιάστηκε μια πλήρη διαστρωματική αρχιτεκτονική για την υποστήριξη του QoS για πολυαλματικά (mutlihop) ασύρματα δίκτυα.

Παρά το γεγονός ότι έχουν προταθεί διάφορα σχήματα διαστρωματικής αρχιτεκτονικής, εντούτοις το πολύπλοκο περιβάλλον των ασύρματων επικοινωνιών απαιτεί την πρόταση νέων πιο αποτελεσματικών με δυνατότητες επέκτασης ώστε να καλύπτονται οι ανάγκες των δικτύων επομένης γενιάς. Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική λαμβάνει υπ' όψιν τόσο το ετερογενές περιβάλλον των νέων δικτύων όσο και την πολυπλοκότητα της τηλεπικοινωνιακής κίνησης. Η προτεινόμενη προσέγγιση απεικονίζεται στο σχήμα 2.3. Το πλαίσιο διαστρωματικής αρχιτεκτονικής για την παροχή QoS θα πρέπει να αποτελείται από ένα διαχειριστή QoS και επίσης να περιλαμβάνει υποσυστήματα - μηχανισμούς όπως ο προγραμματισμός, ο έλεγχος αποδοχής κλήσεων, μηχανισμοί πρόβλεψης και ανάδρασης που θα ρυθμίζουν το MAC επίπεδο των δικτύων. Η αρχιτεκτονική αυτή θα πρέπει να διαθέτει αυτά τα χαρακτηριστικά με σκοπό να υποστηρίζει τη χρήση του ίδιου εξοπλισμού κάτω από διαφορετικές τεχνολογίες πρόσβασης με τη βέλτιστη φασματική απόδοση και διαχείριση πόρων. Επιπλέον, η παροχή QoS απαιτεί τη προσφορά και υποστήριξη διαφοροποιημένων υπηρεσιών με αυστηρές απαιτήσεις ως προς τη καθυστέρηση, το ρυθμό

ψηφιακής διέλευσης κάτω από δεδομένους περιορισμούς του ασυρμάτου μέσου. Εξαιτίας της μεταβλητότητας του ασυρμάτου καναλιού η προσφορά αυστηρών εγγυήσεων QoS είναι εξαιρετικά δύσκολή, οπότε για το λόγο αυτό παρέχονται συγκεκριμένες εγγυήσεις για τα επίπεδα των παραμέτρων ποιότητας υπηρεσίας, οι οποίες περιγράφηκαν αναλυτικά σε προηγούμενη ενότητα. Από την πλευρά του χρήστη θα πρέπει να τονιστεί ότι η διαστρωματική προσέγγιση επιτρέπει την υποστήριξη πολυμεσικών εφαρμογών περιορίζοντας την πολυπλοκότητα των στρωμάτων MAC των διαφόρων τύπων δικτύων.



Σχήμα 2.3: Διαστρωματική προσέγγιση παροχής QoS.

Στην ουσία ο διαχειριστής QoS είναι ένας ενδιάμεσος κόμβος μεταξύ των εφαρμογών και των χαμηλότερων δικτυακών στρωμάτων που είναι σε θέση να διαχειρίζεται δυναμικά τους διαθέσιμους πόρους κάτω από διάφορα επίπεδα φορτίου απευθείας στο επίπεδο των εφαρμογών. Ο διαχειριστής QoS είναι ανεξάρτητος τόσο από το στρώμα εφαρμογών όσο και από το MAC στρώμα. Συγκεκριμένα, λαμβάνει αιτήσεις από τις διάφορες εφαρμογές και τις μεταφράζει στις απαιτήσεις πόρων σε κάθε στρώμα. Ο

διαχειριστής QoS δηλαδή λειτουργεί ως διαμεσολαβητής μεταξύ των εφαρμογών μεταφράζοντας τις απαιτήσεις τους σε ανάγκες πόρων προβαίνοντας στις απαραίτητες διαπραγματεύσεις καθορίζοντας τις παραμέτρους μετάδοσης και τον έλεγχο αποδοχής κλήσεων. Έπειτα με βάση τις ανάγκες προχωρά στην κατανομή πόρων.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφέρουμε ότι οι υποστηριζόμενες εφαρμογές καθορίζουν δυναμικά τις ευέλικτες απαιτήσεις, οι οποίες διατυπώνονται μέσω των SLA και φυσικά αποτελούν αντικείμενο διαπραγματεύσεων. Έτσι, όταν μια εφαρμογή θέλει να τροποποιήσει τις συμφωνίες SLA ο διαχειριστής QoS διαπραγματεύεται με το τμήμα ελέγχου αποδοχής κλήσεων και προχωρά σε νέα κατανομή πόρων. Μέσα λοιπόν από αυτή τη δυναμική λειτουργία, επιτυγχάνεται η βέλτιστη χρησιμοποίηση των πόρων που αποτελεί ζήτημα κεφαλαιώδους σημασίας στα ασύρματα δίκτυα. Σαν τμήμα της διαπραγμάτευσης, ο διαχειριστής QoS θα πρέπει να ελέγξει την επάρκεια των πόρων ώστε να εγγυηθεί τουλάχιστον τις ελάχιστες απαιτήσεις κάθε εφαρμογής παρέχοντας φυσικά εγγυήσεις για όλες τις προϋπάρχουσες σε εξέλιξη συνδέσεις και κλήσεις. Προκειμένου να αποφεύγεται σπατάλη πόρων θα πρέπει όλες οι εφαρμογές να λαμβάνουν τουλάχιστον τον ελάχιστο δυνατό αριθμό πόρων. Επιπλέον, ο διαχειριστής QoS, αν παρατηρηθεί υπερφόρτωση του δικτύου, θα πρέπει να μπορεί να τροποποιεί τις SLA υποβαθμίζοντας το επίπεδο υπηρεσίας στο ελάχιστο ανεκτό ώστε να είναι σε θέση να δώσει προτεραιότητα και να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις συγκεκριμένων εφαρμογών κρίσιμης προτεραιότητας.

Εδώ θα πρέπει να τονίσουμε ότι η διαστρωματική προσέγγιση θεωρείται ως η πλέον κατάλληλη για την παροχή QoS και στα δίκτυα επομένης γενιάς 4G τα οποία είναι ετερογενή αφού υποστηρίζουν διάφορες τοπολογίες και πρότυπα. Η δυνατότητα υποστήριξης πολλαπλών τεχνικών πρόσβασης και διαφόρων τεχνολογιών υλοποιείται μέσα από τους μηχανισμούς προγραμματισμού. Ειδικότερα, ο διαχειριστής QoS ο οποίος προσαρμόζει τις απαιτήσεις στους διαθέσιμους πόρους θα πρέπει να αλληλεπιδρά με το υποσύστημα προγραμματισμού. Το τμήμα ελέγχου αποδοχής κλήσεων του υποσυστήματος προγραμματισμού επιβεβαιώνει κατά πόσο υπάρχουν επαρκείς πόροι για την ικανοποίηση των αιτημάτων που λαμβάνονται από το τμήμα διαχείρισης QoS. Επιπλέον ανανεώνει τις απαιτήσεις εύρους ζώνης και ελέγχει κατά πόσο οι κλήσεις είναι αποδεκτές χωρίς να υπάρξει υποβάθμιση των σε εξέλιξη κλήσεων. Αν το αποτέλεσμα αυτής της διαπραγμάτευσης είναι θετικό, το τμήμα προγραμματισμού θα δεσμεύσει επαρκείς πόρους ώστε να εγγυηθεί τις ελάχιστες αιτούμενες απαιτήσεις, δεσμεύοντας οποιουσδήποτε επιπλέον πόρους ώστε αυτοί να διανεμηθούν σε οποιαδήποτε από τις κλήσεις σε εξέλιξη που απαιτούν επιπλέον πόρους. Το τμήμα προγραμματισμού διαχειρίζεται κάθε μετάδοση για κάθε ροή τηλεπικοινωνιακού

φορτίου και καθορίζει τόσο την περίοδο όσο και τη διάρκεια της μετάδοσης προσαρμοζόμενη στις μεταβαλλόμενες συνθήκες του καναλιού και στα χαρακτηριστικά των ροών του φορτίου.

Τέλος, θα πρέπει να υπάρχει ένας μηχανισμός ανάδρασης ο οποίος θα δέχεται πληροφορίες από τους κόμβους του δικτύου και θα αξιοποιεί την πληροφορία ώστε να ρυθμίζει κατάλληλα τις παραμέτρους μετάδοσης με βάση τις παρεχόμενες εγγυήσεις παροχής QoS. Κλείνοντας την παρούσα ενότητα, μπορούμε να πούμε πως η διαστρωματική αρχιτεκτονική για τη διαχείριση πόρων που προτάθηκε και περιγράφηκε αναλυτικά παραπάνω, αποτελεί έναν αξιόπιστο μηχανισμό παροχής QoS ο οποίος μπορεί να ενσωματωθεί στις συνθήκες και στις σύνθετες απαιτήσεις των ασυρμάτων ευρυζωνικών δικτύων επικοινωνιών.

Κεφάλαιο 3ο

Έλεγχος Αποδοχής Κλήσεων

3.1. Εισαγωγή

Η διαχείριση ραδιοπόρων διαδραματίζει σημαντικότατο ρόλο στην παροχή QoS στα ασύρματα συστήματα επικοινωνιών. Ειδικότερα, οι πολιτικές διαχείρισης πόρων μαζί με το σχεδιασμό δικτύου και την ποιότητα της ζεύξης καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την επίδοση QoS τόσο σε επίπεδο χρήστη όσο και σε επίπεδο δικτύου. Οι τεχνικές διαχείρισης πόρων περιλαμβάνουν την κατανομή συχνοτήτων και καναλιών, την εκπεμπόμενη ισχύ και την πρόσβαση στους σταθμούς βάσης με σκοπό τον έλεγχο των πόρων που κατανέμονται στους χρήστες με στόχο τη μεγιστοποίηση κάποιας παραμέτρου υπό μορφή αντικειμενικής συνάρτησης. Στην περίπτωση αυτή αναφερόμαστε στο ρυθμό ψηφιακής διέλευσης ή διεκπεραιωτικότητα του δικτύου, στη χρησιμοποίηση των πόρων ή στα συνολικά έσοδα από το δίκτυο, κάτω από συγκεκριμένους περιορισμούς όπως η μέγιστη τιμή των πιθανοτήτων μη αποδοχής κλήσης - αποκλεισμού (call blocking probability) και διακοπής κλήσης (call dropping probability) ή η ελάχιστη τιμή λόγου σήματος προς παρεμβολή (signal to interference ratio). Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι η απόδοση των τεχνικών και των λειτουργιών διαχείρισης πόρων έχουν άμεση επίδραση τόσο στους χρήστες όσο και στη συνολική επίδοση του δικτύου.

Η διαχείριση πόρων πραγματοποιείται με μια σειρά λειτουργιών και τη χρήση κατάλληλων αλγορίθμων που μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τρεις μεγάλες κατηγορίες. Η πρώτη ομάδα περιλαμβάνει αλγορίθμους και σχήματα κατανομής πόρων όπως για την κατανομή καναλιών, τον προγραμματισμό, τον έλεγχο ρυθμού μετάδοσης, τη δέσμευση εύρους ζώνης. Στη δεύτερη ομάδα λειτουργιών διαχείρισης πόρων περιλαμβάνονται

αλγόριθμοι κατανομής και ελέγχου ισχύος τόσο σε επίπεδο τερματικών όσο και σε επίπεδο σταθμών βάσης. Τέλος, η τρίτη ομάδα αποτελείται από τους αλγόριθμους αποδοχής κλήσεων που διαχειρίζονται τόσο τις νέες κλήσεις όσο και τις κλήσεις μεταπομπής καθώς και οι αλγόριθμοι ανάθεσης στους σταθμούς βάσης οι οποίοι ελέγχουν τις συνδέσεις.

Η παροχή QoS στα ασύρματα κινητά δίκτυα είναι ένα ιδιαίτερα σύνθετο πρόβλημα που οφείλεται τόσο στην έλλειψη πόρων που παρατηρείται π.χ. κανάλια, κινητικότητα των χρηστών όσο και στις διαφορετικές απαιτήσεις QoS των προσφερομένων πολλαπλών υπηρεσιών. Ο έλεγχος αποδοχής κλήσεων αποτελεί έναν από τους βασικούς μηχανισμούς για την παροχή QoS σε ένα δίκτυο. Μέσα από τον έλεγχο αποδοχής κλήσεων παρέχεται στο δίκτυο η δυνατότητα να περιορίσει την πρόσβαση στο δίκτυο με βάση τη διαθεσιμότητα των πόρων με στόχο την πρόληψη κατάστασης συμφόρησης στο δίκτυο και την υποβάθμιση της παρεχόμενης υπηρεσίας στους ήδη υπάρχοντες χρήστες στο δίκτυο. Μια νέα κλήση γίνεται αποδεκτή μόνο εάν υπάρχουν διαθέσιμοι πόροι ώστε να καλυφθούν οι απαιτήσεις QoS κάθε νέας κλήσης χωρίς φυσικά να παραβιάζονται οι απαιτήσεις QoS των κλήσεων που έχουν ήδη γίνει αποδεκτές.

Με βάση τώρα τη στρωματική δομή δικτύου η οποία είναι ευρέως διαδεδομένη και γνωστή σε όλους, διαφορετικές παράμετροι ποιότητας υπηρεσίας εμπλέκονται στα διάφορα στρώματα. Στο φυσικό στρώμα, έχουμε παραμέτρους όπως ενέργεια δυφίου προς θόρυβο (bit energy-to-noise) που περιγράφει την ποιότητα υπηρεσίας που λαμβάνει ο κινητός χρήστης. Στα σύγχρονα δίκτυα επικοινωνιών όπου έχουμε μετάδοση δεδομένων σε μορφή πακέτων οι παράμετροι QoS όπως οι απώλειες πακέτων, η καθυστέρηση και η διακύμανση καθυστέρησης αναλύθηκαν εκτενώς στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στο ερευνητικό πεδίο όμως της διαχείρισης πόρων και του ελέγχου αποδοχής κλήσεων στα κυψελωτά δίκτυα επικοινωνιών η προσοχή εστιάζεται στις παραμέτρους ποιότητας υπηρεσίας σε επίπεδο κλήσεων (call level QoS parameters) οι οποίες εκφράζονται κατά κύριο λόγο μέσα από τις πιθανότητες μη αποδοχής και διακοπής κλήσης.

Το πρόβλημα του ελέγχου αποδοχής κλήσεων στα ασύρματα δίκτυα είναι ένα θέμα με σημαντικό ερευνητικό ενδιαφέρον ιδιαίτερα την τελευταία δεκαετία, εξαιτίας κυρίως της δημοφιλίας των ασυρμάτων επικοινωνιών αλλά και του σημαντικού ρόλου που διαδραματίζει στην παροχή QoS σε ότι αφορά την ποιότητα σήματος, τις πιθανότητες μη αποδοχής κλήσης και διακοπής κλήσης, την καθυστέρηση πακέτων, το ρυθμό απωλειών αλλά και το ρυθμού μετάδοσης [47]. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα ζητήματα διαχείρισης πόρων που σχετίζονται κυρίως με τον έλεγχο αποδοχής κλήσεων σε ασύρματα κυψελωτά δίκτυα επικοινωνιών που αποτελούν άλλωστε το βασικό θέμα της παρούσας διατριβής.

Συγκεκριμένα, αφού παρουσιαστούν συνοπτικά τα βασικά ζητήματα μοντελοποίησης της τηλεπικοινωνιακής κίνησης στα κυψελωτά δίκτυα επικοινωνιών, θα παρουσιαστεί και θα αναλυθεί ο πιθανοτικός έλεγχος αποδοχής κλήσεων που προτάθηκε για δίκτυα πολλαπλών κλάσεων υπηρεσιών με βάση την εξέλιξη και τα στάδια ανάπτυξης του. Για τη μοντελοποίηση και τη μελέτη του συγκεκριμένου προβλήματος χρησιμοποιήθηκε η θεωρία αλυσίδων Markov, βάσει της οποίας προέκυψαν και οι αναλυτικοί τύποι υπολογισμού των πιθανοτήτων μη αποδοχής κλήσεων. Τέλος, σε ειδική ενότητα παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν για το προτεινόμενο σχήμα αποδοχής κλήσεων.

3.2. Αρχές Λειτουργίας Ελέγχου Αποδοχής Κλήσεων

Ο αντικειμενικός στόχος του ελέγχου αποδοχής κλήσεων είναι η παροχή QoS στις διάφορες συνδέσεις μέσω της αποτελεσματικής διαχείρισης των διαθέσιμων πόρων δικτύου. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί περιορίζοντας κατά κάποιο τρόπο την πρόσβαση ορισμένων κλήσεων στους δικτυακούς πόρους. Με απλά λόγια, ένας μηχανισμός ελέγχου αποδοχής κλήσεων αποδέχεται ένα αίτημα νέας κλήσης στο δίκτυο μόνο εάν υπάρχουν επαρκείς ελεύθεροι πόροι, ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις QoS χωρίς να παραβιάζεται η τρέχουσα παροχή QoS στις ήδη αποδεκτές σε εξέλιξη κλήσεις. Μια αποτελεσματική πολιτική ελέγχου αποδοχής κλήσεων θα πρέπει να συνδυάζει διάφορα χαρακτηριστικά και στόχους ανάμεσα στα οποία είναι: α) η καθιέρωση ενός αποτελεσματικού μηχανισμού απόδοσης προτεραιότητας στην εξυπηρέτηση των κλήσεων μεταπομπής (handoff call) καθώς επίσης και για τις κλήσεις που ανήκουν σε συγκεκριμένες κλάσεις υπηρεσιών π.χ. κλήσεις πραγματικού χρόνου, β) η επίτευξη όσο το δυνατόν χαμηλών πιθανοτήτων μη αποδοχής για τις κλήσεις όλων των υποστηριζόμενων κλάσεων υπηρεσιών, γ) η δίκαιη κατανομή των πόρων, δ) η επίτευξη υψηλού ρυθμού διέλευσης δεδομένων και τέλος ε) η αποφυγή συμφόρησης.

Ένα καλώς σχεδιασμένος αλγόριθμος θα πρέπει να αποφεύγει το γεγονός να τίθεται το τηλεπικοινωνιακό σύστημα εκτός διαθεσιμότητας εξαιτίας υπερφόρτωσης και συμφόρησης. Με βάση το πλαίσιο αποδοχής κλήσεων το οποίο γενικά υιοθετείται, η απόφαση για την αποδοχή ή μη μιας νέας κλήσης στο δίκτυο γίνεται χωρίς να παραβιάζονται οι SLAs των ήδη εξυπηρετούμενων κλήσεων. Η απόφαση αυτή βασίζεται στη διαθεσιμότητα των υπαρχόντων δικτυακών πόρων καθώς και στις απαιτήσεις QoS των

υφιστάμενων κλήσεων και των απαιτήσεων των αιτούμενων κλήσεων. Για το λόγο, αυτό η λήψη της απόφασης αποδοχής θα πρέπει να υλοποιείται από κοινού, λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά του δικτύου, τον τύπο υπηρεσίας, την κινητικότητα του χρήστη και τις επικρατούσες συνθήκες. Αν η απόφαση αποδοχής είναι θετική, τότε επιπλέον πόροι θα πρέπει να δεσμευθούν για την παροχή QoS και την υποστήριξη των νέων χρηστών που θα εισέλθουν στο δίκτυο. Συνεπώς ο έλεγχος αποδοχής κλήσεων σχετίζεται με την κατανομή πόρων, την ανάθεση καναλιών και σταθμών βάσης, τον προγραμματισμό, τον έλεγχο ισχύος αλλά και τη δέσμευση εύρους ζώνης. Για παράδειγμα, η επιλογή μεταξύ δυναμικής και στατικής ανάθεσης καναλιών θα οδηγήσει σε διαφορετική μορφή αλγορίθμων ελέγχου αποδοχής κλήσεων. Στο σημείο αυτό, θα πρέπει να αναφέρουμε ότι οι στρατηγικές ελέγχου αποδοχής κλήσεων που στηρίζονται στην παροχή QoS προστατεύουν το δίκτυο από συμφόρηση η οποία θα έθετε το σύστημα σε κατάσταση μη διαθεσιμότητας.

Το πρόβλημα του ελέγχου αποδοχής κλήσεων μπορεί επίσης να διαμορφωθεί σαν ένα συνδυαστικό πρόβλημα βελτιστοποίησης, όπου ο στόχος είναι η μεγιστοποίηση της απόδοσης του δικτύου, της χρησιμότητας για το χρήστη, των εσόδων για το διαχειριστή του δικτύου και την ίδια στιγμή η ζεύξη να είναι απόλυτα σύμφωνη με τους περιορισμούς QoS των χρηστών έτσι πως αυτές περιγράφονται από τις SLAs. Οι περιορισμοί για τη διασφάλιση της λειτουργίας και τα ανεκτά επίπεδα διαφόρων μεταβλητών στην ποιότητα παροχής υπηρεσίας μπορούν να αποτελέσουν κριτήρια αποδοχής κλήσεων όπως είναι ο λόγος σήματος προς την παρεμβολή SIR (signal-to-interference ratio), ο λόγος bit energy-to interference (E_b/I_0), ο ρυθμός BER (bit error rate), η πιθανότητα διακοπής κλήσεων CDP (Call Dropping Probability). Επιπλέον πρέπει να ληφθεί υπόψη η ποιότητα υπηρεσίας σε επίπεδο σύνδεσης που καθορίζεται από το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και το όριο καθυστέρησης. Για παράδειγμα, ένας αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων μπορεί να στοχεύει στην μεγιστοποίηση του αριθμού των χρηστών, ελαχιστοποιώντας την πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων CBP (Call Blocking Probability), υπό τον περιορισμό ότι η πιθανότητα παραβίασης του BER δε θα υπερβαίνει ένα αποδεκτό επίπεδο ε_1 [27].

$$Pr\left\{BER \geq BER_{thr}\right\} \leq \varepsilon_1,$$

όπου το BER_{thr} υποδηλώνει την τιμή κατωφλίου του BER. Ακολουθώντας μια εναλλακτική προσέγγιση, ο παραπάνω περιορισμός μπορεί να αντικατασταθεί από έναν αντίστοιχο που να αφορά τις CBP όπως

$$CBP \leq \varepsilon_2 .$$

Με τον τρόπο αυτό ένας αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων μπορεί να σχεδιαστεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε να παρέχει προτεραιότητα σε συγκεκριμένες κλάσεις υπηρεσιών ή να επιτυγχάνει δίκαιη κατανομή πόρων.

3.3. Επισκόπηση Διεθνούς Βιβλιογραφίας

Το πρόβλημα του ελέγχου αποδοχής κλήσεων έχει μελετηθεί εκτενώς στη διεθνή βιβλιογραφία, αλλά παρόλα αυτά η διαρκής εξέλιξη των ασυρμάτων δικτύων επικοινωνιών και η ενσωμάτωση νέων δυνατοτήτων σε αυτά το καθιστά πάντα επίκαιρο και σημαντικό. Χαρακτηριστικά μπορούμε να αναφέρουμε ότι στα συστήματα ασυρμάτων επικοινωνιών πρώτης και δεύτερης γενιάς ο έλεγχος αποδοχής κλήσεων αφορούσε την υποστήριξη μιας μόνο κλάσης υπηρεσιών και συγκεκριμένα της πιο κλασσικής και γνωστής που είναι η υπηρεσία φωνής. Με την ανάπτυξη και εξέλιξη των δικτύων κινητών επικοινωνιών τρίτης γενιάς έχουμε την υποστήριξη υπηρεσιών πολυμέσων με τη μετάδοση βίντεο, δεδομένων και φωνής. Κάθε μια από αυτές τις υποστηριζόμενες υπηρεσίες έχει διαφορετικές απαιτήσεις QoS. Τα χαρακτηριστικά αυτά σε συνδυασμό με το γεγονός ότι έχουμε τη μετάδοση πακέτων δεδομένων μας οδηγούν στην ανάπτυξη εξελιγμένων σχημάτων αποδοχής κλήσεων. Στις εργασίες [48] και [49] παρουσιάζονται εκτενείς επισκοπήσεις των αλγορίθμων ελέγχου αποδοχής κλήσεων για ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών και κυψελωτά δίκτυα, αντίστοιχα. Στη συνέχεια θα προχωρήσουμε σε μια σχετικά σύντομη παρουσίαση των σχημάτων ελέγχου αποδοχής κλήσεων, των σχετικών τεχνικών και των σημαντικότερων εργασιών - άρθρων που παρουσιάζονται στη διεθνή βιβλιογραφία και έχουν άμεση σχέση με τη συγκεκριμένη ερευνητική εργασία.

Τα σχήματα ελέγχου αποδοχής κλήσεων στα κυψελωτά δίκτυα επικοινωνιών ανήκουν σε δυο γενικές κατηγορίες: τα ντετερμινιστικά και τα στοχαστικά [49]. Στην πρώτη κατηγορία, οι παράμετροι QoS είναι εγγυημένοι σε διάστημα εμπιστοσύνης 100% απαιτώντας εκτεταμένη γνώση των παραμέτρων του συστήματος. Από την άλλη μεριά, στη δεύτερη κατηγορία οι αντίστοιχες παράμετροι είναι εγγυημένοι υπό συνθήκες κάποιας πιθανότητας. Όπως είναι κατανοητό στη συνέχεια οι αλγόριθμοι ελέγχου αποδοχής κλήσεων μπορούν να κατηγοριοποιηθούν βάσει της σχεδίασης τους και τους στόχους που θέτουν. Κάθε προσέγγιση σχεδιασμού έχει τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Μια πρώτη βασική διάκριση των σχημάτων ελέγχου αποδοχής κλήσεων είναι με βάση το που λαμβάνεται η απόφαση αποδοχής κλήσεων. Με βάση το κριτήριο αυτό, οι αλγόριθμοι

κατηγοριοποιούνται σε κεντρικά ελεγχόμενους και κατανεμημένους. Στους κεντρικά ελεγχόμενους αλγορίθμους, μια οντότητα όπως το κινητό κέντρο MSC (mobile switching centre) ελέγχει την αποδοχή των κλήσεων για όλο το δίκτυο κεντρικά. Αντίθετα στους κατανεμημένους αλγορίθμους ο έλεγχος αποδοχής κλήσεων γίνεται σε κάθε κυψέλη από το σταθμό βάσης (base station). Οι κεντρικά ελεγχόμενοι αλγόριθμοι μπορεί να είναι πιο αποδοτικοί χάρη στη διαθεσιμότητα περισσότερης και συνολικής πληροφορίας, όμως είναι πιο σύνθετοι και δεν χρησιμοποιούνται σε πραγματικά ασύρματα δίκτυα. Αντίθετα οι κατανεμημένοι αλγόριθμοι είναι πιο απλοί, αξιόπιστοι και επιπλέον χρησιμοποιούνται ευρύτατα [50], [51].

Ένας άλλος τρόπος κατηγοριοποίησης των αλγορίθμων είναι βάσει της διαθέσιμης πληροφορίας για τον έλεγχο της αποδοχής, όπου μπορεί να συλλέγονται πληροφορίες από όλες τις κυψέλες και όλο το δίκτυο, οπότε μιλάμε για global αλγορίθμους, ή μπορεί να περιορίζονται στην πληροφορία που έχουμε από μια κυψέλη, οπότε μιλάμε για τοπικούς (local) αλγορίθμους. Στην πρώτη περίπτωση, η πληροφορία για τη δέσμευση πόρων και τον έλεγχο αποδοχής ανταλλάσσεται ανάμεσα στις κυψέλες, ενώ στη δεύτερη η πληροφορία αφορά μόνο τη μια κυψέλη τοπικά. Η κατηγοριοποίηση αυτή αφορά κυρίως τα δυναμικά σχήματα δέσμευσης πόρων, όπου η πληροφορία για την κατάσταση στο δίκτυο συλλέγεται ώστε να χρησιμοποιηθεί για παράδειγμα στη ρύθμιση των κατωφλίων δέσμευσης πόρων.

Μια άλλη σημαντική κατηγορία σχημάτων ελέγχου αποδοχής κλήσεων είναι τα σχήματα πλήρους συμμετοχής CS (Complete Sharing) στα οποία όλες οι κλάσεις υπηρεσιών μοιράζονται τους ίδιους πόρους, σε αυτά η κατανομή τους και η αποδοχή των κλήσεων γίνεται με βάση το κριτήριο της ύπαρξης στο σύστημα διαθέσιμων πόρων τη στιγμή της αίτησης. Η κατηγορία αυτή παρουσιάζει το πλεονέκτημα της πλήρους εκμετάλλευσης των πόρων, όμως υπάρχει ο κίνδυνος της αυξημένης πιθανότητας μη αποδοχής των κλήσεων με υψηλές QoS απαιτήσεις. Από την άλλη πλευρά υπάρχει η κατηγορία των σχημάτων πλήρους διαμελισμού CP (Complete Partitioning) όπου το εύρος ζώνης διαχωρίζεται σε τμήματα. Σε κάθε κλάση υπηρεσίας εκχωρείται ένα τμήμα των συνολικών πόρων για αποκλειστική χρήση. Μειονέκτημα της τεχνικής αυτής αποτελεί το γεγονός ότι υπάρχει η περίπτωση της μη πλήρους εκμετάλλευσης του συνόλου των πόρων. Τέτοια σχήματα ελέγχου αποδοχής κλήσεων που βασίζονται στις τεχνικές αυτές έχουν προταθεί στις εργασίες [52], [53], [54]. Μια επέκταση ενός αλγορίθμου CS μελετάται στην εργασία [55] όπου προτείνεται ένας αλγόριθμος ονόματι DTBR (Dual Threshold Bandwidth Reservation) ο οποίος έχει δυνατότητα να εγγυάται την παροχή QoS σε κάθε είδος κίνησης με τη χρήση δυο κατωφλίων, για την κίνηση φωνής και των δεδομένων,

αντίστοιχα. Η χρήση των δυο κατωφλίων προτάθηκε και στην εργασία [56] για την απόδοση προτεραιότητας, όπου έχουμε τη χρήση της πολιτικής σχήματος guard channel με δυο κατώφλια ονόματι DT-CAC (Dual Threshold Call Admission Control) με σκοπό τον περιορισμό των πιθανοτήτων μη αποδοχής για κάθε κλάση λαμβάνοντας υπ' όψιν τους περιορισμούς για τις πιθανότητες μη αποδοχής των κλήσεων μεταπομπής αλλά και των περιορισμών QoS.

Τα σχήματα αποδοχής κλήσεων διαφοροποιούνται επίσης κατά περίπτωση, ανάλογα με τον αριθμό των υποστηριζόμενων κλάσεων υπηρεσιών από το δίκτυο. Όπως προαναφέρθηκε οι αλγόριθμοι αποδοχής κλήσεων για κλήσεις μιας κλάσης υπηρεσιών ηταν κυρίαρχοι στα δίκτυα δεύτερης γενιάς όπου οι κλήσεις φωνής ηταν το μόνο είδος προσφερόμενης υπηρεσίας. Στους αλγορίθμους αυτούς κύριο μέλημα είναι η απόδοση προτεραιότητας στις κλήσεις μεταπομπής, μια ανάγκη όμως που διατηρείται ακόμα και σήμερα [57], [58]. Όμως, στα σύγχρονα δίκτυα τρίτης γενιάς έχουμε την παροχή πολλαπλών υπηρεσιών, οπότε απαιτούνται ανασχεδιασμένοι αλγόριθμοι ελέγχου αποδοχής κλήσεων που να καλύπτουν τις ανάγκες αυτές. Ειδικά με τη σχεδίαση των νέων αυτών αλγόριθμων αντιμετωπίζονται διάφορες προκλήσεις που ανακύπτουν όπως η απόδοση επιπέδων προτεραιότητας στις κλήσεις των διαφόρων κλάσεων υπηρεσιών, η δικαιοσύνη στο χειρισμό των κλήσεων και η πολιτική κατανομής των πόρων.

Συνεπώς, στα δίκτυα επικοινωνιών τρίτης και τέταρτης γενιάς απαιτείται ο σχεδιασμός αλγορίθμων που να υποστηρίζουν πολλαπλές κλάσεις υπηρεσιών όπως στην εργασία [59] όπου τρία σχήματα ελέγχου αποδοχής κλήσεων προτείνονται για την απόδοση προτεραιότητας στις υποστηριζόμενες κλάσεις υπηρεσιών μέσα από τη χρήση διαφορετικών επιπέδων κατωφλίων ισχύος για κάθε κλάση υπηρεσιών. Στις εργασίες [60], [61], [62] και [63] οι κλήσεις υψηλής προτεραιότητας διακρίνονται από ειδικό χειρισμό καθορίζοντας τον αριθμό των χρηστών κάθε κλάσης που θα εξυπηρετούνται από το δίκτυο. Στις εργασίες [64], [65] προτάθηκε ένα σχήμα κατανομής πόρων για την υποστήριξη του ελέγχου αποδοχής κλήσεων στο οποίο γίνεται τμηματική κατανομή ανάλογα με την προτεραιότητα κάθε κλάσης. Επιπλέον, για τις κλήσεις κατηγορίας βέλτιστης προσπάθειας (best effort) προτάθηκε η χρήση μιας προνομιακής τεχνικής διαχείρισης στην εργασία [64]. Παρόμοιες τεχνικές προνομιακής διαχείρισης για την απόδοση προτεραιοτήτων στις διάφορες κλάσεις παρουσιάζονται επίσης στις εργασίες [66], [67].

Τα σχήματα ελέγχου αποδοχής κλήσεων τα οποία προορίζονται για την απόδοση προτεραιότητας διακρίνονται στους αλγορίθμους δανεισμού, τη χρήση συστημάτων ουρών αναμονής και η αλγόριθμοι δέσμευσης πόρων. Στους αλγορίθμους δανεισμού καναλιών σε

μια κυψέλη που το σύνολο των καναλιών είναι κατειλημμένα, αυτή δανείζεται ελεύθερα κανάλια από μία γειτονική για την εξυπηρέτηση των κλήσεων μεταπομπής [68], [69]. Φυσικά τα κανάλια μπορούν να δανειστούν μόνο υπό την προϋπόθεση ότι δεν προκαλούνται παρεμβολές με τις υπάρχουσες κλήσεις. Μια άλλη κατηγορία αλγορίθμων είναι αυτοί που χρησιμοποιούν ουρές αναμονής για τα αιτήματα κλήσεων μεταπομπής όταν δεν υπάρχουν διαθέσιμα κανάλια. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να μειωθεί η πιθανότητα διακοπής κλήσεων αυξάνοντας όμως τη πιθανότητα μη αποδοχής των νέων κλήσεων. Φυσικά τα ανάλογα επίπεδα προτεραιότητας αποδίδονται και στις κλήσεις που αναμένουν. Τέτοιοι αλγόριθμοι έχουν προταθεί στις εργασίες [70], [71] και [72]. Ειδικά στην εργασία [72] έχει προταθεί ένα γενικευμένο πλαίσιο για τον έλεγχο αποδοχής κλήσεων όπου ενσωματώνεται και ένα σύστημα αναμονής κλήσεων. Το πλαίσιο αυτό έχει γενικευθεί για δίκτυα πολλαπλών κλάσεων υπηρεσιών υιοθετώντας ένα συνδυασμό τεχνικής ουρών αναμονής και δέσμευσης καναλιών στην εργασία [73]. Τέλος, έχουμε την κατηγορία των σχημάτων αποδοχής κλήσεων με δέσμευση καναλιών όπου ένας αριθμός καναλιών δεσμεύεται για μια κατηγορία κλήσεων που ονομάζονται guard channels. Ο μηχανισμός αυτός προτάθηκε πρώτα για τις κλήσεις μεταπομπής στην εργασία [57] και συνδυάζεται με τη χρήση κατωφλίων που ορίζουν τον αριθμό των καναλιών που δεσμεύονται. Η ανάλυση των αλγορίθμων αυτών πραγματοποιείται με τη χρήση αλυσίδων Markov και επιπλέον στην εργασία [74] παρουσιάστηκε η ανάγκη για χρήση πολυδιάστατων μοντέλων Markov λόγω του ότι ο χρόνος παραμονής μιας κλήσης στην κυψέλη είναι διαφορετικός για κάθε είδος κλήσης. Ο στατικός χαρακτήρας των αλγορίθμων αυτών ξεπεράστηκε με την εκτίμηση του βέλτιστου αριθμού των guard channels με βάση τη κίνηση του δικτύου [51], [75].

Μια πολύ σημαντική παραλλαγή των σχημάτων ελέγχου αποδοχής κλήσεων που βασίζονται στο μηχανισμό guard channel είναι οι αλγόριθμοι fractional guard channel που αναπτύχθηκαν στην εργασία [76]. Στον αλγόριθμο αυτό οι νέες κλήσεις γίνονται αποδεκτές με μια πιθανότητα η οποία εξαρτάται από την τρέχουσα κατάσταση δεσμευμένων καναλιών. Η εκτενέστερη μελέτη του σχήματος αυτού σε συνδυασμό με την εξέλιξη του, που αποτελούν τα σχήματα λέπτυνσης (thinning schemes) έγινε στην εργασία [74]. Η επέκταση του αλγορίθμου αυτού για δίκτυα πολλαπλών κλάσεων υπηρεσιών έγινε στην εργασία [77]. Στους αλγορίθμους αυτούς προτείνεται η δυναμική ρύθμιση της ροής των εισερχόμενων κλήσεων. Τα σχήματα αυτά μελετήθηκαν εκτενώς στις εργασίες [78], [79] όπου αξιολογείται η απόδοση τους μέσω υπολογισμού των πιθανοτήτων μη αποδοχής κλήσεων. Ενώ πρόσφατα στην εργασία [80] προτάθηκαν νέες μέθοδοι για την ρεαλιστικότερη εκτίμηση των τιμών των πιθανοτήτων μη αποδοχής των κλήσεων.

Στα σχήματα δέσμευσης, όπως προαναφέρθηκε, οι πόροι δεσμεύονται πρώτα για τις κλάσεις υπηρεσιών μεγαλύτερης προτεραιότητας, για το λόγο αυτό και οι κλήσεις κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την προτεραιότητα τους και τις απαιτήσεις QoS [81], [82], [83]. Επιπλέον σημαντικές εργασίες έχουν γίνει και στον έλεγχο αποδοχής κλήσεων με τη χρήση κατωφλίων, που αποτελεί άλλη μια ιδιαίτερη κατηγορία σχημάτων, όπως στην εργασία [84] όπου προτείνεται η χρήση κατωφλίων αποκοπής. Στην εργασία [85] ο προτεινόμενος αλγόριθμος χρησιμοποιεί προκαθορισμένα κατώφλια με βάση τον αριθμό των κλήσεων. Οι τιμές των κατωφλίων προσδιορίζεται μέσα από τεχνική βελτιστοποίησης με χρήση μοντέλων μη γραμμικού προγραμματισμού.

Εκτός όμως από τις προηγούμενες κατηγορίες αλγορίθμων που στηρίζονται στη χρήση κατωφλίων και τη δέσμευση πόρων έχουν παρουσιαστεί δυναμικά σχήματα κατανομής πόρων τα οποία μεταβάλλουν τους κανόνες αποδοχής ανάλογα με τις παραμέτρους του δικτύου. Ένα τέτοιο δυναμικό σχήμα κατανομής πόρων για τον έλεγχο αποδοχής κλήσεων σε δίκτυα πολλαπλών κλάσεων υπηρεσιών προτείνεται στην εργασία [86] βασισμένο σε ένα πρωτόκολλο δικαιοσύνης. Επιπλέον στην εργασία [87] έχουμε τη χρήση δυναμικών κατωφλίων δέσμευσης πόρων με σκοπό την απόδοση προτεραιότητας στις κλάσεις υπηρεσιών, καθορίζοντας για κάθε κλάση τα δικά της επίπεδα τιμών των κατωφλίων. Επίσης, πολύ σημαντική έρευνα έχει πραγματοποιηθεί για τους δυναμικούς αλγορίθμους προσαρμογής του εύρους ζώνης για ασύρματα δίκτυα που υποστηρίζουν εφαρμογές πολυμέσων πολλαπλών κλάσεων υπηρεσιών, οι οποίοι παρέχουν προτεραιότητα στα διάφορα είδη κλήσεων [53], [88], [89], [90], [91], [92]. Με το δυναμικό καθορισμό του εύρους ζώνης διατηρούνται τα επίπεδα QoS με βάση τη διαθεσιμότητα των πόρων και τα χαρακτηριστικά της κίνησης. Η δυναμική προσαρμογή του εύρους ζώνης (bandwidth adaptation) στους αλγόριθμους ελέγχου αποδοχής κλήσεων μπορεί να συνδυαστεί με την ανάλογη προσαρμογή του επιπέδου QoS, όπου για κάποιες κλήσεις είναι πιθανή η μείωση του επιπέδου QoS σε ανεκτά επίπεδα με σκοπό την αποδοχή μεγαλυτέρου αριθμού κλήσεων από το δίκτυο [91], [92]. Επίσης, στην εργασία [93] με τους αλγορίθμους δυναμικής προσαρμογής εύρους ζώνης επιτυγχάνεται εκτός από την απόδοση προτεραιοτήτων η μεγιστοποίηση της χρησιμοποίησης του δικτύου καθώς και των κερδών του παρόχου.

Οι βέλτιστοι αλγόριθμοι ελέγχου αποδοχής κλήσεων, που είναι επίσης μια σημαντική κατηγορία, είναι ιδιαίτερα προτιμητέοι, όμως είναι εξαιρετικά δύσκολη η ανάπτυξη τους και η σωστή λειτουργία τους. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι έχουμε την αλληλεπίδραση πολλών παραμέτρων, με αποτέλεσμα η λύση που προτείνεται να μην είναι εφικτή. Μόνο οι αλγόριθμοι που στηρίζουν τη βελτιστοποίηση τους στην τιμολόγηση των

παρεχομένων υπηρεσιών θεωρούνται ότι ανταποκρίνονται σε ρεαλιστικές συνθήκες [48]. Σημαντικότερη όμως διάδοση έχουν οι αλγόριθμοι που είναι σχεδόν βέλτιστοι αφού είναι πιο κοντά στην πραγματικότητα. Οι σχεδόν βέλτιστες λύσεις αναπτύχθηκαν με τη χρήση ευρεστικών τεχνικών όπως οι γενετικοί αλγόριθμοι και οι τεχνικές μάθησης. Στην εργασία [94] προτείνονται ευρεστικοί αλγόριθμοι για τη βελτίωση της χωρητικότητας καναλιών στα δίκτυα πολλαπλών κλάσεων υπηρεσιών σε συνδυασμό με τα κατάλληλα σχήματα ελέγχου αποδοχής κλήσεων. Ως προς τη βελτιστοποίηση των πολιτικών αποδοχής με βάση την τιμολόγηση, με στόχο τη βελτίωση της χρησιμότητας των πόρων αλλά και των εσόδων του παρόχου, έχουν ενσωματωθεί στους αλγόριθμους ελέγχου αποδοχής κλήσεων, μέσα από τη χρήση καταλλήλων συναρτήσεων ζήτησης, κατάλληλοι μηχανισμοί για την εύρεση του βέλτιστου σημείου τιμολόγησης [95].

Τα δυναμικά σχήματα ελέγχου αποδοχής κλήσεων που έχουν προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία κατανέμονται σε δυο κατηγορίες: σε αυτά που βασίζονται σε συγκεκριμένες παραμέτρους και ενεργούν προληπτικά –προδραστικούς– (proactive) και σε αυτά που βασίζονται σε μετρήσεις οι οποίοι λειτουργούν σε βάση αντίδρασης (reactive). Στις κατηγορίες αυτές το κριτήριο είναι ο χρόνος λήψης της απόφασης αποδοχής. Στους proactive ελέγχους αποδοχής κλήσεων, η ελεγχόμενη κλήση γίνεται αποδεκτή ή μη με βάση την εκ των προτέρων εκτίμηση των περιορισμών QoS και των σχετικών παραμέτρων. Στην ουσία υπονοείται ότι υπάρχει πλήρης γνώση της εισερχόμενης κίνησης η οποία θεωρούμε ότι ακολουθεί συγκεκριμένες κατανομές [31]. Σε αυτή την κατηγορία εντάσσονται τα σχήματα δέσμευσης καναλιών –guard channel–, όπου έχουμε τη χρήση ενός κατωφλίου δέσμευσης καναλιών όπου αν οι κλήσεις σε εξέλιξη το φτάσουν τότε κάθε νέα κλήση δε γίνεται αποδεκτή. Η λογική αυτή κάποιες φορές οδηγεί σε σπατάλη πόρων όμως οι αλγόριθμοι που την υλοποιούν είναι απλοί και αποτελεσματικοί και έχουν υιοθετηθεί μαζικά στα κυψελωτά δίκτυα επικοινωνιών [31]. Στους reactive αλγορίθμους, αφού ξεκινήσει η εκπομπή μιας κλήσης, ο αλγόριθμος θα λάβει την απόφαση αποδοχής βάσει μετρήσεων QoS κατά τη διάρκεια της εκπομπής. Πρόκειται για δυναμικά σχήματα που στηρίζονται σε μετρήσεις, σε αυτή την κατηγορία υπάγονται οι αλγόριθμοι που βασίζονται στη μέτρηση του SIR και χρησιμοποιούνται ιδιαίτερα στα συστήματα CDMA [31].

Επίσης, αρκετά σχήματα αναπτύχθηκαν με κριτήριο το είδος της πληροφορίας που χρειάζεται για την διαδικασία του ελέγχου αποδοχής κλήσεων [96]. Ορισμένοι αλγόριθμοι αξιοποιούν την πληροφορία των κατειλημμένων κυψελών και απαιτούν κάποιες πληροφορίες για τα επίπεδα κατάληψης της κυψέλης [76],[97]. Εναλλακτικά, οι αλγόριθμοι ελέγχου αποδοχής κλήσεων μπορούν να αξιοποιήσουν πληροφορία κινητικότητας, που είναι

ιδιαίτερα πολύπλοκη διαδικασία αφού απαιτεί σηματοδοσία. Το επίπεδο της ποσότητας της πληροφορίας που απαιτείται για τον έλεγχο αποδοχής κλήσης μπορεί να θεωρηθεί είτε σε επίπεδο κυψέλης είτε σε επίπεδο χρήστη. Αν θεωρηθεί ένα ομογενές μοντέλο κίνησης τότε η πληροφορία από μια κυψέλη είναι αρκετή για να αντιπροσωπεύσει όλη τη κατάσταση του δικτύου. Από την άλλη, αν έχουμε ένα μη ομογενές μοντέλο κίνησης, τότε απαιτείται πληροφορία από διάφορες κυψέλες ώστε να μοντελοποιήσουμε την κατάσταση του δικτύου. Ακόμα, υπάρχει και η τρίτη περίπτωση όπου λαμβάνεται πληροφορία από κάθε χρήστη του δικτύου, η οποία επιτρέπει τη μοντελοποίηση του δικτύου με μεγάλη ακρίβεια οδηγώντας όμως στη συλλογή τεραστίου όγκου πληροφορίας.

Στη βιβλιογραφία προτείνονται σχήματα ελέγχου αποδοχής κλήσεων τα οποία σχεδιάζονται για την άνω ζεύξη ή τη κάτω ζεύξη. Στην άνω ζεύξη ο περιορισμός της εκπεμπόμενης ισχύος θεωρείται ο πιο σημαντικός, ενώ στη κάτω ζεύξη έχουμε την απαίτηση για πληροφορία ανάδρασης από τους κινητούς σταθμούς προς τους σταθμούς βάσης με στόχο την αποτελεσματική χρησιμοποίηση των πόρων. Η εφαρμογή αλγορίθμων ελέγχου αποδοχής κλήσεων και στις δυο ζεύξεις είναι πολύ σημαντική αφού μια κλήση μπορεί να γίνεται δεκτή στη μια ζεύξη και να μη γίνεται αποδεκτή στην άλλη, ειδικά στις περιπτώσεις όπου έχουμε ασύμμετρη κίνηση. Στην εργασία [98] προτάθηκε ένας κοινός αλγόριθμος για τις δυο ζεύξεις, όπου αποδεχόμαστε μια κλήση μόνο εάν αυτή γίνει αποδεκτή και στις δυο ζεύξεις. Η ασυμμετρία της κίνησης μεταξύ άνω και κάτω ζεύξης λαμβάνεται υπ' όψιν μέσα από τη ρύθμιση του εύρους ζώνης που έχει κατανεμηθεί σε κάθε ζεύξη βάσει των χαρακτηριστικών της κίνησης σε καθεμία [99]. Η ασύμμετρη αυτή κατανομή του εύρους ζώνης βελτιώνει σημαντικά τη χρησιμοποίηση των πόρων και την ποιότητα υπηρεσίας. Μέσα από τη βελτιστοποίηση της κατανομής μπορούν να μειωθούν σημαντικά οι πιθανότητες μη αποδοχής των νέων κλήσεων και των κλήσεων μεταπομπής αλλά και οι πιθανότητες διακοπής μιας κλήσης. Η επίδραση της κατανομής εύρους ζώνης αναλύεται καλύτερα μέσα από τους αλγορίθμους που βασίζονται στο λόγο σήματος προς παρεμβολή (SIR-based).

Τα σχήματα αυτά που βασίζονται στην ποιότητα του σήματος είναι επίσης μια σημαντική κατηγορία η οποία έχει μελετηθεί και στην οποία πρέπει να αναφερθούμε εκτενώς. Ειδικότερα οι αλγόριθμοι ελέγχουν την αποδοχή των κλήσεων βάσει του λόγου σήματος προς παρεμβολή (Signal to Interference Ratio) SIR. Το ενδιαφέρον για αλγορίθμους αυτής της κατηγορίας εστιάζεται κυρίως στα CDMA (Code Division Multiple Access) συστήματα όπου οι παρεμβολές είναι ο βασικότερος παράγοντας που επηρεάζει την απόδοση τους σε θέματα χωρητικότητας και παροχής QoS στους τελικούς χρήστες. Στα

σχήματα ελέγχου αποδοχής κλήσεων αυτής της κατηγορίας, το κριτήριο αποδοχής είναι το κατά πόσο μια νέα κλήση θα έχει την απαιτούμενη ποιότητα σήματος και αν η αποδοχή της θα επηρεάσει τα επίπεδα παρεμβολής στις κλήσεις που είναι σε εξέλιξη. Στην ουσία τα διάφορα επίπεδα παρεμβολών αντιστοιχίζονται σε επίπεδα QoS. Συνεπώς, μια κλήση γίνεται αποδεκτή αν λόγος σήματος προς παρεμβολή είναι πάνω από ένα όριο SIR που ορίζεται ως ανεκτό για την αποδοχής της [100]. Η αποδοχή της κλήσης στηρίζεται στον υπολογισμό της υπολειπόμενης χωρητικότητας της κυψέλης ώστε να αποδεχθεί την κλήση [100]. Οι απλοί αυτοί αλγόριθμοι βελτιώθηκαν περαιτέρω με τη χρήση καλύτερων μοντέλων διάδοσης λαμβάνοντας υπ' όψιν και τη διακυψελική παρεμβολή (intercell interference) αλλά και επιπλέον παράγοντες [101], [102].

Με βάση το SIR μπορεί να υπολογιστεί και ο ρυθμός εσφαλμένων διφύων BER (Bit Error Rate) λαμβάνοντας υπόψη τις χρησιμοποιούμενες κωδικοποιήσεις. Επιπρόσθετα προς το SIR μπορούν να υπολογιστούν και οι τιμές της ενέργειας ανά διφύο E_b/N_0 και ο λόγος της ενέργειας ανά διφύο προς την παρεμβολή E_b/I_0. Με βάση αυτούς τους υπολογισμούς έχουν αναπτυχθεί σχήματα ελέγχου αποδοχής στα οποία το κριτήριο για την απόφαση αποδοχής είναι οι περιορισμοί E_b/I_0, ειδικά στα συστήματα CDMA με πολλαπλούς κώδικες [103]. Τα σχήματα ελέγχου αποδοχής κλήσεων που βασίζονται στο SIR ανήκουν στα δυναμικά σχήματα που μπορούν να αντιμετωπίσουν τις διακυμάνσεις της κίνησης. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί είτε χρησιμοποιώντας πληροφορία είτε μόνο από μια κυψέλη είτε και από γειτονικές, εξασφαλίζοντας τη γνώση της γενικότερης κατάστασης του δικτύου.

Τέλος, εκτός από τα συστήματα CDMA σχήματα ελέγχου αποδοχής κλήσεων που βασίζονται στο SIR χρησιμοποιούνται και στα συστήματα με διαίρεση χρόνου TDMA (Time Division Multiple Access) το οποίο έχει περιορισμούς όσον αφορά στην ποιότητα σήματος λόγω της επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων και της προκαλούμενης ομοκαναλικής παρεμβολής. Στην περίπτωση αυτή, ο αλγόριθμος ελέγχου αποδοχής κλήσεων ελέγχει τα επίπεδα SIR σε όλες τις διαθέσιμες χρονοθυρίδες (timeslots) και αποδέχεται μια νέα κλήση μόνο εάν το επίπεδο SIR είναι μεγαλύτερο από ένα κατώφλι. Επίσης, έχει τη δυνατότητα να επανακαθορίζει τις χρησιμοποιούμενες χρονοθυρίδες εάν σε κάποιο μειωθεί το επίπεδο QoS [104]. Ανάλογα σχήματα ελέγχου αποδοχής κλήσεων έχουν παρουσιαστεί και για υβριδικά σχήματα T/CDMA [105]. Για τους αλγόριθμους που βασίζονται στο SIR έχουν αναπτυχθεί και κατάλληλες τεχνικές βελτιστοποίησης με τη χρήση τεχνικών γραμμικού προγραμματισμού, με στόχο τη μείωση των πιθανοτήτων μη αποδοχής κλήσεων αλλά και την αποτελεσματικότερη διαχείριση των διαθέσιμων πόρων λαμβανομένων υπ' όψιν των περιορισμών του σήματος [106].

3.4. Περιγραφή Δικτύου και Κίνησης σε Κυψελωτά Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα

Η θεωρία της τηλεπικοινωνιακής κίνησης είναι ένα θέμα που έχει μελετηθεί εκτενώς στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα. Στην παρούσα διατριβή προχωρήσαμε στη μελέτη δικτύων ασυρμάτων επικοινωνιών τα οποία βασίζονται στην κυψελωτή αρχιτεκτονική, η οποία είναι από τις δημοφιλείς σήμερα και αξιοποιείται σε πληθώρα τηλεπικοινωνιακών τεχνολογιών. Ένας πολύ βασικός παράγοντας στην σχεδίαση κυψελωτών συστημάτων είναι η δυνατότητα εξυπηρέτησης της τηλεπικοινωνιακής κίνησης. Ως τηλεπικοινωνιακή κίνηση στα κυψελωτά συστήματα, ή απλά κίνηση ορίζεται το σύνολο, όσον αφορά στο πλήθος και στη διάρκεια, των τηλεφωνικών κλήσεων ή των κλήσεων μετάδοσης δεδομένων από και προς τα κινητά τερματικά, που πραγματοποιούνται μέσω ενός αριθμού διαύλων προς κάποιο σταθμό βάσης με τη χρήση των διαθεσίμων πόρων του δικτύου. Μετά το χωρισμό του συστήματος σε κυψέλες οι διαθέσιμοι ραδιοδίαυλοι κατανέμονται σ` αυτές σύμφωνα με την πυκνότητα των χρηστών κάθε κυψέλης, την απόσταση επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων και το διαθέσιμο ραδιοφάσμα. Θα επικεντρώσουμε τη θεώρησή μας στην κίνηση που σχετίζεται με ένα σταθμό βάσης, ο οποίος διαθέτει συγκεκριμένο αριθμό διαύλων για την εξυπηρέτηση μεγάλου αριθμού χρηστών. Ταυτόχρονα, αύξηση των χρηστών ενός σταθμού συνεπάγεται μείωση της παρεχόμενης ποιότητας υπηρεσίας. Οι ραδιοδίαυλοι είναι αμφίδρομοι, μέσω των οποίων είτε οι χρήστες μπορούν να έχουν πρόσβαση στο δίκτυο, είτε το δίκτυο πρόσβαση στους χρήστες.

Η θεωρία τηλεπικοινωνιακής κίνησης ασχολείται με τα προβλήματα αναμονής αλλά και απωλειών στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα. Η ανάλυση των προβλημάτων αυτών εξαρτάται τόσο από τις διαδικασίες εισόδου και εξόδου όσο και από τη δομή του συστήματος. Ένας από τους στόχους της ανάλυσης της κίνησης είναι να συσχετίσει την πιθανότητα αποκλεισμού των κλήσεων με το συνολικό αριθμό των πόρων και τη στατιστική των αφίξεων και αναχωρήσεων των κλήσεων. Η φορά της κίνησης δεν επηρεάζει την ανάλυση της κίνησης σύμφωνα με τη θεωρία αναμονής. Επίσης, η ανάλυση δεν επηρεάζεται από τον τύπο της ασύρματης πρόσβασης ή τον τύπο της πολυπλεξίας που χρησιμοποιείται. Οι σημαντικότεροι παράγοντες για την εξυπηρέτηση της κίνησης είναι:

- Ο ρυθμός άφιξης κλήσεων.
- Οι διάρκειες κατάληψης των πόρων για τις επιτυχείς κλήσεις.
- Ο συνολικός αριθμός των διαθέσιμων πόρων.
- Η πιθανότητα μη αποδοχής – αποκλεισμού μιας νεοεισερχόμενης κλήσης.

- Ο τρόπος αντιμετώπισης των αποκλειόμενων κλήσεων.

Γενικά οι κλήσεις δημιουργούνται από τους χρήστες σε εντελώς τυχαίες χρονικές στιγμές. Αν ένας χρήστης Α επιθυμεί να επικοινωνήσει με ένα χρήστη Β, το αποτέλεσμα θα είναι, είτε η αποκατάσταση της μεταξύ τους επικοινωνίας, είτε η εγκατάλειψη της προσπάθειας από τον Α. Η επικοινωνία μπορεί να επιτευχθεί, είτε αμέσως, είτε μετά από ένα αριθμό αποτυχημένων προσπαθειών του Α. Έχει παρατηρηθεί, πως κάποιος χρήστης, μετά από μία αποτυχημένη προσπάθεια αποκατάστασης επικοινωνίας με κάποιον άλλο χρήστη επαναλαμβάνει τις προσπάθειές του μέχρι να το επιτύχει, γεγονός που δημιουργεί επαναλαμβανόμενες κλήσεις, δηλαδή αυξημένο φορτίο στο δίκτυο. Η καθυστέρηση με την οποία ο χρήστης επαναλαμβάνει τις προσπάθειές του εξαρτάται από την εκτίμησή του για την αιτία της αποτυχίας της επικοινωνίας.

Ο αριθμός των προσφερόμενων κλήσεων ανά μονάδα χρόνου, δηλαδή ο ρυθμός κλήσεων σ' ένα σταθμό βάσης ποικίλει και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Για παράδειγμα, σε περιοχές όπου έχουμε μεγάλη συγκέντρωση χρηστών, όπως το κέντρο μιας πόλης κατά τις εργάσιμες ώρες, ο ρυθμός κλήσεων είναι αυξημένος, ενώ κατά την υπόλοιπη διάρκεια της ημέρας μειώνεται σημαντικά. Η διαδικασία εισόδου των κλήσεων λοιπόν είναι μια στοχαστική ανέλιξη. Η διάρκεια της επικοινωνίας ή της κατάληψης ενός διαύλου είναι επίσης ένα τυχαίο φαινόμενο. Οι συνήθειες των χρηστών κυμαίνονται μεταξύ εκείνων που πραγματοποιούν λίγες κλήσεις, μεγάλης διάρκειας και εκείνων που πραγματοποιούν πολλές κλήσεις μικρής διάρκειας. Η ποικιλία αυξάνεται αν λάβει κανείς υπ' όψιν και τις κλήσεις μεταφοράς δεδομένων όπως π.χ. για την πλοήγηση στο Διαδίκτυο. Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε πως η διάρκεια μιας κλήσης ή ο χρόνος κατάληψης του διαύλου καθορίζονται από ένα πιθανοτικό νόμο, αφού κάθε κατηγορία κλήσης έχει τα δικά της χαρακτηριστικά. Οι τερματισμοί των κλήσεων λοιπόν συμβαίνουν σε τυχαίες χρονικές στιγμές και επηρεάζονται πάρα πολύ από τη λειτουργία του συστήματος. Οδηγούν λοιπόν σε μια δεύτερη στοχαστική ανέλιξη, τη διαδικασία εξόδου. Οι ιδιότητες των διαδικασιών εισόδου και εξόδου μπορούν να εκφραστούν από τους πιθανοτικούς νόμους, οι οποίοι διέπουν τη διάρκεια του χρόνου κατάληψης και τα χρονικά διαστήματα μεταξύ δύο διαδοχικών κλήσεων (inter-arrival time). Συνεπώς, οι απαντήσεις στα προβλήματα αυτά δεν μπορούν να είναι ακριβείς, αλλά μπορούν να βρεθούν μόνο πιθανοτικά ή χρησιμοποιώντας μέσες τιμές για τα εξεταζόμενα μεγέθη.

Για την περιγραφή και τη μοντελοποίηση του κυψελωτού δικτύου αλλά και της κίνησης οι παρακάτω υποθέσεις, όσον αφορά τις αφίξεις των κλήσεων, έχει αποδειχθεί πως παρέχουν ακριβείς εκτιμήσεις για πολλές χρήσιμες εφαρμογές της θεωρίας

τηλεπικοινωνιακής κίνησης [107]. Για τις ανάγκες της παρούσας διατριβής, θεωρούμε ότι το μελετούμενο δίκτυο χαρακτηρίζεται από ομογένεια, συνεπώς αρκεί να μελετήσουμε μια οποιαδήποτε κυψέλη του δικτύου. Οι ακόλουθες βασικές θεωρήσεις και παραδοχές για τις αφίξεις των κλήσεων έχουν υιοθετηθεί στις μαθηματικές αναλύσεις των προτεινόμενων αλγορίθμων, που θα πραγματοποιηθούν με χρήση των αλυσίδων Markov για τα συστήματα αναμονής. [107].

- Ο αριθμός των χρηστών είναι πολύ μεγάλος και ο ρυθμός των κλήσεων από κάθε χρήστη μικρός, οπότε οι αφίξεις κλήσεων μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι τυχαίες και ανεξάρτητες διαδικασίες και κατά συνέπεια μπορούν περιγραφούν από την κατανομή Poisson.
- Οι διαδικασίες κατάληψης των πόρων υποτίθεται ότι είναι επίσης τυχαίες και ανεξάρτητες.
- Οι στοχαστικές ανελίξεις της κίνησης είναι στατικές ως προς το χρόνο και εργοδικές, δηλαδή ο χρονικός μέσος όρος και ο μέσος όρος συνόλου είναι ίσοι με πιθανότητα 1.

Ο αριθμός των κατειλημμένων πόρων μεταβάλλεται χρονικά, επειδή υπάρχουν αφίξεις και τερματισμοί κλήσεων. Οι αναχωρήσεις μοντελοποιούνται με βάση τη χρονική διάρκεια μιας κλήσης. Η χρονική αυτή διάρκεια θεωρείται ότι είναι μια τυχαία μεταβλητή εκθετικά κατανεμημένη με μέση τιμή μ. Η εκθετική κατανομή προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα, στην ανάλυση του προβλήματος του ελέγχου αποδοχής κλήσεων με αλυσίδες Markov. Ο χρόνος αυτός σε πολλές εργασίες αντιπροσωπεύει στην ουσία το χρόνο συγκράτησης καναλιού που αποτελεί το χρόνο εξυπηρέτησης για τις κλήσεις και περιγράφει τη διάρκεια που μια αποδεκτή κλήση θα χρησιμοποιήσει ένα κανάλι που της έχει αποδοθεί μέχρι να ολοκληρωθεί ή να γίνει μεταπομπή της. Πρόκειται για μια τυχαία μεταβλητή η οποία μπορεί να υπολογιστεί από το χρόνο συγκράτησης μιας κλήσης και το χρόνο παραμονής στη κυψέλη [49]. Ο χρόνος συγκράτησης μιας κλήσης είναι η συνολική διάρκεια της σύνδεσης για μια κλήση και εξαρτάται από τα ειδικά χαρακτηριστικά κάθε κλήσης, αφού κάθε κλήση διαφορετικής κλάσης υπηρεσιών μπορεί να έχει διαφορετική διάρκεια. Ο χρόνος παραμονής στη κυψέλη είναι επίσης μια ακόμα σημαντική παράμετρος και αποτελεί το χρόνο παραμονής ενός κινητού χρήστη στη κυψέλη. Ο χρόνος αυτός εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά κινητικότητας του χρήστη καθώς και τη γεωμετρία της κυψέλης.

Εδώ θα πρέπει να σημειώσουμε, ότι η πλειοψηφία των ερευνητικών εργασιών στο χώρο αυτό χρησιμοποιεί την εκθετική κατανομή για τη μοντελοποίηση του χρόνου συγκράτησης καναλιού λόγω του ότι προσφέρει ικανοποιητική ακρίβεια αλλά και σχετικά

απλή ανάλυση [49]. Για να ισχύει αυτό θα πρέπει να τηρούνται αρκετές προϋποθέσεις [108]. Όμως, πειράματα και μετρήσεις έδειξαν αντίθετα αποτελέσματα, αφού ο χρόνος συγκράτησης καναλιού φαίνεται να είναι μη εκθετικός [109]. Επίσης στα σύγχρονα δίκτυα όπου έχουμε κίνηση πακέτων δεδομένων, αυτή δε μπορεί να περιγραφεί με ακρίβεια με την εκθετική κατανομή [110]. Για το λόγο αυτό, και έχουν προταθεί νέες προσεγγίσεις για το χρόνο συγκράτησης καναλιού που ακολουθούν άλλες κατανομές όπως η Erlang, η γάμμα και η λογαριθμοκανονική [74], [111], [112], [113] που αποκρίνονται με μεγαλύτερη ακρίβεια στη μοντελοποίηση της κίνησης. Η περίπτωση αυτή και η επίδραση της στην επίδοση του προτεινόμενου σχήματος ελέγχου αποδοχής κλήσεων θα εξεταστεί αναλυτικά σε επόμενη ενότητα της παρούσας διατριβής.

3.4.1. Κριτήρια Απόδοσης Δικτύου

Για τη μέτρηση της απόδοσης και της συμπεριφοράς των δικτύων κινητών επικοινωνιών έχουν προταθεί κατάλληλα μεγέθη. Τα κυψελωτά δίκτυα και η δικτυακή απόδοση τους μελετήθηκε εκτενώς από τους Hong και Rappaport στην εργασία [57]. Σήμερα εξαιτίας της κινητικότητας των χρηστών αλλά και των σύνθετων μοντέλων τηλεπικοινωνιακής κίνησης που προέρχονται από την ποικιλία των προσφερομενων υπηρεσιών απαιτούνται νέες προσεγγίσεις και τεχνικές ανάλυσης. Όμως τα βασικά μεγέθη που είναι: η πιθανότητα μη αποδοχής – αποκλεισμού – κλήσεων και η πιθανότητα διακοπής κλήσεων παραμένουν ως τα βασικά κριτήρια απόδοσης. Τα μεγέθη αυτά θα περιγραφούν συνοπτικά στη συνέχεια:

- <u>Πιθανότητα μη αποδοχής – αποκλεισμού – κλήσεων</u>: Το μέγεθος αυτό περιγράφει την πιθανότητα κάποιος χρήστης να ζητήσει την πραγματοποίηση μιας κλήσης και η αίτηση του να μη γίνει αποδεκτή. Αυτό μπορεί να συμβεί, είτε γιατί το δίκτυο είναι υπερφορτωμένο και δεν υπάρχουν διαθέσιμοι πόροι ώστε να παραχωρηθούν στο χρήστη για την κλήση είτε γιατί δεν πληρούνται τα όρια αποδοχής έτσι όπως αυτά τίθενται από τον αλγόριθμο που χρησιμοποιούνται.
- <u>Πιθανότητα διακοπής μιας κλήσης σε εξέλιξη</u>: Το μέγεθος αυτό περιγράφει την πιθανότητα να τερματιστεί μια ήδη εξελισσόμενη κλήση. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην υπερφόρτωση του δικτύου που οδηγεί στην πτώση της ποιότητας υπηρεσίας κάτω από ένα όριο, στην μείωση του σηματοθορυβικού λόγου στην είσοδο του δεκτή λόγω κάλυψης ή παρεμβολών καθώς και στην έλλειψη κάλυψης από κάποιο σταθμό βάσης κατά την κίνηση των τερματικών.

Είναι φανερό άλλωστε και από την καθημερινή μας εμπειρία ότι το πλέον ανεπιθύμητο γεγονός είναι η διακοπή μιας κλήσης που βρίσκεται ήδη σε εξέλιξη. Η διακοπή μιας κλήσης είναι πολύ πιο ενοχλητική σε σχέση με τη μη αποδοχή της [48]. Για το λόγο αυτό ο σχεδιαστής ενός ασύρματου δικτύου θα πρέπει να σχεδιάσει το δίκτυο κατά τέτοιο τρόπο ώστε η πιθανότητα διακοπής μιας εξελισσόμενης συνδιάλεξης να παραμένει σε πολύ χαμηλά επίπεδα, χαμηλότερα από αυτά της πιθανότητας αποκλεισμού νεοεισερχόμενης κλήσης.

Τέλος, σύμφωνα με όσα προαναφέρθηκαν θα πρέπει επίσης να αναφερθούμε στις περιπτώσεις των κλήσεων μεταπομπής, αφού ο εξαναγκασμένος τερματισμός μιας κλήσης μπορεί να οφείλεται σε αποτυχημένη μεταπομπή. Καθώς το κινητό τερματικό κινείται, υπάρχει περίπτωση να περάσει από την περιοχή κάλυψης ενός σταθμού βάσης που εξυπηρετεί μια κυψέλη στην περιοχή κάλυψης ενός άλλου σταθμού σε κάποια άλλη κυψέλη. Στην περίπτωση αυτή το δίκτυο μέσω της διαδικασίας μεταπομπής (handoff) θα πρέπει να μετάγει την κλήση. Υπάρχει όμως περίπτωση όταν το δίκτυο είναι υπερφορτωμένο, όλες οι γειτονικές κυψέλες, που θεωρητικά θα μπορούσαν να εξυπηρετήσουν την κλήση να μην έχουν διαθέσιμους πόρους και να μην μπορούν να παρέχουν τη σύνδεση. Αν μέσα σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα η κλήση δε μπορέσει να εξυπηρετηθεί τότε αυτή τερματίζεται από το δίκτυο λόγω αποτυχίας εκτέλεσης μεταπομπής (handoff failure). Αυτές οι κλήσεις επειδή βρίσκονται σε εξέλιξη θα πρέπει να περιορίζεται η πιθανότητα απόρριψης τους λόγω ενόχλησης των χρηστών οπότε σε όλους τους αλγορίθμους τους αποδίδεται προτεραιότητα για την εξυπηρέτηση τους, κάτι που είναι βασική μέριμνα των αλγορίθμων ελέγχου αποδοχής κλήσεων.

3.4.2. Κατηγοριοποίηση Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης – Κλήσεων – σε Κλάσεις Υπηρεσιών για Κυψελωτά Δίκτυα

Στα δίκτυα επικοινωνιών πρώτης και δεύτερης γενιάς είχαμε μια μόνο κλάση υπηρεσιών φωνής. Σήμερα όμως τα σύγχρονα δίκτυα προσφέρουν μια ποικιλία εφαρμογών στους τελικούς χρήστες που μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε διαφορετικούς τύπους κίνησης. Κάθε τύπος κίνησης χαρακτηρίζεται σαν μια κλάση υπηρεσιών. Κάθε κλάση υπηρεσιών έχει τα δικά της QoS χαρακτηριστικά όπως ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, την καθυστέρηση, τη διάρκεια κ.λ.π. Συνεπώς κάθε κλάση υπηρεσιών θα πρέπει να τύχει ξεχωριστής αντιμετώπισης ώστε να διαφοροποιηθεί η παρεχόμενη υπηρεσία στο χρήστη. Εκτός από τα ειδικά χαρακτηριστικά κάθε κλήσης ιδιαίτερη σημασία έχει η απόδοση προτεραιότητας σε κλάση υπηρεσιών, η οποία θα βασιστεί στις απαιτήσεις QoS, την

πολιτική τιμολόγησης κάθε κλήσης καθώς και τις SLAs με τους χρήστες. Αυτή η κατηγοριοποίηση των κλήσεων σε κλάσεις υπηρεσιών αξιοποιείται και από τον πάροχο αφού αυτή επιδρά στη κατανομή των πόρων, στη λήψη απόφασης αποδοχής κλήσεων και στην εφαρμοζόμενη τιμολογιακή πολιτική.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο, οι υπηρεσίες και οι εφαρμογές που προσφέρονται στα 3G δίκτυα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν στις παρακάτω κλάσεις υπηρεσιών με κυριότερο παράγοντα διαφοροποίησης την ευαισθησία στην καθυστέρηση που έχει η κάθε υπηρεσία σε: α) conversational β) streaming γ) interactive και δ) background [32]. Οι κατηγορίες αυτές και ο συσχετισμός με τα δικτυακά μοντέλα μεταφοράς πακέτων δεδομένων που ακολουθούν το πρωτόκολλο IP περιγράφηκαν διεξοδικά στο προηγούμενο κεφάλαιο. Για το λόγο αυτό θα δώσουμε τον παρακάτω πίνακα όπου περιγράφονται συνοπτικά τα ποσοτικά χαρακτηριστικά των QoS χαρακτηριστικών των τεσσάρων κλάσεων υπηρεσιών για τα 3G δίκτυα [114].

Πίνακας 3.1: Κλάσεις Υπηρεσιών 3G και QoS Παράμετροι

QoS Χαρακτηριστικά	**ΚΛΑΣΕΙΣ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ**			
	Conversational	**Streaming**	**Interactive**	**Background**
Απαιτήσεις Χρόνου	Πραγματικού χρόνου	Πραγματικού χρόνου	Μη πραγματικού χρόνου	Μη πραγματικού χρόνου
Εφαρμογές	Εφαρμογές φωνής	Εφαρμογές βίντεο	Υπηρεσίες διαδραστικές	Πλοήγηση στο Διαδίκτυο, e-mail
BitRate	16 kbps 32 kbps	64 kbps 128 kbps 384 kbps 756 kbps 2 Mbps	Υποστηρίζονται όλοι οι ρυθμοί μετάδοσης	Υποστηρίζονται όλοι οι ρυθμοί μετάδοσης
E_b/N_0	5 db	1-1.5 db	1 db	1 db

Οι διάφορες υπηρεσίες και οι κλάσεις στις οποίες ανήκουν μπορούν επίσης να μοντελοποιηθούν σε δύο γενικές κατηγορίες οι οποίες τις περιγράφουν με απλό τρόπο χωρίς να θυσιάζεται η ακρίβεια και είναι ιδιαίτερα διαδεδομένός [73, 77, 93, 110, 115, 116, 117]:

- Κλάση Υπηρεσιών πραγματικού χρόνου (Real Time Services) μη ανεκτής καθυστέρησης: Πρόκειται για υπηρεσίες με υψηλές απαιτήσεις QoS π.χ. μεγαλύτερη απαίτηση για εύρος ζώνης. Επίσης θεωρείται ότι ο χρόνος καθυστέρησης μεγαλύτερος από 200ms είναι μη αποδεκτός για υπηρεσίες αυτής της κλάσης [93]. Κυριότεροι εκπρόσωποι είναι οι υπηρεσίες φωνής, οι βιντεοκλήσεις, η μετάδοση εικόνας και ήχου σε πραγματικό χρόνο κ.α..

- Υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου (Non Real Time Services) ανεκτής καθυστέρησης: Πρόκειται για υπηρεσίες με μικρότερες απαιτήσεις QoS σε θέματα καθυστέρησης συγκριτικά με τις υπηρεσίες πραγματικού χρόνου. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων υπηρεσιών είναι η πλοήγηση στο Διαδίκτυο, η λήψη αρχείων, η μεταφορά αρχείων μέσω FTP και γενικά οι κλήσεις πακέτων δεδομένων.

Το κριτήριο για τη διάκριση των κλήσεων είναι το χαρακτηριστικό της καθυστέρησης κάθε κλήσης. Ειδικότερα για κάθε πακέτο δεδομένων υπάρχει ένα όριο χρονικής διάρκειας ώστε αυτό να παραδοθεί επιτυχώς στον προορισμό του. Ανάλογα με την αυστηρότητα του περιορισμού γίνεται η κατηγοριοποίηση των κλήσεων σε πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου και η ανάλογη ένταξη τους στις δυο βασικές κλάσεις υπηρεσιών.

Φυσικά στα σύγχρονα δίκτυα όπου έχουμε την ύπαρξη διαφόρων υπηρεσιών πολυμέσων θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε μια διευρυμένη κατηγοριοποίηση των κλάσεων υπηρεσιών λαμβάνοντας υπ' όψιν εκτός της καθυστέρησης και επιπλέον παραμέτρων QoS όπως η ζήτηση εύρους ζώνης και η διάρκεια της κλήσης. Με τον τρόπο αυτό οι κλήσεις κατηγοριοποιούνται σε περισσότερες κλάσεις υπηρεσιών επιτυγχάνοντας την ακριβέστερη περιγραφή τους χωρίς όμως να μειώνεται η αξία ή η ακρίβεια της γενικότερης περιγραφής στην οποία αναφερθήκαμε πριν [83], [118].

3.5. Πιθανοτικός Αλγόριθμος Δέσμευσης Πόρων

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται το αρχικό τμήμα της βασικότερης συνεισφοράς της παρούσας διατριβής και βασίζεται στη μελέτη του ελέγχου αποδοχής κλήσεων μέσω της δέσμευσης πόρων επεκτείνοντας το μοντέλο που προτάθηκε στις εργασίες [76], [119] για δίκτυα μιας κλάσης υπηρεσιών που επεκτάθηκε έπειτα στην εργασία [120] για πολλαπλές κλάσεις υπηρεσιών. Επιπλέον, στην εργασία [74] μελετήθηκαν αλγόριθμοι δέσμευσης πόρων για τον έλεγχο αποδοχής κλήσεων με στόχο την απόδοση προτεραιότητας στις κλήσεις μεταπομπής σε ασύρματα δίκτυα που υποστήριζαν μία κλάση υπηρεσιών. Στην εργασία αυτή προτάθηκαν βελτιώσεις διαδεδομένων αλγόριθμων με βάση την ιδέα που προτάθηκε στο [76] που οδήγησαν στην ανάπτυξη των σχημάτων λέπτυνσης (thinning schemes) ενώ στην εργασία [77] παρουσιάστηκε η ιδέα της επέκτασης, όχι όμως αναλυτικά, των αλγορίθμων αυτών για δίκτυα πολλαπλών κλάσεων υπηρεσιών όπου στόχος είναι η απόδοση προτεραιότητας στις υπηρεσίες πραγματικού χρόνου. Οι παραπάνω

εργασίες, παρά τη μεγάλη αξία τους, έχουν αρκετούς περιορισμούς ως προς τα αριθμητικά αποτελέσματα που παρουσιάζουν και την αξιολόγηση της επίδοσης των προτεινομένων σχημάτων [121].

Ο προτεινόμενος στη συγκεκριμένη διατριβή αλγόριθμος ελέγχου αποδοχής κλήσεων με δέσμευση πόρων για δίκτυα πολλαπλών κλάσεων υπηρεσιών βασίζεται σε μια πιθανοτική θεώρηση για τον έλεγχο των εισερχόμενων κλήσεων στο δίκτυο και για το λόγο αυτό ονομάστηκε PRRS (Probabilistic Resource Reservation Scheme). Ο αλγόριθμος αυτός βασίζεται στον αριθμό των εξυπηρετούμενων κλήσεων από το δίκτυο που στην ουσία εκφράζει τον αριθμό των χρηστών που εισέρχονται στο δίκτυο. Η βασική ιδέα στην οποία στηρίζεται η λειτουργία του αλγορίθμου είναι η προοδευτική διαχείριση των εισερχόμενων νέων κλήσεων χαμηλής προτεραιότητας μειώνοντας το ρυθμό αποδοχής τους καθώς αυξάνεται το φορτίο του δικτύου μέσω μιας εξωτερικά επιβαλλόμενης πιθανότητας [116]. Η λειτουργία αυτή πραγματοποιείται σε συνδυασμό με την ύπαρξη κατωφλίων δέσμευσης πόρων για κάθε κλάση υπηρεσιών. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζονται τμήματα των διαθέσιμων πόρων για αποκλειστική χρήση από κάθε κλάση υπηρεσιών.

Η ανάλυση του προτεινόμενου αλγορίθμου πραγματοποιείται για δυο διαφορετικές κλάσεις υπηρεσιών, οι οποίες περιγράφονται από τις γενικές κατηγορίες των υπηρεσιών πραγματικού χρόνου μη ανεκτής καθυστέρησης (real time - delay non tolerant) και των υπηρεσιών μη πραγματικού χρόνου ανεκτής καθυστέρησης (non real time - delay tolerant) [116, 117]. Στο σημείο αυτό, θα πρέπει να αναφέρουμε ότι επιλέχθηκε μια γενική περιγραφη των υποστηριζόμενων κλάσεων υπηρεσιών πάνω στην οποία μπορούν να περιγραφούν οποιεσδήποτε κλάσεις υπηρεσιών που προδιαγράφονται από τα σχετικά πρότυπα, όπως αναλύθηκαν σχετικά στο προηγούμενο κεφάλαιο. Εδώ θα πρέπει να τονίσουμε ότι στην παρούσα διατριβή οι όροι μη πραγματικού χρόνου και ανεκτής καθυστέρησης καθώς και οι όροι πραγματικού χρόνου – μη ανεκτής καθυστέρησης, αντίστοιχα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν εναλλακτικά για την περιγραφή των δυο μελετούμενων κλάσεων υπηρεσιών. Για την εξαγωγή αναλυτικών τύπων για των υπολογισμό των σχετικών πιθανοτήτων μη αποδοχής κλήσεων για κάθε κλάση υπηρεσιών θα χρησιμοποιηθούν μοντέλα Markov. Επιπλέον θα πρέπει να τονιστεί ότι τόσο στην ανάλυση μας όσο και στους εξαγόμενους αναλυτικούς τύπους χρησιμοποιούνται διαφορετικοί χρόνοι συγκράτησης καναλιού (channel holding time) για κάθε κλάση υπηρεσιών που εκφράζουν αντίστοιχα, τους χρόνους εξυπηρέτησης για κάθε κλάση. Οι εξαγόμενες σχέσεις θα χρησιμοποιηθούν περαιτέρω για την αξιολόγηση του προτεινόμενου αλγορίθμου ως προς τις πιθανότητες αποδοχής κλήσεων. Περαιτέρω αξιολόγηση του αλγορίθμου με επιπλέον κριτήρια όπου θα

μελετηθούν ειδικά χαρακτηριστικά του και οι διάφορες λειτουργίες θα πραγματοποιηθεί στη συνέχεια της παρούσας διατριβής.

3.5.1. Περιγραφή Μοντέλου Δικτύου και Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης

Στην ενότητα αυτή, θα περιγράψουμε το μοντέλο δικτύου στο οποίο στηρίζεται η ανάλυση του σχήματος αποδοχής κλήσεων με δέσμευση πόρων χρησιμοποιώντας πιθανοτική ανάλυση που βασίζεται στον αριθμό των χρηστών κάθε κλάσης, με στόχο την παροχή QoS σε κάθε χρήστη. Για το σκοπό αυτό, θεωρούμε ένα κυψελωτό κινητό δίκτυο ασυρμάτων επικοινωνιών στο οποίο έχουμε δυνατότητα υποστήριξης ευρυζωνικών εφαρμογών.

- Για τις ανάγκες της παρούσας διατριβής θεωρούμε ότι το μελετούμενο δίκτυο χαρακτηρίζεται από ομογένεια, συνεπώς αρκεί να μελετήσουμε μια κυψέλη του δικτύου.
- Επίσης, όπως προαναφέραμε θεωρούμε ότι έχουμε δίκτυο το οποίο έχει τη δυνατότητα εξυπηρέτησης U κλάσεων υπηρεσιών όπως π.χ. φωνή, βίντεο, μετάδοση δεδομένων κ.α.
- Θεωρούμε ότι M είναι ο συνολικός αριθμός των διαθέσιμων πόρων που εκφράζει τη μέγιστη χωρητικότητα της κυψέλης σε εξυπηρετούμενες κλήσεις.
- Καθώς θεωρούμε διαφορετικές κλάσεις υπηρεσιών, η κάθε μια με τα δικά της χαρακτηριστικά QoS, κάποιες κλήσεις θα πρέπει να έχουν υψηλότερη προτεραιότητα. Για το λόγο αυτό, στον προτεινόμενο αλγόριθμο έχει ενσωματωθεί ένας κατάλληλος μηχανισμός προτεραιότητας βάσει του οποίου θεωρούμε ότι κάθε κλήση της κλάσης υπηρεσίας u με ($u=1,\ldots,U$) έχει χαμηλότερη προτεραιότητα σε σχέση με μια κλήσης κλάσης $u+1$.
- Επίσης στο προτεινόμενο σχήμα ενσωματώνεται η έννοια της προτεραιότητας της κίνησης πραγματικού χρόνου έναντι της κίνησης μη πραγματικού χρόνου. Για το λόγο αυτό οι κλήσεις χαμηλής προτεραιότητας υπόκεινται σε μια παράμετρο κατωφλίου K_u το οποίο αποτελεί το κατώφλι για τους πόρους που δεσμεύονται. Για το σχήμα αποδοχής κλήσεων με δέσμευση πόρων μια νέα κλήση χαμηλής προτεραιότητας θα γίνει αποδεκτή μόνο εάν οι ήδη δεσμευμένοι πόροι είναι λιγότεροι από K_u. Αν αντιθέτως ξεπεραστεί το κατώφλι τότε η κλήση δε θα εξυπηρετηθεί. Σύμφωνα με την προηγούμενη παραδοχή, για κάθε κλήση κλάσης υπηρεσίας u που έχει μικρότερη προτεραιότητα σχέση με τις κλήσεις $u+1$ κλάσης

υπηρεσιών, η τιμή του κατωφλίου K_u θα πρέπει να είναι μικρότερη ή τουλάχιστον ίση με το κατώφλι K_{u+1} ($K_u \leq K_{u+1}$). Με απλά λόγια, οι κλήσεις μεγαλύτερης προτεραιότητας έχουν στη διάθεση τους περισσότερους πόρους για την εξυπηρέτηση τους.. Στην ουσία μέσω της ανάθεσης διαφορετικών κατωφλίων δέσμευσης πόρων γίνεται ο καθορισμός των διαφορετικών επιπέδων QoS βάσει των απαιτήσεων κάθε κλήσης, καθώς και η λειτουργία του μηχανισμού προτεραιότητας σε συνδυασμό με την παροχή εγγυήσεων QoS [122], [123].

- Ως προς το ρυθμό αφίξεων των χρηστών, για κάθε κλάση υπηρεσίας u γίνεται η υπόθεση ότι ακολουθούν την κατανομή Poisson. Ειδικότερα οι νέες κλήσεις κάθε κλάσης υπηρεσιών παρουσιάζουν ρυθμό άφιξης $\lambda_{u,N}$ και οι κλήσεις μεταπομπής $\lambda_{u,H}$ αντίστοιχα με $u=1,\ldots,U$ [124], [125].
- Ο συνολικός χρόνος που μια νέα και μια κλήση μεταπομπής ζητά να χρησιμοποιήσει ένα κανάλι είναι γνωστός σαν RCCT (Requested Call Connection Time). Ο χρόνος αυτός θεωρείται ότι είναι εκθετικά κατανεμημένος με μέσο ρυθμό $1/h_{u,N}$ και $1/h_{u,H}$ για τις νέες και τις κλήσεις μεταπομπής αντίστοιχα.
- Ο χρόνος παραμονής στην κυψέλη CRT (Cell Residence Time) είναι ο χρόνος που ένα κινητό τερματικό μένει στην κυψέλη και εξαρτάται άμεσα από την κινητικότητα του χρήστη. Ο CRT θεωρείται ότι είναι εκθετικά κατανεμημένος με μέσο ρυθμό $1/r_u$.
- Στον αλγόριθμο αποδοχής κλήσεων με βάση τους χρήστες που μελετάμε στην παρούσα ενότητα, θα αντιμετωπίσουμε τις νέες κλήσεις και τις κλήσεις μεταπομπής κάθε κλάσης υπηρεσιών σε ενιαία βάση, θεωρώντας ότι ο συνολικός ρυθμός αφίξεων κλήσεων είναι λ_u και ορίζεται ως $\lambda_u=\lambda_{u,N}+\lambda_{u,H}$ [73], [89], [121], [126], [127], [128]. Πρόκειται για μια διαδεδομένη πρακτική στη διεθνή βιβλιογραφία και η οποία παρέχει απλότητα στην ανάλυση, χωρίς να θυσιάζει την ακρίβεια της καθώς και των αναλυτικών τύπων. Επιπλέον μέσα από την προσέγγιση αυτή δίνεται έμφαση στην απόδοση προτεραιότητας στις κλάσεις υπηρεσιών με βάση τις απαιτήσεις QoS κάθε μιας.
- Με βάση τις παραμέτρους που ορίστηκαν προηγουμένως έχουμε και τον ολικό χρόνο εξυπηρέτησης μιας κλήσης ο οποίος για τους χρήστες μιας κλάσης υπηρεσίας u θα είναι μ_u και θα ορίζεται σαν $\mu_u=h_{u,N}+h_{u,H}+r_u$. Ο ρυθμός εξυπηρέτησης κάθε κλήσης θα είναι επίσης εκθετικά κατανεμημένος [121].

- Συνεπώς η ένταση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης εκφράζεται ως ο λόγος του ρυθμού άφιξης (λ_u) προς το συνολικό μέσο χρόνο εξυπηρέτησης (μ_u) και θα δίνεται από τη σχέση $\rho_u=\lambda_u/\mu_u$.
- Τέλος, στην ανάλυση του αλγορίθμου, η κατάσταση κάθε κυψέλης περιγράφεται με ένα διάνυσμα $\overline{n}=\left(n_1,n_2,...,n_u,...,n_U\right)$ όπου με n_u υποδηλώνεται ο αριθμός των σε εξέλιξη κλήσεων κλάσεως u, $u=1,\ldots,U$.

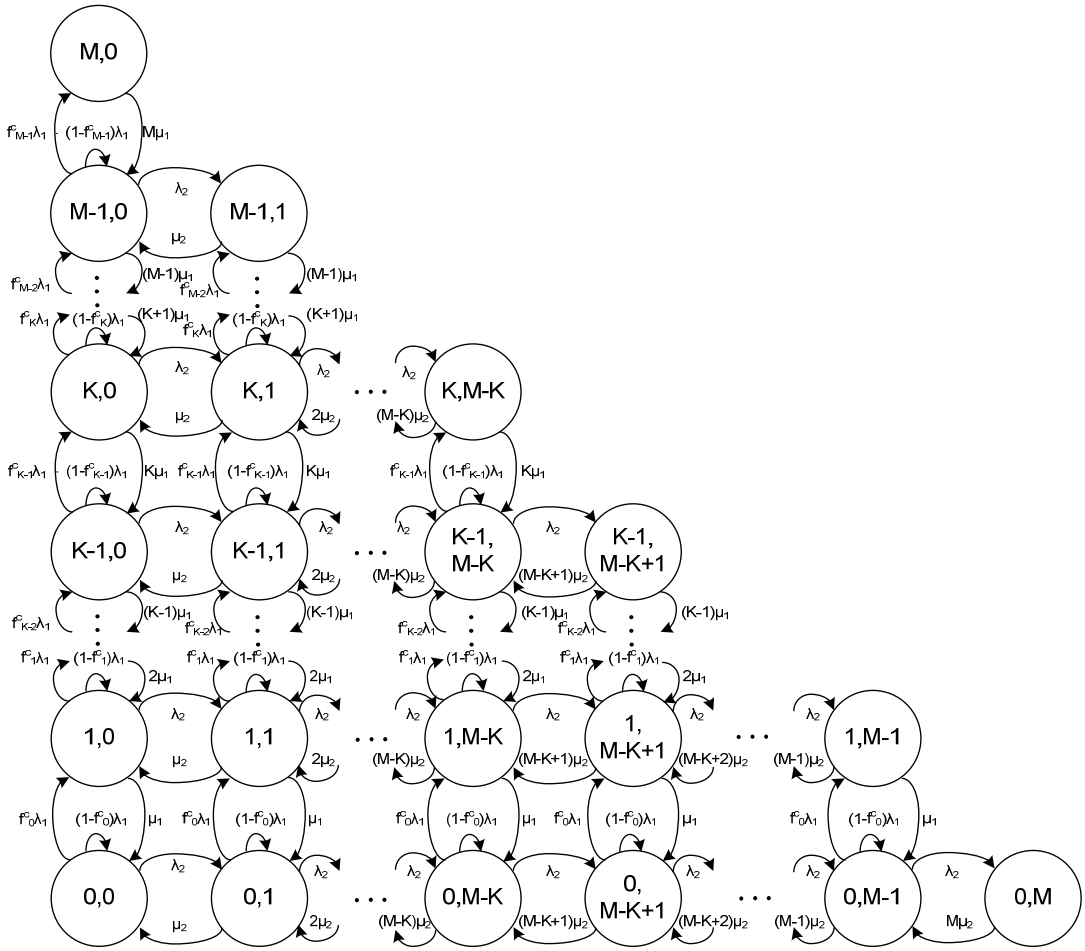
3.5.2. Περιγραφή του Σχήματος Αποδοχής Κλήσεων με βάση τους Χρήστες

Η βασική ιδέα του σχήματος αποδοχής κλήσεων είναι η διαχείριση των νέων κλήσεων με προοδευτικότητα έτσι ώστε να μειώνεται η ροή των κλήσεων χαμηλής προτεραιότητας καθώς η κίνηση του δικτύου αυξάνεται. Στην ουσία ο αλγόριθμος αυτός περιορίζει των αριθμό των κλήσεων χαμηλής προτεραιότητας σε ένα δίκτυο σταδιακά, καθώς εξαντλούνται οι πόροι του δικτύου. Η επίτευξη του στόχου αυτού υλοποιείται με την αποδοχή των κλήσεων χαμηλής προτεραιότητας μη πραγματικού χρόνου με κάποια εξωτερικά επιβαλλόμενη πιθανότητα, η οποία μειώνεται καθώς το φορτίο στο δίκτυο αυξάνεται. Με την εφαρμογή διαφορετικών πολιτικών για την επιλογή των πιθανοτήτων αποδοχής, δημιουργούνται σημαντικές διαφορές στη διαδικασία αποδοχής κλήσεων. Όπως αναφέραμε προηγουμένως, οι κλήσεις μη πραγματικού χρόνου που είναι χαμηλής προτεραιότητας και απαιτούν τη δέσμευση λιγότερων πόρων εισέρχονται στο σύστημα με κάποια εξωτερικά επιβαλλόμενη πιθανότητα μειώνοντας κατ' αυτό το τρόπο το φορτίο στο δίκτυο, αφήνοντας διαθέσιμους πόρους για την αποδοχή κλήσεων υψηλότερης προτεραιότητας. Από την άλλη πλευρά οι κλήσεις πραγματικού χρόνου που αποτελούν και τις κλήσεις υψηλής προτεραιότητας γίνονται πάντα αποδεκτές εκτός και αν εξαντληθούν όλοι διαθέσιμοι πόροι στην αντιπροσωπευτική κυψέλη που εξετάζουμε.

Όπως προαναφέρθηκε στην παρακάτω ανάλυση μελετήθηκαν δυο αντιπροσωπευτικές κατηγορίες κλάσεων υπηρεσιών. Η γενικότητα της περιγραφής των υποστηριζόμενων κλάσεων δίνει τη δυνατότητα να αξιοποιηθεί το προτεινόμενο μοντέλο και για την περιγραφή οποιονδήποτε κλάσεων υπηρεσιών με παρόμοια χαρακτηριστικά. Ειδικότερα, η πρώτη κλάση υπηρεσιών $u=1$ αναφέρεται στις κλήσεις μη πραγματικού χρόνου που είναι χαμηλής προτεραιότητας, ενώ η δεύτερη κλάση υπηρεσιών $u=2$ αναφέρεται στις κλήσεις πραγματικού χρόνου που χαρακτηρίζονται ως υψηλής προτεραιότητας.

Βασικό στοιχείο στην υλοποίηση του αλγορίθμου είναι η δέσμευση πόρων που επιτυγχάνεται με την ύπαρξη κατάλληλου κατωφλίου που ορίζει το όριο διαθέσιμων πόρων για τις κλήσεις χαμηλής προτεραιότητας. Αντίθετα για τις κλήσεις πραγματικού χρόνου δεν υπάρχει κάποιος περιορισμός αφού μπορούν να εξαντλήσουν τη χωρητικότητα της κυψέλης. Συγκεκριμένα, μια κλήση χαμηλής προτεραιότητας γίνεται αποδεκτή μόνο αν οι κλήσεις σε εξέλιξη της ίδιας κλάσης χαμηλής προτεραιότητας είναι λιγότερες από *K*, ή έχουν εξαντληθεί οι πόροι του δικτύου. Από την άλλη πλευρά, οι κλήσεις υψηλής προτεραιότητας γίνονται πάντα αποδεκτές εκτός και αν εξαντληθούν όλοι οι διαθέσιμοι πόροι στην αντιπροσωπευτική κυψέλη που εξετάζουμε. Στην ουσία για τις κλήσεις αυτές δεν υπάρχουν περιορισμοί, αλλά γίνεται δέσμευση πόρων για αποκλειστική χρήση από αυτή την κλάση υπηρεσιών. Συνεπώς, το όριο αποδοχής ταυτίζεται με την χωρητικότητα της κυψέλης.

Για το σχήμα αποδοχής κλήσεων που μελετάμε θεωρούμε μια πιθανότητα f_k^c ($k=0,1,\ldots,M-1$), $0 \le f_k^c \le 1$, για την αποδοχή των κλήσεων κλάσης μη πραγματικού χρόνου χαμηλής προτεραιότητας σε μία κυψέλη, όπου k είναι ο αριθμός των σε εξέλιξη κλήσεων μη πραγματικού χρόνου. Στο διάγραμμα αλυσίδας Markov στο σχήμα 3.1 μπορούμε να δούμε τις μεταβάσεις από τη μια κατάσταση στην άλλη για το μελετούμενο σχήμα αποδοχής κλήσεων. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η τιμή της πιθανότητας f_k^c εξαρτάται μόνο από τον αριθμό των σε εξέλιξη κλήσεων μη πραγματικού χρόνου, την κίνηση των οποίων άλλωστε ρυθμίζει. Για το λόγο αυτό, οι καταστάσεις που χαρακτηρίζονται από τον ίδιο αριθμό κλήσεων μη πραγματικού χρόνου έχουν στη μετάβαση την ίδια πιθανότητα αποδοχής κλήσης f_k^c που φαίνεται άλλωστε και στο διάγραμμα μεταβάσεων όπως φαίνεται στο σχετικό σχήμα 3.1. Για παράδειγμα, στις καταστάσεις $\overline{n} = (n_1, n_2)$ και $\overline{n}' = (n_1, n_2 + 1)$ η επιβαλλόμενη πιθανότητα αποδοχής είναι και για τις δύο $f_{n_1}^c$, ακόμα και αν το φορτίο στην κατάσταση $\overline{n}'$ είναι υψηλότερο σε σχέση με την κατάσταση $\overline{n}$. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι μας ενδιαφέρει η ρύθμιση του φορτίου κίνησης από τις κλήσεις μη πραγματικού χρόνου, με στόχο τον περιορισμό των δεσμευμένων πόρων σε αυτές και τη διάθεση περισσότερων πόρων στις άλλες κλήσεις, σε συνδυασμό με την ανάθεση προτεραιότητας στις κλήσεις πραγματικού χρόνου.



Σχήμα 3.1: Αλυσίδα Markov για το προτεινόμενο σχήμα αποδοχής κλήσεων.

Η ανάλυση για το προτεινόμενο αλγόριθμο θα γίνει με βάση τη θεωρία Markov και το διάγραμμα μεταβάσεων καταστάσεων του σχήματος 3.1. Κάθε κατάσταση χαρακτηρίζεται από τα n_1 και n_2 τα οποία αναφέρονται στις κλάσεις υπηρεσιών μη πραγματικού και πραγματικού χρόνου, αντίστοιχα. Η κατάσταση της κυψέλης μπορεί να περιγραφεί μέσα από τις αλυσίδες Markov και κάθε δυνατή και εφικτή κατάσταση από τον χώρο ο οποίος περιγράφεται από τη σχέση:

$$S = \left\{ \left(n_1, n_2 \right); 0 \le n_1 \le M, 0 \le n_2 \le M - n_1, n_1 + n_2 \le M \right\}. \quad (3.1.)$$

Οι πιθανότητες μετάβασης από την κατάσταση $\left(n_1, n_2\right)$ στην κατάσταση $\left(n_1', n_2'\right)$ όπου $\left(n_1, n_2\right) \in S$ και $\left(n_1', n_2'\right) \in S$ μπορούν να προσδιορισθούν ως εξής:

$$\pi\left(n_1, n_2 \mid n_1 + 1, n_2\right) = f_{n_1}^c \lambda_1, \quad (3.2)$$

$$\pi\left(n_1, n_2 \mid n_1, n_2\right) = (1 - f_{n_1}^c)\lambda_1 \quad (3.3)$$

$$\text{και } \pi\left(n_1, n_2 \mid n_1, n_2 + 1\right) = \lambda_2 \quad (3.4)$$

$$\text{όπου } 0 \le n_1 \le M-1 \text{ και } 0 \le n_2 \le M-n_1-1$$

$$\pi\left(n_1,n_2 \mid n_1-1,n_2\right)=n_1\mu_1 \quad (3.5)$$

$$\text{όπου } 1 \le n_1 \le M \text{ και } 0 \le n_2 \le M-n_1$$

$$\pi\left(n_1,n_2 \mid n_1,n_2-1\right)=n_2\mu_2 \quad (3.6)$$

$$\text{όπου } 0 \le n_1 \le M \text{ και } 1 \le n_2 \le M-n_1$$

Θεωρώντας τη γνωστή βηματική συνάρτηση $u(x)$ η οποία ορίζεται ως εξής:

$$u(x)=\begin{cases}1 & ,x \ge 0\\ 0 & ,x<0\end{cases}$$

αλλά και τη συμπληρωματική της $\bar{u}(x)=1-u(x)$ θα έχουμε την εξίσωση σφαιρικής ισορροπίας για τις αλυσίδες Markov:

$$\begin{aligned}&\left[\bar{u}\left(n_1+n_2-M\right)\left(f_{n_1}^c\lambda_1+\lambda_2\right)+n_1\mu_1+n_2\mu_2\right]p\left(n_1,n_2\right)\\ &=u\left(n_1-1\right)\bar{u}\left(n_1+n_2-1-M\right)f_{n_1-1}^c\lambda_1 p\left(n_1-1,n_2\right)\\ &+u\left(n_2-1\right)\bar{u}\left(n_1+n_2-1-M\right)\lambda_2 p\left(n_1,n_2-1\right) \qquad (3.7)\\ &+\bar{u}\left(n_1+n_2-M\right)\left(n_1+1\right)\mu_1 p\left(n_1+1,n_2\right)\\ &+\bar{u}\left(n_1+n_2-M\right)\left(n_2+1\right)\mu_2 p\left(n_1,n_2+1\right)\end{aligned}$$

όπου $0 \le n_1+n_2 \le M$.

Η πιθανότητα σταθερής κατάστασης, η οποία υποδηλώνεται ως $p\left(n_1,n_2\right)$ μπορεί να προκύψει από την εξίσωση σφαιρικής ισορροπίας και θα μας δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$p\left(n_1,n_2\right)=\frac{\prod_{k=0}^{n_1-1} f_k^c \rho_1^{n_1}}{n_1!}\cdot\frac{\rho_2^{n_2}}{n_2!}\cdot p\left(0,0\right) \quad (3.8)$$

όπου $\left(n_1,n_2\right)\in S$. Καθώς το $p\left(n_1,n_2\right)$ θα πρέπει να ικανοποιεί την εξίσωση

$$\sum_{n_1=0}^{M}\sum_{n_2=0}^{M-n_1} p\left(n_1,n_2\right)=1 \quad (3.9)$$

θα προκύψει και ο παράγοντας κανονικοποίησης $p\left(0,0\right)$ ο οποίος θα είναι:

$$p\left(0,0\right)=\left[\sum_{n_1=0}^{M}\left(\prod_{k=0}^{n_1-1} f_k^c\right)\frac{\rho_1^{n_1}}{n_1!}\left(\sum_{n_2=0}^{M-n_1}\frac{\rho_2^{n_2}}{n_2!}\right)\right]^{-1} . \quad (3.10)$$

Από το σχήμα 3.1 όπου μπορούμε να δούμε το διάγραμμα καταστάσεων Markov διαπιστώνεται ότι μια κλήση μη πραγματικού χρόνου δε θα γίνει αποδεκτή όχι μόνο στην

περίπτωση που εξαντληθούν οι πόροι οπότε οι συνολικά εξυπηρετούμενες κλήσεις είναι $n_1 + n_2 = M$, αλλά ακόμα και λόγω των επιβαλλόμενων πιθανοτήτων f_k^c με τις οποίες ελέγχονται οι μεταβάσεις από τη μια κατάσταση στην άλλη, αλλά γίνεται παράλληλα και η ρύθμιση της ροής του φορτίου κλήσεων στο δίκτυο. Για το λόγο αυτό, η συνολική πιθανότητα μη αποδοχής θα αποτελείται από δυο συνιστώσες. Η πρώτη αντιστοιχεί στην πιθανότητα μη αποδοχής που οφείλεται στην έλλειψη διαθέσιμων πόρων από το σύστημα και δίνεται από τη σχέση:

$$p_{1b}^{c\,\prime} = \frac{\sum_{n_1=0}^{M}\left(\prod_{k=0}^{n_1-1} f_k^c\right)\frac{\rho_1^{n_1}}{n_1!}\cdot\frac{\rho_2^{M-n_1}}{(M-n_1)!}}{\sum_{n_1=0}^{M}\left(\prod_{k=0}^{n_1-1} f_k^c\right)\frac{\rho_1^{n_1}}{n_1!}\left(\sum_{n_2=0}^{M-n_1}\frac{\rho_2^{n_2}}{n_2!}\right)}. \quad (3.11)$$

Η δεύτερη συνιστώσα αντιστοιχεί στις μη αποδεκτές κλήσεις λόγω της πιθανοτικής παραμέτρου f_k^c που εισάγεται για τις κλήσεις μη πραγματικού χρόνου και θα δίνεται από τη σχέση

$$p_{1b}^{c\,\prime\prime} = \frac{\sum_{n_1=0}^{M-1}(1-f_{n_1}^c)\left(\prod_{k=0}^{n_1-1} f_k^c\right)\frac{\rho_1^{n_1}}{n_1!}\cdot\left(\sum_{n_2=0}^{M-1-n_1}\frac{\rho_2^{n_2}}{n_2!}\right)}{\sum_{n_1=0}^{M}\left(\prod_{k=0}^{n_1-1} f_k^c\right)\frac{\rho_1^{n_1}}{n_1!}\left(\sum_{n_2=0}^{M-n_1}\frac{\rho_2^{n_2}}{n_2!}\right)}. \quad (3.12)$$

Η συνολική πιθανότητα μη αποδοχής μιας κλήσης μη πραγματικού χρόνου για το προτεινόμενο σχήμα θα προκύπτει από την άθροιση των ανωτέρω πιθανοτήτων, οπότε θα έχουμε τη συνολική πιθανότητα:

$$p_{1b}^c = p_{1b}^{c\,\prime} + p_{1b}^{c\,\prime\prime} \Rightarrow$$

$$p_{1b}^c = \left\{\frac{\sum_{n_1=0}^{M}\left(\prod_{k=0}^{n_1-1} f_k^c\right)\frac{\rho_1^{n_1}}{n_1!}\cdot\frac{\rho_2^{M-n_1}}{(M-n_1)!}}{\sum_{n_1=0}^{M}\left(\prod_{k=0}^{n_1-1} f_k^c\right)\frac{\rho_1^{n_1}}{n_1!}\left(\sum_{n_2=0}^{M-n_1}\frac{\rho_2^{n_2}}{n_2!}\right)} + \frac{\sum_{n_1=0}^{M-1}(1-f_{n_1}^c)\left(\prod_{k=0}^{n_1-1} f_k^c\right)\frac{\rho_1^{n_1}}{n_1!}\cdot\left(\sum_{n_2=0}^{M-1-n_1}\frac{\rho_2^{n_2}}{n_2!}\right)}{\sum_{n_1=0}^{M}\left(\prod_{k=0}^{n_1-1} f_k^c\right)\frac{\rho_1^{n_1}}{n_1!}\left(\sum_{n_2=0}^{M-n_1}\frac{\rho_2^{n_2}}{n_2!}\right)}\right\} \quad (3.13)$$

Από την άλλη πλευρά, για τις κλήσεις πραγματικού χρόνου, για τις οποίες το σύνολο των πόρων είναι διαθέσιμο και επιπλέον δεν υφίστανται περιορισμό από άλλους, ισχύει η σχέση

$$p_{2b}^c = \frac{\sum_{n_1=0}^{M}\left(\prod_{k=0}^{n_1-1} f_k^c\right)\frac{\rho_1^{n_1}}{n_1!}\cdot\frac{\rho_2^{M-n_1}}{(M-n_1)!}}{\sum_{n_1=0}^{M}\left(\prod_{k=0}^{n_1-1} f_k^c\right)\frac{\rho_1^{n_1}}{n_1!}\left(\sum_{n_2=0}^{M-n_1}\frac{\rho_2^{n_2}}{n_2!}\right)}. \quad (3.14)$$

Περαιτέρω, αν η επιβαλλόμενη πιθανότητα αποδοχής f_k^c τεθεί ίση με τη μονάδα για τις τιμές *k=0,1,…,K-1* και μηδέν για *k=K,K+1,…,M-1*, τότε ο αλγόριθμος καταλήγει να γίνεται ένα παραδοσιακό σχήμα αποδοχής κλήσεων, όπου οι κλήσεις χαμηλής προτεραιότητας γίνονται αποδεκτές ή μη, μόνο με το κριτήριο του κατωφλίου (threshold based schemes). Στην περίπτωση αυτή, μια κλήση χαμηλής προτεραιότητας μη πραγματικού χρόνου γίνεται αποδεκτή μόνο εάν οι κλήσεις αυτής της κατηγορίας είναι λιγότερες από το κατώφλι *K*. Αντίθετα, για τις κλήσεις πραγματικού χρόνου, αυτές γίνονται αποδεκτές με μόνο κριτήριο τη διαθεσιμότητα πόρων στο δίκτυο. Με βάση λοιπόν τα παραπάνω, οι αναλυτικοί τύποι για τις πιθανότητες μη αποδοχής κλήσεων για τις κλήσεις μη πραγματικού χρόνου (p_{1b}^{α}) και τις κλήσεις πραγματικού χρόνου (p_{2b}^{α}) θα δίνονται από τις σχέσεις:

$$p_{1b}^{\alpha} = \frac{\dfrac{\rho_1^K}{K!}\sum_{n_2=0}^{M-K}\dfrac{\rho_2^{n_2}}{n_2!} + \sum_{n_1=0}^{K-1}\dfrac{\rho_1^{n_1}}{n_1!}\cdot\dfrac{\rho_2^{M-n_1}}{(M-n_1)!}}{\sum_{n_1=0}^{M}\dfrac{\rho_1^{n_1}}{n_1!}\sum_{n_2=0}^{M-n_1}\dfrac{\rho_2^{n_2}}{n_2!}} \quad (3.15)$$

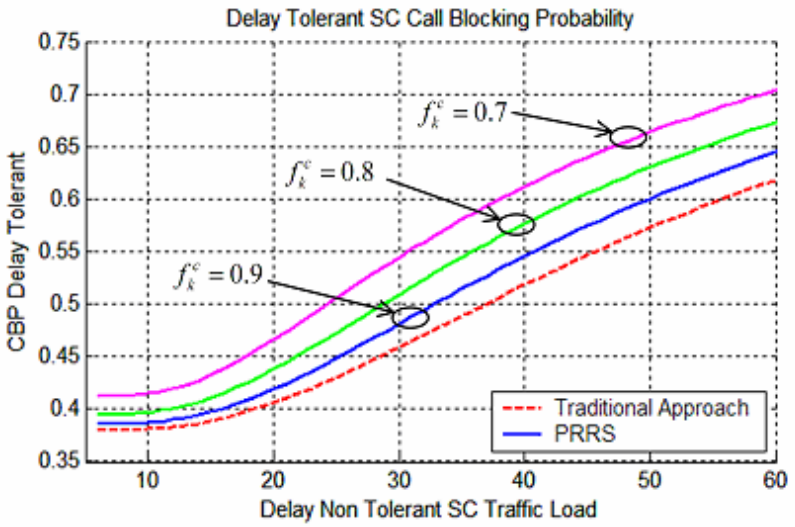
$$p_{2b}^{\alpha} = \frac{\sum_{n_1=0}^{K}\dfrac{\rho_1^{n_1}}{n_1!}\cdot\dfrac{\rho_2^{M-n_1}}{(M-n_1)!}}{\sum_{n_1=0}^{M}\dfrac{\rho_1^{n_1}}{n_1!}\sum_{n_2=0}^{M-n_1}\dfrac{\rho_2^{n_2}}{n_2!}} \quad (3.16)$$

3.5.3. Αριθμητικά Αποτελέσματα και Ανάλυση

Η επίδοση του προτεινόμενου σχήματος αποδοχής κλήσεων αναλύεται και αξιολογείται κάτω από διαφορετικές καταστάσεις τηλεπικοινωνιακού φορτίου. Η επιλογή του πιθανοτικού αλγορίθμου σε σχέση με τα κλασσικά σχήματα αποδοχής κλήσεων είναι σημαντική διότι καταφέρνει να υλοποιήσει ένα σχήμα με έμφαση στην απόδοση προτεραιότητας στις κλήσεις πραγματικού χρόνου. Στα παρακάτω αριθμητικά αποτελέσματα που θα παρουσιαστούν θα επικεντρωθούμε στην επίδραση της επιβαλλόμενης πιθανότητας αποδοχής στο μηχανισμό απόδοσης προτεραιότητας και στη γενικότερη επίδοση του σχήματος. Περαιτέρω αξιολόγηση με επιπλέον κριτήρια θα παρουσιαστούν σε επόμενη ενότητα.

Όπως προαναφέρθηκε, το προτεινόμενο σχήμα αποδοχής μελετάται για τις δύο βασικές κατηγορίες φορτίου κλήσεων πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου. Ειδικότερα για τις προσομοιώσεις του προτεινόμενου αλγορίθμου κάτω από μεταβαλλόμενο φορτίο μη

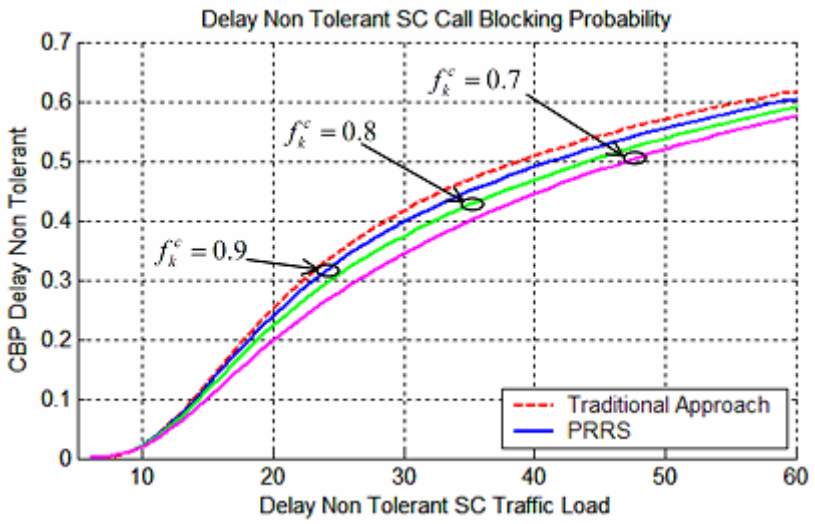
πραγματικού χρόνου οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται θα είναι: λ_1=1/20, λ_2=1/40, μ_2=1/350, M=35, K=20 ενώ η παράμετρος μ_1 μεταβάλλεται από 1/200 έως 1/1200. Για τις προσομοιώσεις που αφορούν μεταβαλλόμενο φορτίο πραγματικού χρόνου η παράμετρος μ_2 μεταβάλλεται από 1/240 έως 1/2400 ενώ η παράμετρος μ_1 παραμένει σταθερή με τιμή μ_1=1/600. Για το μελετούμενο σχήμα έχουν χρησιμοποιηθεί τρεις διαφορετικές τιμές πιθανότητας αποδοχής ώστε να καταδειχθεί η επίδραση της πιθανοτικής προσέγγισης, αλλά και η ευαισθησία του σχήματος ως προς τις μεταβολές της πιθανοτικής παραμέτρου f_k^c. Κατ' αυτό τον τρόπο, ορίζεται ίση με 0.9, 0.8 και 0.7 διαδοχικά για τιμές $k=0,\ldots,K-1$ και ίση με 0.1, 0.2 και 0.3 για $k=K,\ldots,M-1$. Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι μειώνοντας την επιβαλλόμενη πιθανότητα αποδοχής για τις κλήσεις χαμηλής προτεραιότητας μη πραγματικού χρόνου για τις καταστάσεις κάτω από το κατώφλι, αυτό αντιστοιχεί σε αύξηση της πιθανότητας αποδοχής πάνω από το κατώφλι με στόχο τον έλεγχο της ροής φορτίου των κλήσεων μη πραγματικού χρόνου και την καλύτερη κατανομή των δεσμευμένων πόρων για την εξυπηρέτηση των κλήσεων πραγματικού χρόνου στις οποίες αποδίδεται επιπλέον προτεραιότητα.



Σχήμα 3.2:Πιθανότητα μη αποδοχής κλήσης μη πραγματικού χρόνου (delay tolerant) συναρτήσει φορτίου πραγματικού χρόνου.

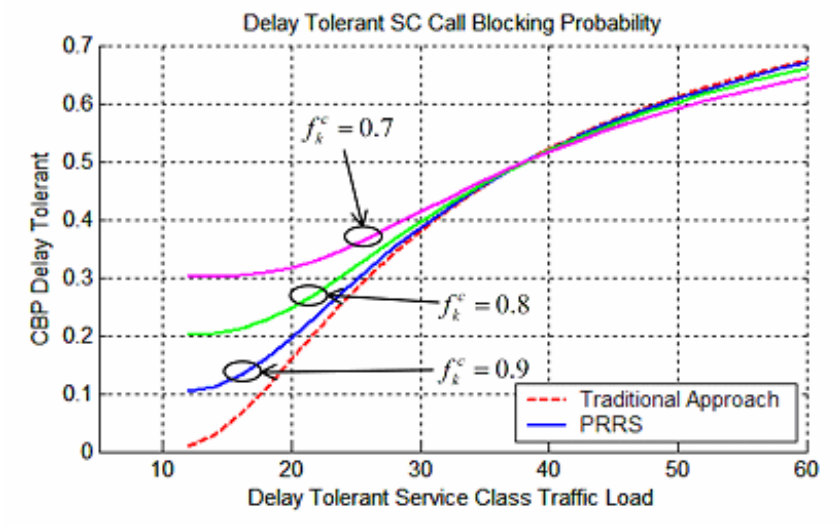
Η εξάρτηση της πιθανότητας μη αποδοχής κλήσεων μη πραγματικού χρόνου, ανεκτής καθυστέρησης ($CBPs_{dt}$) από φορτίο κλήσεων πραγματικού χρόνου για διαφορετικές τιμές της πιθανοτικής παραμέτρου f_k^c απεικονίζεται στο σχήμα 3.2, ενώ η αντίστοιχη εξάρτηση της πιθανότητας μη αποδοχής κλήσεων πραγματικού χρόνου όπου η καθυστέρηση είναι μη ανεκτή ($CBPs_{dnt}$) απεικονίζεται στο σχήμα 3.3. Παράλληλα στα δύο

σχήματα αποτυπώνεται και η παραδοσιακή προσέγγιση του σχήματος αποδοχής κλήσεων όπου δεν έχουμε την επίδραση της πιθανοτικής θεώρησης, για τον έλεγχο των εισερχομένων κλήσεων και ισοδυναμεί με την τιμή 1 για την πιθανοτική παράμετρο $f_k^c = 1$ [74].



Σχήμα 3.3: Πιθανότητα μη αποδοχής κλήσης πραγματικού χρόνου (delay non tolerant) συναρτήσει φορτίου πραγματικού χρόνου.

Παρατηρώντας τα δύο σχήματα 3.2 και 3.3, βλέπουμε ότι το σχήμα αποδοχής κλήσεων PRRS επιτυγχάνει χαμηλότερες πιθανότητες μη αποδοχής κλήσεων για τις κλήσεις πραγματικού χρόνου και υψηλότερες για τις κλήσεις μη πραγματικού χρόνου καθώς μειώνουμε την τιμή της πιθανοτικής παραμέτρου f_k^c κάτω από το κατώφλι K για όλες τις τιμές φορτίου μη πραγματικού χρόνου. Επίσης οι πιθανότητες μη αποδοχής αυξάνονται όσο αυξάνεται το φορτίο πραγματικού χρόνου. Αυτό οφείλεται στην πιθανοτική θεώρηση για τον έλεγχο και στο σχεδιασμό του αλγορίθμου. Ειδικότερα, καθώς χρησιμοποιούμε μικρότερες τιμές για την πιθανοτική παράμετρο f_k^c για τον έλεγχο των μεταβάσεων στο διάγραμμα καταστάσεων Markov, για τις εισερχόμενες κλήσεις μη πραγματικού χρόνου επιτρέπεται η διάθεση περισσότερων πόρων για τους χρήστες πραγματικού χρόνου. Με τον τρόπο αυτό, μπορούμε να μειώνουμε την πιθανότητα μη αποδοχής των κλήσεων πραγματικού χρόνου, αποδίδοντας σε αυτές μεγαλύτερη προτεραιότητα και επιτυγχάνοντας μια δικαιότερη κατανομή των πόρων, ανάμεσα στις δύο κλάσεις υπηρεσιών. Στην ουσία το επίπεδο απόδοσης προτεραιότητας μεταξύ των κλήσεων μπορεί να ελεγχθεί μέσα από την επιλογή καταλλήλων τιμών για την πιθανοτική παράμετρο.



Σχήμα 3.4: Πιθανότητα μη αποδοχής κλήσης μη πραγματικού χρόνου (delay tolerant) συναρτήσει φορτίου μη πραγματικού χρόνου.

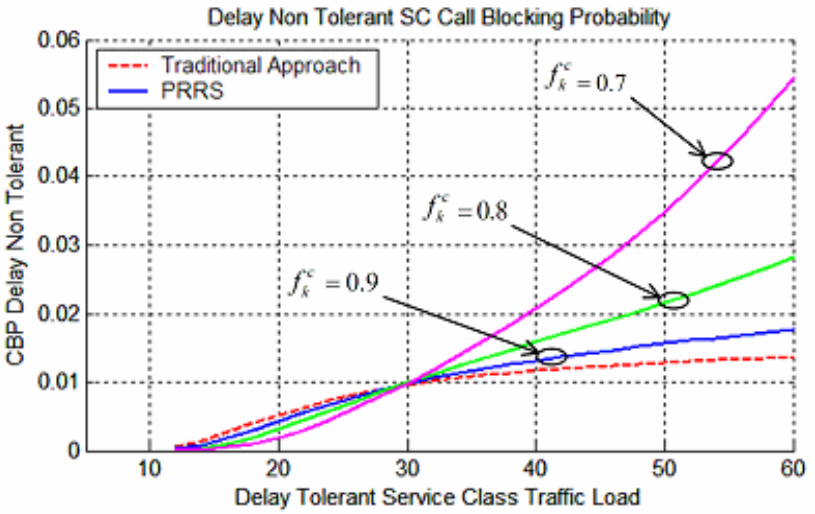
Η εξάρτηση της πιθανότητας μη αποδοχής κλήσεων μη πραγματικού χρόνου, ανεκτής καθυστέρησης από μεταβλητό φορτίο κλήσεων μη πραγματικού χρόνου για διαφορετικές τιμές της πιθανοτικής παραμέτρου f_k^c απεικονίζεται στο σχήμα 3.4, ενώ η εξάρτηση της πιθανότητας μη αποδοχής κλήσεων πραγματικού χρόνου όπου η καθυστέρηση είναι μη ανεκτή για διαφορετικές τιμές της πιθανοτικής παραμέτρου f_k^c συναρτήσει φορτίου μη πραγματικού χρόνου απεικονίζεται στο σχήμα 3.5. Παράλληλα στα δύο σχήματα αποτυπώνεται και η παραδοσιακή προσέγγιση του σχήματος αποδοχής κλήσεων όπου δεν έχουμε την επίδραση της πιθανοτικής θεώρησης, για τον έλεγχο των εισερχομένων κλήσεων και ισοδυναμεί με την τιμή 1 για την πιθανοτική παράμετρο $f_k^c = 1$.

Από το σχήμα 3.4 γίνεται φανερό, ότι για χαμηλό και μέτριο εισερχόμενο φορτίο οι πιθανότητες μη αποδοχής κλήσεων μη πραγματικού χρόνου αυξάνονται με τη χρήση μικρότερης τιμής για την πιθανοτική παράμετρο f_k^c. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι σε καταστάσεις χαμηλού φορτίου η τιμή της πιθανότητας αποδοχής για τις κλήσεις μη πραγματικού χρόνου επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την εξωτερικά επιβαλλόμενη τιμή της πιθανοτικής παραμέτρου. Δηλαδή, ενώ υπάρχουν διαθέσιμοι πόροι για την εξυπηρέτηση των κλήσεων, αυτές μπλοκάρονται λόγω της επιβαλλόμενης πιθανότητας αποδοχής της παραμέτρου f_k^c. Για παράδειγμα, βλέπουμε ότι για την ελάχιστη τιμή φορτίου η πιθανότητα μη αποδοχής είναι ίση με το συμπλήρωμα της επιβαλλόμενης πιθανότητας αποδοχής $1 - f_k^c$. Αυτό συμβαίνει διότι οι τιμές των πιθανοτήτων που υπολογίζονται από

τους αναλυτικούς τύπους που προκύπτουν από την ανάλυση Markov καθορίζονται από τις πρώτες καταστάσεις του διαγράμματος μεταβάσεων.

Αντίθετα, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.4, γίνεται φανερό ότι για υψηλό εισερχόμενο φορτίο η συμπεριφορά του αλγορίθμου αντιστρέφεται και με την αύξηση της τιμής της παραμέτρου f_k^c η τιμή της πιθανότητας μη αποδοχής για κλήσεις μη πραγματικού χρόνου μειώνεται για ίδιες υψηλές τιμές φορτίου ανεκτής καθυστέρησης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στις καταστάσεις υψηλού φορτίου, βασικότερο ρόλο στον υπολογισμό της πιθανότητας έχουν οι καταστάσεις που βρίσκονται κοντά ή υψηλότερα στο κατώφλι δέσμευσης πόρων. Εδώ θα πρέπει να αναφερθεί ότι οι υψηλότερες τιμές πιθανοτήτων μη αποδοχής που παρατηρούνται για τις κλήσεις μη πραγματικού χρόνου δίνουν τη δυνατότητα να απελευθερωθούν περισσότεροι διαθέσιμοι πόροι για την εξυπηρέτηση των κλήσεων πραγματικού χρόνου που αντιστοιχούν σε χαμηλότερα επίπεδα πιθανοτήτων μη αποδοχής.

Από το σχήμα 3.5, γίνεται φανερό ότι οι τιμές ($CBPs_{dnt}$) είναι σημαντικά χαμηλότερες σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές πιθανοτήτων ($CBPs_{dt}$) το οποίο σημαίνει ότι το μελετούμενη σχήμα αποδοχής παρέχει έναν αξιόπιστο μηχανισμό απόδοσης προτεραιότητας στις κλήσεις πραγματικού χρόνου. Εξετάζοντας την επίδραση της παραμέτρου f_k^c , μπορούμε να δούμε ότι για χαμηλά και μέτρια φορτία η χρήση μικρότερης τιμής για την παράμετρο οδηγεί σε επίτευξη χαμηλότερης πιθανότητας μη αποδοχής. Αντίθετα για υψηλότερες τιμές φορτίου παρατηρείται ανεστραμμένη συμπεριφορά με μεγαλύτερες αποκλίσεις στις πιθανότητες.



Σχήμα 3.5: Πιθανότητα μη αποδοχής κλήσης πραγματικού χρόνου (delay non tolerant) συναρτήσει φορτίου μη πραγματικού χρόνου.

3.5.4. Συμπεράσματα

Μέσα από τη μελέτη του αλγορίθμου PRRS προκύπτουν αρκετά ενδιαφέροντα συμπεράσματα. Μέσω του σχήματος αυτού, γίνεται μια πρώτη προσπάθεια ενσωμάτωσης της πιθανοτικής θεώρησης σε ένα υφιστάμενο σχήμα αποδοχής κλήσεων με δέσμευση πόρων μέσω της χρήσης κατωφλίων. Μέσα από τα αριθμητικά αποτελέσματα, μπορούμε να δούμε ότι το προτεινόμενο σχήμα παρέχει έναν αξιόπιστο μηχανισμό απόδοσης προτεραιότητας σε ορισμένες κλάσεις υπηρεσιών. Επιπλέον, η επίδραση της πιθανοτικής παραμέτρου μειώνει σημαντικά τις πιθανότητες μη αποδοχής για τις κλήσεις πραγματικού χρόνου. Αυτό αποτελεί ένα σημαντικό πλεονέκτημα της προτεινόμενης μεθόδου. Από την άλλη πλευρά, η ενσωμάτωση της πιθανοτικής θεώρησης στο επίπεδο των χρηστών για τη διαχείριση κλήσεων μέσω της δέσμευσης πόρων οδηγεί και σε αποτελέσματα τα οποία δε βελτιώνουν τις πιθανότητες μη αποδοχής σε απόλυτους αριθμούς σε κάθε περίπτωση αλλά παρουσιάζουν καλύτερα αποτελέσματα ως προς την απόδοση προτεραιότητας. Μέσα στο πλαίσιο αυτό αναπτύχθηκε ο πιθανοτικός έλεγχος αποδοχής κλήσεων ο οποίος θα περιγραφεί στη συνέχεια και ως στόχο έχει να ξεπεραστούν τα οποία μειονεκτήματα αναφέρθηκαν στο σχήμα PRRS, παρουσιάζοντας συνολικά βελτιωμένη συμπεριφορά σε όλα τα επίπεδα.

3.6. Πιθανοτικός Έλεγχος Αποδοχής Κλήσεων

Στην παρούσα διατριβή, η βασικότερη συνεισφορά της έγκειται στη μελέτη του προβλήματος ελέγχου αποδοχής κλήσεων και στην ανάπτυξη ενός πρωτοποριακού και καινοτόμου σχήματος –του πιθανοτικού ελέγχου αποδοχής κλήσεων (Probabilistic Call Admission Control)– που παρέχει συνολικά βελτιωμένη απόδοση. Ο νέος αυτός αλγόριθμος έχει ως στόχο να ξεπεράσει τα οποία μειονεκτήματα παρουσιάστηκαν στον αλγόριθμο δέσμευσης πόρων που βασίζεται στη διάκριση των κλήσεων αποκλειστικά με βάση τους χρήστες και παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα. Η λογική στην οποία στηρίζεται ο πιθανοτικός έλεγχος αποδοχής κλήσεων είναι να ελέγξει το ρυθμό αποδοχής των κλήσεων χαμηλής προτεραιότητας ανάλογα με τις διακυμάνσεις της τηλεπικοινωνιακής κίνησης. Έτσι καθώς το φορτίο του δικτύου αυξάνεται, περιορίζεται τεχνητά η αποδοχή των κλήσεων χαμηλής προτεραιότητας είτε αυτές αφορούν κλήσεις πραγματικού χρόνου είτε κλήσεις μεταπομπής, ώστε να υπάρχουν διαθέσιμοι πόροι για την εξυπηρέτηση των κλήσεων υψηλής προτεραιότητας αλλά και για την παροχή εγγυήσεων QoS στις κλήσεις που είναι σε

εξέλιξη. Αυτό επιτυγχάνεται με την επιβολή πιθανοτήτων μετάβασης στις καταστάσεις που αντιστοιχούν σε πιθανότητες αποδοχής των κλήσεων.

Ειδικότερα, θα πρέπει να τονίσουμε ότι η διαφοροποίηση του πιθανοτικού σχήματος σε σχέση με τα παραδοσιακά σχήματα ελέγχου αποδοχής κλήσεων έγκειται στα εξής: Καταρχήν, στο πιθανοτικό σχήμα έχουμε την εισαγωγή του πιθανοτικού ελέγχου των μεταβάσεων καταστάσεων στο διάγραμμα αλυσίδων Markov. Η πιθανότητα που εισάγεται για τον περιορισμό της ροής των κλήσεων χαμηλής προτεραιότητας καθορίζεται με βάση την κατάσταση του δικτύου, με κριτήριο τους συνολικούς κατειλημμένους πόρους που μπορούν να εκφράζονται είτε σε μονάδες εύρους ζώνης είτε σε κανάλια. Επιπλέον, το κατώφλι που χρησιμοποιείται στους αλγορίθμους αυτούς δεν λειτουργεί απαγορευτικά ως προς την αποδοχή των κλήσεων χαμηλής προτεραιότητας, αλλά αποτελεί το σημείο αλλαγής της πιθανότητας αποδοχής. Η τιμή της πιθανοτικής παραμέτρου είναι αυτή που καθορίζει τον τρόπο λειτουργίας του κατωφλίου αποκοπής. Δηλαδή, πάνω από το κατώφλι χρησιμοποιείται μια πολύ μικρότερη τιμή της πιθανοτικής παραμέτρου για τις κλήσεις χαμηλής προτεραιότητας. Με τον τρόπο αυτό, χαλαρώνεται η αυστηρότητα του κατωφλίου, αποφεύγεται η ύπαρξη ανεκμετάλλευτων πόρων ενώ αυξάνεται ο αριθμός των εξυπηρετουμένων κλήσεων, διατηρώντας παράλληλα τον μηχανισμό απόδοσης προτεραιότητας είτε αυτός αφορά τις κλήσεις πραγματικού χρόνου για το απλό σχήμα είτε τις κλήσεις μεταπομπής στην πλήρη εκδοχή του προτεινόμενου σχήματος. Το κατώφλι στον προτεινόμενο πιθανοτικό σχήμα χρησιμοποιείται επίσης στην παροχή εγγυήσεων QoS στις εξυπηρετούμενες κλήσεις.

Η ανάπτυξη του σχήματος πιθανοτικού ελέγχου αποδοχής κλήσεων στην παρούσα διατριβή έγινε σε δύο φάσεις. Στην πρώτη φάση, η πιθανοτική προσέγγιση αναπτύχθηκε με κύριο στόχο τα δίκτυα πολλαπλών κλάσεων υπηρεσιών με στόχο την απόδοση προτεραιότητας μεταξύ των υποστηριζόμενων κλάσεων. Οι διάφορες κλάσεις υπηρεσιών θεωρείται ότι μπορεί να έχουν διαφορετικές απαιτήσεις εύρους ζώνης, διαφορετικούς χρόνους συγκράτησης καναλιών καθώς και διαφορετική διάρκεια που οδηγεί σε διαφορετικά επίπεδα QoS [88],[91],[92],[93],[99]. Στην πρώτη φάση, αναπτύχθηκε το απλό σχήμα πιθανοτικού ελέγχου όπου οι νέες κλήσεις και οι κλήσεις μεταπομπής αντιμετωπίζονται ως ενιαία τηλεπικοινωνιακή κίνηση. Στο απλό σχήμα, αυτές οι δύο κατηγορίες κλήσεων δεν διακρίνονται αφού δίνεται έμφαση στη διάκριση των κλήσεων μεταξύ των υποστηριζόμενων κλάσεων υπηρεσιών. Στην ουσία, στο απλό σχήμα οι νέες κλήσεις και οι κλήσεις μεταπομπής αντιμετωπίζονται ενιαία. Παρά την απλοποίηση αυτή, τα αποτελέσματα είναι σημαντικά και επιτρέπουν την επέκταση του πιθανοτικού μοντέλου και την ανάπτυξη του

γενικευμένου σχήματος πιθανοτικού ελέγχου αποδοχής κλήσεων, όπου θα αντιμετωπιστούν τα ειδικά ζητήματα που ανακύπτουν.

Το γενικευμένο μοντέλο είναι πολύ πιο σύνθετο. Στο σχήμα αυτό, έχουμε πλέον τη διάκριση των κλήσεων σε δυο επίπεδα. Το πρώτο επίπεδο, αφορά τη διάκριση των κλήσεων σε κλάσεις υπηρεσιών σε συνδυασμό με την απόδοση προτεραιότητας με βάση τις αντίστοιχες QoS απαιτήσεις και τα ειδικά χαρακτηριστικά τους. Επιπλέον σε δεύτερο επίπεδο επεκτείνεται ανά κλάση η διάκριση τους σε νέες κλήσεις και κλήσεις μεταπομπής. Ειδικότερα, κάθε αποδοτικός αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων θα πρέπει να δίνει προτεραιότητα στην εξυπηρέτηση των κλήσεων μεταπομπής που είναι σε εξέλιξη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι η διακοπή μιας σε εξέλιξη κλήσης, όπως είναι οι κλήσεις μεταπομπής, είναι πολύ πιο ενοχλητική για τον τελικό χρήστη σε σχέση με τη μη αποδοχή του σε μία νέα κλήση [48]. Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί, ότι το γενικευμένο σχήμα πιθανοτικού ελέγχου αποδοχής κλήσεων παρέχει μια πλήρη λύση στο θέμα του ελέγχου αποδοχής, αφού αντιμετωπίζεται ξεχωριστά κάθε κατηγορία κλήσης αλλά και το ζήτημα της διαχείρισης πόρων με βάση τις ειδικές QoS απαιτήσεις κάθε μιας.

3.6.1. Περιγραφή Απλού Σχήματος Πιθανοτικού Ελέγχου Αποδοχής Κλήσεων

Το απλό σχήμα πιθανοτικού ελέγχου αποδοχής κλήσεων για ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών το οποίο αναλύεται στην παρούσα ενότητα έχει ως στόχους: τη βελτιωμένη απόδοση όσον αφορά την εξυπηρέτηση μεγάλου αριθμού κλήσεων και κατ' επέκταση μεγάλου αριθμού χρηστών, την ορθή διαχείριση των πόρων αλλά και την ανάπτυξη ενός εύρωστου μηχανισμού απόδοσης προτεραιότητας για τις κλήσεις πραγματικού χρόνου. Ο πιθανοτικός αλγόριθμος που αναλύεται στην παρούσα ενότητα ονομάστηκε PBRS (Probabilistic Bandwidth Reservation Scheme). Η χρήση του αλγορίθμου αυτού προορίζεται κυρίως για δίκτυα πολλαπλών κλάσεων υπηρεσιών, για το λόγο αυτό εστιάζεται στη διάκριση των κλήσεων σε κλάσεις υπηρεσιών. Για τη μοντελοποίηση και τη μαθηματική ανάλυση του πιθανοτικού σχήματος θα χρησιμοποιηθεί η θεωρία των πολυδιάστατων αλυσίδων Markov. Στη συνέχεια, θα προχωρήσουμε στην παρουσίαση της περιγραφής του μοντέλου δικτύου και έπειτα θα παρουσιάσουμε την ανάλυση τόσο για την περίπτωση των δυο όσο και για περισσοτέρων κλάσεων υπηρεσιών. Τέλος, θα παρουσιάσουμε τα αριθμητικά αποτελέσματα της ανάλυσης μας και την επίδοση του αλγορίθμου κάτω από οποιεσδήποτε συνθήκες.

3.6.1.1. Περιγραφή Μοντέλου Δικτύου και Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης

Στην ενότητα αυτή, θα περιγράψουμε το μοντέλο δικτύου στο οποίο στηρίζεται η ανάλυση του πιθανοτικού σχήματος αποδοχής κλήσεων, με στόχο την παροχή QoS σε κάθε υποστηριζόμενη κλάση υπηρεσίας. Θεωρούμε ένα κυψελωτό κινητό δίκτυο ασυρμάτων επικοινωνιών με πολλαπλές κλάσεις υπηρεσιών για υποστήριξη ευρυζωνικών εφαρμογών.

- Για τις ανάγκες της παρούσας ανάλυσης, θεωρούμε ότι το μελετούμενο δίκτυο χαρακτηρίζεται από ομογένεια, συνεπώς αρκεί να μελετήσουμε μια κυψέλη του δικτύου.
- Θεωρούμε ότι το δίκτυο έχει τη δυνατότητα εξυπηρέτησης U κλάσεων υπηρεσιών όπως π.χ. φωνή, μεταφορά δεδομένων κ.α.
- Θεωρούμε ότι C είναι η μέγιστη χωρητικότητα της κυψέλης εκφραζόμενη σε μονάδες εύρους ζώνης BUs (bandwidth units) [80], [115], [129], [130]. Το σύνολο του διαθέσιμων πόρων εκφράζεται ως προς το εύρος ζώνης που είναι μια πολύ κρίσιμη δικτυακή παράμετρος για την παροχή QoS [131]. Επίσης θεωρούμε ότι M είναι ο συνολικός αριθμός κλήσεων που μπορεί να εξυπηρετηθεί από το δίκτυο. Αυτός ο αριθμός ορίζεται ως $M=C/c$, όπου c είναι ο αριθμός των BUs που απαιτείται για την εξυπηρέτηση κάθε κλήσης. Η τιμή του c μπορεί να μεταβάλλεται σε ένα πεδίο τιμών $[c_{min},c_{max}]$ ανάλογα με τις απαιτήσεις QoS [55]. Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι αναλόγως του μίγματος εξυπηρετουμένων κλήσεων η χωρητικότητα σε επίπεδο κλήσεων μπορεί να ποικίλει.
- Καθώς κάθε κλάση υπηρεσιών έχει τα δικά της χαρακτηριστικά QoS, κάποιες έχουν υψηλότερη προτεραιότητα εξυπηρέτησης. Για το λόγο αυτό, στον προτεινόμενο αλγόριθμο έχει ενσωματωθεί ένας κατάλληλος μηχανισμός προτεραιότητας για τον οποίο θεωρούμε ότι κάθε κλήση της κλάσης υπηρεσίας u με ($u=1,\ldots,U$) έχει χαμηλότερη προτεραιότητα σε σχέση με μια κλήσης κλάσης $u+1$.
- Για την απόδοση διαφορετικών προτεραιοτήτων ανάμεσα στις κλάσεις υπηρεσιών, υποθέτουμε ότι οι κλήσεις υπηρεσιών χαμηλής προτεραιότητας (delay tolerant) περιορίζονται από ένα κατώφλι L_u, πάνω από τις οποίες οι κλήσεις της u κλάσης υπηρεσίας δε γίνονται αποδεκτές [78]. Συνεπώς, μια νέα κλήση που ανήκει σε μια κατηγορία κλάσης υπηρεσιών χαμηλής προτεραιότητας θα γίνει αποδεκτή μόνο αν οι συνολικές κλήσεις από όλες τις υποστηριζόμενες κλάσεις υπηρεσιών που είναι σε εξέλιξη είναι λιγότερες από L_u. Ο καθορισμός των διαφόρων επιπέδων προτεραιότητας στις διάφορες κλάσεις ακολουθεί τη συνθήκη $L_u<L_{u+1}$. Στο

προτεινόμενο σχήμα αποδοχής κλήσεων, τα κατώφλια L_u ($u=1, 2,\ldots, U$) είναι τα κρίσιμα σημεία όπου αλλάζει η πολιτική αποδοχής κλήσεων.

- Ως προς το ρυθμό αφίξεων των χρηστών για κάθε κλάση υπηρεσίας u γίνεται η υπόθεση ότι ακολουθούν την κατανομή Poisson η οποία είναι η πιο διαδεδομένη και ευρύτερα αποδεκτή στη διεθνή βιβλιογραφία. Ενδεικτικά δίνονται οι παρακάτω αναφορές [49],[73],[78],[80],[107],[115],[132],[133]. Ειδικότερα, οι νέες κλήσεις κάθε κλάση υπηρεσιών παρουσιάζουν ρυθμό άφιξης $\lambda_{u,N}$ και οι κλήσεις μεταπομπής $\lambda_{u,H}$ αντίστοιχα με $u=1,\ldots,U$ [124], [125]. Οι παραδοχές αυτές είναι τυπικές για τη μοντελοποίηση της κίνησης σε επίπεδο κλήσεων [134], [135]. Αντίθετα, όταν ο έλεγχος αποδοχής κλήσεων εξετάζεται σε επίπεδο πακέτων ο ρυθμός αφίξεων πακέτων εμφανίζει εξάρτηση μεγάλου διαστήματος (long range dependence) οπότε δεν ακολουθεί κατανομή Poisson [135], [170]. Συνεπώς, για την περίπτωση μας οι παραδοχές που υιοθετήθηκαν είναι απόλυτα λογικές αφού ο έλεγχος αποδοχής κλήσεων εξετάζεται σε επίπεδο κλήσεων και όχι σε επίπεδο πακέτων.
- Ο συνολικός χρόνος που μια νέα ή μια κλήση μεταπομπής αναμένει για την πραγματοποίηση μιας σύνδεσης είναι γνωστός σαν RCCT (Requested Call Connection Time) ο οποίος θεωρείται ότι είναι εκθετικά κατανεμημένος με μέσο ρυθμό $1/h_{u,N}$ και $1/h_{u,H}$ για τις νέες και τις κλήσεις μεταπομπής, αντίστοιχα.
- Ο χρόνος παραμονής στην κυψέλη CRT (Cell Residence Time) είναι ο χρόνος που ένα κινητό τερματικό μένει στην κυψέλη και εξαρτάται άμεσα από την κινητικότητα του χρήστη. Ο CRT θεωρείται επίσης ότι είναι εκθετικά κατανεμημένος με μέσο ρυθμό $1/r_u$ [49], [108]. Ο χρόνος CRT εξαρτάται από την ταχύτητα και την κατεύθυνση του κινητού τερματικού [56]. Μέσα από το χρόνο αυτό μπορούν να μοντελοποιηθούν διάφορα χαρακτηριστικά. Καταρχήν μια κλήση μπορεί να μην μπλοκαριστεί στην υπό μελέτη κυψέλη από το δίκτυο. Αυτό μπορεί να συμβεί στις περιπτώσεις όπου το κινητό τερματικό βρίσκεται στα όρια των κυψελών όπου συχνά υπάρχει αλληλοκάλυψη κυψελών, που συμβαίνει συχνά προκειμένου να υπάρχει πλήρης κάλυψη μιας περιοχής [136]. Επιπλέον, στα σύγχρονα συστήματα επικοινωνιών χρησιμοποιούνται στρατηγικές δανεισμού [137]. Αυτό σημαίνει ότι αν ξεκινήσει μια κλήση σε μια κυψέλη όπου όλα τα κανάλια είναι δεσμευμένα τότε το δίκτυο μπορεί να δανειστεί κανάλια από μια γειτονική κυψέλη προκειμένου να εξυπηρετηθεί η κλήση με την προϋπόθεση ότι δε προκαλούνται παρεμβολές στις κλήσεις που είναι σε εξέλιξη.

- Στον απλό πιθανοτικό αλγόριθμο αποδοχής κλήσεων που μελετάμε στην πρώτη φάση, θα αντιμετωπίσουμε τις νέες κλήσεις και τις κλήσεις μεταπομπής κάθε κλάσης υπηρεσιών με τον ίδιο τρόπο και σε ενιαία βάση θεωρώντας ότι ο συνολικός ρυθμός αφίξεων κλήσεων είναι λ_u και ορίζεται ως $\lambda_u=\lambda_{u,N}+\lambda_{u,H}$ [49],[73], [89],[126],[127]. Πρόκειται για μια διαδεδομένη πρακτική στη διεθνή βιβλιογραφία και αρθρογραφία η οποία παρέχει απλότητα στην ανάλυση, χωρίς να παραμελείται η ακρίβεια της ανάλυσης και των αναλυτικών τύπων. Επιπλέον, μέσα από την προσέγγιση αυτή δίνεται έμφαση στην απόδοση προτεραιότητας στις κλάσεις υπηρεσιών με βάση τις απαιτήσεις QoS κάθε μιας. Στην ουσία στο σημείο αυτό έχουμε τη βασική διάκριση μεταξύ του απλού και του γενικευμένου πιθανοτικού ελέγχου αποδοχής κλήσεων.
- Με βάση τις παραμέτρους που ορίστηκαν προηγουμένως ορίζουμε και τον ολικό χρόνο εξυπηρέτησης μια κλήσης ο οποίος για τους χρήστες μιας κλάσης υπηρεσίας u θα είναι μ_u και θα είναι $\mu_u=h_{u,N}+h_{u,H}+r_u$ [49]. Ο ρυθμός εξυπηρέτησης κάθε κλήσης που στην ουσία αντιστοιχεί στο χρόνο που η κλήση δεσμεύει τα κανάλια και θεωρείται και πάλι ότι ακολουθεί την εκθετική κατανομή και θα διαφέρει για κάθε κλάση υπηρεσιών ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της εφόσον και οι χρόνοι που τον αποτελούν είναι και αυτοί εκθετικά κατανεμημένοι [49],[108]. Θα πρέπει να σημειωθεί, ότι ο εκθετικά κατανεμημένος χρόνος εξυπηρέτησης των κλήσεων είναι από τις βασικότερες παραδοχές για την επίλυση του προβλήματος του ελέγχου αποδοχής κλήσεων και την εφαρμογή της ανάλυσης Markov. Οι παραδοχές των αφίξεων με κατανομή Poisson και των χρόνων εξυπηρέτησης με εκθετική κατανομή είναι σημαντικές ώστε η ανάλυση να είναι εφικτή η ανάλυση του αλγορίθμου. Οι παραδοχές αυτές είναι ιδιαίτερα δημοφιλείς και έχουν υιοθετηθεί ευρύτατα στη διεθνή βιβλιογραφία [49],[73],[77],[84],[133].
- Συνεπώς η ένταση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης που εκφράζεται με το φορτίο ως ο λόγος του ρυθμού άφιξης (λ_u) προς το συνολικό μέσο χρόνο εξυπηρέτησης (μ_u) θα δίνεται από τη σχέση $\rho_u=\lambda_u/\mu_u$.
- Τέλος, στην ανάλυση του αλγορίθμου, η κατάσταση κάθε κυψέλης περιγράφεται με ένα διάνυσμα $\overline{n}=(n_1,n_2,...,n_u,...,n_U)$ όπου με n_u υποδηλώνεται ο αριθμός των σε εξέλιξη κλήσεων κλάσεως u $u=1,\ldots,U$. Επιπλέον, με $n=n_1+n_2+...+n_U$ συμβολίζεται ο συνολικός αριθμός των κλήσεων που βρίσκονται σε εξέλιξη στην κατάσταση $\overline{n}$ εκφράζοντας παράλληλα και το συνολικό φορτίο κλήσεων.

3.6.1.2. Ανάλυση του Σχήματος Αποδοχής Κλήσεων: Η περίπτωση των δύο κλάσεων υπηρεσιών

Η ανάλυση του απλού πιθανοτικού σχήματος αποδοχής κλήσεων, αρχικά θα εξεταστεί για την περίπτωση των δυο κλάσεων υπηρεσιών. Η πρώτη κλάση υπηρεσιών αφορά τις κλήσεις χαμηλής προτεραιότητας και περιγράφονται οι κλήσεις μη πραγματικού χρόνου ανεκτής καθυστέρησης (π.χ. μεταφορά δεδομένων), ενώ η δεύτερη κλάση υπηρεσιών αφορά τις κλήσεις υψηλής προτεραιότητας και περιγράφονται κλήσεις πραγματικού χρόνου μη ανεκτής καθυστέρησης (π.χ. κλήσεις φωνής). Το κατώφλι για την πρώτη κλάση υπηρεσιών είναι L. Μια κλήση της πρώτης κλάσης γίνεται αποδεκτή με δεδομένο ότι ο συνολικός αριθμός των κλήσεων σε εξέλιξη όλων των κλάσεων υπηρεσιών που είναι σε εξέλιξη θα πρέπει να είναι κάτω από L. Από την άλλη πλευρά, οι κλήσεις της δεύτερης κλάσης υπηρεσιών γίνονται αποδεκτές χωρίς περιορισμούς, υπονοώντας ότι γίνονται αποδεκτές μέχρι εξαντλήσεως όλων των πόρων που στην περίπτωση αυτή είναι η χωρητικότητα της κυψέλης σε κλήσεις M.

Για τις κλήσεις χαμηλής προτεραιότητας η χρήση μιας επιβαλλόμενης πιθανότητας στην αποδοχή τους, ρυθμίζει και τις μεταβάσεις των καταστάσεων του δικτύου. Στην ουσία, οι νέες εισερχόμενες κλήσεις γίνονται αποδεκτές με μια επιπλέον πιθανότητα η οποία υπαγορεύεται αλλά και εκφράζει την τρέχουσα κατάσταση του δικτύου. Η πιθανοτική αυτή παράμετρος $f_{n,1}$ $(n=0, 1,..., M-1)$ σχετίζεται με τον συνολικό αριθμό των κλήσεων σε εξέλιξη σε μια κυψέλη, όπου $n=n_1+n_2$ ο οποίος μεταφράζεται σε δεσμευμένες μονάδες εύρους ζώνης που είναι ίσες με $c_1n_1+c_2n_2$. Στο προτεινόμενο αλγόριθμο πιθανοτικού ελέγχου αποδοχής το κατώφλι L αποτελεί το κρίσιμο σημείο όπου έχουμε την αλλαγή της πολιτικής αποδοχής μέσα από την επιλογή της κατάλληλης τιμής της πιθανοτικής παραμέτρου $f_{n,1}$. Η ρύθμιση της τιμής της παραμέτρου γίνεται με βάση την κατάσταση του δικτύου όπως αυτή καθορίζεται από το συνολικές κλήσεις σε εξέλιξη. Συνεπώς για τον περιορισμό του ρυθμού αποδοχής των νέων κλήσεων μη πραγματικού χρόνου καθώς το φορτίο του δικτύου αυξάνεται – καθώς το n αυξάνεται – το $f_{n,1}$ γίνεται μικρότερο. Ειδικότερα:

$$f_{n,1} = \begin{cases} f^d, & n < L \\ f^a, & L \le n < M \end{cases} \qquad (3.17)$$

όπου $f^a < f^d$.

Η ανάλυση Markov για το σχήμα PBRS γίνεται με βάση το διάγραμμα αλυσίδας στο επόμενο σχήμα 3.6 όπου μπορούμε να εξετάσουμε τις μεταβάσεις από τη μια κατάσταση στην άλλη για το μελετούμενο σχήμα πιθανοτικού ελέγχου αποδοχής κλήσεων.

Κάθε κατάσταση χαρακτηρίζεται από τον αριθμό των κλήσεων σε εξέλιξη για κάθε κλήση από τις δύο κλάσεις υπηρεσιών n_1 και n_2, αντίστοιχα. Κάθε κατάσταση της κυψέλης που δίνεται από $\overline{n} = (n_1, n_2)$ μπορεί να περιγραφεί από τις αλυσίδες Markov που αντιστοιχούν στο περιορισμένο χώρο καταστάσεων ο οποίος περιγράφεται παρακάτω

$$S = \{\overline{n} = (n_1, n_2); 0 \le n_2 \le M, 0 \le n_1 \le M - n_2, n_1 + n_2 \le M\}.$$

Οι πιθανότητες μετάβασης από την κατάσταση $\overline{n} = (n_1, n_2) \in S$ στην κατάσταση $\overline{n}' = (n_1', n_2') \in S$ δίνονται παρακάτω:

$$\pi(n_1, n_2 \mid n_1 + 1, n_2) = f_{n,1}\lambda_1 \quad (3.18\alpha)$$

$$\text{και } \pi(n_1, n_2 \mid n_1, n_2) = (1 - f_{n,1})\lambda_1, \quad (3.18\beta)$$

$$\pi(n_1, n_2 \mid n_1, n_2 + 1) = \lambda_2, \quad (3.18\gamma)$$

$$\text{για } 0 \le n_2 \le M - 1 \text{ και } 0 \le n_1 \le M - n_2 - 1$$

$$\pi(n_1, n_2 \mid n_1 - 1, n_2) = n_1\mu_1, \quad (3.19)$$

$$\text{για } 0 \le n_2 \le M \text{ και } 1 \le n_1 \le M - n_2$$

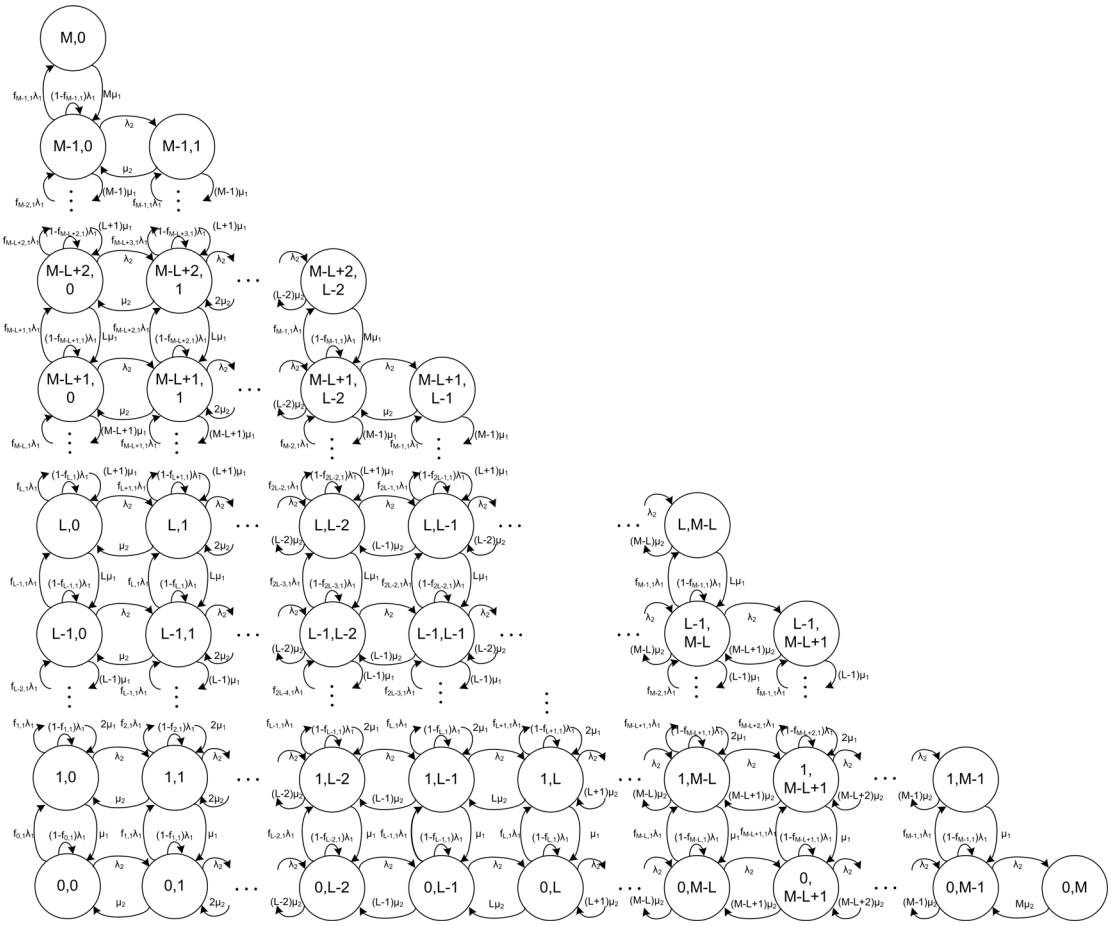
$$\pi(n_1, n_2 \mid n_1, n_2 - 1) = n_2\mu_2, \quad (3.20)$$

$$\text{για } 1 \le n_2 \le M \text{ και } 0 \le n_1 \le M - n_2.$$

Παρατηρώντας το διάγραμμα καταστάσεων Markov θα πρέπει να σχολιάσουμε τα εξής: Η εξυπηρέτηση των κλήσεων ανεκτής καθυστέρησης γίνεται με διαφορετική τιμή της πιθανοτικής παραμέτρου, ανάλογα με την κατάσταση του δικτύου. Για παράδειγμα, αν θεωρήσουμε τις καταστάσεις $\overline{n} = (n_1, n_2)$ και $\overline{n}' = (n_1, n_2 + 1)$ με αντίστοιχες επιβαλλόμενες τιμές αποδοχής $f_{n_1+n_2,1}$ και $f_{n_1+n_2+1,1}$, αντίστοιχα. Με αυτό θέλουμε να δείξουμε ότι οι τιμές των πιθανοτικών παραμέτρων κατά τις μεταβάσεις σε καταστάσεις όπου ο συνολικός αριθμός των κλήσεων σε εξέλιξη είναι διαφορετικός $f_{n_1+n_2,1} \ne f_{n_1+n_2+1,1}$ θα είναι διαφορετικός, ακόμα και αν ο αριθμός των κατειλημμένων BUs από τις κλήσεις μη πραγματικού χρόνου είναι ίδιος.

Από την άλλη πλευρά, είναι προφανές ότι στις καταστάσεις όπου έχουμε τον ίδιο συνολικό αριθμό κλήσεων σε εξέλιξη θα έχουμε και την ίδια τιμή της παραμέτρου, αφού η κατάσταση του δικτύου σε επίπεδο εξυπηρετουμένων από το δίκτυο κλήσεων, θα είναι ίδια. Για παράδειγμα, αν θεωρήσουμε τις καταστάσεις $\overline{n} = (n_1, n_2)$ και $\overline{n}' = (n_1 + 1, n_2 - 1)$,

αυτές εφόσον έχουν τον ίδιο αριθμό κλήσεων σε εξέλιξη τότε η τιμή της πιθανοτικής παραμέτρου για την αποδοχή των κλήσεων μη πραγματικού χρόνου ή ανεκτής καθυστέρησης και θα είναι $f_{n_1+n_2,1}$. Αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι η τιμή της πιθανοτικής παραμέτρου που ελέγχει τις μεταβάσεις στην αλυσίδα Markov αλλά ουσιαστικά την αποδοχή νέων κλήσεων μη πραγματικού χρόνου καθορίζεται από τη συνολική κατάσταση και το φορτίο του δικτύου, όπως αυτό εκφράζεται από το συνολικό αριθμό κλήσεων σε εξέλιξη, χωρίς να κάνει διάκριση στο είδος της κλήσης, αφού δε διακρίνει ποιους πόρους δεσμεύει κάθε κλήση και στην ανάλυση μας ο έλεγχος αποδοχής κλήσεων μελετάται σε επίπεδο κλήσεων (call level).



Σχήμα 3.6: Αλυσίδα Markov για το σχήμα πιθανοτικού ελέγχου αποδοχής κλήσεων.

Προκειμένου τώρα να προχωρήσουμε στην εξαγωγή της εξίσωσης σφαιρικής ισορροπίας για τις αλυσίδες Markov, έχει προταθεί από τη βιβλιογραφία η παραδοχή $\mu_1 = \mu_2$ που οδηγεί στον περιορισμό του δισδιάστατου διαγράμματος καταστάσεων Markov σε μονοδιάστατο, άρα και στην εύκολη επίλυση του [74]. Αυτή η προσέγγιση βρίσκει εφαρμογή και έχει υιοθετηθεί σε σχήματα αποδοχής κλήσεων που ως στόχο έχουν

την απόδοση προτεραιότητας στις κλήσεις μεταπομπής για δίκτυα που υποστηρίζουν μία μόνο κλάση υπηρεσιών. Όμως στα δίκτυα πολλαπλών κλάσεων υπηρεσιών, αυτό είναι αδύνατο αφού κάθε κλάση έχει διαφορετικούς χρόνους εξυπηρέτησης όπως επιβάλλεται από τα διαφορετικά QoS χαρακτηριστικά.

Συνεπώς για την εξαγωγή της εξίσωσης σφαιρικής ισορροπίας στην περίπτωση της πολυδιάστατης αλυσίδας Markov, που έχουμε στην περίπτωση αυτή κάθε κατάσταση χαρακτηρίζεται από το συνολικό αριθμό των κλήσεων σε εξέλιξη όλων των κλάσεων υπηρεσιών *n* και όχι από τα n_1, n_2, ανεξάρτητα. Οπότε η πιθανότητα σταθερής κατάστασης θα συμβολίζεται με $p(n)$. Επιπλέον, θεωρούμε τις δύο αλυσίδες που συνθέτουν το πολυδιάστατο διάγραμμα Markov ανεξάρτητες, αφού και τα συμβάντα της εισόδου κλήσεων διαφορετικού τύπου μπορούν να θεωρούν ανεξάρτητα και ασυσχέτιστα [73]. Στην ουσία, η έλευση μιας κλήσης μιας κλάσης υπηρεσίας και το αίτημα της για τη διάθεση εύρους ζώνης, είναι ανεξάρτητο σε σχέση με το αίτημα μίας άλλης νέας κλήσης διαφορετικής κλάσης υπηρεσιών, από την πρώτη [73].

Αν θεωρήσουμε $u(x)$ τη βηματική συνάρτηση και $\bar{u}(x)$ τη συμπληρωματική της, τότε με βάση το διάγραμμα μεταβάσεων θα προκύψει η παρακάτω εξίσωση σφαιρικής ισορροπίας:

$$\begin{aligned}\left[\bar{u}(n_1+n_2-M)\left(f_{n,1}\lambda_1+\lambda_2\right)+u(n_1-1)n_1\mu_1+u(n_2-1)n_2\mu_2\right]p(n)= \\ \left[u(n_1-1)f_{n-1,1}\lambda_1+u(n_2-1)\lambda_2\right]p(n-1)+ \\ +\bar{u}(n_1+n_2-M)\left[(n_1+1)\mu_1+(n_2+1)\mu_2\right]p(n+1)\end{aligned} \quad (3.21)$$

όπου $0 \le n_1+n_2 \le M$.

Οι πιθανότητες σταθερής κατάστασης $p(n)$ που προκύπτουν από την παραπάνω εξίσωση θα είναι:

$$p(n)=\sum_{n_1=0}^{n}\frac{\prod_{l=0}^{n_1-1} f_{n,1}\rho_1^{n_1}}{n_1!}\cdot\frac{\rho_2^{n-n_1}}{(n-n_1)!}\cdot p(0)\ ,\ 0\le n\le M \quad (3.22)$$

όπου $n \in S$ και $p(0)$ είναι ο παράγοντας κανονικοποίησης. Καθώς το $p(n)$ θα πρέπει να ικανοποιεί τη σχέση

$$\sum_{n=0}^{M} p(n)=1 \quad (3.23)$$

ο παράγοντας κανονικοποίησης θα είναι:

$$p(0)=\left[\sum_{n=0}^{M}\sum_{n_1=0}^{n}\frac{\prod_{l=0}^{n_1-1}f_{n,1}\cdot\rho_1^{n_1}}{n_1!}\cdot\frac{\rho_2^{n-n_1}}{(n-n_1)!}\right]^{-1}. \quad (3.24)$$

Στον μελετούμενο αλγόριθμο PBRS, μια κλήση μη πραγματικού χρόνου μπλοκάρεται όχι μόνο όταν εξαντλούνται οι πόροι οπότε $n=M$, οπότε έχουμε φτάσει στη μεγίστη χωρητικότητα της κυψέλης, αλλά εξαιτίας και της μείωσης της παραμέτρου $f_{n,1}$. Συνεπώς, η πιθανότητα μη αποδοχής CBP για τις κλήσεις μη πραγματικού χρόνου θα αποτελείται από δύο όρους. Ο πρώτος όρος της CBP θα προκύπτει από τη έλλειψη διαθεσιμότητας πόρων και θα μας δίνεται από τη σχέση:

$$p_1^{b'}=\frac{\sum_{n_1=0}^{M}\frac{\prod_{l=0}^{n_1-1}f_{n,1}\rho_1^{n_1}}{n_1!}\cdot\frac{\rho_2^{M-n_1}}{(M-n_1)!}}{\sum_{n=0}^{M}\sum_{n_1=0}^{n}\frac{\prod_{l=0}^{n_1-1}f_{n,1}\rho_1^{n_1}}{n_1!}\cdot\frac{\rho_2^{n-n_1}}{(n-n_1)!}}. \quad (3.25)$$

Ο δεύτερος όρος θα αναφέρεται στην πιθανότητα μη αποδοχής που οφείλεται στη μείωση της πιθανοτικής παραμέτρου $f_{n,1}$, και θα δίνεται από τη σχέση:

$$p_1^{b''}=\frac{\sum_{n=0}^{M}\sum_{n_1=0}^{n}\frac{(1-f_{n,1})\prod_{l=0}^{n_1-1}f_{n,1}\rho_1^{n_1}}{n_1!}\cdot\frac{\rho_2^{n-n_1}}{(n-n_1)!}}{\sum_{n=0}^{M}\sum_{n_1=0}^{n}\frac{\prod_{l=0}^{n_1-1}f_{n,1}\rho_1^{n_1}}{n_1!}\cdot\frac{\rho_2^{n-n_1}}{(n-n_1)!}}. \quad (3.26)$$

Η συνολική πιθανότητα μη αποδοχής των κλήσεων μη πραγματικού χρόνου θα προκύπτει από το άθροισμα των παραπάνω πιθανοτήτων:

$$p_1^b=p_1^{b'}+p_1^{b''}. \quad (3.27)$$

Εξαιτίας της προτεραιότητας των κλήσεων πραγματικού χρόνου μια τέτοια κλήση θα μπλοκάρεται μόνο αν όλοι οι πόροι σε επίπεδο κλήσεων είναι κατειλημμένοι Από το δισδιάστατο διάγραμμα Markov προκύπτει ότι μια κλήση πραγματικού χρόνου μπλοκάρεται αν $n=n_1+n_2=M$, οπότε οι πιθανότητες μη αποδοχής θα είναι:

$$p_2^b=p_1^{b'}. \quad (3.28)$$

Στο σημείο αυτό, θα πρέπει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση που η πιθανοτική παράμετρος $f_{n,1}$ είναι ίση με τη μονάδα για *n=0, 1,…, L-1* και ίση με το μηδέν για *n=L,*

L+1,…, M-1, τότε ο προτεινόμενος αλγόριθμος αποτελεί ένα παραδοσιακό σχήμα ελέγχου αποδοχής κλήσεων με απόδοση προτεραιότητας, όπου το κατώφλι *L* καθορίζει την αποδοχή των κλήσεων μη πραγματικού χρόνου, που είναι γνωστός ως σχήμα ελέγχου αποδοχής με απόδοση προτεραιότητας μέσω αποκοπής (cutoff priority scheme) [74]. Στην περίπτωση αυτή, οι πιθανότητες μη αποδοχής κλήσεων για τις δυο υποστηριζόμενες κλάσεις υπηρεσιών μη πραγματικού χρόνου p_{1t}^{b} και πραγματικού χρόνου p_{2t}^{b} θα δίνονται από τις σχέσεις:

$$p_{1t}^{b} = \frac{\sum_{n=L}^{M} \frac{\rho_1^{n_1}}{n_1!} \sum_{n_1=0}^{L} \frac{\rho_2^{n-n_1}}{(n-n_1)!}}{\sum_{n=0}^{L} \frac{\rho_1^{n_1}}{n_1!} \sum_{n_1=0}^{n} \frac{\rho_2^{n-n_1}}{(n-n_1)!}} \quad (3.29)$$

$$p_{2t}^{b} = \frac{\sum_{n_1=0}^{L} \frac{\rho_1^{n_1}}{n_1!} \cdot \frac{\rho_2^{M-n_1}}{(M-n_1)!}}{\sum_{n=0}^{L} \frac{\rho_1^{n_1}}{n_1!} \sum_{n_1=0}^{n} \frac{\rho_2^{n-n_1}}{(n-n_1)!}}. \quad (3.30).$$

Προφανώς όταν το *L=M* το σχήμα αποδοχής κλήσεων εκφυλίζεται σε ένα απλό αλγόριθμο χωρίς δυνατότητα απόδοσης προτεραιότητας. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει ότι το προτεινόμενο σχήμα ενσωματώνει τις δυνατότητες των σχημάτων που βασίζονται στην απόδοση προτεραιότητας (priority based), στη χρήση κατωφλίων (threshold driven) αλλά και στα σχήματα λέπτυνσης (thinning schemes).

3.6.1.3. Ανάλυση του Σχήματος Αποδοχής Κλήσεων: Η περίπτωση των πολλαπλών κλάσεων υπηρεσιών

Στην περίπτωση των πολλαπλών κλάσεων υπηρεσιών, σε κάθε κλάση αντιστοιχίζεται και ένα διαφορετικό επίπεδο προτεραιότητας. Για την επίτευξη της λειτουργίας του μηχανισμού απόδοσης προτεραιότητας ορίζουμε μια πιθανότητα $f_{n,1}$ για κάθε κλάση υπηρεσίας που εξαρτάται από τις συνολικό αριθμό των κλήσεων όλων των κλάσεων υπηρεσιών σε εξέλιξη. Λόγω των διαφορετικών QoS χαρακτηριστικών των κλάσεων υπηρεσιών, κάθε μια από αυτές εξετάζεται ανεξάρτητα, οπότε οι τιμές της παραμέτρου θα είναι:

$$f_{n,u} = \begin{cases} f_u^d, & n < L_u \\ f_u^a, & L_u \le n < M \end{cases}, \quad (3.31)$$

όπου $f_u^a < f_u^d$ και το L_u λειτουργεί ως το κατώφλι αλλαγής της πολιτικής αποδοχής κλήσεων με βάση την τιμή της παραμέτρου η οποία είναι διαφορετική σε κάθε κατάσταση.

Θεωρούμε $\overline{X}(t) = \left(X_1(t), X_2(t), ..., X_u(t), ..., X_U(t)\right)$ ως το διάνυσμα των κλήσεων διαφορετικών κλάσεων υπηρεσιών στην κυψέλη που εξετάζουμε τη χρονική στιγμή *t*. Επιπλέον θεωρούμε ότι σε κάθε μια κατάσταση αντιστοιχίζεται μια μοναδική κατανομή εύρους ζώνης στις κλήσεις που βρίσκονται σε εξέλιξη. Με δεδομένο ότι $X_u(t)$, *u=1, 2,…, U*, είναι αναστρέψιμες διαδικασίες μπορεί εύκολα να αποδειχθεί ότι και το $\overline{X}(t)$ είναι μια αναστρέψιμη διαδικασία η οποία ικανοποιεί την ιδιότητα περιορισμού (truncation property) [73]. Με βάση αυτά, η κατάσταση της κυψέλης του δικτύου που υποστηρίζει πολλαπλές κλάσεις υπηρεσιών που αναπαριστώνται με $\overline{n} = (n_1, n_2, ..., n_U)$ ορίζεται με βάση τον περιορισμένο χώρο καταστάσεων που δίνεται από

$$S' = \left\{\overline{n} = (n_1, n_2, ..., n_U); 0 \le n_1 + n_2 + ... + n_U \le M\right\}.$$

Ορίζουμε

$$\mathrm{H}(\overline{n}) = \begin{cases} 1, & \gamma\iota\alpha \quad n \in S' \\ 0, & \gamma\iota\alpha \quad n \notin S' \end{cases} \quad (3.32)$$

και επιπλέον ορίζουμε ένα διάνυσμα γραμμής I_u μήκους *U*, όπου όλα τα στοιχεία είναι μηδέν εκτός από το *u* στοιχείο το οποίο είναι ίσο με μονάδα και το οποίο υποδηλώνει την αντίστοιχη κλάση υπηρεσιών. Η πιθανότητα μετάβασης από την κατάσταση $\overline{n}$ στην $\overline{n}'$ με $\overline{n}$, $\overline{n}' \in S'$, συμβολίζεται με $\pi(\overline{n}, \overline{n}')$, όπου οι μεταβάσεις καταστάσεων για την περίπτωση των πολλαπλών κλάσεων υπηρεσιών θα πρέπει να ικανοποιούν τις σχέσεις:

$$\pi(\overline{n}, \overline{n} + I_u) = \mathrm{H}(\overline{n} + I_u) f_{n,u} \lambda_u \quad (3.33)$$

$$\pi(\overline{n}, \overline{n} - I_u) = \mathrm{H}(\overline{n} - I_u) n_u \mu_u . \quad (3.34)$$

Εφαρμόζοντας την ανάλυση Markov, η εξίσωση σφαιρικής ισορροπίας θα προκύπτει από τη σχέση:

$$\left[\sum_{u=1}^{U} \mathrm{H}(\overline{n} + I_u) f_{n,u} \lambda_u + \sum_{u=1}^{U} \mathrm{H}(\overline{n} - I_u) n_u \mu_u\right] P(\overline{n}) = \mathrm{H}(\overline{n}) \left[\sum_{u=1}^{U} f_{(n-1),u} \lambda_u P(\overline{n} - I_u) + \sum_{u=1}^{U} (n_u + 1) \mu_u P(\overline{n} + I_u)\right] \quad (3.35)$$

όπου $P(\overline{n})$ υποδηλώνει την πιθανότητα σταθερής κατάστασης που ανήκει στο χώρο $\overline{n} \in S'$.

Αν θεωρήσουμε το χώρο $S'_n \subset S'$ όπου

$$S'_n = \left\{ \overline{n} = \left(n_1, n_2, ..., n_U \right); n_1 + n_2 + ... + n_U = n, n \le M \right\}.$$

Η πιθανότητα $P(n)$ ορίζει την πιθανότητα οι n κλήσεις συνολικά είναι σε εξέλιξη. Μετά από κατάλληλη επεξεργασία της εξίσωσης ισορροπίας, η $P(n)$ θα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$P(n) = \sum_{\overline{n} \in S'_n} P(\overline{n}) = G^{-1} \sum_{\overline{n} \in S'_n} \prod_{u=1}^{U} \frac{\prod_{i=0}^{n_u - 1} f_{(n_1 + ... + i + ... + n_u), u} \rho_u^{n_u}}{n_u !}. \quad (3.36)$$

όπου $n = 1, ..., M$ και G είναι ο παράγοντας κανονικοποίησης. Εφ' όσον το $P(n)$ θα πρέπει να ικανοποιεί την εξίσωση

$$\sum_{n=1}^{M} P(n) = 1 \quad (3.37)$$

ο παράγοντας κανονικοποίησης θα είναι

$$G = \left[\sum_{\overline{n} \in S'} \prod_{u=1}^{U} \frac{\prod_{i=0}^{n_u - 1} f_{(n_1 + ... + i + ... + n_u), u} \rho_u^{n_u}}{n_u !} \right]^{-1}. \quad (3.38)$$

Με βάση την κατανομή των σταθερών καταστάσεων και δεδομένου ότι κάθε κλήση u που ανήκει στην κατάσταση $\overline{n} \in S'$ μπλοκάρεται με πιθανότητα $1 - f_{n,u}$, προκύπτει ότι οι πιθανότητες μη αποδοχής για την οποιαδήποτε u κλάση υπηρεσιών θα δίνεται από τη σχέση:

$$P_u^B = \sum_{n=1}^{M} \left(1 - f_{n,u} \right) P(n). \quad (3.39)$$

Αν θέσουμε $f_{0,u} = f_{1,u} = ... = f_{L_u - 1, u} = 1$ και $f_{L_u, u} = ... = f_{M-1,u} = 0$ για $u = 1, ..., U$, το προτεινόμενο σχήμα εκφυλίζεται σε ένα σχήμα κατωφλίου όπου το L_u είναι το κατώφλι για τις κλήσεις της u κλάσης υπηρεσιών. Επιπρόσθετα, όταν $L_u = M$ και $f_{n,u} = 1$ για $0 \le n \le M - 1$ και $u = 1, ..., U$, τότε το μελετούμενο σχήμα καταλήγει σε ένα σχήμα που δεν αποδίδει προτεραιότητα.

3.6.1.4. Αριθμητικά Αποτελέσματα και Ανάλυση

Η επίδοση του απλού πιθανοτικού σχήματος αποδοχής κλήσεων αναλύεται και αξιολογείται κάτω από διαφορετικές καταστάσεις τηλεπικοινωνιακού φορτίου εκφρασμένου

σε μονάδες Erlangs/κυψέλη. Για λόγους αντιπροσωπευτικότητας και για την καλύτερη παρουσίαση της ανάλυσης μας παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα για δυο κλάσεις υπηρεσιών [93]. Η επιλογή του πιθανοτικού σχήματος σε σχέση με τα κλασσικά σχήματα είναι πολύ σημαντική διότι καταφέρνει να υλοποιήσει ένα σχήμα με έμφαση στην απόδοση προτεραιότητας στις κλήσεις πραγματικού χρόνου. Ήδη άλλωστε από την προηγούμενη ενότητα, προέκυψε ότι η πιθανοτική προσέγγιση προσφέρει ένα αξιόπιστο μηχανισμό απόδοσης προτεραιότητας. Επιπλέον, ο νέος πιθανοτικός αλγόριθμός, όπως θα δούμε και στα σχετικά διαγράμματα επιδεικνύει υψηλά ποσοστά αποδοχής κλήσεων και καλύτερη διαχείριση των πόρων.

Στα παρακάτω αριθμητικά αποτελέσματα που θα παρουσιαστούν θα επικεντρωθούμε στην επίδραση της επιβαλλόμενης πιθανότητας αποδοχής στο μηχανισμό απόδοσης προτεραιότητας καθώς και στη γενικότερη επίδοση του σχήματος. Ειδικότερα, στον πιθανοτικό αλγόριθμο ελέγχου αποδοχής κλήσεων με βάση το συνολικό αριθμό πόρων όπως εκφράζεται από το συνολικό αριθμό κλήσεων ανά κατάσταση η χρήση της εξωτερικά επιβαλλόμενης πιθανότητας βελτιώνει και τη συνολική συμπεριφορά του αλγορίθμου. Περαιτέρω αξιολόγηση με επιπλέον κριτήρια όπως δικαιοσύνη και διεκπεραιωτικότητα θα παρουσιαστούν σε επόμενη ενότητα. Τα αριθμητικά αποτελέσματα στοχεύουν στο να καταδείξουν την επίδραση των παραμέτρων στην επίδοση του προτεινόμενου σχήματος αποδοχής κλήσεων. Εκτός των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τους αναλυτικούς τύπους, πραγματοποιήθηκαν εκτεταμένες προσομοιώσεις μέσα από ένα πρόγραμμα προσομοίωσης διακριτών καταστάσεων –συμβάντων– που ανεπτύχθη σε γλώσσα προγραμματισμού C++ για να επιβεβαιωθεί η ακρίβεια του πιθανοτικού μοντέλου. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συμβολίζονται με '□' στα σχήματα.

Όπως προαναφέρθηκε, το προτεινόμενο πιθανοτικό σχήμα αποδοχής μελετάται για δύο βασικές κατηγορίες φορτίου κλήσεων, πραγματικού (μη ανεκτής καθυστέρησης) και μη πραγματικού χρόνου (ανεκτής καθυστέρησης) με βάση την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε. Ειδικότερα, για τις προσομοιώσεις του προτεινόμενου αλγορίθμου κάτω από μεταβαλλόμενο φορτίο πραγματικού χρόνου οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται θα είναι: λ_1=1/20, λ_2=1/40, μ_1=1/350, C=70, L=30, $c=c_{max}$=2 οπότε $M=35$ ενώ η παράμετρος μ_2 μεταβάλλεται από 1/200 έως 1/1200. Για τις προσομοιώσεις που αφορούν μεταβαλλόμενο φορτίο μη πραγματικού χρόνου η παράμετρος μ_1 μεταβάλλεται από 1/240 έως 1/2400 ενώ η παράμετρος, μ_2 παραμένει σταθερή με τιμή μ_1=1/600. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφέρουμε ότι για την τιμή του c υιοθετούμε τις απαιτήσεις της πιο αυστηρής ως προς τις αναγκαίες μονάδες εύρους ζώνης αλλά και QoS,

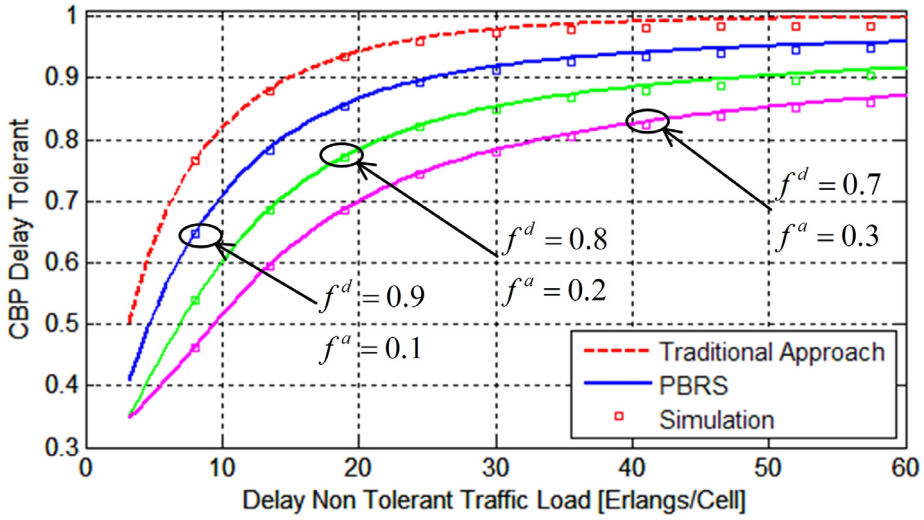
κλάσης υπηρεσιών μη ανεκτής καθυστέρησης δεχόμενοι ότι $c=c_{max}$. Αυτό σημαίνει ότι υιοθετούμε το χείριστο σενάριο από πλευράς ορίων διαθέσιμης χωρητικότητας σε επίπεδο κλήσεων, το οποίο όμως υπερκαλύπτει τις απαιτήσεις QoS οποιασδήποτε κλήσης που θα έχουμε στο δίκτυο. Με τον τρόπο αυτό διασφαλίζουμε ότι το εύρος ζώνης θα αντιστοιχηθεί σε χωρητικότητα κλήσεων με τρόπο που να ικανοποιεί οποιοδήποτε συνδυασμό κλήσεων στο δίκτυο.

Για τον μελετούμενο σχήμα έχουν χρησιμοποιηθεί τρεις διαφορετικές ομάδες για τις επιβαλλόμενες τιμές πιθανότητας αποδοχής $f_{n,1}$, ώστε να καταδειχθεί η επίδραση της πιθανοτικής προσέγγισης, αλλά και η ευαισθησία του σχήματος ως προς τις μεταβολές της πιθανοτικής παραμέτρου. Στο σημείο αυτό, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η παράμετρος $f_{n,1}$ αποτελείται από τις παραμέτρους f^a και f^d όπως ορίζονται στη σχέση 3.31. Για τη διαμόρφωση των τριών ομάδων, η παράμετρος f^d τέθηκε ίση με 0.9, 0.8 και 0.7 διαδοχικά και η παράμετρος f^a ίση με 0.1, 0.2 και 0.3 αντίστοιχα. Αυτό έγινε προκειμένου να αντισταθμιστεί για την έλλειψη δικαιοσύνης προς τις κλήσεις μη πραγματικού χρόνου, αφού η μείωση της αποδοχής τους στις καταστάσεις κάτω από το κατώφλι αντισταθμίζεται από μια ισοδύναμη αύξηση πάνω από το κατώφλι. Στα παρακάτω αποτελέσματα, μπορούμε να δούμε την ευαισθησία του προτεινόμενου σχήματος στις μεταβολές της πιθανοτικής παραμέτρου, αλλά και την αλληλεπίδραση των τιμών των διαφόρων παραμέτρων φορτίου με την επίδοση του πιθανοτικού σχήματος αλλά και μεταξύ τους.

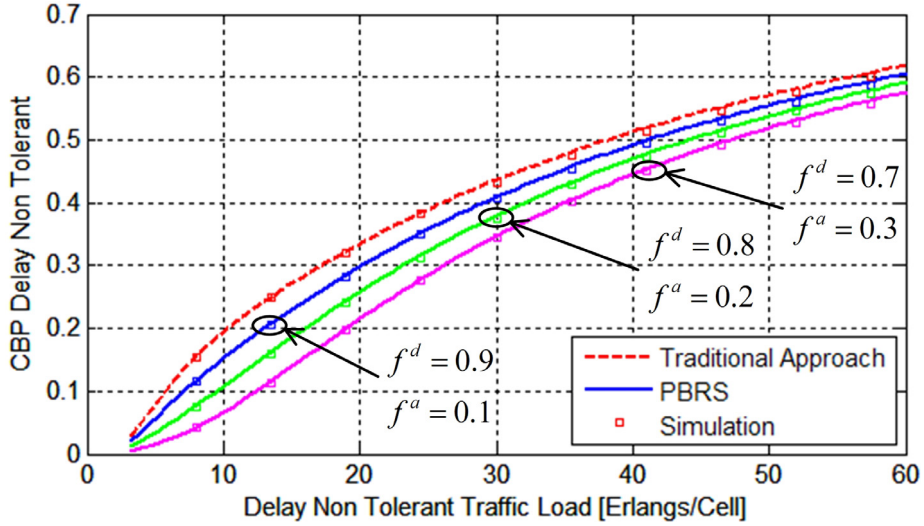
Οι τιμές αλλά και η εξάρτηση της πιθανότητας μη αποδοχής κλήσεων μη πραγματικού χρόνου, ανεκτής καθυστέρησης ($CBPs_{dt}$) από μεταβλητό φορτίο κλήσεων πραγματικού χρόνου για διαφορετικές τιμές της πιθανοτικής παραμέτρου $f_{n,1}$ απεικονίζεται στο σχήμα 3.7, ενώ η αντίστοιχη εξάρτηση της πιθανότητας μη αποδοχής κλήσεων πραγματικού χρόνου όπου η καθυστέρηση είναι μη ανεκτή ($CBPs_{dnt}$) απεικονίζεται στο σχήμα 3.8. Παράλληλα στα δύο σχήματα έχει σχεδιαστεί και η επίδοση του παραδοσιακού αλγορίθμου – μη πιθανοτικού αλγορίθμου – , προκειμένου να συγκριθεί η απόδοση του με το πιθανοτικό σχήμα, αλλά και να υπάρχει ένα μέτρο της σχετικής επιτεύξιμης βελτίωσης. Επίσης στα σχήματα παρουσιάζονται και τα αντίστοιχα αποτελέσματα της προσομοίωσης του προτεινόμενου αλγορίθμου.

Παρατηρώντας τα δύο σχήματα 3.7 και 3.8, μπορούμε να δούμε ότι ο πιθανοτικός αλγόριθμος επιτυγχάνει σημαντικά χαμηλότερες πιθανότητες μη αποδοχής κλήσεων και για τις δύο υπό μελέτη κλάσεις υπηρεσιών, κάτω από οποιεσδήποτε συνθήκες μεταβαλλόμενου τηλεπικοινωνιακού φορτίου πραγματικού χρόνου σε σχέση με τους αντίστοιχους

παραδοσιακούς αλγορίθμους. Παράλληλα συγκρίνοντας τις τιμές των πιθανοτήτων μη αποδοχής μπορούμε να δούμε ότι οι επιτεύξιμες $CBPs_{dnt}$ είναι αρκετά χαμηλότερες σε σχέση με τις $CBPs_{dt}$ για οποιοδήποτε φορτίο, οπότε διαπιστώνεται η αποτελεσματική λειτουργία του μηχανισμού απόδοσης προτεραιότητας που έχει ενσωματωθεί.



Σχήμα 3.7: Πιθανότητα μη αποδοχής κλήσης μη πραγματικού χρόνου (delay tolerant) συναρτήσει φορτίου πραγματικού χρόνου.

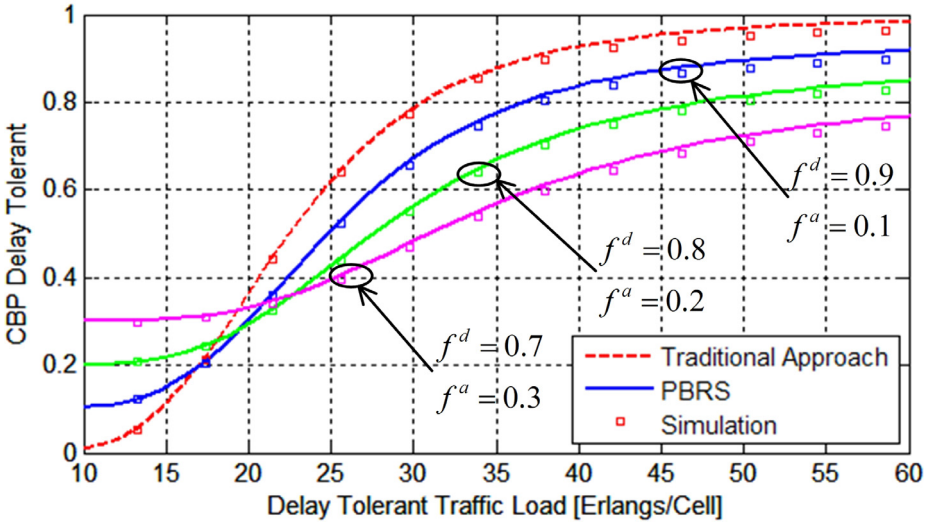


Σχήμα 3.8: Πιθανότητα μη αποδοχής κλήσης πραγματικού χρόνου (delay non tolerant) συναρτήσει φορτίου πραγματικού χρόνου.

Επιπλέον, ως προς την ευαισθησία της επίδοσης του αλγορίθμου στην πιθανοτική παράμετρο, διαπιστώνεται ότι με τη χρήση χαμηλότερων τιμών για το f^d και υψηλότερων τιμών για το f^a έχουμε την επίτευξη καλύτερων αποτελεσμάτων, αφού μειώνονται οι πιθανότητες μπλοκαρίσματος των κλήσεων κάθε υποστηριζόμενης κλάσης υπηρεσιών. Αυτό

οφείλεται στη καλύτερη διαχείριση των διαθέσιμων BUs, που οδηγεί στη βελτιστοποίηση και μεγιστοποίηση της χρησιμοποίησης (utilization) των διαθέσιμων πόρων σε κάθε κατάσταση, κυρίως όμως στις καταστάσεις πάνω από το κατώφλι και αυτό αφορά ειδικά την δυνατότητα αποδοχής κλήσεων μη πραγματικού χρόνου και πάνω από το κατώφλι που έχει οριστεί. Τέλος θα πρέπει να σημειωθεί, ότι τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων έρχονται σε συμφωνία με αυτά που προέκυψαν από τους αναλυτικούς τύπους για τις πιθανότητες μη αποδοχής επιβεβαιώνοντας την ακρίβεια του προτεινόμενου μοντέλου αλλά και της ανάλυσης.

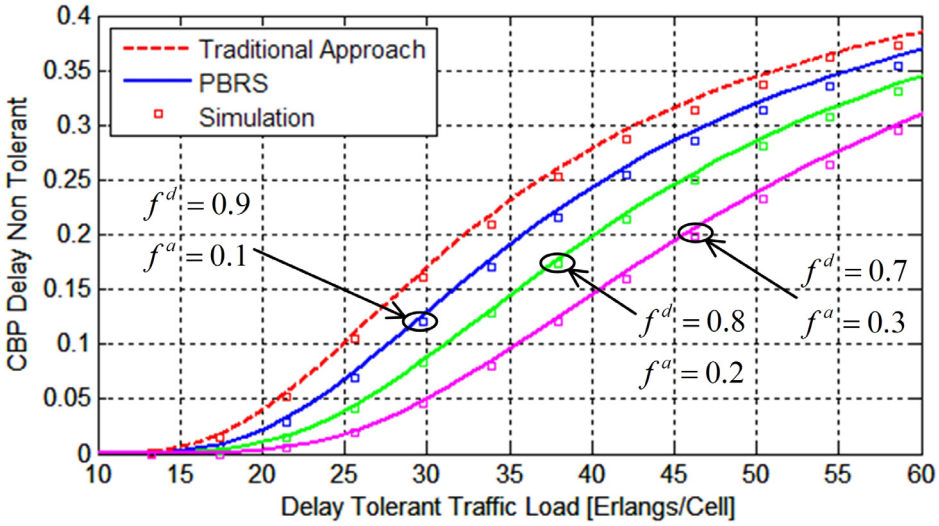
Οι τιμές των πιθανοτήτων μη αποδοχής κλήσεων μη πραγματικού χρόνου, ανεκτής καθυστέρησης ($CBPs_{dt}$) αλλά και η εξάρτηση της από μεταβλητό φορτίο κλήσεων μη πραγματικού χρόνου για διαφορετικές τιμές της πιθανοτικής παραμέτρου $f_{n,1}$ απεικονίζονται στο σχήμα 3.9, ενώ η αντίστοιχη εξάρτηση της πιθανότητας μη αποδοχής κλήσεων πραγματικού χρόνου όπου η καθυστέρηση είναι μη ανεκτή ($CBPs_{dnt}$) απεικονίζεται στο σχήμα 3.10. Παράλληλα στα δύο σχήματα έχει σχεδιαστεί και η επίδοση του παραδοσιακού αλγορίθμου – μη πιθανοτικού αλγορίθμου – , προκειμένου να συγκριθεί η απόδοση του με το πιθανοτικό σχήμα, αλλά και να υπάρχει ένα μέτρο της σχετικής επιτεύξιμης βελτίωσης για κάθε μελετούμενη κλάση υπηρεσιών, καθώς και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για το μελετούμενο σχήμα ελέγχου αποδοχής κλήσεων.



Σχήμα 3.9: Πιθανότητα μη αποδοχής κλήσης μη πραγματικού χρόνου (delay tolerant) συναρτήσει φορτίου μη πραγματικού χρόνου.

Από τα σχήματα 3.9 και 3.10, όπου σχεδιάζονται οι πιθανότητες μη αποδοχής συναρτήσει του φορτίου μη πραγματικού χρόνου, διαπιστώνεται η προφανής τάση ότι όσο αυξάνεται το φορτίο θα αυξάνεται η πιθανότητα μπλοκαρίσματος των κλήσεων. Στα

σχήματα 3.9 και 3.10 παρατηρούμε ότι με τη χρήση του πιθανοτικού αλγορίθμου επιτυγχάνουμε σημαντικά μικρότερες πιθανότητες μη αποδοχής κλήσεων σε σχέση με το παραδοσιακό σχήμα. Ειδικότερα, όταν χρησιμοποιούνται μικρότερες τιμές για την πιθανοτική παράμετρο f^d κάτω από το κατώφλι και μεγαλύτερες f^a πάνω από αυτό, έχουμε σημαντική βελτίωση, αφού περιορίζονται σημαντικά οι πιθανότητες μη αποδοχής των κλήσεων όλων των υποστηριζόμενων κλάσεων υπηρεσιών.



Σχήμα 3.10: Πιθανότητα μη αποδοχής κλήσης πραγματικού χρόνου (delay non tolerant) συναρτήσει φορτίου μη πραγματικού χρόνου.

Στο σχήμα 3.9. παρατηρούμε ότι σε καταστάσεις χαμηλού φορτίου οι τιμές των πιθανοτήτων μη αποδοχής καθορίζονται κυρίως από τις τιμές της πιθανοτικής παραμέτρου. Πρόκειται για μια κλασσική περίπτωση μόχλευσης των πιθανοτήτων από τις τιμές της παραμέτρου f^d για τις κλήσεις χαμηλής προτεραιότητας. Αυτό είναι φυσικό διότι στις καταστάσεις χαμηλού φορτίου, το δίκτυο έχει διαθέσιμους πόρους να εξυπηρετήσει τις κλήσεις, όμως αυτές δε γίνονται αποδεκτές με σκοπό να ελεγχθεί μέσω του αλγορίθμου η ροή τους κλιμακωτά από την αρχή, ώστε να αποφύγουμε καταστάσεις συμφόρησης σε καταστάσεις υψηλού φορτίου στο δίκτυο. Στην ουσία, ο πιθανοτικός αλγόριθμος υπερεκτιμά τις πιθανότητες μη αποδοχής κλήσεων λόγω της εξωτερικά επιβαλλόμενης πιθανότητας αποδοχής $f_{n,1}$, παρά την ύπαρξη διαθέσιμων πόρων. Για το λόγο αυτό, στην παραδοσιακή προσέγγιση παρατηρούμε ότι αρχικά οι πιθανότητες μη αποδοχής είναι χαμηλότερες σε σχέση με αυτές του PBRS, αφού για τις κλήσεις στην πρώτη περίπτωση δε τίθονται περιορισμοί στην αποδοχή τους, όμως παρατηρούμε ότι μόλις αυξάνεται το φορτίο η κατάσταση αντιστρέφεται πλήρως αφού οι πιθανότητες μπλοκαρίσματος μειώνονται

σημαντικά στην πιθανοτική προσέγγιση, αυξάνοντας τον αριθμό των εξυπηρετουμένων χρηστών παρέχοντας καλύτερη ποιότητα υπηρεσίας. Στην ουσία επιχειρείται μια εξοικονόμηση πόρων προκειμένου να βελτιωθεί η λειτουργία του αλγορίθμου στις καταστάσεις υψηλού φορτίου, όπου η εύρυθμη λειτουργία είναι κρίσιμη για την αποφυγή συμφόρησης (congestion avoidance).

Επιπλέον συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των σχημάτων 3.9 και 3.10, μπορούμε να δούμε ότι ο αλγόριθμος PBRS εξασφαλίζει επαρκώς εκτός από χαμηλότερες πιθανότητες μπλοκαρίσματος κλήσεων, την απόδοση προτεραιότητας στις κλήσεις πραγματικού χρόνου -μη ανεκτής καθυστέρησης- αφού οι πιθανότητες μη αποδοχής τους είναι χαμηλότερες σε σχέση με τις άλλες κλήσεις σε κάθε περίπτωση. Η δυνατότητα αυτή ενισχύεται από το δυναμικό χαρακτήρα του αλγορίθμου, όπου με την κατάλληλη επιλογή των τιμών της πιθανοτικής παραμέτρου μπορούμε να καθορίσουμε τα επίπεδα απόδοσης προτεραιότητας. Τέλος, θα πρέπει να αναφερθεί ότι τα αποτελέσματα που εξάγονται από τους αναλυτικούς τύπους συμφωνούν με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, επιβεβαιώνοντας την ορθότητα της ανάλυσης, αλλά και την απόδοση του προτεινόμενου αλγορίθμου σε επίπεδο δικτύου.

3.6.2. Περιγραφή Γενικευμένου – Πλήρους Σχήματος Πιθανοτικού Ελέγχου Αποδοχής Κλήσεων

Στην παρούσα ενότητα, θα αναλυθεί το γενικευμένο σχήμα πιθανοτικού ελέγχου αποδοχής κλήσεων που αποτελεί το επιστέγασμα της ανάλυσης των θεμάτων ελέγχου αποδοχής κλήσεων στην παρούσα διατριβή. Ο γενικευμένος πιθανοτικός έλεγχος αποδοχής κλήσεων ενοποιεί τα σχήματα λέπτυνσης (thinning schemes), πολλαπλών κατωφλίων (multiple thresholding schemes) και των δεσμευμένων καναλιών (guard channel schemes) σε ένα γενικότερο πλαίσιο το οποίο παρέχει τη δυνατότητα να αποδίδει επίπεδα προτεραιότητας στις κλήσεις των διαφόρων κλάσεων υπηρεσιών καθώς και ανεξάρτητο χειρισμό των κλήσεων μεταπομπής κάθε υποστηριζόμενης κλάσης υπηρεσιών. Η βασική ιδέα του γενικευμένου πιθανοτικού ελέγχου αποδοχής κλήσεων είναι η συνδυασμένη χρήση α) δυο πιθανοτικών παραμέτρων για τον έλεγχο της ροής της κίνησης αφού στο γενικευμένο σχήμα έχουμε τον πλήρη διαχωρισμό της κίνησης των νέων κλήσεων και των κλήσεων μεταπομπής καθώς και την ξεχωριστή αντιμετώπιση τους, δίνοντας προτεραιότητα στην αποδοχή των κλήσεων μεταπομπής και β) πολλαπλών κατωφλίων για την παροχή εγγυήσεων QoS [138].

Στο προτεινόμενο σχήμα υπάρχουν δυο ανεξάρτητοι πιθανοτικοί παράμετροι: η πρώτη αφορά τον έλεγχο της ροής των νέων κλήσεων, παρέχοντας προτεραιότητα στις κλήσεις μεταπομπής, στην ίδια κλάση υπηρεσιών ενώ η δεύτερη παράμετρος χρησιμοποιείται για τη διαχείριση των προτεραιοτήτων μεταξύ των πολλαπλών κλάσεων υπηρεσιών. Εκτός από τις δυο αυτές παραμέτρους υιοθετούμε και ανεξάρτητα κατώφλια τόσο για κάθε κλάση υπηρεσιών όσο και για τις νέες κλήσεις κάθε κλάσης. Η ύπαρξη των κατωφλίων έχει ως στόχο τη ύπαρξη μιας σχετικής δέσμευσης πόρων για κάθε κλάση υπηρεσιών, αλλά και την παροχή εγγυήσεων ποιότητας υπηρεσίας. Κάθε κατώφλι είναι προσαρμόσιμο μέσα από την κατάλληλη επιλογή των πιθανοτικών παραμέτρων. Στην ουσία η τιμή της πιθανοτικής παραμέτρου είναι αυτή που καθορίζει την αυστηρότητα του κατωφλίου, αφού όπως είδαμε και στο απλό πιθανοτικό σχήμα, τα κατώφλια αποτελούν τα σημεία αλλαγής της πολιτικής αποδοχής, όπως αυτή καθορίζεται από τις τιμές των παραμέτρων. Δηλαδή η τιμή της πιθανοτικής παραμέτρου διαφοροποιείται πάνω και κάτω από το κατώφλι, ώστε να γίνεται η προσαρμογή της λειτουργίας του αλγορίθμου στις συνθήκες κίνησης και φορτίου. Η τιμή άλλωστε της πιθανοτικής παραμέτρου καθορίζεται ανάλογα με το συνολικό αριθμό κατειλημμένων καναλιών κάθε στιγμή. Ο σχετικός μηχανισμός ελέγχου απόδοσης κλήσεων υλοποιεί την αλληλεπίδραση μεταξύ των παραμέτρων και την επίδοση του συστήματος χωρίς να προσθέτει περιττή πολυπλοκότητα. Η πιθανοτική προσέγγιση στοχεύει στον σταδιακό περιορισμό και τον έλεγχο των ροών φορτίου κλήσεων σύμφωνα με την προτεραιότητα τους καθώς αυξάνεται η τηλεπικοινωνιακή κίνηση, όπως αναφέρθηκε πολλές φορές και διεξοδικά στις προηγούμενες ενότητες.

Στη συνέχεια, θα προχωρήσουμε στην ανάλυση και την παρουσίαση του γενικευμένου πιθανοτικού σχήματος ελέγχου αποδοχής κλήσεων περιγράφοντας πρώτα το μοντέλο κίνησης και τις δικτυακές παροχές και έπειτα χρησιμοποιώντας την ανάλυση Markov για πολυδιάστατες αλυσίδες θα προχωρήσουμε στην εξαγωγή των αναλυτικών τύπων για τον υπολογισμό των πιθανοτήτων μη αποδοχής. Έπειτα θα παρουσιάσουμε την περίπτωση της χρήσης διαφορετικών κατανομών για το χρόνο συγκράτησης των καναλιών που είναι πολύ σημαντικό για τη ακριβέστερη προσομοίωση των συνθηκών αλλά και της κίνησης των πακέτων δεδομένων στα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών. Τέλος θα παρουσιάσουμε τα σχετικά αριθμητικά αποτελέσματα που προέκυψαν τόσο από τους αναλυτικούς τύπους όσο και από τις προσομοιώσεις ώστε να ελέγξουμε και να διαπιστώσουμε τη συνέπεια και την ακρίβεια του προτεινόμενου μοντέλου κάτω από ρεαλιστικές συνθήκες τηλεπικοινωνιακής κίνησης.

3.6.2.1. Περιγραφή Μοντέλου Κίνησης και Δικτυακές Παραδοχές

Το σύστημα το οποίο μελετάμε είναι ένα ομογενές κινητό κυψελωτό ασύρματο δίκτυο επικοινωνιών το οποίο υποστηρίζει πολλαπλές κλάσεις υπηρεσιών. Η περιγραφή του δικτύου και της τηλεπικοινωνιακής κίνησης καθώς και οι σχετικές παραδοχές που υιοθετούνται στην ανάλυση μας έχουν περιγραφεί εκτενώς στην προηγούμενη ενότητα, για το λόγο αυτό θα κάνουμε μια απλή επανάληψη μόνο των σημαντικότερων, αναφερόμενοι κυρίως στις χρησιμοποιούμενες παραμέτρους και τα σχετικά σύμβολα που θα χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση του γενικευμένου μοντέλου του πιθανοτικού ελέγχου αποδοχής κλήσεων.

Η ανάλυση μας εστιάζεται σε μια κυψέλη του ομογενούς δικτύου για την οποία θεωρούμε ότι έχουμε μια σταθερή κατανομή καναλιών. Ο αριθμός των καναλιών ανά κυψέλη υποδηλώνεται με C. Το μελετούμενο δίκτυο θεωρούμε ότι υποστηρίζει J κλάσεις υπηρεσιών οι οποίες αντιστοιχίζονται σε διαφορετικούς τύπους κλήσεων και κατ' επέκταση κίνησης. Σε κάθε είδος κλήσης αποδίδεται ένα μοναδικό επίπεδο προτεραιότητας. Προκειμένου να λάβουμε υπ' όψιν μας τις διαφορετικές απαιτήσεις QoS των κλήσεων αλλά και για να μοντελοποιήσουμε την πολυπλοκότητα της κίνησης των δικτύων επόμενης γενιάς θεωρούμε ότι για κάθε κλήση κλάσης j δίνονται c_j κανάλια όπου $j = 1, 2, ..., J$ [80], [129], [130]. Για την παροχή εγγυήσεων QoS, υιοθετούμε μια στρατηγική χρήσης πολλαπλών κατωφλίων. Βέβαια θα πρέπει να τονίσουμε ότι το ένα κατώφλι για την τελευταία J κλάση θα είναι οπωσδήποτε ίσο με C αφού δεν έχει νόημα σε ένα δίκτυο να μένουν πόροι ανεκμετάλλευτοι. Επιπλέον, αφού η διασφάλιση της προτεραιότητας είναι κρίσιμη για τα κινητά δίκτυα επικοινωνιών, για τις νέες κλήσεις ορίζονται ανεξάρτητα κατώφλια $K_j \le C_j$.

Όπως είναι άλλωστε πολύ διαδεδομένο στη βιβλιογραφία οι αφίξεις των νέων κλήσεων και των κλήσεων μεταπομπής κάθε κλάσης υπηρεσιών που υποστηρίζει το δίκτυο θεωρούμε ότι ακολουθούν μια κατανομή Poisson με ρυθμούς λ_{nj} και λ_{hj}, αντίστοιχα, που αποτελεί μια πολύ καλή προσέγγιση για την εισερχόμενη κίνηση [73],[77],[78],[80], [107], [110]. Οι αντίστοιχοι χρόνοι συγκράτησης του καναλιού θεωρούμε ότι είναι εκθετικά κατανεμημένοι με μέσες τιμές $1/\mu_{nj}$ και $1/\mu_{hj}$, για τις νέες κλήσεις και τις κλήσεις μεταπομπής, αντίστοιχα. Ο εκθετικά κατανεμημένος χρόνος συγκράτησης καναλιού ισχύει μόνο κάτω από προϋποθέσεις [110], οπότε εκτός από αυτή την κατανομή για τις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκε συμπληρωματικά και η λογαριθμοκανονική κατανομή η

οποία είναι πιο ρεαλιστική όταν η κίνηση του δικτύου παρουσιάζει longtailed χαρακτηριστικά [110].

Στη συνέχεια ορίζονται οι πιθανοτικές παράμετροι που χρησιμοποιούνται στον αλγόριθμο. Η πρώτη παράμετρος $b_{i,j}$ με $0 \le b_{i,j} \le 1$ αποτελεί την εξαρτώμενη από την κατάσταση πιθανότητα αποδοχής της *j* κλήσης όπου ο αριθμός των απασχολημένων καναλιών είναι *i* με $i = 1, 2, ..., C$ και αφορά τη διάκριση των προτεραιοτήτων μεταξύ κλήσεων διαφορετικών κλάσεων υπηρεσιών. Ενσωματώνοντας την παράμετρο $b_{i,j}$ στο σχήμα αποδοχής κλήσεων, υλοποιείται ο ανεξάρτητος σταδιακός έλεγχος των κλάσεων υπηρεσιών που υποστηρίζονται από το δίκτυο. Η παράμετρος αυτή συνδέεται με το αντίστοιχο κατώφλι πόρων κάθε κλάσης υπηρεσιών. Εκτός από την απόδοση προτεραιότητας στις διάφορες κλάσεις υπηρεσιών έχουμε την εισαγωγή της, εξαρτώμενης από την κατάσταση, πιθανότητας αποδοχής $a_{i,j}$ με $0 \le a_{i,j} \le 1$ για τις νέες κλήσεις της κλάσης *j* θεωρώντας κατειλημμένα *i* κανάλια με $i = 1, 2, ..., C$. Η παράμετρος $a_{i,j}$ έχει ως στόχο τον έλεγχο και την απόδοση προτεραιότητας στις κλήσεις μεταπομπής κάθε κλάσης υπηρεσιών. Η παράμετρος αυτή συνδέεται με το κατώφλι των κλήσεων μεταπομπής. Η δυναμική ρύθμιση των πιθανοτήτων αποδοχής οδηγεί στην ανάπτυξη και των ανάλογων πολιτικών για την αποδοχή των κλήσεων. Τέλος για την παροχή απόλυτων εγγυήσεων QoS μπορεί να εφαρμοστεί μια αυστηρή πολιτική με βάση μόνο τα κατώφλια όπου αν θέσουμε τις παραμέτρους $a_{i,j}$ και $b_{i,j}$ ίσες με μηδέν για $i \ge K_j$ και $i \ge C_j$, αντίστοιχα, τότε θα έχουμε απλά κατώφλια αποκοπής που συναντάμε σε κλασσικούς αλγορίθμους αποδοχής κλήσεων [74],[84].

3.6.2.2. Ανάλυση του Γενικευμένου Πιθανοτικού Σχήματος Αποδοχής Κλήσεων: Η περίπτωση της μιας κλάσης υπηρεσιών

Στην ενότητα αυτή, θα προχωρήσουμε στην ανάλυση της περίπτωσης της μιας κλάσης υπηρεσιών π.χ. της *j* κλάσης, θεωρώντας ανεξάρτητες τις νέες και τις κλήσεις μεταπομπής. Ο πιθανοτικός αλγόριθμος ελέγχου αποδοχής κλήσεων μπορεί να μοντελοποιηθεί με μια διαδικασία Markov δυο διαστάσεων όπου η μεταβλητή κατάστασης είναι ένα διάνυσμα το οποίο ορίζεται από τον αριθμό των νέων χρηστών και των χρηστών μεταπομπής. Ο περιορισμένος χώρος καταστάσεων ορίζεται ως:

$$S_j = \left\{ n_j = \left(n_{nj}, n_{hj} \right); 0 \le \left(n_{nj} + n_{hj} \right) c_j \le C_j \right\}$$

όπου n_{nj} και n_{hj} υποδηλώνουν τους αριθμούς των σε εξέλιξη αποδεκτών αιτημάτων για νέες κλήσεις και κλήσεις μεταπομπής, αντίστοιχα. Ορίζουμε έπειτα τη συνάρτηση $h\left(n_j\right)$ ως:

$$h\left(n_j\right)=1 \ \ \varepsilon\acute{\alpha}\nu \ \ n_j \in S_j \ \ \acute{\eta} \ \ h\left(n_j\right)=0 \ \ \varepsilon\acute{\alpha}\nu \ \ n_j \notin S_j. \quad (3.40)$$

και τη πιθανότητα μετάβασης $\pi\left(n_j, n_j'\right)$ από την κατάσταση n_j στην n_j', όπου $n_j, n_j' \in S_j$. Με βάση τη δομή αλλά και τις αρχές λειτουργίας του προτεινόμενου σχήματος ελέγχου αποδοχής κλήσεων οι πιθανότητες μεταβάσεων καταστάσεων θα είναι οι εξής:

$$\pi\left(\left(n_{nj}, n_{hj}\right),\left(n_{nj}+1, n_{hj}\right)\right)=h\left(n_{nj}+1, n_{hj}\right) a_{\left(n_{nj}+n_{hj}\right)c_j, j} \lambda_{nj} \quad (3.41\alpha)$$

$$\pi\left(\left(n_{nj}, n_{hj}\right),\left(n_{nj}, n_{hj}+1\right)\right)=h\left(n_{nj}, n_{hj}+1\right) \lambda_{hj} \quad (3.41\beta)$$

$$\pi\left(\left(n_{nj}, n_{hj}\right),\left(n_{nj}-1, n_{hj}\right)\right)=h\left(n_{nj}-1, n_{hj}\right) n_{nj} \mu_{nj} \quad (3.41\gamma)$$

$$\pi\left(\left(n_{nj}, n_{hj}\right),\left(n_{nj}, n_{hj}-1\right)\right)=h\left(n_{nj}, n_{hj}-1\right) n_{hj} \mu_{hj}. \quad (3.41\delta)$$

Εφαρμόζοντας τις βασικές αρχές των διαδικασιών γεννήσεων θανάτων της ανάλυσης Markov θα προκύψει η ακόλουθη εξίσωση σφαιρικής ισορροπίας:

$$\begin{aligned} & h\left(n_{nj}, n_{hj}\right)\Big(a_{\left(n_{nj}+n_{hj}-1\right)c_j, j} \lambda_{nj} P_j\left(n_{nj}-1, n_{hj}\right)+\lambda_{hj} P_j\left(n_{nj}, n_{hj}-1\right) \\ & +\mu_{nj}\left(n_{nj}+1\right) P_j\left(n_{nj}+1, n_{hj}\right)+\mu_{hj}\left(n_{hj}+1\right) P_j\left(n_{nj}, n_{hj}+1\right)\Big)= \quad (3.42) \\ & \Big(h\left(n_{nj}+1, n_{hj}\right) a_{\left(n_{nj}+n_{hj}\right)c_j, j} \lambda_{n_j}+h\left(n_{nj}, n_{hj}+1\right) \lambda_{h_j} \\ & +n_{nj} h\left(n_{nj}-1, n_{hj}\right) \mu_{n_j}+n_{hj} h\left(n_{nj}, n_{hj}-1\right) \mu_{h_j}\Big) P_j\left(n_{nj}, n_{hj}\right). \end{aligned}$$

Η πιθανότητα σταθερής κατάστασης $P_j\left(n_j\right)$ προκύπτει από τη συνολική εξίσωση σφαιρικής ισορροπίας, η οποία θα είναι:

$$P_j\left(n_j\right)=\frac{\left(\prod_{i=0}^{n_{nj}-1} a_{\left(i+n_{hj}\right)c_j, j}\right) \rho_{nj}^{n_{nj}}}{n_{nj}!} \cdot \frac{\rho_{hj}^{n_{hj}}}{n_{hj}!} \cdot P_j(0), \ n_j \in S_j \quad (3.43)$$

όπου η πιθανότητα $P_j(0)$ θα δίνεται από την εξίσωση κανονικοποίησης

$$P_j(0)=\left[\sum_{n_j \in S_j} \frac{\left(\prod_{i=0}^{n_{nj}-1} a_{\left(i+n_{hj}\right)c_j, j}\right) \rho_{nj}^{n_{nj}}}{n_{nj}!} \cdot \frac{\rho_{hj}^{n_{hj}}}{n_{hj}!}\right]^{-1}. \quad (3.44)$$

Για την εξαγωγή της πιθανότητας σταθερής κατάστασης, θεωρούμε ότι οι αλυσίδες που συνθέτουν το πολυδιάστατο διάγραμμα Markov είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους και η μια δεν επηρεάζει την άλλη [73]. Θεωρούμε ουσιαστικά τις εισερχόμενες κλήσεις των διαφόρων κατηγοριών ασυσχέτιστες μεταξύ τους. Η παραδοχή αυτή μας επιτρέπει να υιοθετήσουμε

αρκετές απλοποιήσεις για την εξαγωγή της πιθανότητας σταθερής κατάστασης και κατ' επέκταση των σχέσεων των πιθανοτήτων μη αποδοχής κλήσεων.

Συνεπώς, με βάση και τις στατικές κατανομές, οι πιθανότητες μη αποδοχής κλήσεων για τις νέες κλήσεις αλλά και τις κλήσεις μεταπομπής για την *j* κλάση υπηρεσιών θα δίνονται αντίστοιχα από τις σχέσεις:

$$P_{nj}^{b} = \sum_{n_j \in S_j} \left(1 - a_{(n_{nj}+n_{hj})c_j,j}\right) P_j\left(n_j\right) \quad (3.45)$$

$$P_{hj}^{b} = \sum_{\substack{n_j \in S_j \\ \forall (n_{nj}+n_{hj})c_j = C_j}} P_j\left(n_j\right) \quad (3.46)$$

Τέλος, θα πρέπει να αναφέρουμε ότι αν θέσουμε για τις πιθανοτικές παραμέτρους $a_{0j} = ... = a_{(K_j-1)j} = 1$ και $a_{K_j j} = ... = a_{C_j j} = 0$ τότε το προτεινόμενο σχήμα θα μετατραπεί σε ένα παραδοσιακό guard channel scheme με το K_j να λειτουργεί σαν ένα κατώφλι για τις νέες κλήσεις.

3.6.2.3. Ανάλυση του Γενικευμένου Πιθανοτικού Σχήματος Αποδοχής Κλήσεων: Η περίπτωση των πολλαπλών κλάσεων υπηρεσιών

Το πρόβλημα της υποστήριξης πολλαπλών κλάσεων υπηρεσιών μπορεί να αντιμετωπιστεί με αντίστοιχο τρόπο [138]. Στην περίπτωση αυτή, είναι ξεκάθαρο ότι οι κλήσεις των διαφορετικών κλάσεων δεν αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Συνεπώς, τα διάφορα επίπεδα προτεραιότητας των εξυπηρετούμενων κλήσεων μπορούν να θεωρηθούν ανεξάρτητα. Θεωρούμε ότι $X(t) = \left(X_1(t), X_2(t), ..., X_J(t)\right)$ είναι το διάνυσμα όλων των τύπων κλήσεων των διαφόρων κλάσεων υπηρεσιών στη κυψέλη τη χρονική στιγμή *t* και με βάση το διάνυσμα αυτό υπάρχει μια μοναδική κατανομή καναλιών στις κλήσεις που βρίσκονται σε εξέλιξη. Καθώς έχουμε μια αναστρέψιμη διαδικασία $X_j(t)$, μπορεί εύκολα να αποδειχθεί ότι $X(t)$ είναι μια αναστρέψιμη διαδικασία η οποία ικανοποιεί τις ιδιότητες της φραγμένης (truncation property).

Η κυψέλη του δικτύου που υποστηρίζει τις πολλαπλές κλάσεις υπηρεσιών μπορεί να περιγραφεί από τη σχέση $n = \left(n_1, n_2, ..., n_j, ..., n_J\right)$ με τον φραγμένο χώρο καταστάσεων

$$S = \left\{\left(n_1, n_2, ..., n_j, ..., n_J\right); n_j \in S_j, j = 1, 2, ..., J\right\}$$

όπου n_j είναι το διάνυσμα που ορίζεται από τον αριθμό των νέων κλήσεων καθώς και των κλήσεων μεταπομπής για την *j* κλάση υπηρεσιών η οποία θα ικανοποιεί τον περιορισμό

$$\sum_{j=1}^{J}\left(n_{nj}+n_{hj}\right)c_j \le C. \quad (3.47)$$

Στη συνεχεία θα ορίσουμε τη συνάρτηση $H(n)$ η οποία ορίζει την ύπαρξη κάθε κατάστασης n και $g(n)$ τον αριθμό των κατειλημμένων καναλιών, οπότε θα έχουμε τις παρακάτω σχέσεις:

$$H(n)=1 \ \ \varepsilon\acute{\alpha}\nu \ \ n\in S \ \ \acute{\eta} \ \ H(n)=0 \ \ \varepsilon\acute{\alpha}\nu \ \ n\notin S \quad (3.48)$$

$$g(n)=\sum_{j=1}^{J}\left(n_{nj}+n_{hj}\right)c_j. \quad (3.49)$$

Επιπλέον, ορίζουμε ένα διάνυσμα γραμμής I_j μήκους J του οποίου όλα τα στοιχεία είναι ίσα με μηδέν, εκτός από το j στοιχείο το οποίο είναι ίσο με τη μονάδα. Με βάση τις διαδικασίες γεννήσεων και θανάτων της ανάλυσης Markov, οι ρυθμοί μετάβασης της $X(t)$ εξάγονται με βάση την αρχή λειτουργίας του πιθανοτικού αλγορίθμου ελέγχου αποδοχής κλήσεων, οπότε θα έχουμε τις σχέσεις:

$$\pi\left(n,n+I_j\right)=H\left(n+I_j\right)\left(a_{g(n),j}\lambda_{nj}+\lambda_{hj}\right)b_{g(n),j} \quad (3.50)$$

$$\pi\left(n,n-I_j\right)=H\left(n-I_j\right)\left(n_{nj}\mu_{nj}+n_{hj}\mu_{hj}\right) \quad (3.51)$$

Με βάση τις σχέσεις μεταβάσεων καταστάσεων και τις βασικές αρχές της ανάλυσης Markov θα έχουμε την κατάσταση σφαιρικής ισορροπίας:

$$\begin{aligned}&\left[\sum_{j=1}^{J}H\left(n+I_j\right)\left(a_{g(n),j}\lambda_{nj}+\lambda_{hj}\right)b_{g(n),j}+\sum_{j=1}^{J}H\left(n-I_j\right)\left(n_{nj}\mu_{nj}+n_{hj}\mu_{hj}\right)\right]P(n)=\\&H(n)\left[\sum_{j=1}^{J}\left(a_{g\left(n-I_j\right),j}\lambda_{nj}+\lambda_{hj}\right)b_{g\left(n-I_j\right),j}P\left(n-I_j\right)+\sum_{j=1}^{J}\left(\left(n_{nj}+1\right)\mu_{nj}+\left(n_{hj}+1\right)\mu_{hj}\right)P\left(n+I_j\right)\right].\end{aligned} \quad (3.52)$$

Με βάση τις προηγούμενες σχέσεις η πιθανότητα σταθερής κατάστασης για τις στατικές κατανομές της $X(t)$ για $n\in S$ θα δίνεται από τη σχέση

$$P(n)=N^{-1}\prod_{j=1}^{J}\prod_{k=0}^{n_{nj}+n_{hj}-1}b_{kc_j,j}\frac{\left(\prod_{i=0}^{n_{nj}-1}a_{\left(i+n_{hj}\right)c_j,j}\right)\rho_{nj}^{n_{nj}}}{n_{nj}!}\cdot\frac{\rho_{hj}^{n_{hj}}}{n_{hj}!} \quad (3.53)$$

όπου N είναι ο παράγοντας κανονικοποίησης

$$N=\sum_{n\in S}\prod_{j=1}^{J}\prod_{k=0}^{n_{nj}+n_{hj}-1}b_{kc_j,j}\frac{\left(\prod_{i=0}^{n_{nj}-1}a_{\left(i+n_{hj}\right)c_j,j}\right)\rho_{nj}^{n_{nj}}}{n_{nj}!}\cdot\frac{\rho_{hj}^{n_{hj}}}{n_{hj}!}. \quad (3.54)$$

Μια κλήση κλάσης υπηρεσιών j γίνεται αποδεκτή με πιθανότητα $b_{i,j}$ μόνο εάν υπάρχουν τουλάχιστον c_j διαθέσιμα κανάλια και οι περιορισμοί αποδοχής που αφορούν τα κατώφλια και το συνολικό αριθμό καναλιών δεν παραβιάζονται. Τότε οι πιθανότητες μη αποδοχής για

τις νέες κλήσεις και τις κλήσεις μεταπομπής κάθε υποστηριζόμενης κλάσης υπηρεσιών θα δίνονται από τις σχέσεις:

$$P_{hj}^{B} = \sum_{n_j \in S_j} \sum_{n \in S'} \left(1 - b_{g(n),j}\right) P(n) \quad (3.55)$$

$$P_{nj}^{B} = \sum_{n_j \in S_j} \sum_{n \in S; \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq j}}^{J} (n_{nl} + n_{hl}) c_l \leq C - (n_{nj} + n_{hj}) c_j} \left(1 - a_{g(n),j} b_{g(n),j}\right) P(n) \quad (3.56)$$

όπου $S' = \left\{ n \in S; \sum_{l=1, l \neq j}^{J} (n_{nl} + n_{hl}) c_l \leq C - (n_{nj} + n_{hj}) c_j \right\}$.

Τέλος, αν θέσουμε $b_{i,j} = 1$ για $i = 1, 2, ..., C$ και $j = 1, 2, ..., J$ τότε το προτεινόμενο σχήμα ελέγχου αποδοχής κλήσεων μετατρέπεται σε ένα απλό σχήμα χωρίς μηχανισμό απόδοσης προτεραιότητας ανάμεσα στις υποστηριζόμενες κλάσεις υπηρεσιών.

3.6.2.4. Λογαριθμοκανονική Κατανομή Χρόνου Συγκράτησης Καναλιού-Εξυπηρέτησης

Για το χρόνο συγκράτησης καναλιού, στις περισσότερες εργασίες πάνω στις ασύρματες επικοινωνίες και ειδικά στο θέμα του ελέγχου αποδοχής κλήσεων, θεωρείται ότι αυτός ακολουθεί μια εκθετική κατανομή. Πρόκειται για μια παραδοχή η οποία προέρχεται από τα δίκτυα σταθερής τηλεφωνίας και αφορά τις κλήσεις φωνής, αλλά παρόλα αυτά έχει υιοθετηθεί μαζικά και στις μελέτες κινητών ασυρμάτων δικτύων. Υιοθετώντας τη χρήση του εκθετικά κατανεμημένου χρόνου συγκράτησης καναλιού με μέση τιμή μ θεωρούμε ότι ο υπολειπόμενος χρόνος μετά τη κλήση διαρκεί ένα δεδομένο διάστημα το οποίο επίσης ακολουθεί εκθετική κατανομή με την ίδια παράμετρο μ (memoryless property). Με τον τρόπο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί η θεωρία συστημάτων αναμονής και η ανάλυση Markov για τον υπολογισμό των πιθανοτήτων μη αποδοχής. Όμως ο πραγματικός χρόνος συγκράτησης καναλιού στα σύγχρονα δίκτυα ασύρματων δικτύων δεν υπακούει την παραδοχή της εκθετικής κατανομής καθώς πρέπει να υπάρχουν σημαντικές προϋποθέσεις που πρέπει να τηρούνται [108],[109],[139]. Ειδικότερα, για να ακολουθεί ο χρόνος συγκράτησης καναλιού την εκθετική κατανομή θα πρέπει και ο χρόνος παραμονής στη κυψέλη και ο χρόνος που επικοινωνεί ένας χρήστης με ένα σταθμό βάσης να είναι εκθετικά κατανεμημένος [108]. Ο εκθετικά κατανεμημένος χρόνος συγκράτησης καναλιού μπορεί να περιγράφει ικανοποιητικά τις κλήσεις φωνής, όμως δε θεωρείται επαρκής για τις περιπτώσεις μεταφοράς δεδομένων. Ο εκθετικά κατανεμημένος χρόνος εξυπηρέτησης υπερεκτιμά την παρουσία σύντομων κλήσεων στο δίκτυο και επιπλέον δεν περιγράφει με μεγάλη ακρίβεια τις

συνθήκες των σύγχρονων δικτύων όπου έχουμε τη μεταφορά πακέτων δεδομένων ακόμα και για κλήσεις φωνής. Κατά τη διάρκεια μιας κλήσης όπου έχουμε μεταφορά δεδομένων παράγεται μια αντίστοιχη ακολουθία πακέτων. Για το λόγο αυτό, η κίνηση χαρακτηρίζεται ως εκρηκτική (bursty). Έτσι, σε κάθε κλήση αυτής της κατηγορίας παρατηρείται μια εκρηκτική ακολουθία πακέτων η οποία πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν για τη μοντελοποίηση της κίνησης. Αυτές οι ιδιαιτερότητες της κίνησης πακέτων δεδομένων είναι από τα βασικότερα χαρακτηριστικά των μεταδόσεων που χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο IP.

Στις εργασίες [109], [140] παρουσιάστηκαν μετρήσεις δικτύου και σχετικά πειράματα που δείχνουν ότι η λογαριθμοκανονική κατανομή είναι ένα πολύ πιο ακριβής για τη μοντελοποίηση του χρόνου συγκράτησης καναλιού. Τα συμπεράσματα αυτά συμφωνούν και με τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην εργασία [141]. Η λογαριθμοκανονική κατανομή δείχνει ότι προσεγγίζει καλύτερα την κίνηση πακέτων δεδομένων στα σύγχρονα δίκτυα επικοινωνιών η οποία παρουσιάζει long-tailed χαρακτηριστικά [110], [142]. Εκτός όμως από τη λογαριθμοκανονική κατανομή έχουν προταθεί και άλλες προσεγγίσεις όσον αφορά την κατανομή του χρόνου συγκράτησης καναλιού. Στην εργασία [143], οι συγγραφείς κατέληξαν στα συμπεράσματα ότι ο χρόνος παραμονής μιας κλήσης στη κυψέλη για μια οιαδήποτε κλήση ακολουθεί μια γενικευμένη γάμμα κατανομή αλλά ο χρόνος συγκράτησης του καναλιού παραμένει εκθετικός. Θα πρέπει να αναφέρουμε ότι η κατανομή γάμμα είναι πολύ καλή για την προσαρμογή δεδομένων σε κάποια κατανομή. Επιπλέον, οι άλλες κατανομές όπως η εκθετική και η Erlang μπορούν να αποτελέσουν ειδικές περιπτώσεις αυτής. Επίσης ο χρόνος συγκράτησης του καναλιού μοντελοποιήθηκε και με τη χρήση της hyper-Erglang κατανομής στην εργασία [144]. Η επίδραση του μη εκθετικά κατανεμημένου χρόνου συγκράτησης καναλιού και ειδικά η περίπτωση της λογαριθμοκανονικής κατανομής καθώς και η σύγκριση της με την περίπτωση του εκθετικά κατανεμημένου χρόνου παρουσιάστηκε στην εργασία [145] και μελετήθηκε εκτενέστερα στην εργασία [146].

Όμως παρόλο που η εκθετική κατανομή δεν είναι τόσο ακριβής στην πράξη, η ανάλυση που βασίζεται σε αυτή είναι κατανοητή και εύκολα μπορεί να εξαχθεί. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι για την εφαρμογή της θεωρίας Markov και την εξαγωγή αναλυτικών τύπων για τις πιθανότητες μη αποδοχής απαραίτητες προϋποθέσεις είναι οι αφίξεις κλήσεων να ακολουθούν κατανομή Poisson και ο χρόνος εξυπηρέτησης να είναι εκθετικά κατανεμημένος (σύστημα M/M/C/K) [107]. Επιπλέον, παρέχει ικανοποιητική ακρίβεια σε επίπεδο μέσων τιμών οπότε μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για τη γενική τάση [147] Με βάση τη σχετική μαθηματική θεωρία των συστημάτων αναμονής είναι πολύ δύσκολο να γίνει μαθηματική ανάλυση του προβλήματος ακολουθώντας τη χρήση της

λογαριθμοκανονικής κατανομής ή της μικτής λογαριθμοκανονικής κατανομής για το χρόνο συγκράτησης καναλιού [145], [146]. Στην περίπτωση αυτή, είναι εξαιρετικά δύσκολο να ποσοτικοποιηθούν τα διάφορα μεγέθη καθώς έχουμε να κάνουμε με συστήματα M/G/C/K [148]. Στις περιπτώσεις αυτές, το σύστημα είναι πολύ σύνθετο και είναι σχεδόν αδύνατη η εξαγωγή αναλυτικών τύπων και θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν αριθμητικές μέθοδοι και προσομοιώσεις των οποίων η ακρίβεια είναι σχετική [129]. Για το λόγο αυτό, στη συγκεκριμένη μελέτη καταφύγαμε σε κατάλληλες προσομοιώσεις για την περίπτωση των σημαντικότερων κατανομών του χρόνου συγκράτησης καναλιού που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία.

Για τις ανάγκες της ανάλυσης του γενικευμένου πιθανοτικού αλγορίθμου ελέγχου αποδοχής κλήσεων προχωρήσαμε και στη μελέτη της περίπτωσης όπου ο χρόνος συγκράτησης του καναλιού ακολουθεί λογαριθμοκανονική κατανομή. Η επιλογή αυτή έγινε προκειμένου να περιγραφεί με πιο ρεαλιστικό τρόπο η κίνηση στο δίκτυο, αφού αυτή αφορά πακέτα δεδομένων για κάθε είδους κλήση. Η επιλογή της λογαριθμοκανονικής κατανομής για το χρόνο εξυπηρέτησης είναι πολύ δημοφιλής και συναντάται σε μεγάλο βαθμό στη βιβλιογραφία ως η πλέον κατάλληλη για τα σύγχρονα ευρυζωνικά ασύρματα δίκτυα πολλαπλών κλάσεων υπηρεσιών [115],[129],[138],[146],[149]. Για τη μελέτη της περίπτωσης αυτής, προχωρήσαμε στην ανάπτυξη ενός προγράμματος προσομοίωσης διακριτών καταστάσεων (discrete event simulation program). Εκτός όμως από την περίπτωση αυτή ανάλογες προσομοιώσεις έγιναν και για την περίπτωση του εκθετικά κατανεμημένου χρόνου συγκράτησης καναλιού, ώστε να δούμε τις αποκλίσεις των δυο προσεγγίσεων, αλλά και να ελέγξουμε την ακρίβεια του προτεινόμενου μοντέλου.

Τα αποτελέσματα όπως θα δούμε και στη σχετική ενότητα που ακολουθεί τόσο για την υπόθεση της εκθετικής όσο και για την περίπτωση της λογαριθμοκανονικής κατανομής μας έδειξαν ότι η υπόθεση των διαφορετικών κατανομών δεν κατέδειξε κάποια σημαντική διαφορά στα αποτελέσματα. Η εκθετική κατανομή που χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυση Markov παρέχει επαρκή ακρίβεια για την εξαγωγή των αναλυτικών τύπων και επιπλέον δείχνει την τάση που ακολουθούν οι τιμές των πιθανοτήτων αποδοχής για κάθε είδους κλήση.

3.6.2.5. Αριθμητικά Αποτελέσματα και Ανάλυση

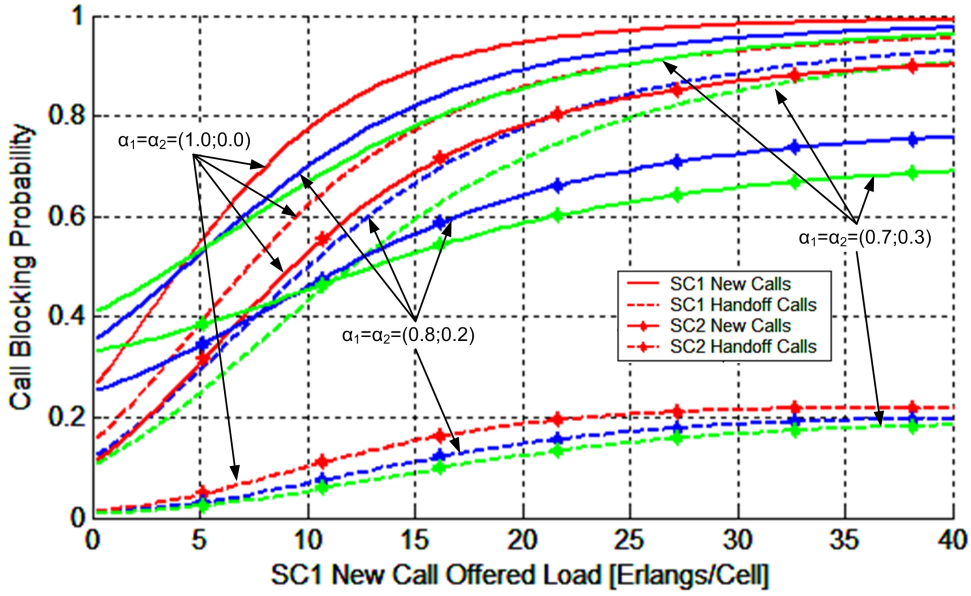
Στην ενότητα αυτή, θα παρουσιαστούν ορισμένα ενδεικτικά και αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα για την επίδοση του γενικευμένου πιθανοτικού ελέγχου αποδοχής κλήσεων

που αποτελεί και το κύριο αντικείμενο της παρούσας διατριβής. Ειδικότερα θα παρουσιαστούν τα αριθμητικά αποτελέσματα που προκύπτουν τόσο από τους αναλυτικούς τύπους υπολογισμού των πιθανοτήτων μη αποδοχής όσο και από τις σχετικές προσομοιώσεις του προτεινόμενου σχήματος [138]. Η ακρίβεια και η ορθότητα της ανάλυσης του πιθανοτικού ελέγχου αποδοχής κλήσεων επαληθεύτηκε μέσω προσομοιώσεων, με τη χρήση ενός προγράμματος διακριτών καταστάσεων. Για τις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκαν δυο σενάρια όσον αφορά τις κατανομές που ακολουθεί ο χρόνος συγκράτησης καναλιού. Στο πρώτο έχουμε τη χρήση της εκθετικής κατανομής και στο δεύτερο υιοθετείται η λογαριθμοκανονική κατανομή. Για τις δύο κατανομές που χρησιμοποιήθηκαν θεωρήσαμε ότι αυτές έχουν τις ίδιες μέσες τιμές και τις ίδιες διακυμάνσεις [110], [138]. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων απεικονίζονται με σύμβολα στα σχετικά σχήματα

Για λόγους απλότητας, αλλά και καλύτερης παρουσίασης θεωρήσαμε δύο κλάσεις υπηρεσιών με αντιπροσωπευτικά χαρακτηριστικά, μια τακτική ιδιαίτερα διαδεδομένη στις εργασίες αυτού του χώρου. Οι τιμές των διαφόρων παραμέτρων που χρησιμοποιούνται για το γενικευμένο πιθανοτικό αλγόριθμο ελέγχου αποδοχής κλήσεων είναι: C=30, C_1=25, C_2=30, K_1=23, K_2=26, c_1=1, c_2=2, λ_{n1}=1/20, λ_{n2}=1/50, λ_{h1}=1/25, λ_{h2}=1/55, μ_{h1}=1/250, μ_{n2}=1/100, μ_{h2}=1/100 ενώ η παράμετρος μ_{n1} μεταβάλλεται από 1/1200 έως 1/100. Μέσα από τα εξεταζόμενα αριθμητικά αποτελέσματα επιδιώκουμε να εξετάσουμε την επίδοση του προτεινόμενου αλγορίθμου κάτω από μεταβαλλόμενο φορτίο υπηρεσίας SC1 σε συνδυασμό με την επίδραση των πιθανοτικών παραμέτρων $a_{i,j}$ και $b_{i,j}$ σε σχέση με την επίτευξη χαμηλότερων πιθανοτήτων μπλοκαρίσματος κλήσεων για όλες τις κλήσεις με τη βέλτιστη διαχείριση πόρων, την απόδοση προτεραιότητας στις κλήσεις μεταπομπής και την απόδοση των επιπέδων προτεραιότητας ανά κλάση υπηρεσίας. Στις τιμές των παραμέτρων αντιστοιχίζονται δυο τιμές, μία κάτω από το κατώφλι και μια πάνω από το κατώφλι που αποτελεί την ένδειξη για την αλλαγή της πολιτικής αποδοχής των κλήσεων.

Στο πρώτο σχήμα 3.11, οι πιθανότητες μη αποδοχής κλήσεων σχεδιάζονται ως συνάρτηση του μεταβαλλόμενου φορτίου μετρούμενου σε Erlangs/κυψέλη. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο σχήμα αυτό βασίζονται στους αναλυτικούς τύπους που εξήχθησαν. Όπως, αναμενόταν οι πιθανότητες μη αποδοχής των κλήσεων αυξάνονται όσο αυξάνεται το φορτίο και παράλληλα αυξάνονται οι κλήσεις σε εξέλιξη και ο αριθμός των εξυπηρετουμένων χρηστών στο δίκτυο. Στο παρακάτω σχήμα, απεικονίζεται η επίδραση της πιθανοτικής παραμέτρου $a_{i,j}$ που αφορά τις κλήσεις μεταπομπής κάθε κλάσης. Για το λόγο

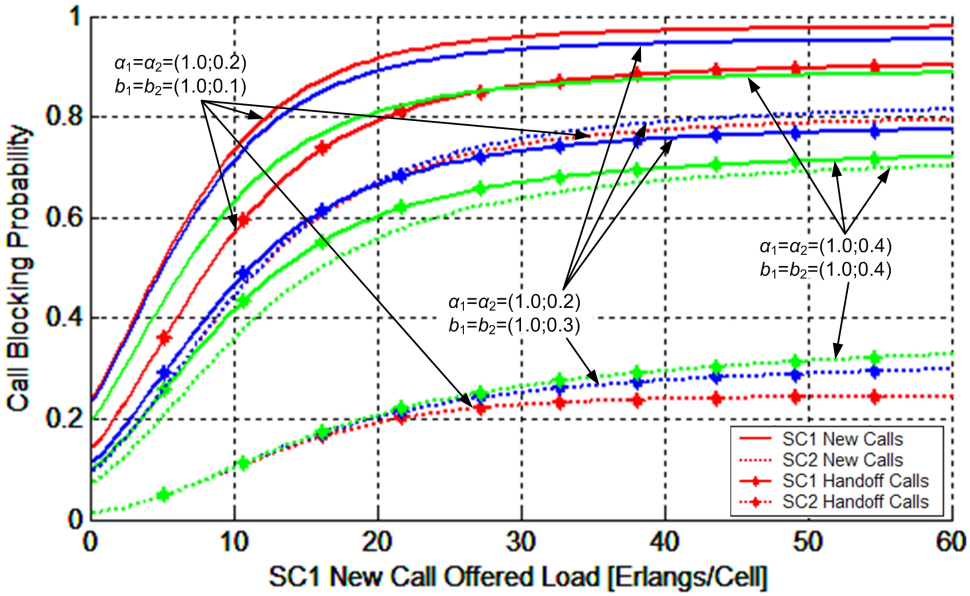
αυτό κρατάμε τη δεύτερη παράμετρο αδρανή, αφού η τιμή της είναι $b_{i,j} = (1;0)$. Στην ουσία με τον τρόπο αυτό μπορούμε να εξετάσουμε και να παρουσιάσουμε την επίδραση αποκλειστικά της παραμέτρου $a_{i,j}$ στον αλγόριθμο και κατ' επέκταση στο δίκτυο. Με την επιλογή αυτή καταδεικνύεται η λειτουργία του αλγορίθμου για την απόδοση προτεραιότητας στις κλήσεις μεταπομπής που ως άμεση συνέπεια έχει την επίτευξη χαμηλότερων πιθανοτήτων μη αποδοχής για αυτές. Μέσα από την κατάλληλη επιλογή των τιμών των παραμέτρων μπορούμε να μειώσουμε την επίδραση των κατωφλίων και να πετύχουμε χαμηλότερες πιθανότητες μπλοκαρίσματος. Όπως φαίνεται και στο σχήμα, οι κλήσεις μεταπομπής για κάθε κλάση έχουν σημαντικά μικρότερες τιμές πιθανότητας μη αποδοχής για οποιοδήποτε φορτίο σε σχέση με τις νέες κλήσεις. Επομένως ο μηχανισμός απόδοσης προτεραιότητας λειτουργεί ικανοποιητικά. Επίσης διαπιστώνεται, ότι ο αλγόριθμος ακόμα και με τη χρήση μόνο των κατωφλίων επιτρέπει την επίτευξη χαμηλότερων πιθανοτήτων μη αποδοχής για τις κλήσεις υψηλότερης προτεραιότητας όπως οι κλήσεις που αντιπροσωπεύονται με τη δεύτερη κλάση υπηρεσιών SC2. Η επίτευξη βελτιωμένων τιμών πιθανοτήτων μη αποδοχής και η αποτελεσματικότερη χρήση των καναλιών μπορεί να επιτευχθεί με την προσαρμογή των κατωφλίων και την επιλογή της καταλληλης τιμής για την πιθανοτική παράμετρο.



Σχήμα 3.11: Πιθανότητες μη αποδοχής κλήσεων συναρτήσει μεταβαλλόμενου φορτίου υπηρεσίας SC1 για διάφορες τιμές της παραμέτρου $a_{i,j}$.

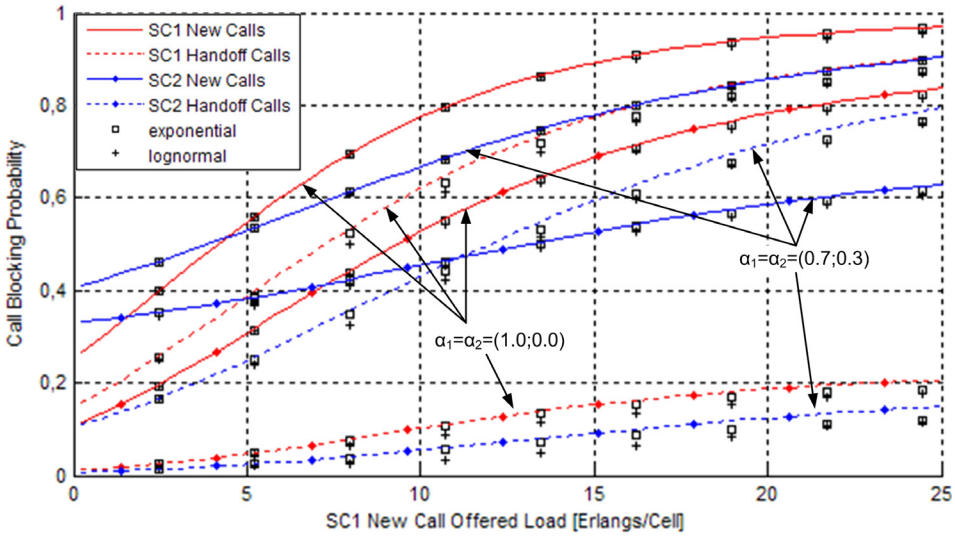
Στο σχήμα 3.12, απεικονίζονται οι πιθανότητες μη αποδοχής κλήσεων ως συνάρτηση του μεταβαλλόμενου φορτίου υπηρεσίας SC1 καθώς και η επίδραση των δυο

πιθανοτικών παραμέτρων $a_{i,j}$ και $b_{i,j}$. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο σχήμα αυτό βασίζονται στους αναλυτικούς τύπους που εξήχθησαν. Για τις ανάγκες της παρουσίασης των σχετικών ερευνητικών αποτελεσμάτων επιλέχθηκαν τρεις ομάδες τιμών για τις παραμέτρους, ώστε να καταδειχθεί τόσο η επίδραση της παραμέτρου $b_{i,j}$ όσο και της συνδυασμένης χρήσης τους. Όπως φαίνεται στο σχήμα, η συνδυασμένη χρήση των πιθανοτικών παραμέτρων βελτιώνει σημαντικά την επίδοση του σχήματος. Ειδικότερα, επιτρέποντας την αποδοχή κλήσεων και πάνω από το κατώφλι, τα επίπεδα προτεραιότητας μεταξύ των κλάσεων υπηρεσιών αλλά και μεταξύ των νέων κλήσεων και των κλήσεων μεταπομπής διατηρούνται, επιτυγχάνοντας παράλληλα χαμηλότερες πιθανότητες μη αποδοχής για μεσαία φορτία κίνησης. Οι πιθανότητες μη αποδοχής μειώνονται από τη στιγμή που η συνεισφορά των καταστάσεων που βρίσκονται πάνω από το κατώφλι στο αντίστοιχο διάγραμμα καταστάσεων Markov μειώνεται όταν αυξάνονται οι τιμές των παραμέτρων $a_{i,j}$ και $b_{i,j}$. Μέσα από το σχήμα διαπιστώνεται ότι οι κλήσεις μεταπομπής της κλάσης υψηλότερης προτεραιότητας SC2 έχουν τη μικρότερη πιθανότητα μη αποδοχής, όπως άλλωστε είναι επιθυμητό. Επιπλέον, από το σχήμα φαίνεται ότι τα αποτελέσματα είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντικά, αφού ο αλγόριθμος επιτυγχάνει τους στόχους που είχαν τεθεί στο σχεδιασμό του, καλύπτοντας τους στόχους του αλλά και τις ανάγκες των σύγχρονων ασύρματων ευρυζωνικών κυψελωτών δικτύων επικοινωνιών.



Σχήμα 3.12: Πιθανότητες μη αποδοχής κλήσεων συναρτήσει μεταβαλλόμενου φορτίου SC1 για διάφορες τιμές των παραμέτρων $a_{i,j}$ και $b_{i,j}$.

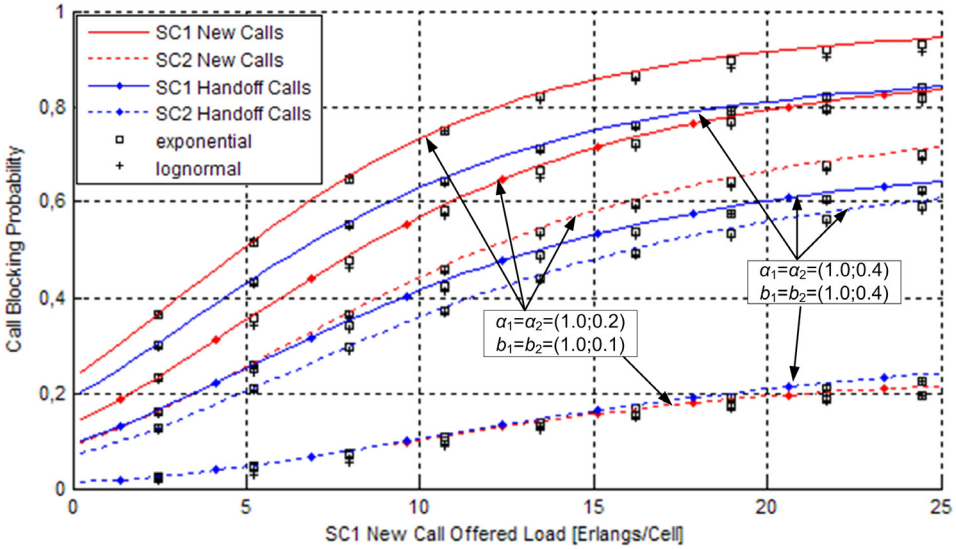
Στα παρακάτω σχήματα 3.13 και 3.14, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τα αριθμητικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται στα σχήματα 3.11 και 3.12, αντίστοιχα. Στα σχήματα αυτά παρουσιάζονται τόσο κάποια από τα αναλυτικά αποτελέσματα όσο και αυτά των προσομοιώσεων ώστε να ελεγχθεί η ακρίβεια του θεωρητικού μοντέλου, αλλά και να εξεταστεί και η επίδραση της περίπτωσης χρόνου συγκράτησης καναλιού που ακολουθεί τη λογαριθμοκανονική κατανομή. Αυτό γίνεται προκειμένου να εξετάσουμε τη συμπεριφορά του πιθανοτικού ελέγχου αποδοχής κλήσεων κάτω από ρεαλιστικές συνθήκες κίνησης. Για το λόγο αυτό, εστιάζουμε σε μικρότερο διάστημα μεταβαλλόμενου φορτίου, που τα επίπεδα μεταβολής του είναι σε πιο ρεαλιστική βάση, ώστε να καταδειχθεί η συμπεριφορά του πιθανοτικού ελέγχου αποδοχής κλήσεων αλλά και η τάση της απόδοσης του σχήματος κάτω από την επίδραση των διάφόρων παραμέτρων. Στα σχήματα 3.13 και 3.14, παρουσιάζονται πιο ευκρινώς τόσο τα αναλυτικά όσο και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για το μελετούμενο σχήμα ελέγχου αποδοχής κλήσεων.



Σχήμα 3.13: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για τις πιθανότητες μη αποδοχής κλήσεων συναρτήσει μεταβαλλόμενου φορτίου SC1 για διάφορες τιμές της παραμέτρου $a_{i,j}$.

Από τα σχήματα αυτά βλέπουμε ότι τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για την περίπτωση του εκθετικού χρόνου συγκράτησης καναλιού και τα αναλυτικά αποτελέσματα σχεδόν συμπίπτουν, γεγονός που αποδεικνύει την ορθότητα και την ακρίβεια της ανάλυσης. Όσον αφορά την περίπτωση της λογαριθμοκανονικής κατανομής για το χρόνο συγκράτησης καναλιού, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων παρουσιάζουν μικρή μόνο διαφορά, η οποία δεν μπορεί να θεωρηθεί σημαντική. Άρα μπορούμε να πούμε με σαφήνεια ότι η παραδοχή για την κατανομή του χρόνου συγκράτησης καναλιού δεν έχει μεγάλη επίδραση

στην εκτίμηση των πιθανοτήτων μη αποδοχής κλήσεων. Τέλος, θα πρέπει να τονίσουμε ότι η χρήση του πιθανοτικού ελέγχου αποδοχής κλήσεων επιδεικνύει ικανοποιητική απόδοση για τις εξεταζόμενες περιπτώσεις και ανταποκρίνεται σε ρεαλιστικές συνθήκες όπως αυτές αναφέρονται στην τηλεπικοινωνιακή κίνηση που έχουμε στα σύγχρονα δίκτυα επικοινωνιών.



Σχήμα 3.14: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για τις πιθανότητες μη αποδοχής κλήσεων συναρτήσει μεταβαλλόμενου φορτίου SC1 για διάφορες τιμές των παραμέτρων $a_{i,j}$ και $b_{i,j}$.

3.6.2.6. Συμπεράσματα

Το πιθανοτικό σχήμα ελέγχου αποδοχής κλήσεων το οποίο μελετήθηκε στην παρούσα διατριβή, ενσωματώνει υφιστάμενα σχήματα και αλγορίθμους αποδοχής κλήσεων σε ένα ενιαίο πλαίσιο το οποίο επιτυγχάνει να αξιοποιήσει τα πλεονεκτήματα τους, επιτυγχάνοντας σημαντικά ανώτερη απόδοση. Το ενοποιημένο πλαίσιο επιτυγχάνει τη εύρυθμη λειτουργία των δικτύων πολλαπλών υπηρεσιών αποδίδοντας τα κατάλληλα επίπεδα προτεραιότητας σε κάθε κλάσης υπηρεσιών, παρέχοντας παράλληλα προτεραιότητα και στις κλήσεις μεταπομπής. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση δυο πιθανοτικών παραμέτρων, όπου με την κατάλληλη επιλογή τιμών μπορούμε να καθορίσουμε τα επίπεδα προτεραιότητας, την αυστηρότητα των κατωφλίων αλλά και την κατανομή πόρων. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος επιδεικνύει σημαντικά βελτιωμένη επίδοση σε επίπεδο πιθανοτήτων μη αποδοχής κλήσεων, που αποτελεί το βασικότερο κριτήριο επίδοσης. Περαιτέρω αξιολόγηση, με επιπλέον κριτήρια θα ακολουθήσει σε επόμενο κεφάλαιο.

Επίσης, θα πρέπει να σημειωθεί η επικύρωση της ακρίβειας του θεωρητικού μοντέλου με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, γεγονός που καταδεικνύει την ακρίβεια

της ανάλυσης αλλά και την εύρυθμη λειτουργία του αλγορίθμου. Επιπλέον, θα πρέπει να τονίσουμε ότι με βάση τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων με τη χρήση της παραδοχής της εκθετικής και της λογαριθμοκανονικής κατανομής, όπου η δεύτερη θεωρείται ως πιο ρεαλιστική προς την πραγματική κατάσταση του χρόνου συγκράτησης καναλιού συμπεραίνουμε ότι αυτή η παραδοχή έχει μικρή επίδραση στα αποτελέσματα επίδοσης του ελέγχου αποδοχής κλήσεων όταν αυτός εξετάζεται σε επίπεδο κλήσεων. Τέλος, από τα αποτελέσματα μπορούμε να συμπεράνουμε ότι ο πιθανοτικος έλεγχος αποδοχής κλήσεων είναι σε θέση να προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα στην αποτελεσματική διαχείριση πόρων και τον αποτελεσματικό έλεγχο αποδοχής κλήσεων στα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών.

Κεφάλαιο 4ο

Αξιολόγηση Επίδοσης Ελέγχου Αποδοχής Κλήσεων

4.1. Εισαγωγή

Ένα από τα βασικότερα ζητήματα που τίθενται μετά τη σχεδίαση και την ανάπτυξη ενός σχήματος ελέγχου αποδοχής κλήσεων είναι η αξιολόγηση της επίδοσης του κατά την εφαρμογή του σε ένα δίκτυο. Στην πλειοψηφία των σχετικών ερευνητικών εργασιών η μελέτη της επίδοσης βασίζεται μόνο στην εκτίμηση των πιθανοτήτων μη αποδοχής κλήσεων, που αποτελεί τη βασικότερη παράμετρο ποιότητας υπηρεσίας σε επίπεδο κλήσεων για τα δίκτυα επικοινωνιών. Σήμερα, όπου στα σύγχρονα κινητά δίκτυα επικοινωνιών έχουμε την υποστήριξη πολλαπλών κλάσεων υπηρεσιών, κατά την εφαρμογή του ελέγχου αποδοχής κλήσεων η συμπεριφορά των σχετικών αλγορίθμων μεταβάλλεται και ανακύπτουν διάφορα ζητήματα επίδοσης, όπως αυτό της δικαιοσύνης στην εξυπηρέτηση των κλήσεων αλλά και στην κατανομή των πόρων [150].

Επιπλέον, έχουν προταθεί διάφορες προσεγγίσεις ελέγχου αποδοχής κλήσεων με μοναδικό στόχο τη βελτιστοποίηση της χρησιμοποίησης του δικτύου, κατά την εφαρμογή τους όμως ανακύπτουν σημαντικά ζητήματα δικαιοσύνης εξυπηρέτησης ανάμεσα στις κλήσεις με διαφορετικές απαιτήσεις QoS [151]. Ειδικά, στις περιπτώσεις όπου χρησιμοποιούνται στρατηγικές επίτευξης είτε βέλτιστων εσόδων είτε βέλτιστης χρησιμότητας, τότε είναι πιθανό να οδηγηθούμε σε μεγάλες διαφορές μεταξύ των πιθανοτήτων μη αποδοχής κλήσεων [152]. Αυτό μπορεί να οδηγήσει στο δυσάρεστο φαινόμενο κάποιες κλήσεις να μην εξυπηρετούνται και να έχουν περιορισμένη πρόσβαση στο δίκτυο σε σχέση με άλλες. Για το λόγο αυτό, η δίκαιη εξυπηρέτηση των κλήσεων

αποτελεί τη σημερινή εποχή μια από τις προδιαγραφές σχεδιασμού των αλγορίθμων, αφού επιδιώκεται δικαιοσύνη ανάμεσα στους χρήστες της ίδιας κλάσης υπηρεσιών όπου πιθανά έχουμε διαφορετικές συνθήκες καναλιού και διαφορετικά χαρακτηριστικά κινητικότητας καθώς και το κυριότερο δικαιοσύνη στην εξυπηρέτηση των χρηστών διαφορετικών κλάσεων υπηρεσιών [48]. Αυτό μεταφράζεται σε μικρές σχετικά διαφορές μεταξύ των τιμών των πιθανοτήτων μη αποδοχής κλήσεων των υποστηριζόμενων κλάσεων υπηρεσιών, έτσι ώστε να μην παρατηρούνται φαινόμενα μονομερούς απόρριψης συγκεκριμένων κατηγοριών κλήσεων.

Για την περίπτωση του προτεινόμενου πιθανοτικού ελέγχου αποδοχής κλήσεων τα σχετικά αποτελέσματα εκτίμησης των πιθανοτήτων μη αποδοχής κλήσεων παρουσιάστηκαν εκτενώς στο προηγούμενο κεφάλαιο. Ο πιθανοτικός έλεγχος αποδοχής κλήσεων προτάθηκε για χρήση από ασύρματα κυψελωτά δίκτυα επικοινωνιών που υποστηρίζουν πολλαπλές κλάσεις υπηρεσιών, συνεπώς πρέπει να εξεταστεί με ιδιαίτερη προσοχή το ζήτημα της δικαιοσύνης στην εξυπηρέτηση των υποστηριζόμενων κλήσεων. Συνεπώς, εκτός από τις τιμές των πιθανοτήτων απαιτείται η εκτενέστερη μελέτη της επίδοσης των αλγορίθμων όσον αφορά ειδικά χαρακτηριστικά τους όπως η απόδοση προτεραιότητας, η δικαιοσύνη στην εξυπηρέτηση των κλήσεων και τη κατανομή των πόρων καθώς και ο ρυθμός διεκπεραίωσης κλήσεων (διεκπεραιωτικότητα - throughput) στο δίκτυο. Από τα βασικότερα ζητήματα τα οποία θα μελετηθούν στην παρούσα ενότητα είναι η επίδραση στη λειτουργία του σχήματος, και ειδικά τα χαρακτηριστικά της απόδοσης προτεραιότητας, της δικαιοσύνης και της διεκπεραιωτικότητας κλήσεων από τις μεταβολή της πιθανοτικής παραμέτρου που αποτελεί και την κύρια λειτουργική καινοτομία του προτεινόμενου σχήματος.

4.2. Επισκόπηση Διεθνούς Βιβλιογραφίας

Στη διεθνή βιβλιογραφία και στις σχετικές δημοσιεύσεις έχουν προταθεί διάφορες τεχνικές για την ανάπτυξη δίκαιων και αποτελεσματικών αλγορίθμων ελέγχου αποδοχής κλήσεων, με στόχο τη βελτίωση της χρησιμοποίησης του δικτύου και τη δίκαιη εξυπηρέτηση των κλήσεων [151]. Το πρόβλημα της δικαιοσύνης μπορεί να αντιμετωπιστεί μέσα από διάφορες προσεγγίσεις, οι οποίες διαχωρίζονται είτε με βάση το κριτήριο δικαιοσύνης και τον αλγόριθμο ελέγχου αποδοχής κλήσεων που χρησιμοποιείται είτε με βάση τον τρόπο υπολογισμού και τις μαθηματικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την επίτευξη της δίκαιης λειτουργίας: Στην εργασία [153] τα θέματα δικαιοσύνης στον έλεγχο αποδοχής κλήσεων εξετάζονται ως προς το εύρος ζώνης. Ειδικότερα, προτείνεται η δέσμευση εύρους ζώνης μέσω του αλγορίθμου ελέγχου αποδοχής κλήσεων και η κατανομή

του σε κάθε είδος κλήσης ανάλογα με τις απαιτήσεις της. Στην περίπτωση αυτή οι κλήσεις ταξινομούνται βάσει του ζητούμενου εύρους ζώνης. Μέσα από τη διαδικασία αυτή εξασφαλίζεται η εγγυημένη χρήση τμημάτων εύρους ζώνης που έχουν κατανεμηθεί για τις κλήσεις αυτές. Στη συγκεκριμένη εργασία, αυτή προτείνονται τέσσερα σχήματα ελέγχου αποδοχής κλήσεων που βασίζονται σε μετρήσεις και η επίδοση τους αξιολογείται βάσει της δικαιοσύνης στην εξυπηρέτηση των κλήσεων. Μια άλλη τεχνική δέσμευσης πόρων για το δικαιότερο έλεγχο αποδοχής κλήσεων προτείνεται στην εργασία [154], όπου χρησιμοποιούνται δεσμευμένα τμήματα πόρων για τις δυο κλάσεις υπηρεσιών ευρείας και στενής ζώνης. Με τον τρόπο αυτό ελέγχονται και ρυθμίζονται οι διαφορές στις πιθανότητες μη αποδοχής των κλήσεων οδηγώντας σε αποτελεσματικότερη διαχείριση τους. Εκτός όμως από τη μέθοδο δέσμευσης πόρων έχουν προταθεί τεχνικές κράτησης κλήσεων (call – hold) με σκοπό να μετριαστεί το πρόβλημα της έλλειψης δικαιοσύνης μεταξύ κλήσεων ευρείας και στενής ζώνης λόγω απόδοσης προτεραιότητας στις πρώτες [155].

Από την άλλη πλευρά, όταν για τον έλεγχο αποδοχής κλήσεων χρησιμοποιείται ένας αλγόριθμος SIR – based, τότε για την εγγύηση της δίκαιης εξυπηρέτησης όλων των χρηστών, έχει προταθεί ένας δυναμικός αλγόριθμος δίκαιου καταμερισμού της ισχύος [156]. Επίσης, για τα σχήματα αποδοχής κλήσεων αυτής της κατηγορίας έχουν προταθεί κοινές τεχνικές διαχείρισης ραδιοπόρων με αλγόριθμους κατανομής καναλιών βάσει ισχύος με χρήση οπορτουνιστικού προγραμματισμού (opportunistic scheduling) [157]. Μέσω του αλγορίθμου αυτού παρέχονται πόροι και εγγυήσεις χρήσης τους για τις εφαρμογές πραγματικού χρόνου, δίκαιος προγραμματισμός και αποδίδονται τα κατάλληλα επίπεδα προτεραιότητας. Για την αξιολόγηση της επίδοσης σε θέματα δικαιοσύνης στον αλγόριθμο αυτό χρησιμοποιείται ο δείκτης δικαιοσύνης Jain's (Jain's Fairness Index). Η χρήση του δείκτη αυτού ενδείκνυται επειδή αναφέρεται σε αλγορίθμους κατανομής καναλιών.

Μια άλλη προσέγγιση για την ενσωμάτωση χαρακτηριστικών δικαιοσύνης στους αλγορίθμους ελέγχου αποδοχής κλήσεων έχουμε στις περιπτώσεις όπου ο έλεγχος αποδοχής κλήσεων διαμορφώνεται σαν ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού, του οποίου στόχος είναι η μεγιστοποίηση της χρησιμοποίησης του δικτύου διασφαλίζοντας τη διαφοροποίηση αλλά και τη δικαιοσύνη μεταξύ των χρηστών των διαφόρων κλάσεων υπηρεσιών των χρηστών [158], [159]. Στις περιπτώσεις αυτές, ο δείκτης δικαιοσύνης λειτουργεί σαν περιορισμός στον προσδιορισμό της βέλτιστης πολιτικής αποδοχής. Ο υπολογιζόμενος δείκτης δικαιοσύνης προκύπτει ορίζοντας μια σχέση διαφοράς μεταξύ των πιθανοτήτων μη αποδοχής των υποστηριζόμενων κλάσεων υπηρεσιών. Ο περιορισμός που τίθεται αφορά το γεγονός ότι η διαφορά μεταξύ των πιθανοτήτων μη αποδοχής δε θα πρέπει

να ξεπερνά μια προκαθορισμένη τιμή. Για το ίδιο πρόβλημα σε δίκτυα WiMAX ο έλεγχος αποδοχής κλήσεων αντιμετωπίζεται σαν ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης, για το οποίο προτείνεται μια στρατηγική βελτιστοποίησης με βάση τα έσοδα και με περιορισμούς τη χρησιμότητα και τη δικαιοσύνη [152], [160]. Για την επίλυση του προβλήματος αυτού προτάθηκαν ταχείς υπολογιστικές μέθοδοι μέσω της εφαρμογής ενός greedy αλγορίθμου [152], [160].

Στην εργασία [161], το ζήτημα αντιμετωπίζεται σαν ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης πολλαπλών κριτηρίων και επεκτείνεται με στόχο τη συνολική παροχή QoS. Στην εργασία αυτή, ο προτεινόμενος αλγόριθμος χρησιμοποιεί ένα νευρωνικό δίκτυο Hopfield με σκοπό να καθοριστούν τα βέλτιστα δυνατά επίπεδα QoS για όλες τις κλάσεις υπηρεσιών που μεγιστοποιούν τη χρησιμοποίηση των πόρων μέσα από τη δίκαιη κατανομή τους. Στην περίπτωση αυτή, η δικαιοσύνη εξετάζεται σε σχέση με τον καταμερισμό του εύρους ζώνης προκειμένου να επιτευχθεί η μεγιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης που αφορά τη συνολική χρησιμοποίηση, ικανοποιώντας ταυτόχρονα τους περιορισμούς της χωρητικότητας όσον αφορά το κατανεμημένο ως προς το συνολικά διατιθέμενο εύρος ζώνης.

Μια άλλη προσέγγιση στην επίλυση των ζητημάτων δικαιοσύνης που ανακύπτουν στον έλεγχο αποδοχής κλήσεων σε δίκτυα επικοινωνιών που υποστηρίζουν πολλαπλές κλάσεις υπηρεσιών βασίζεται στη χρήση της θεωρίας παιγνίων. Ειδικότερα, έχει προταθεί η χρήση συνεργατικών και μη συνεργατικών παιγνίων ως μέθοδος επιλογής των παραμέτρων κατωφλίου του σχήματος ελέγχου αποδοχής κλήσεων για δίκτυα κινητών επικοινωνιών CDMA [162]. Το ίδιο πλαίσιο θεωρίας παιγνίων χρησιμοποιείται επίσης για τη δίκαιη και αποτελεσματική κατανομή πόρων σε πολλαπλές κλάσεις υπηρεσιών παρέχοντας εγγυήσεις απόδοσης προτεραιότητας [163]. Επίσης συνεργατικά παίγνια έχουν χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη δίκαιων αλγορίθμων ελέγχου αποδοχής κλήσεων σε δίκτυα με πολλαπλές κλάσεις υπηρεσιών, όπου λαμβάνονται υπ' όψη η αποτελεσματικότητα και η δικαιοσύνη στην εξυπηρέτηση των κλήσεων μέσα από κατάλληλα αξιώματα [164].

Επιπλέον, η θεωρία παιγνίων χρησιμοποιείται στην εργασία [165] για τον ορισμό μιας συνάρτησης τιμολόγησης ενώ η πιθανότητα αποδοχής κλήσεων υπολογίζεται από τη συνάρτηση χρησιμότητας Cobb-Douglas. Η ισορροπία Nash προκύπτει χρησιμοποιώντας τις πιθανότητες αποδοχής ως το όφελος από το παίγνιο. Η δικαιοσύνη στη χρησιμοποίηση των πόρων επιτυγχάνεται όταν έχει επιτευχθεί η ισορροπία Nash. Στην εργασία αυτή, προτείνεται μια ολοκληρωμένη στρατηγική για τη χρησιμοποίηση των πόρων, που ποσοτικοποιείται μέσα από ένα δείκτη δικαιοσύνης ως ο λόγος μεταξύ των πόρων που χρησιμοποιούνται από μια κλάση υπηρεσιών προς το σύνολο των διαθέσιμων πόρων.

4.3. Κριτήρια Αξιολόγησης Επίδοσης

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν τα κριτήρια αξιολόγησης επίδοσης για τα σχήματα αποδοχής κλήσεων. Ειδικότερα, πρόκειται να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα του μηχανισμού ανάθεσης προτεραιότητας μέσα από τον ορισμό κατάλληλου δείκτη. Επιπλέον, εξετάζεται η δικαιοσύνη στην εξυπηρέτηση των κλήσεων μέσα από του ορισμό κατάλληλου κριτηρίου δικαιοσύνης που βασίζεται στις πιθανότητες μη αποδοχής κλήσεων. Τέλος προτείνεται και μια μετρική για την εκτίμηση της διεκπεραιωτικότητας των κλήσεων στο δίκτυο.

4.3.1. Δείκτης Απόδοσης Προτεραιότητας στις Κλάσεις Υπηρεσιών SCPI

Όπως προαναφέρθηκε, τα σύγχρονα δίκτυα επικοινωνιών υποστηρίζουν πολλαπλές κλάσεις υπηρεσιών στις οποίες ταξινομούνται οι διάφορες εφαρμογές. Ένας από τους βασικότερους στόχους των προτεινόμενων σχημάτων ελέγχου αποδοχής κλήσεων είναι η απόδοση επιπέδων προτεραιότητας μέσα από ένα κατάλληλο μηχανισμό στις διάφορες κλάσεις υπηρεσιών βάσει διαφορετικών κριτηρίων κάθε φορά, του τίθενται από το διαχειριστή του δικτύου. Αυτό επιβάλλεται για διάφορους λόγους, ενδεικτικά αναφέρουμε: την ανάγκη για άμεση εξυπηρέτηση των κλήσεων μεταπομπής, τις ειδικές κατηγορίες κλήσεων (όπως κλήσεις πραγματικού χρόνου, κλήσεις εκτάκτου ανάγκης), την ανάγκη διάθεσης περισσότερων πόρων σε κάποιες κλήσεις λόγω μεγαλυτέρων απαιτήσεων QoS, την επίτευξη μεγαλύτερων κερδών για τον πάροχο για την εξυπηρέτηση κλήσεων υψηλής προστιθέμενης αξίας (βιντεοκλήσεις, κλήσεις υπηρεσιών μεταφοράς δεδομένων) και την επίτευξη μεγαλύτερης χρησιμοποίησης πόρων στο δίκτυο. Ο μηχανισμός απόδοσης προτεραιότητας ενισχύει την αποδοχή κλήσεων συγκεκριμένων κλάσεων υπηρεσιών σε αντίθεση με τις κλήσεις που χαρακτηρίζονται ως μικρότερης προτεραιότητας. Η απόδοση προτεραιότητας απεικονίζεται στις πιθανότητες μη αποδοχής κλήσεων κάθε κλάσης υπηρεσίας, αφού οδηγεί σε διαφορές στις πιθανότητες αποδοχής των κλήσεων.

Προκειμένου να μετρήσουμε την αποτελεσματικότητα της απόδοσης σχετικής προτεραιότητας μεταξύ δυο κλάσεων υπηρεσιών χρησιμοποιούμε ένα απλό στον ορισμό μέγεθος που υποδηλώνει το βαθμό της σχετικής προτεραιότητας μεταξύ των κλήσεων δυο κλάσεων υπηρεσιών. Πρόκειται για το δείκτη *SCPI* (Service Class Priority Index) ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της πιθανότητας μη αποδοχής μιας κλήσης χαμηλής προτεραιότητας

$CBP_{low\ priority}$ (Call Blocking Probability low priority) προς την πιθανότητα μη αποδοχής μιας κλήσης υψηλής προτεραιότητας $CBP_{high\ priority}$ (Call Blocking Probability high priority), σύμφωνα με τη σχέση:

$$SCPI = \frac{CBP_{low\ priority}}{CBP_{high\ priority}} = \frac{P_l^B}{P_h^B} > 1 \quad (4.1)$$

Ο δείκτης δείχνει το βαθμό του ανόμοιου χειρισμού των κλήσεων των κλάσεων διαφόρων υπηρεσιών που υποστηρίζονται από το δίκτυο. Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι για την επίτευξη μιας ελάχιστης διάκρισης προτεραιότητας μεταξύ των κλήσεων θα πρέπει η τιμή του δείκτη *SCPI* να ξεπερνά τη μονάδα. Οι υψηλότερες τιμές αναφέρονται σε μεγαλύτερες αποκλίσεις στις τιμές των πιθανοτήτων μη αποδοχής των κλήσεων των διαφόρων κλάσεων υπηρεσιών που υποστηρίζονται από το δίκτυο και αντιστοιχούν σε υψηλότερα επίπεδα προτεραιότητας. Τέλος, θα πρέπει να τονίσουμε ότι η απόδοση προτεραιότητας είναι ένας από τους στόχους σχεδιασμού ενός αποτελεσματικού σχήματος ελέγχου αποδοχής κλήσεων. Αυτό όμως θα πρέπει να συνδυασθεί και με τη δίκαιη εξυπηρέτηση των κλήσεων αποφεύγοντας τις περιπτώσεις όπου κλήσεις κάποιων κατηγοριών μονοπωλούν την εξυπηρέτηση από το δίκτυο, όπως θα δούμε και στη συνέχεια.

4.3.2. Δείκτης Δικαιοσύνης (Fairness Index)

Η απόκλιση στις τιμές των πιθανοτήτων μη αποδοχής συνεπώς είναι επιθυμητή ως ένα επίπεδο για την αναγκαία διάκριση των κλήσεων και την απόδοση της αντίστοιχης προτεραιότητας στην εξυπηρέτηση τους από το δίκτυο. Όμως πολλές φορές όταν οι διαφορές στις πιθανότητες μη αποδοχής των κλήσεων είναι υψηλές εμφανίζονται ζητήματα αδικίας στο χειρισμό συγκεκριμένων κλάσεων υπηρεσιών και την εξυπηρέτηση των κλήσεων. Συγκεκριμένα, υπάρχει περίπτωση οι κλήσεις χαμηλότερης προτεραιότητας να μπλοκάρονται σε πολύ υψηλό βαθμό, ενώ οι κλήσεις υψηλής προτεραιότητας να γίνονται αποδεκτές, λόγω της αποδιδόμενης σε αυτές κατάλληλης προτεραιότητας. Αυτό οδηγεί σε δυσαρέσκεια τους χρήστες που κάνουν κλήσεις που κατηγοριοπούνται ως χαμηλής προτεραιότητας λόγω της μη εξυπηρέτησης τους. Αυτό δημιουργεί σοβαρά προβλήματα και στους τηλεπικοινωνιακούς παρόχους αφού εκτός από τη δυσαρέσκεια των πελατών τους, αντιμετωπίζουν και τη μη ορθολογική διαχείριση των πόρων προς όφελος όλου του δικτύου. Ειδικότερα, όταν δεν έχουμε δίκαιη διαχείριση του φορτίου δεν έχουμε τη βέλτιστη χρησιμοποίηση των πόρων του δικτύου, αλλά και δεν επιτυγχάνουμε υψηλό βαθμό εξυπηρέτησης των κλήσεων [116],[117].

Για την αποφυγή τέτοιων ανεπιθύμητων καταστάσεων απαιτείται ο ορισμός συγκεκριμένων προδιαγραφών δικαιοσύνης, το οποίο μπορεί να γίνει μέσα από τη ποσοτικοποίηση του χαρακτηριστικού αυτού με τη χρήση κατάλληλου δείκτη. Η εισαγωγή του δείκτη δικαιοσύνης καταδεικνύει το γεγονός ότι η δικαιοσύνη στη διαχείριση του τηλεπικοινωνιακού φορτίου είναι ένα μείζον ζήτημα που απασχολεί τόσο τους χρήστες όσο και τους παρόχους. Οι προδιαγραφές δικαιοσύνης που αφορούν τιμές του δείκτη παρέχουν εγγυήσεις ώστε οι τιμές των πιθανοτήτων μη αποδοχής κλήσεων να μη διαφέρουν σε τέτοιο επίπεδο ώστε να προκαλείται μπλοκάρισμα κλήσεων των υποστηριζόμενων κλάσεων υπηρεσιών σε μη αποδεκτό βαθμό [153],[166],[167],[168]. Στην ουσία, προσπαθούμε να επιτύχουμε ένα συγκερασμό μεταξύ της απόδοσης προτεραιότητας μεταξύ των κλάσεων υπηρεσιών αλλά και της δικαιοσύνης στη διαχείριση των κλήσεων των διαφορετικών κλάσεων υπηρεσιών σε συνδυασμό με την αποτελεσματικότερη αξιοποίηση των πόρων του δικτύου [116], [117], [160].

Για την επίτευξη της δικαιοσύνης είναι απαραίτητη είτε η παρακολούθηση της κατανομής πόρων [169] είτε η παρακολούθηση της επιτεύξιμης ποιότητας υπηρεσίας [170]. Όσον αφορά την πρώτη τεχνική, ένας από τους πιο κοινούς δείκτες για τη μέτρηση της δικαιοσύνης στη διαχείριση πόρων είναι ο δείκτης Jain's JFI (Jain's Fairness Index) [171],[172] που αναφέρθηκε προηγουμένως. Ο δείκτης αυτός χρησιμοποιείται για να μετρήσει τη δικαιοσύνη στη διαχείριση πόρων και συγκεκριμένα στην κατανομή τους, αγνοώντας όμως τη διαδικασία αποδοχής κλήσεων. Δηλαδή χρησιμοποιεί ως εξεταζόμενα μεγέθη μονάδες πόρων είτε αυτά είναι κανάλια, είτε μονάδες εύρους ζώνης. Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση της δικαιοσύνης σε θέματα ψηφιακής διέλευσης. Ο δείκτης αυτός όμως δεν είναι κατάλληλος να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση της δικαιοσύνης σε αλγορίθμους αποδοχής κλήσεων που η μελέτη τους και η αξιολόγηση της επίδοσης τους στηρίζεται κατά βάση στις αντίστοιχες πιθανότητες μη αποδοχής κλήσεων που επιτυγχάνονται, δηλαδή σε μεγέθη QoS και όχι στον τρόπο κατανομής των πόρων ανάμεσα στους χρήστες που κάνουν τις κλήσεις των διαφόρων κλάσεων υπηρεσιών.

Για το λόγο αυτό και θα πρέπει να καταφύγουμε στη δεύτερη προσέγγιση όπου η δικαιοσύνη παρακολουθείται μέσω ενός κατάλληλου δείκτη που βασίζεται σε μεγέθη ποιότητας υπηρεσίας. Συνεπώς, είναι αναγκαίος ο ορισμός ενός νέου δείκτη δικαιοσύνης που να στηρίζεται στις πιθανότητες μη αποδοχής κλήσεων:

$$F = \frac{1}{\overline{P_e}^2} \sum_{u=1}^{U} (P_u^B - \overline{P_e})^2 \quad (4.2)$$

όπου P_u^B είναι η πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων κάθε κλάσης υπηρεσιών u που υποστηρίζονται από το δίκτυο σε κάθε κυψέλη και

$$\overline{P_e} = \frac{1}{U}\sum_{u=1}^{U} P_u^B \quad (4.3)$$

όπου $\overline{P_e}$ είναι η μέση τιμή της πιθανότητας μη αποδοχής των κλήσεων όλων των κλάσεων υπηρεσιών σε μια κυψέλη.

Ο προτεινόμενος δείκτης δικαιοσύνης F ορίζεται ως μια μη πεπερασμένη ποσότητα, χωρίς περιορισμό στην τιμή του, που αντιστοιχεί στον τετραγωνικό συντελεστή της απόκλισης της πιθανότητας μη αποδοχής κλήσεων κάθε κλάσης υπηρεσιών [172]. Η τιμή του δείκτη χαρακτηρίζει ως προς το επίπεδο δικαιοσύνης τα μελετούμενα σχήματα, θεωρώντας ότι ένα σχήμα ελέγχου αποδοχής κλήσεων είναι ιδανικά δίκαιο όταν η τιμή του δείκτη είναι $F=0$. Ειδικότερα, για την καλύτερη παρουσίαση αλλά και κατανόηση των αποτελεσμάτων που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια, θα πρέπει να αναφέρουμε ότι η σχέση μεταξύ του δείκτη και του επιπέδου δικαιοσύνης του μελετούμενου αλγορίθμου είναι αντίστροφη, αφού όσο μειώνεται η τιμή του δείκτη τόσο πιο δίκαιος γίνεται ο αλγόριθμος. Ένας αλγόριθμος θεωρείται δίκαιος στις περιπτώσεις όπου οι κλήσεις των υποστηριζόμενων κλάσεων υπηρεσιών δε διαφέρουν σημαντικά, παρέχοντας παράλληλα τα αναγκαία επίπεδα προτεραιότητας. Με τη χρήση αυτού του δείκτη δικαιοσύνης, μια πολιτική που επιδιώκει να μειώσει της τιμή του δείκτη περιορίζει και τις διαφορές των πιθανοτήτων αποδοχής των κλήσεων.

4.3.3. Διεκπεραιωτικότητα κλήσεων (Throughput)

Εκτός όμως από το δείκτη δικαιοσύνης τον οποίο αναφέραμε, τα σχήματα ελέγχου αποδοχής κλήσεων μελετώνται και με βάση την επίδοση τους ως προς τον υπολογισμό της διεκπεραιωτικότητας των κλήσεων στο δίκτυο. Εξαιτίας του περιορισμένου εύρους ζώνης, κάθε προτεινόμενο σχήμα ελέγχου αποδοχής κλήσεων θα πρέπει να είναι σε θέση να διεκπεραιώνει έναν υψηλό αριθμό κλήσεων [166]. Συνεπώς, μια αποτελεσματική πολιτική ελέγχου αποδοχής κλήσεων εκτός από δικαιοσύνη θα πρέπει να εξασφαλίζει και υψηλή χρησιμοποίηση του δικτύου [168]. Το μέγεθος αυτό εκφράζεται από τον αριθμό των κλήσεων που γίνονται αποδεκτές από το δίκτυο και ορίζεται ως εξής:

$$T = \sum_{u=1}^{U} \lambda_u^{-1}\left(1 - P_u^B\right) \quad (4.4)$$

όπου P_u^B είναι η πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων κάθε κλάσης υπηρεσιών u που υποστηρίζεται από το δίκτυο σε κάθε κυψέλη και λ_u είναι ο αντίστοιχος ρυθμός αφίξεων των κλήσεων στην κυψέλη.

4.4. Αριθμητικά Αποτελέσματα και Ανάλυση

Στην ενότητα αυτή, θα μελετηθεί η επίδοση του προτεινόμενου πιθανοτικού αλγορίθμου ελέγχου αποδοχής κλήσεων που παρουσιάστηκε στη προηγούμενη ενότητα και θα αξιολογηθεί με βάση τα κριτήρια και τους δείκτες που προαναφέραμε. Με τον τρόπο αυτό, θα ολοκληρωθεί η ανάλυση της πιθανοτικής προσέγγισης και θα παρουσιαστούν τα πλεονεκτήματα της σε όλα τα σημεία. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται θα αναλυθούν με βάση τη λογική των δεικτών αλλά και την επίτευξη των στόχων σχεδιασμού που τέθηκαν κατά την ανάπτυξη του πιθανοτικού μοντέλου. Για την καλύτερη παρουσίαση της επίδοσης του πιθανοτικού σχήματος ελέγχου αποδοχής κλήσεων τα αποτελέσματα για τους μελετούμενους δείκτες παρουσιάζονται για δυο αντιπροσωπευτικές κλάσεις υπηρεσιών, πραγματικού χρόνου μη ανεκτής καθυστέρησης και μη πραγματικού χρόνου ανεκτής καθυστέρησης [93], [116], [117].

Τα αριθμητικά αποτελέσματα στοχεύουν στο να καταδείξουν την επίδραση των παραμέτρων στην επίδοση του προτεινόμενου πιθανοτικού σχήματος αποδοχής κλήσεων σε σχέση με τους προαναφερθέντες δείκτες απόδοσης προτεραιότητας, δικαιοσύνης και διεκπεραιωτικότητας κάτω από διάφορες συνθήκες μεταβαλλόμενου φορτίου και κίνησης κάθε είδους. Για τον υπολογισμό των δεικτών θα χρησιμοποιήσουμε τις τιμές των παραμέτρων τηλεπικοινωνιακής κίνησης που δόθηκαν στα αριθμητικά αποτελέσματα για το απλό πιθανοτικό σχήμα ελέγχου αποδοχής κλήσεων στην ενότητα 3.6.1.4. Ειδικότερα, θα επικεντρωθούμε στην επίδραση της επιβαλλόμενης πιθανότητας αποδοχής στο μηχανισμό απόδοσης προτεραιότητας και στη γενικότερη επίδοση του σχήματος με βάση τους παραπάνω δείκτες. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούμε τα αποτελέσματα των πιθανοτήτων μη αποδοχής κλήσεων που υπολογίστηκαν στην προηγούμενη ενότητα τόσο από τους αναλυτικούς τύπους όσο και από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, που προέκυψαν από το πρόγραμμα προσομοίωσης διακριτών καταστάσεων –συμβάντων– που ανεπτύχθη για να επιβεβαιωθεί η ακρίβεια του πιθανοτικού μοντέλου. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τις τιμές των δεικτών αξιολόγησης επίδοσης συμβολίζονται με '□' στα σχήματα. Παράλληλα στα αποτελέσματα έχει σχεδιαστεί και η επίδοση του παραδοσιακού

αλγορίθμου – μη πιθανοτικού αλγορίθμου – , ως προς τους μελετούμενους δείκτες, προκειμένου να συγκριθεί η απόδοση του με το πιθανοτικό σχήμα, αλλά και να υπάρχει ένα μέτρο της σχετικής επιτεύξιμης βελτίωσης για καθένα χαρακτηριστικό.

Για το μελετούμενο σχήμα έχουν χρησιμοποιηθεί τρεις διαφορετικές ομάδες για τις επιβαλλόμενες τιμές πιθανότητας αποδοχής $f_{n,1}$, ώστε να καταδειχθεί η επίδραση της πιθανοτικής προσέγγισης, αλλά και η ευαισθησία του σχήματος ως προς τις μεταβολές της πιθανοτικής παραμέτρου σε σχέση με τους δείκτες αξιολόγησης επίδοσης. Η διαμόρφωση των τριών ομάδων γίνεται με βάση τις παραμέτρους f^a και f^d όπως ορίζονται στη σχέση 3.31. Η παράμετρος f^d τέθηκε ίση με 0.9, 0.8 και 0.7 διαδοχικά και η παράμετρος f^a ίση με 0.1, 0.2 και 0.3 αντίστοιχα. Αυτό έγινε προκειμένου να γίνει αντιστάθμιση ως προς την έλλειψη δικαιοσύνης με αναφορά τις κλήσεις μη πραγματικού χρόνου, έτσι ώστε η μείωση της αποδοχής τους στις καταστάσεις κάτω από το κατώφλι να αντισταθμίζεται από μια ισοδύναμη αύξηση πάνω από το κατώφλι. Για τις ανάγκες της αξιολόγησης επίδοσης χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες ομάδες παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν και για τον υπολογισμό των πιθανοτήτων μη αποδοχής κλήσεων.

Στα παρακάτω αποτελέσματα, μπορούμε να δούμε την ευαισθησία του προτεινόμενου σχήματος ως προς τα χαρακτηριστικά της απόδοσης προτεραιότητας, της δικαιοσύνης αλλά και της διεκπεραιωτικότητας στις μεταβολές της πιθανοτικής παραμέτρου, αλλά και την αλληλεπίδραση των τιμών των διαφόρων παραμέτρων φορτίου σε σχέση με τη συνολική επίδοση του πιθανοτικού σχήματος. Τέλος, θα παρουσιαστούν τα βασικά συμπεράσματα από μια συνολική αξιολόγηση βάσει των κριτηρίων και των δεικτών, καταδεικνύοντας παράλληλα την ανωτερότητα της πιθανοτικής προσέγγισης.

4.4.1. Αξιολόγηση Πιθανοτικού Ελέγχου Αποδοχής Κλήσεων με τον SCPI

Αρχικά θα παρουσιάσουμε τα αριθμητικά αποτελέσματα για το δείκτη απόδοσης προτεραιότητας, προκειμένου να δείξουμε την επίδραση των μεταβολών της πιθανοτικής παραμέτρου στο μηχανισμό απόδοσης προτεραιότητας. Για τον υπολογισμό των σχετικών τιμών και την αξιολόγηση της λειτουργίας του μηχανισμού απόδοσης προτεραιότητας έχουμε υιοθετήσει την ανάπτυξη δυο βασικών και ενδεικτικών σεναρίων που βασίζονται στη συνολική κίνηση του δικτύου και παρέχουν αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα για την επίδοση του σχήματος.

Συγκεκριμένα, τα δυο σενάρια κατηγοριοποιούνται με βάση το συνολικό άθροισμα των εντάσεων κίνησης για τις δυο κλάσεις υπηρεσιών που προσομοιώνονται. Αυτό έγινε διότι ο πιθανοτικός αλγόριθμος PBRS και η δομή λειτουργίας του βασίζει την απόφαση αποδοχής στο συνολικό αριθμό των κλήσεων που είναι σε εξέλιξη χωρίς να γίνεται διάκριση μεταξύ της κατανομής τους ανά κλάση υπηρεσιών. Το πρώτο σενάριο (Περίπτωση Ι) αναφέρεται σε συνδυασμούς φορτίων που ανταποκρίνονται σε χαμηλά και μέτρια φορτία και το δεύτερο (Περίπτωση ΙΙ) αναφέρεται σε συνδυασμούς που αντιστοιχούν σε υψηλά φορτία τηλεπικοινωνιακής κίνησης.

Στον παρακάτω πίνακα, μπορούμε να δούμε τις τιμές του δείκτη *SCPI* για τις δυο βασικές περιπτώσεις: συνολικού φορτίου, όπου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τόσο για την παραδοσιακή όσο και για την πιθανοτική προσέγγιση:

Πίνακας 4.1: Τιμές δείκτη απόδοσης προτεραιότητας SCPI

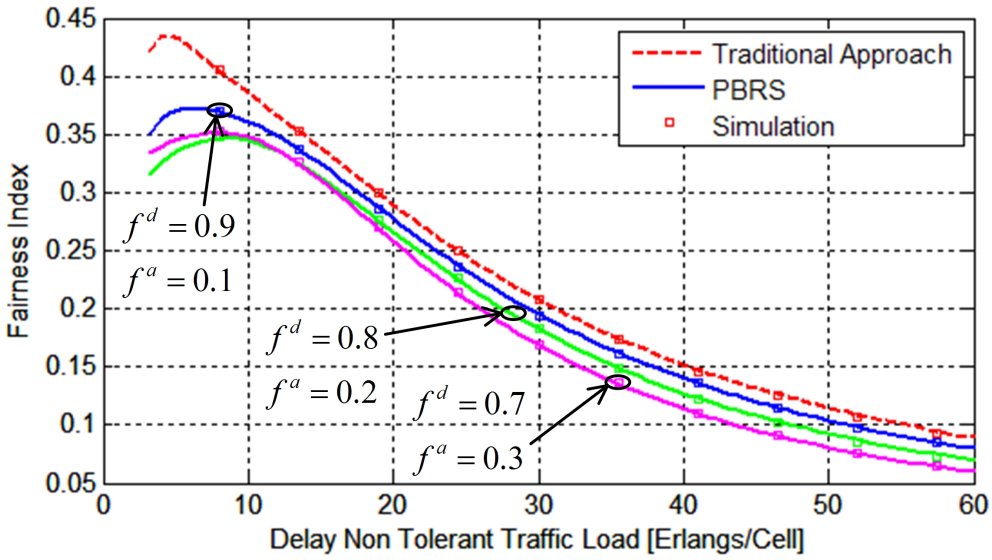
Συνθήκες φορτίου κίνησης		SCPI			
		Παραδοσιακή προσέγγιση	Πιθανοτική Προσέγγιση		
			$f^d = 0.9$, $f^a = 0.1$	$f^d = 0.8$, $f^a = 0.2$	$f^d = 0.7$, $f^a = 0.3$
Περίπτωση Ι	ϱ_1=20, ϱ_2=8.75	9.1	13.4	27.1	79.4
	ϱ_1=35, ϱ_2=8.75	3.8	4	4.6	5.8
	ϱ_1=30, ϱ_2=20	2.8	2.9	3	3.2
Περίπτωση ΙΙ	ϱ_1=50, ϱ_2=8.75	2.8	2.8	2.8	3
	ϱ_1=30, ϱ_2=35	2.1	2.1	2	2
	ϱ_1=30, ϱ_2=50	1.7	1.7	1.7	1.6

Με βάση τα αποτελέσματα που περιγράφονται, διαπιστώνεται ότι ο πιθανοτικός έλεγχος αποδοχής κλήσεων ενισχύει γενικά τη δυνατότητα απόδοσης προτεραιότητας. Αυτό άλλωστε φάνηκε και από τα αποτελέσματα στο προηγούμενο κεφάλαιο όπου μελετήθηκαν οι πιθανότητες μη αποδοχής κλήσεων. Ειδικότερα, στην πρώτη περίπτωση όπου έχουμε συνδυασμούς χαμηλών και μέτριων φορτίων παρατηρούμε ότι με την εφαρμογή χαμηλότερων τιμών για την παράμετρο f^d έχουμε βελτίωση της απόδοσης του μηχανισμού προτεραιότητας και επίτευξη υψηλότερων τιμών για το δείκτη *SCPI*. Από την άλλη, στη δεύτερη περίπτωση όπου έχουμε υψηλά φορτία παρατηρούμε ότι η λειτουργία του μηχανισμού προτεραιότητας διατηρείται, αφού ο αλγόριθμος δίνει τη δυνατότητα

διάκρισης των κλάσεων υπηρεσιών, παρέχοντας προτεραιότητα ακόμα και υπό συνθήκες αυξημένης τηλεπικοινωνιακής κίνησης. Εδώ όμως θα πρέπει να σημειωθεί, ότι ο σχολιασμός της επίδοσης δε πρέπει να γίνεται μεμονωμένα ως προς ένα κριτήριο αλλά συνολικά, όπως θα δούμε σε επόμενη ενότητα με σκοπό η κρίση να γίνεται με βάση όλες τις παραμέτρους.

4.4.2. Αξιολόγηση Πιθανοτικού Ελέγχου Αποδοχής Κλήσεων με το Δείκτη Δικαιοσύνης

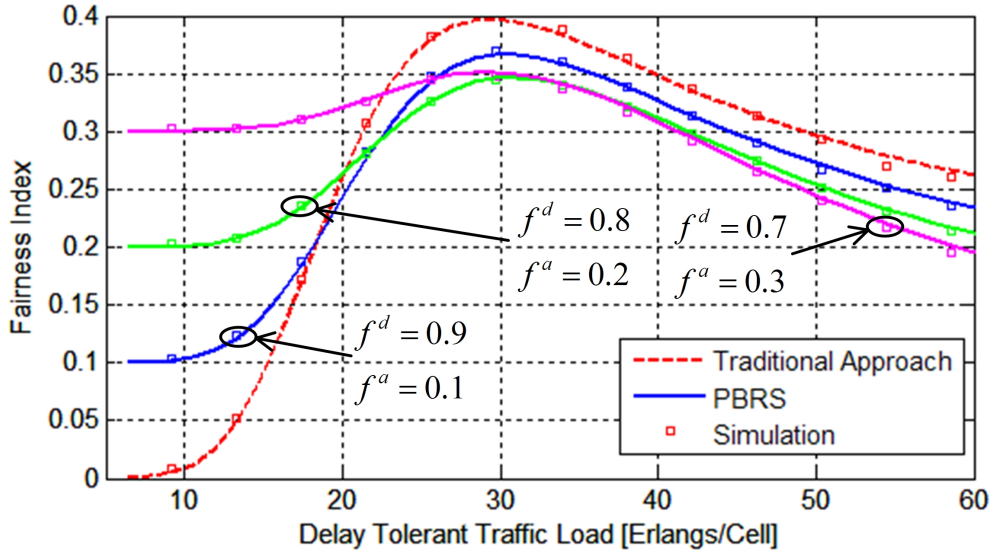
Οι τιμές του δείκτη δικαιοσύνης, αλλά και η εξάρτηση από τις τιμές της πιθανοτικής παραμέτρου $f_{n,1}$ για το απλό σχήμα πιθανοτικού ελέγχου αποδοχής κλήσεων, κάτω από μεταβαλλόμενο φορτίο πραγματικού χρόνου (μη ανεκτής καθυστέρησης) και μη πραγματικού χρόνου (ανεκτής καθυστέρησης), απεικονίζονται στα παρακάτω σχήματα 4.1 και 4.2, αντίστοιχα. Παράλληλα στα δύο σχήματα έχει σχεδιαστεί και η επίδοση του αντίστοιχου δείκτη δικαιοσύνης του παραδοσιακού αλγορίθμου – μη πιθανοτικού – , προκειμένου να συγκριθούν οι αποδόσεις του, ώστε να υπάρχει παράλληλα και ένα μέτρο της σχετικής επιτεύξιμης βελτίωσης. Υπενθυμίζεται επίσης ότι στα σχήματα παρουσιάζονται επίσης και τα αντίστοιχα αποτελέσματα του δείκτη με βάση τις τιμές που προέκυψαν για τις πιθανότητες μη αποδοχής κλήσεων από τις προσομοιώσεις του προτεινόμενου αλγορίθμου.



Σχήμα 4.1: Δείκτης Δικαιοσύνης συναρτήσει φορτίου πραγματικού χρόνου για διάφορες τιμές του ζεύγους παραμέτρων f^d και f^a.

Όπως παρατηρούμε από το σχήμα 4.1, ο δείκτης δικαιοσύνης του πιθανοτικού σχήματος εμφανίζεται βελτιωμένος σε σχέση με την παραδοσιακή προσέγγιση ελέγχου

αποδοχής κλήσεων. Επιπλέον, παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται το φορτίο μη ανεκτής καθυστέρησης η τιμή του δείκτη μειώνεται, που αποτελεί ένδειξη ότι η διαχείριση και εξυπηρέτηση των κλήσεων γίνεται πιο δίκαια. Όσον αφορά την ευαισθησία της δικαιοσύνης του σχήματος ελέγχου αποδοχής κλήσεων στις τιμές της πιθανοτικής παραμέτρου αποδοχής διαπιστώνεται ότι με τη χρήση χαμηλότερων τιμών κάτω από το κατώφλι και αντίστοιχα υψηλότερων πάνω από αυτό έχουμε τη βελτίωση του δείκτη δικαιοσύνης. Αυτό οφείλεται καθαρά στη πιθανοτική φύση του προτεινόμενου αλγορίθμου, αφού εκτός από την επίτευξη χαμηλότερων τιμών πιθανοτήτων μη αποδοχής, όπως είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, επιτυγχάνει και την άμβλυνση των διαφορών μεταξύ τους, επιτυγχάνοντας δικαιότερη εξυπηρέτηση των κλήσεων όλων των κλάσεων υπηρεσιών που υποστηρίζονται από το δίκτυο.



Σχήμα 4.2: Δείκτης Δικαιοσύνης συναρτήσει φορτίου μη πραγματικού χρόνου για διάφορες τιμές του ζεύγους παραμέτρων f^d και f^a.

Ανάλογα συμπεράσματα εξάγονται και για την περίπτωση των τιμών του δείκτη δικαιοσύνης υπό συνθήκες μεταβαλλόμενου φορτίου ανεκτής καθυστέρησης. Ειδικότερα, παρατηρούμε ότι οι τιμές του δείκτη δικαιοσύνης, στις καταστάσεις χαμηλού φορτίου καθορίζονται από τις τιμές των πιθανοτικών παραμέτρων αποδοχής κλήσεων. Ο δείκτης λαμβάνει τη μέγιστη τιμή σε μέτριες τιμές φορτίου, που οφείλεται στο γεγονός ότι στις καταστάσεις αυτές έχουμε την επίτευξη των μέγιστων διαφορών στις πιθανότητες μη αποδοχής κλήσεων, κάτι που επαληθεύεται από τα αποτελέσματα στην ενότητα 3.6.1.4 στο προηγούμενο κεφάλαιο. Επιπλέον, διαπιστώνεται ότι με την υιοθέτηση της πιθανοτικής προσέγγισης βελτιώνεται η δικαιοσύνη του σχήματος. Σημειώνεται επίσης ότι και σε αυτή την περίπτωση, με τη χρήση χαμηλότερων τιμών κάτω από το κατώφλι και αντίστοιχα

υψηλότερων πάνω από αυτό έχουμε τη βελτίωση του δείκτη δικαιοσύνης. Είναι πολύ σημαντικό να τονίσουμε ότι η επίδοση δικαιοσύνης μπορεί να ελεγχθεί με την κατάλληλη επιλογή στην τιμή των παραμέτρων του πιθανοτικού σχήματος.

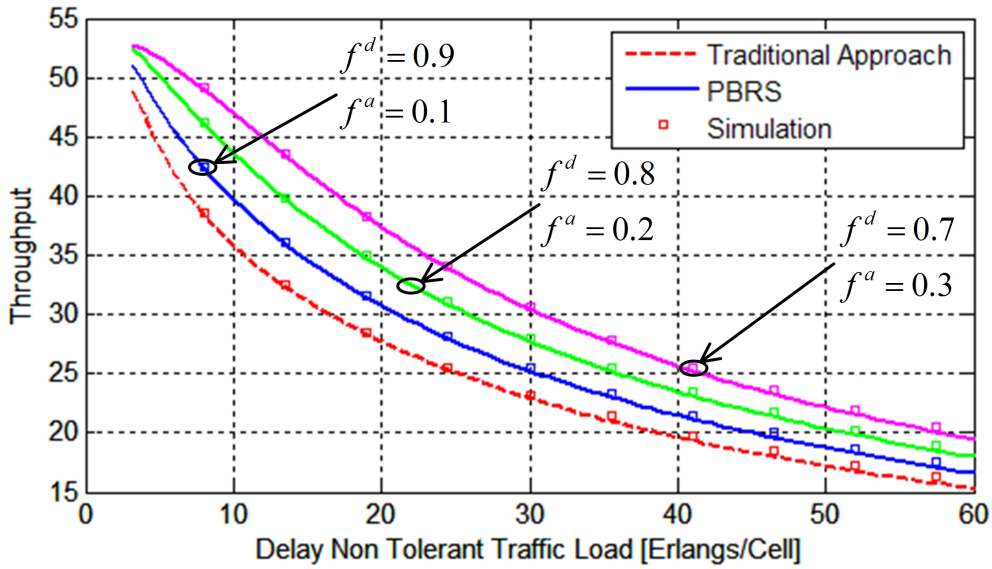
Τέλος, στον παρακάτω πίνακα 4.2 παρουσιάζονται οι τιμές του δείκτη δικαιοσύνης που επιτυγχάνονται για τις καταστάσεις φορτίου των δυο σεναρίων, τα οποία θα χρησιμοποιήσουμε για την αξιολόγηση του αλγορίθμου. Όπως παρατηρούμε από τις τιμές του πίνακα 4.2, σε συνδυασμό με της τιμές του πίνακα 4.1 για το δείκτη προτεραιότητας, διαπιστώνεται ότι η βελτίωση του δείκτη δικαιοσύνης σε συνδυασμό με την αύξηση του φορτίου στο δίκτυο επιτυγχάνεται, διατηρώντας παράλληλα την αποτελεσματικότητα του μηχανισμού απόδοσης προτεραιότητας, καθώς για τις μελετούμενες περιπτώσεις οι τιμές του δείκτη *SCPI* είναι πάνω από τη μονάδα. Το χαρακτηριστικό αυτό αποτελεί και το βασικό πλεονέκτημα του πιθανοτικού αλγορίθμου PBRS, που οφείλεται στο πιθανοτικό πλαίσιο που υιοθετήθηκε στη λειτουργία του αλγορίθμου. Επίσης από τις τιμές του δείκτη στις συνθήκες των δυο σεναρίων καταδεικνύεται η επιτεύξιμη βελτίωση σε σχέση με τη παραδοσιακή προσέγγιση με την χρήση των αντίστοιχων πιθανοτικών παραμέτρων. Επίσης από τους πίνακες μπορούμε να δούμε και τις αντίστοιχες οριακές τιμές των πιθανοτικών παραμέτρων για τη βελτίωση της δικαιοσύνης. Ειδικότερα, σαν παράδειγμα έχουμε την πρώτη περίπτωση, όπου οι τιμές $f^d = 0.8$ και $f^a = 0.2$ αποτελούν το κατάλληλο ζεύγος των οριακών τιμών για τις συνιστώσες της πιθανοτικής παραμέτρου όπου επιτυγχάνεται η μέγιστη βελτίωση της δικαιοσύνης στην εξυπηρέτηση των κλήσεων.

Πίνακας 4.2: Τιμές Δείκτη Δικαιοσύνης

Συνθήκες φορτίου κίνησης		Δείκτης Δικαιοσύνης			
		Παραδοσιακή προσέγγιση	Πιθανοτική Προσέγγιση		
			$f^d = 0.9$, $f^a = 0.1$	$f^d = 0.8$, $f^a = 0.2$	$f^d = 0.7$, $f^a = 0.3$
Περίπτωση I	ϱ_1=20, ϱ_2=8.75	0.26	0.25	0.26	0.32
	ϱ_1=35, ϱ_2=8.75	0.38	0.35	0.34	0.34
	ϱ_1=30, ϱ_2=20	0.29	0.27	0.26	0.25
Περίπτωση II	ϱ_1=50, ϱ_2=8.75	0.3	0.27	0.25	0.24
	ϱ_1=30, ϱ_2=35	0.18	0.17	0.15	0.14
	ϱ_1=30, ϱ_2=50	0.11	0.1	0.09	0.08

4.4.3. Αξιολόγηση Πιθανοτικού Ελέγχου Αποδοχής Κλήσεων με το Δείκτη Διεκπεραιωτικότητας

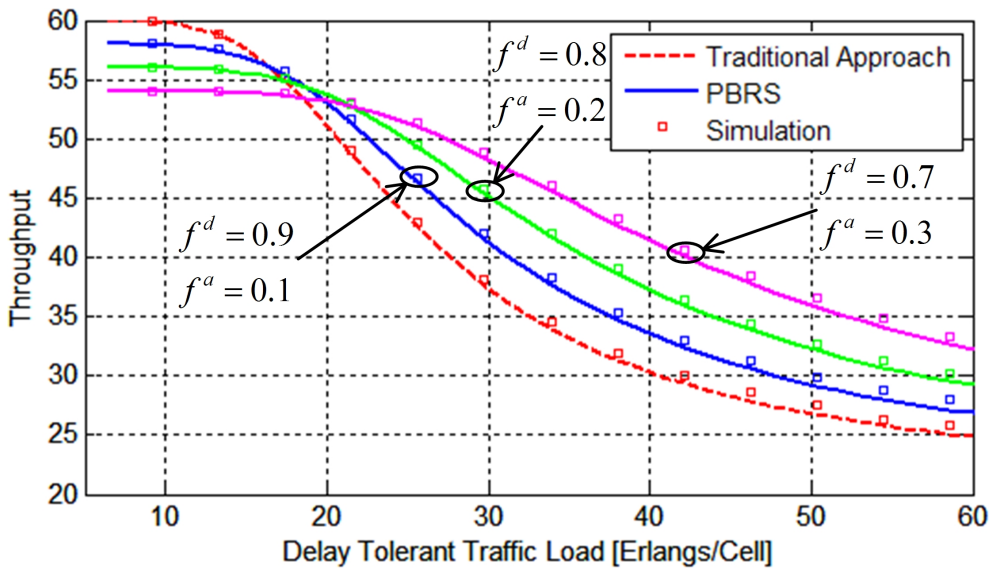
Στη συνέχεια, η επίδοση του σχήματος πιθανοτικού ελέγχου αποδοχής κλήσεων αξιολογείται με βάση το δείκτη διεκπεραιωτικότητας. Οι τιμές αλλά και η εξάρτηση της διεκπεραιωτικότητας κλήσεων για διαφορετικές τιμές της πιθανοτικής παραμέτρου $f_{n,1}$ απεικονίζονται στο σχήμα 4.3 για μεταβαλλόμενο φορτίο πραγματικού χρόνου (μη ανεκτής καθυστέρησης) και στο σχήμα 4.4 για μεταβαλλόμενο φορτίο μη πραγματικού χρόνου (ανεκτής καθυστέρησης). Παράλληλα στα δύο σχήματα έχει σχεδιαστεί και η επίδοση του δείκτη διεκπεραιωτικότητας του παραδοσιακού αλγορίθμου – μη πιθανοτικού – , προκειμένου να συγκριθούν οι αποδόσεις του ώστε να υπάρχει παράλληλα ένα μέτρο της σχετικής επιτεύξιμης βελτίωσης. Επίσης στα σχήματα παρουσιάζονται και τα αντίστοιχα αποτελέσματα της προσομοίωσης του προτεινόμενου αλγορίθμου.



Σχήμα 4.3: Δείκτης Διεκπεραιωτικότητας συναρτήσει φορτίου πραγματικού χρόνου για διάφορες τιμές του ζεύγους παραμέτρων f^d και f^a.

Όπως είναι προφανές και από τα δυο σχήματα 4.3 και 4.4, ο αριθμός των κλήσεων που γίνονται αποδεκτές προς διεκπεραίωση στο δίκτυο μειώνεται όσο αυξάνεται το τηλεπικοινωνιακό φορτίο. Λαμβάνοντας υπόψη τη σχέση (4.4), η μείωση των κλήσεων που εισέρχονται στο δίκτυο και διεκπεραιώνονται οφείλεται στην αύξηση των πιθανοτήτων μη αποδοχής κλήσεων. Όμως παρατηρούμε ότι με την πιθανοτική προσέγγιση που έχουμε στον αλγόριθμο PBRS επιτυγχάνουμε βελτιωμένη διεκπεραιωτικότητα σε σχέση με τη παραδοσιακή προσέγγιση για κάθε είδος μεταβαλλόμενου φορτίου.

Στο σημείο αυτό, θα πρέπει να αναφέρουμε ότι εξετάζοντας την επίδραση του ζεύγους τιμών f^d και f^a, διαπιστώνεται ότι με τη χρήση χαμηλότερων τιμών για την παράμετρο f^d κάτω από το κατώφλι και υψηλότερων τιμών για την f^a πάνω από το κατώφλι αντίστοιχα, οδηγούμαστε στην επίτευξη υψηλότερης διεκπεραιωτικότητας κλήσεων. Στο σχήμα 4.4, παρατηρούμε ότι οι αρχικές τιμές διεκπεραιωτικότητας για χαμηλά φορτία μη πραγματικού χρόνου ακολουθούν αντίστροφη λογική. Αυτό βέβαια αυτό οφείλεται στις επιβαλλόμενες πιθανότητες αποδοχής, όπως περιγράφηκε στην ενότητα 3.6.1.4. Όσο αυξάνεται όμως το φορτίο μη πραγματικού χρόνου αυξάνεται η διεκπεραιωτικότητα του πιθανοτικού αλγορίθμου, επιτυγχάνοντας σημαντική βελτίωση σε σχέση με την παραδοσιακή προσέγγιση. Η γενική τάση πάντως είναι ότι η χρήση της πιθανοτικής προσέγγισης μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές βελτιώσεις σε θέματα διεκπεραιωτικότητας. Η επίτευξη του στόχου της υψηλής διεκπεραιωτικότητας είναι πολύ σημαντική στο σχεδιασμό του αλγορίθμου ελέγχου αποδοχής κλήσεων, διότι με τη πιθανοτική προσέγγιση, εκτός από τη μείωση των πιθανοτήτων μη αποδοχής κλήσεων, πετυχαίνουμε την υψηλότερη χρησιμοποίηση των πόρων του δικτύου και την εξυπηρέτηση μεγαλυτέρου αριθμού χρηστών.



Σχήμα 4.4: Δείκτης Διεκπεραιωτικότητας συναρτήσει φορτίου πραγματικού χρόνου για διάφορες τιμές του ζεύγους παραμέτρων f^d και f^a.

Τέλος, στον παρακάτω πίνακα 4.3, παρουσιάζονται οι τιμές του δείκτη διεκπεραιωτικότητας που επιτυγχάνονται για τις καταστάσεις φορτίου των δυο σεναρίων, τα οποία χρησιμοποιούμε για την αξιολόγηση του αλγορίθμου. Όπως παρατηρούμε από τις τιμές του πίνακα 4.3, σε συνδυασμό με τις τιμές του πίνακα 4.1 για το δείκτη προτεραιότητας, διαπιστώνεται ότι η βελτίωση του δείκτη διεκπεραιωτικότητας σε

συνδυασμό με την αύξηση του φορτίου στο δίκτυο επιτυγχάνεται διατηρώντας παράλληλα την αποτελεσματικότητα του μηχανισμού απόδοσης προτεραιότητας, καθώς για τις μελετούμενες περιπτώσεις οι τιμές του δείκτη *SCPI* είναι πάνω από τη μονάδα. Επιπλέον, διαπιστώνεται ότι σε όλες τις συνθήκες, η επίδοση της πιθανοτικής προσέγγισης είναι ανώτερη σε σχέση με την παραδοσιακή, επιτυγχάνοντας υψηλότερη διεκπεραιωτικότητα κλήσεων. Φυσικά και εδώ μπορούμε να διαπιστώσουμε σε ποιες τιμές των παραμέτρων μπορούμε να πετύχουμε τις βέλτιστες τιμές των δεικτών σε σχέση πάντα και με τους άλλους δείκτες απόδοσης που εξετάζουμε.

Πίνακας 4.3: Τιμές Διεκπεραιωτικότητας

Συνθήκες φορτίου κίνησης		Διεκπεραιωτικότητα			
		Παραδοσιακή προσέγγιση	Πιθανοτική Προσέγγιση		
			$f^d = 0.9$, $f^a = 0.1$	$f^d = 0.8$, $f^a = 0.2$	$f^d = 0.7$, $f^a = 0.3$
Περίπτωση I	ρ_1=20, ρ_2=8.75	51	53	54	53
	ρ_1=35, ρ_2=8.75	33	37	41	45
	ρ_1=30, ρ_2=20	28	30	34	37
Περίπτωση II	ρ_1=50, ρ_2=8.75	27	29	32	36
	ρ_1=30, ρ_2=35	21	23	26	28
	ρ_1=30, ρ_2=50	17	19	20	22

4.4.4. Συνδυαστική Αξιολόγηση Πιθανοτικού Ελέγχου Αποδοχής Κλήσεων

Με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τους δείκτες επίδοσης ως προς τα κριτήρια της απόδοσης προτεραιότητας, της δικαιοσύνης και της διεκπεραιωτικότητας θα προχωρήσουμε σε μια συνδυαστική και συνολική αξιολόγηση του μοντέλου πιθανοτικού ελέγχου αποδοχής κλήσεων. Η συγκριτική αξιολόγηση θα βασιστεί, ως επί το πλείστον, στις τιμές των δεικτών επίδοσης για τα δυο μελετούμενα σενάρια, τα οποία επελέγησαν ώστε να καταδείξουν τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του προτεινόμενου καινοτόμου αλγορίθμου ελέγχου αποδοχής κλήσεων, κάτω από διάφορες συνθήκες τηλεπικοινωνιακής κίνησης. Η αξιολόγηση αυτή θα βοηθήσει στην ορθότερη παρουσίαση των πλεονεκτημάτων της

πιθανοτικής προσέγγισης, ώστε να εξεταστεί η επίδραση σε όλους τους κρίσιμους παράγοντες σχεδιασμού ενός εύρωστου σχήματος ελέγχου αποδοχής κλήσεων.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που παρατίθενται στους πίνακες 4.1, 4.2 και 4.3, παρατηρούμε ότι η πιθανοτική προσέγγιση, όπως εφαρμόζεται μέσα από τον αλγόριθμο PBRS, προσφέρει σημαντικά βελτιωμένες δυνατότητες και απόδοση στον έλεγχο αποδοχής κλήσεων. Ειδικότερα, η πιθανοτική προσέγγιση ευνοεί γενικά τον μηχανισμό απόδοσης προτεραιότητας, όπως φαίνεται άλλωστε από τις υψηλές τιμές του δείκτη *SCPI* ελέγχοντας καλύτερα τα επίπεδα προτεραιότητας, χωρίς όμως να μετριάζει τη δικαιοσύνη στην εξυπηρέτηση των κλήσεων. Επίσης, ο προτεινόμενος αλγόριθμος παρουσιάζει σημαντικά βελτιωμένη επίδοση ως προς τις πιθανότητες μη αποδοχής κλήσεων, όπως είδαμε και στην ενότητα 3.6.1.4 στο προηγούμενο κεφάλαιο. Σημαντικά βελτιωμένες εμφανίζονται και οι επιδόσεις της πιθανοτικής προσέγγισης και ως προς τη διεκπεραιωτικότητα των κλήσεων, αφού έχουμε τη δυνατότητα εξυπηρέτησης περισσότερων κλήσεων ως απόρροια και των χαμηλότερων πιθανοτήτων μη αποδοχής των κλήσεων.

Προκειμένου να έχουμε μια καλύτερη εικόνα των ωφελειών που προκύπτουν από τον πιθανοτικό έλεγχο αποδοχής κλήσεων θα δώσουμε στους παρακάτω πίνακες 4.4, 4.5 και 4.6 τα κέρδη σε ποσοστιαία κλίμακα ως προς τις τιμές των τριών αυτών κριτηρίων για τα δυο σενάρια κίνησης που χρησιμοποιήσαμε μέχρι τώρα. Η σύγκριση θα γίνει με αναφορά στην παραδοσιακή προσέγγιση στον έλεγχο αποδοχής κλήσεων, όπου υπενθυμίζουμε ότι δεν έχουμε χρήση πιθανότητας στις μεταβάσεις από κατάσταση σε κατάσταση. Όλα τα ποσοστά έχουν υπολογιστεί με βάση τις πιθανότητες μη αποδοχής που δίνονται στην ενότητα 3.6.1.4 ως το % κέρδος σε σχέση με την παραδοσιακή –μη πιθανοτική– προσέγγιση. Μέσα από τους πίνακες αυτούς θα δούμε την επίδραση των πιθανοτικών παραμέτρων στους δείκτες επίδοσης, εντοπίζοντας παράλληλα και τις οριακές τιμές για τις παραμέτρους σε σχέση με την επιτεύξιμη βελτίωση κάθε φορά.

Πίνακας 4.4: Μεταβολή Δείκτη SCPI

Συνθήκες φορτίου κίνησης		Μεταβολή SCPI (%)		
		$f^d = 0.9 \;\; f^a = 0.1$	$f^d = 0.8 \;\; f^a = 0.2$	$f^d = 0.7 \;\; f^a = 0.3$
Περίπτωση I	ϱ_1=20, ϱ_2=8.75	47	198	773
	ϱ_1=35, ϱ_2=8.75	5	21	53
	ϱ_1=30, ϱ_2=20	4	7	14
Περίπτωση II	ϱ_1=50, ϱ_2=8.75	0	0	7
	ϱ_1=30, ϱ_2=35	0	-5	-5
	ϱ_1=30,ϱ_2=50	0	0	-6

Πίνακας 4.5: Ποσοστιαία Βελτίωση Δείκτη Δικαιοσύνης

Συνθήκες φορτίου κίνησης		Μεταβολή Δείκτη Δικαιοσύνης (%)		
		$f^d = 0.9\ f^a = 0.1$	$f^d = 0.8\ f^a = 0.2$	$f^d = 0.7\ f^a = 0.3$
Περίπτωση I	ϱ_1=20, ϱ_2=8.75	4	0	-23
	ϱ_1=35, ϱ_2=8.75	8	11	11
	ϱ_1=30, ϱ_2=20	7	10	14
Περίπτωση II	ϱ_1=50, ϱ_2=8.75	10	17	20
	ϱ_1=30, ϱ_2=35	6	17	22
	ϱ_1=30,ϱ_2=50	9	18	27

Πίνακας 4.6: Ποσοστιαία Βελτίωση Δείκτη Διεκπεραιωτικότητας

Συνθήκες φορτίου κίνησης		Μεταβολή Δείκτη Διεκπεραιωτικότητας (%)		
		$f^d = 0.9\ f^a = 0.1$	$f^d = 0.8\ f^a = 0.2$	$f^d = 0.7\ f^a = 0.3$
Περίπτωση I	ϱ_1=20, ϱ_2=8.75	4	6	4
	ϱ_1=35, ϱ_2=8.75	12	24	36
	ϱ_1=30, ϱ_2=20	7	21	32
Περίπτωση II	ϱ_1=50, ϱ_2=8.75	7	19	33
	ϱ_1=30, ϱ_2=35	10	24	33
	ϱ_1=30,ϱ_2=50	12	18	29

Όπως βλέπουμε μέσα από τους τρεις πίνακες, ο αλγόριθμος PBRS ενισχύει σημαντικά το μηχανισμό απόδοσης προτεραιότητας, ενώ με τη χρήση κατάλληλων τιμών για τις παραμέτρους f^d κάτω από το κατώφλι και f^a πάνω από το κατώφλι μπορεί να επιτευχθεί σημαντική βελτίωση σε θέματα δικαιοσύνης και διεκπεραιωτικότητας. Η σημαντικά βελτιωμένη απόδοση μπορεί να καταδειχθεί μέσα από συγκεκριμένα παραδείγματα από τα σενάρια κίνησης που επελέγησαν. Για παράδειγμα, αν εξετάσουμε την περίπτωση όπου η κίνηση για τις δυο κλάσεις υπηρεσιών που προσομοιώνονται είναι ϱ_1=35 και ϱ_2=8.75 τότε μπορούμε να δούμε ότι η καλύτερη τιμή για τις πιθανοτικές παραμέτρους είναι για το f^d 0.7 και για το f^a 0.3, αφού επιτυγχάνουμε βελτίωση στη δικαιοσύνη εξυπηρέτησης 11% και στη διεκπεραιωτικότητα 36%. Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα ίδια αποτελέσματα για τη δικαιοσύνη μπορούν να επιτευχθούν και με τιμή για το f^d 0.8 και για το f^a 0.2, όμως επιλέγοντας την ομάδα τιμών 0.7 και 0.3 έχουμε μεγαλύτερη διεκπεραιωτικότητα, που είναι προς όφελος της συνολικής λειτουργίας του δικτύου.

Μια άλλη περίπτωση που μπορούμε να εξετάσουμε, είναι αυτή όπου οι προδιαγραφές για τους επιτεύξιμους στόχους αλλά και οι τιμές των παραμέτρων μπορούν να

καθοριστούν από τον τηλεπικοινωνιακό πάροχο. Για παράδειγμα, εάν εξετάσουμε την περίπτωση όπου στο δίκτυο η κίνηση περιγράφεται από την κατάσταση ρ_1=30, ρ_2=35 και ο πάροχος επιζητά μια βελτίωση του δείκτη δικαιοσύνης κατά 20% τότε μπορούμε να θέσουμε κατευθείαν τις τιμές των παραμέτρων f^d 0.7 και για το f^a 0.3, καθώς οι άλλες τιμές δεν ικανοποιούν τις σχετικές προδιαγραφές. Εδώ μπορούμε να τονίσουμε ότι κατά την επίτευξη του στόχου αυτού έχουμε την παράλληλη βελτίωση του δείκτη διεκπεραιωτικότητας, αλλά και μια μικρή μείωση του δείκτη απόδοσης προτεραιότητας. Φυσικά στις συνθήκες αυτές το φορτίο και από τις δυο κλάσεις υπηρεσιών είναι περίπου ισοδύναμο οπότε η δικαιοσύνη είναι κρισιμότερη. Επιπλέον, διαπιστώνεται ότι για τις συγκεκριμένες συνθήκες τηλεπικοινωνιακού φορτίου ότι αν κάποιος αποδεχθεί μια μικρή μείωση του δείκτη απόδοσης προτεραιότητας κατά 5%, μπορεί να πετύχει βελτιώσεις ακόμα και της τάξης του 22% στη δικαιότερη εξυπηρέτηση των κλήσεων, αλλά και 33% αύξηση της διεκπεραιωτικότητας που οδηγεί σε αύξηση της χρησιμοποίησης των πόρων του δικτύου.

Εναλλακτικά, βλέπουμε ότι στις άλλες περιπτώσεις υψηλών φορτίων, με τη χρήση της πιθανοτικής προσέγγισης μπορούμε να πετύχουμε σημαντικά οφέλη σε θέματα δικαιοσύνης στην εξυπηρέτηση των κλήσεων χωρίς να αλλοιώνουμε τη λειτουργία του μηχανισμού απόδοσης προτεραιότητας. Όπως για παράδειγμα, όταν έχουμε συνθήκες όπου ρ_1=30, ρ_2=50, οπότε έχουμε πολύ υψηλά φορτία κίνησης κλήσεων πραγματικού χρόνου με υψηλές απαιτήσεις πόρων, με τη χρήση της πιθανοτικής προσέγγισης και ειδικά των τιμών για τις παραμέτρους $f^d = 0.8$ και $f^\alpha = 0.2$, έχουμε επιτύχει κέρδη της τάξης του 18% σε δικαιότερη εξυπηρέτηση των κλήσεων και 18% σε διεκπεραιωτικότητα χωρίς αλλοίωση των χαρακτηριστικών επίδοσης του μηχανισμού προτεραιότητας. Θα πρέπει εδώ να αναφέρουμε ότι οι τιμές αυτές των παραμέτρων είναι οριακές, αν επιθυμούμε τη συνολική βελτίωση των δεικτών. Αν όμως τον περιορισμό της προτεραιότητας τον θεωρήσουμε ελαστικό αποδεχόμενοι π.χ. μια μείωση της τάξης του 6% τότε μπορούμε στα αλλά κριτήρια να πετύχουμε υψηλότερες επιδόσεις.

Τέλος, θα πρέπει να αναφέρουμε ότι τα κριτήρια επίδοσης που προτάθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση της επίδοσης του σχήματος πιθανοτικού ελέγχου αποδοχής κλήσεων, θα πρέπει να αξιοποιηθούν συνδυαστικά, ώστε να έχουμε τη πληρέστερη εικόνα για τη λειτουργία της πιθανοτικής προσέγγισης. Μέσα από την αξιολόγηση διαπιστώνεται ότι από την κατάλληλη επιλογή των τιμών της πιθανοτικής παραμέτρου, βάσει των συνθηκών τηλεπικοινωνιακής κίνησης, μπορούμε να πετύχουμε σημαντικά οφέλη αφού βλέπουμε ότι βελτιώνεται η επίδοση του αλγόριθμου συνολικά, επιτυγχάνοντας καλύτερη

διαχείριση των πόρων και καλύτερη χρησιμοποίηση τους στο δίκτυο. Αυτή η βελτιωμένη συμπεριφορά είναι μεγάλης σημασίας στα σύγχρονα ευρυζωνικά δίκτυα επικοινωνιών, λαμβάνοντας υπ' όψη τις υψηλές απαιτήσεις σε QoS για την υποστήριξη των πολλαπλών κλάσεων υπηρεσιών, όπου ο έλεγχος αποδοχής κλήσεων είναι κρίσιμος για τη εύρυθμη λειτουργία του δικτύου και την αποφυγή καταστάσεων συμφόρησης.

Κεφάλαιο 5ο

Βελτιστοποίηση Πιθανοτικού Ελέγχου Αποδοχής Κλήσεων και Κατανομή Πόρων με χρήση Θεωρίας Παιγνίων

5.1. Εισαγωγή

Η διαχείριση ραδιοπόρων διαδραματίζει σημαντικότατο ρόλο στην παροχή QoS στα ασύρματα συστήματα επικοινωνιών [48]. Ειδικά στα σύγχρονα δίκτυα που υποστηρίζουν πολλαπλές κλάσεις υπηρεσιών με αυξημένες και διαφοροποιημένες απαιτήσεις QoS, η ανάγκη για αποτελεσματική και αποδοτική κατανομή πόρων σε συνδυασμό με τη λειτουργία του ελέγχου αποδοχής κλήσεων καθίσταται ακόμα πιο επιτακτική [31]. Οι χρήστες του δικτύου λειτουργούν ανεξάρτητα και εκτελούν κλήσεις, αιτούμενοι πόρους και αυξημένα επίπεδα QoS, αγνοώντας την τρέχουσα κατάσταση του δικτύου. Τα σχήματα ελέγχου αποδοχής κλήσεων χρησιμοποιούνται για τη διαχείριση της εισερχόμενης τηλεπικοινωνιακής κίνησης στο δίκτυο αλλά και των κλήσεων που έχουν γίνει αποδεκτές, την αποφυγή συμφόρησης και την εγγύηση των παρεχομένων επιπέδων QoS στους χρήστες.

Τα στατικά παραδοσιακά σχήματα ελέγχου αποδοχής κλήσεων που χρησιμοποιούν κατώφλια για τη λήψη της απόφασης αποδοχής ή μη μιας νέας κλήσης παρουσιάζουν σχετικά χαμηλή επίδοση συγκρινόμενα με τα δυναμικά σχήματα τα οποία εκτός από τον έλεγχο αποδοχής κλήσεων συνδυάζουν επιπλέον δυνατότητες διαχείρισης πόρων. Το κύριο ζητούμενο είναι η δυναμική προσαρμογή τόσο του ελέγχου αποδοχής κλήσεων όσο και της κατανομής πόρων στην εισερχόμενη τηλεπικοινωνιακή κίνηση αλλά και στις απαιτήσεις QoS των χρηστών με στόχο τη βέλτιστη εκμετάλλευση και χρησιμοποίηση των περιορισμένων

δικτυακών πόρων. Τα περισσότερα δυναμικά σχήματα χρησιμοποιούν συναρτήσεις χρησιμότητας (utility functions) για τη λήψη της απόφασης αποδοχής μιας κλήσης [173].

Στο κεφάλαιο αυτό, προτείνεται η βελτιστοποίηση του σχήματος πιθανοτικού ελέγχου αποδοχής κλήσεων το οποίο αναλύθηκε εκτενώς σε προηγούμενο κεφάλαιο [174]. Στο σχήμα πιθανοτικού ελέγχου αποδοχής κλήσεων που προτάθηκε στην παρούσα διατριβή έχουμε τη χρήση πιθανοτικών παραμέτρων για την αποδοχή κλήσεων κάθε κλάσης υπηρεσιών. Η τιμή της πιθανοτικής παραμέτρου ποικίλει και καθορίζεται με βάση την κατάσταση του δικτύου αλλά και τα χαρακτηριστικά κάθε κλήσης. Στο πλαίσιο της βελτιστοποίησης του συγκεκριμένου σχήματος προτείνεται ο δυναμικός υπολογισμός της τιμής της πιθανοτικής παραμέτρου βάσει του φορτίου του δικτύου με τη χρήση της θεωρίας παιγνίων και των μοντέλων διαπραγματεύσεων Nash. Μέσα από την ενσωμάτωση της θεωρίας παιγνίων αναπτύσσεται ένα νέο σχήμα ελέγχου αποδοχής κλήσεων το οποίο ονομάζεται GTPS (Game Theoretic Probabilistic Scheme), εισάγοντας παράλληλα σε αυτό, τη δυνατότητα κατανομής πόρων και διαπραγμάτευσης τιμών. Το σχήμα που προτείνεται χρησιμοποιεί τη θεωρία παιγνίων και τα μοντέλα διαπραγματεύσεων του Nash που αποτελούν ένα σημαντικότατο εργαλείο για την αποτελεσματική κατανομή πόρων. Αυτό συμβαίνει διότι πραγματοποιούν την κατανομή πόρων σε ένα κύκλο παιγνίου ανεξάρτητα από τον αριθμό των χρηστών στο σύστημα. Συνεπώς, κάθε χρήστης, γνωρίζοντας αμέσως την κατανομή πόρων μετά την αποδοχή του νέου χρήστη, μπορεί να αποφανθεί αν η εισαγωγή του στο σύστημα έρχεται σε σύγκρουση με την ικανοποίηση των δικών του απαιτήσεων QoS.

Στα πλαίσια αυτά, ο συνδυασμός των απαιτήσεων ποιότητας υπηρεσίας των εξυπηρετούμενων κλήσεων αλλά και των κλάσεων υπηρεσιών γενικότερα με κατάλληλη τεχνική τιμολόγησης των παρεχόμενων υπηρεσιών του δικτύου είναι εξαιρετικά ελκυστική. Η χρήση αλγορίθμων τιμολόγησης και μοντέλων διαπραγμάτευσης τιμών μπορεί να προσφέρει μια ρεαλιστική απεικόνιση της εκάστοτε κατάστασης του δικτύου και της συμπεριφοράς των χρηστών. Ειδικότερα, η βασική ιδέα έγκειται στη λογική της τηλεπικοινωνιακής αγοράς ότι οι τιμές των κλήσεων για τους νέους χρήστες που απαιτούν πόρους του δικτύου αυξάνονται καθώς αυξάνεται η κίνηση του δικτύου σε σχέση με τις περιόδους κανονικής κίνησης. Η προσέγγιση αυτή στηρίζεται στη κλασσική οικονομική θεωρία της προσφοράς και ζήτησης, όπου η τιμή αυξάνεται όσο αυξάνεται η ζήτηση και μειώνεται αντίστοιχα η διαθέσιμη προσφορά. Η όλη διαδικασία τιμολόγησης διαμορφώνει ένα παίγνιο διαπραγμάτευσης Nash μεταξύ των διαθέσιμων δικτυακών πόρων και των απαιτήσεων των χρηστών όπου τα αποτελέσματα του παιγνίου μας δίνουν τις τιμές

συμφωνίας. Μετά την εξαγωγή των τιμών για κάθε τύπου κλήσεις, υπολογίζονται οι τιμές των πιθανοτικών παραμέτρων αποδοχής για τις εισερχόμενες κλήσεις, μέσα από τη χρήση κατάλληλων συναρτήσεων ζήτησης που εκφράζουν την αντίδραση των χρηστών στις προσφερόμενες τιμές και τις μεταβολές τους δηλαδή τη πιθανότητας αποδοχής της διαπραγματευόμενης τιμής που οδηγεί στη είσοδο του στο δίκτυο.

5.2. Επισκόπηση Διεθνούς Βιβλιογραφίας

Η θεωρία παιγνίων είναι ένα μαθηματικό εργαλείο το οποίο έχει αναπτυχθεί για την κατανόηση και την περιγραφή καταστάσεων ανταγωνισμού, όπου συμμετέχουν λογικοί παίκτες που λαμβάνουν αποφάσεις και αλληλεπιδρούν για την επίτευξη των στόχων τους. Οι τεχνικές της θεωρίας παιγνίων έχουν γνωρίσει τεράστια εφαρμογή σε μια ποικιλία προβλημάτων της μηχανικής [175]. Για παράδειγμα, τα μοντέλα διαπραγματεύσεων του Nash έχουν προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία για ανάθεση εκτέλεσης εργασιών σε υπολογιστικά συστήματα [176], για την ανάθεση καναλιών σε συστήματα ορθογωνικής πολλαπλής προσπέλασης διαίρεσης συχνότητας OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) [177], [178] αλλά και πρόσφατα στον έλεγχο αποδοχής κλήσεων [179]. Όπως έχει προκύψει από τη σχετική έρευνα, μια από τις πιο αποτελεσματικές λύσεις για τη διαχείριση πόρων και τον έλεγχο αποδοχής κλήσεων στα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών βασίζεται στη χρήση θεωρίας παιγνίων. Στη συνέχεια, θα δώσουμε συνοπτικά μερικά βασικά στοιχεία της θεωρίας παιγνίων και έπειτα θα περιγράψουμε τις εφαρμογές τους στα προβλήματα διαχείρισης πόρων των σύγχρονων δικτύων επικοινωνιών.

5.2.1. Στοιχεία Θεωρίας Παιγνίων

Ένα παίγνιο περιγράφεται από μια ομάδα συμμετεχόντων λογικών παικτών, όπου οι στρατηγικές σχετίζονται με τους παίκτες και τα οφέλη των παικτών. Ένας λογικός παίκτης έχει το δικό του συμφέρον και συνεπώς ενεργεί επιλέγοντας την κατάλληλη στρατηγική για την επίτευξη του συμφέροντος του. Στην περίπτωση αυτή, ο παίκτης θεωρείται ότι είναι σε θέση να αξιολογεί είτε ακριβώς είτε προσεγγιστικά, το αποτέλεσμα των κερδών που αναμένεται να έχει, το οποίο όμως δεν εξαρτάται μόνο από τις δικές του ενέργειες αλλά και από τις ενέργειες των άλλων παικτών. Στα παίγνια υπάρχουν δύο τύποι στρατηγικών: οι καθαρές και οι μεικτές. Σε μια καθαρή στρατηγική, ο παίκτης επιλεγεί μια συγκεκριμένη

στρατηγική ντετερμινιστικά, αντίθετα σε μια μεικτή στρατηγική τουλάχιστον ένας παίκτης που συμμετέχει σε ένα παίγνιο επιλέγει τη στρατηγική του ακολουθώντας μια πιθανοτική κατανομή. Δυο άλλα σημαντικά χαρακτηριστικά είναι η ατομικότητα και η αμοιβαία ανεξαρτησία. Ενώ η ατομικότητα επηρεάζει τη λογική και το ίδιο συμφέρον του παίκτη καθώς και τη συνεργασία μεταξύ των παικτών, η αμοιβαία ανεξαρτησία καθορίζει τις ενέργειες των παικτών σε απάντηση των ενεργειών των άλλων παικτών.

Από τα πιο βασικά μοντέλα της θεωρίας παιγνίων είναι αυτό των μη συνεργατικών παιγνίων, όπου ένας παίκτης δεν είναι σε θέση να επιβάλλει συμφωνίες με τους άλλους παίκτες. Ένα μη-συνεργατικό παίγνιο μπορεί να αναπαρασταθεί είτε σε στρατηγική είτε σε εκτεταμένη μορφή. Η πιο γνωστή περίπτωση τέτοιου παιγνίου είναι το ευρύτατα διαδεδομένο δίλημμα του φυλακισμένου [175]. Σε ένα μη-συνεργατικό παίγνιο, η λύση του που αποτελεί και την κατάσταση ισορροπίας του είναι μια ομάδα στρατηγικών που υιοθετείται για τους παίκτες και κανένας δεν αποκλίνει από αυτές. Στην κατάσταση ισορροπίας που είναι γνωστή και ως κατάσταση ισορροπίας Nash, η στρατηγική που επιλέγει ο παίκτης είναι η βέλτιστη, δεδομένου ότι κάθε παίκτης θα επιλέγει μια στρατηγική ισορροπίας επίσης. Αν δεν ισχύει αυτή η παραδοχή τότε τουλάχιστον ένας παίκτης θα υιοθετεί διαφορετική στρατηγική. Από την άλλη πλευρά, όταν οι παίκτες συνεργάζονται μεταξύ τους και διαμορφώνουν συμμαχίες και συμφωνίες τότε τα παίγνια ονομάζονται συνεργατικά. Μια αποτελεσματική μέθοδος για την επίτευξη της ισορροπίας Nash σε ένα συνεργατικό παίγνιο είναι η χρήση των βέλτιστων αποκρίσεων των παικτών. Η βέλτιστη απόκριση ενός παίκτη ορίζεται ως η βέλτιστη στρατηγική του, δεδομένων των στρατηγικών των άλλων παικτών. Βέβαια, θα πρεπει να σημειώσουμε ότι στις περιπτώσεις όπου ο στόχος είναι η μεγιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος ή η ελαχιστοποίηση του κόστους, η ισορροπία του παιγνίου μπορεί να μην εγγυηθεί την απόλυτη επίτευξη του στόχου. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι η όλη λογική της ισορροπίας μπορεί να μην είναι χρήσιμη στις περιπτώσεις όπου οι παίκτες ενός παιγνίου τελικά δεν επιλέξουν τη λύση της κατάστασης ισορροπίας, για τον οποιοδήποτε λόγο.

Γενικά, ένα παίγνιο μπορεί να λάβει χώρα είτε μια φορά είτε επαναλαμβανόμενα. Στην πρώτη περίπτωση, το παίγνιο χαρακτηρίζεται από ένα στάδιο, ενώ στη δεύτερη αναφέρεται και ως παίγνιο πολλαπλών σταδίων. Στην περίπτωση όπου έχουμε πολλαπλά στάδια, οι παίκτες, είναι ενήμεροι για τις προηγούμενες ενέργειες και των άλλων παικτών οπότε προσαρμόζουν ανάλογα και τη στρατηγική τους. Επιπλέον, τα οφέλη από το παίγνιο μπορεί να εξαρτώνται όχι μόνο από ένα στάδιο αλλά και από τη συμπεριφορά των παικτών στο μέλλον.

Μια ακόμα σημαντική κατηγορία παιγνίων είναι τα παίγνια διαπραγματεύσεων με σημαντικές εφαρμογές τόσο σε προβλήματα οικονομικής φύσεως όπως οι βιομηχανικές σχέσεις αλλά και σημαντικές προεκτάσεις σε τομείς όπως οι επιστήμες των μηχανικών και ειδικά στο χώρο των τηλεπικοινωνιών. Στα παίγνια αυτής της κατηγορίας, οι παίκτες συνεργατικά προσπαθούν να καταλήξουν σε μια συμφωνία και έχουν την επιλογή να διαπραγματευτούν μεταξύ τους, ώστε να κερδίσουν μεγαλύτερο όφελος από αυτό που θα είχαν αν δεν συνεργάζονταν. Ένα παίγνιο διαπραγμάτευσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατανομή μιας ποσότητας πόρων μεταξύ δυο παικτών ή ακόμα και για την διαπραγμάτευση τιμών για την παροχή μιας υπηρεσίας ή κάποιων πόρων. Η ποσότητα πόρων που θα εκχωρηθούν σε ένα παίκτη επηρεάζει τα οφέλη του άλλου παίκτη. Αντίστοιχα, συμβαίνει και με τη διαπραγμάτευση των τιμών μεταξύ των παικτών. Λόγω της επίδρασης των αποτελεσμάτων των διαπραγματεύσεων στις ωφέλειες των παικτών όλα τα εμπλεκόμενα μέρη επιδιώκουν τη βέλτιστη και δίκαιη συμφωνία μέσω των διαπραγματεύσεων.

Ένα παίγνιο διαπραγμάτευσης ορίζεται από το ζεύγος των συναρτήσεων ωφέλειας για τους δυο παίκτες και το σημείο διαφωνίας όπου αποτελεί την τιμή της ωφέλειας σε περίπτωση αποτυχίας των διαπραγματεύσεων. Η λύση του παιγνίου διαπραγμάτευσης έχει προσδιοριστεί ως η λύση Nash η οποία ικανοποιεί τα παρακάτω αξιώματα: Είναι αμετάβλητη σε μετασχηματισμούς, είναι βέλτιστη κατά Pareto, είναι ανεξάρτητη από τις εναλλακτικές και παρουσιάζει συμμετρία για τους συμμετέχοντες παίκτες. Στο σημείο αυτό θα πρεπει να σημειωθεί ότι το βασικότερο αξίωμα των παιγνίων διαπραγματεύσεων που καταλήγουν στην λύση Nash είναι ότι η λύση αυτή είναι βέλτιστη κατά Pareto [175]. Η κατά Pareto βέλτιστη λύση για το παίγνιο ορίζει μια συμφωνία ότι ένας παίκτης δεν μπορεί να αυξήσει τη χρησιμότητα από τη λύση χωρίς να μειώσει τη χρησιμότητα για τον άλλο παίκτη. Η λύση Nash λόγω του ότι είναι βέλτιστη κατά Pareto μας εξασφαλίζει την αποτελεσματικότητα της λύσης.

Τέλος, θα πρεπει να αναφέρουμε ότι άλλη μια πολύ σημαντική κατηγορία παιγνίων τα οποία ανήκουν στην κατηγόρια των μη-συνεργατικών, στα οποία αναφερθήκαμε, είναι τα παίγνια ανταγωνισμού. Στα παίγνια αυτά οι παίκτες ανταγωνίζονται μεταξύ τους για την κατανομή και εκχώρηση πόρων σε αυτούς, ή για την κατανομή κάποιας ποσότητας. Τέτοια γνωστά μοντέλα παιγνίων είναι το παίγνιο Cournot, το οποίο προέρχεται από το οικονομικό μοντέλο αγοράς και ανταγωνισμού του Cournot καθώς και το μοντέλο του παιγνίου χρεοκοπίας (bankruptcy game) [175]. Τα δυο αυτά μοντέλα παιγνίων μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την διαχείριση πόρων σε ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών.

5.2.2. Θεωρία Παιγνίων σε Ασύρματα Δίκτυα Επικοινωνιών

Οι τεχνικές της θεωρίας παιγνίων μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο σχεδιασμό και ανάλυση πρωτοκόλλων για την κατανομή των πόρων σύμφωνα με τη δυναμική του δικτύου. Σε ένα παίγνιο διαχείρισης πόρων πολλαπλοί παίκτες – χρήστες ενεργούν λογικά για την επίτευξη του στόχου τους που είναι η κατανομή πόρων με τρόπο που να ενισχύεται η ωφέλεια τους. Η γενικότητα των προτεινόμενων μαθηματικών μοντέλων της θεωρίας παιγνίων τα καθιστά δημοφιλή αφού δεν παρουσιάζουν εξάρτηση από τα τεχνικά χαρακτηριστικά των συστημάτων επικοινωνιών στα οποία εφαρμόζονται για τη διαχείριση πόρων. Έτσι έχουν παρουσιαστεί εργασίες για τη διαχείριση πόρων με τη χρήση της θεωρίας παιγνίων για ασύρματα δίκτυα WLAN που ακολουθούν το πρότυπο IEEE 802.11 [180], για κινητά δίκτυα CDMA [181], για ασύρματα OFDM δίκτυα [182], [183] καθώς και για αδόμητα δίκτυα αισθητήρων (ad hoc sensor networks) [184]. Επίσης, παρουσιάζονται ως μια πολλά υποσχόμενη λύση για τα δίκτυα επόμενης γενιάς.

Για την επίλυση των σχετικών προβλημάτων διαχείρισης και κατανομής πόρων έχουν προταθεί διάφορες τεχνικές τόσο συνεργατικές όσο και μη-συνεργατικές. Ένα τέτοιο συνεργατικό παίγνιο έχει προταθεί για την κατανομή εύρους ζώνης και η λύση του βρίσκεται μέσα από την επίτευξη ισορροπίας που υπολογίζεται από την τιμή Shapley [185]. Η διαμόρφωση του συνεργατικού παιγνίου είναι τελείως διαφορετική από τη μη συνεργατική προσέγγιση όπου κάθε δίκτυο είναι ένας εγωιστής παίκτης που στοχεύει μόνο στη μεγιστοποίηση του κέρδους του. Σε ένα μη συνεργατικό περιβάλλον, οι παίκτες ανταγωνίζονται για την επίτευξη των δικών τους στόχων αδιαφορώντας για την κοινή ωφέλεια. Συνεπώς, η συνεργατική προσέγγιση στη θεωρία παιγνίων χαρακτηρίζεται ως ομαδικά προσανατολισμένη διαδικασία αφού στόχος της είναι η επίτευξη της κοινής ωφέλειας, ενώ η μη-συνεργατική προσέγγιση ένα προσανατολισμένη στο ιδιωτικό κέρδος κάθε παίκτη. Στη συνεργατική προσέγγιση του παιγνίου η ομάδα των παικτών που είναι οι χρήστες επιδιώκουν τη δίκαιη κατανομή των πόρων που αποτελεί και το συλλογικό κέρδος, από την άλλη πλευρά στις περιπτώσεις των μη-συνεργατικών παιγνίων η κατανομή γίνεται με βάση τα οφέλη των μεμονωμένων χρηστών (για παράδειγμα η απόδοση του εύρους ζώνης). Ένα τέτοιο πλαίσιο κατανομής όρων που ακολουθεί ένα μη-συνεργατικό παίγνιο για την ασύρματη πρόσβαση σε δίκτυα επόμενης γενιάς παρουσιάζεται στην εργασία [186].

Το πρόβλημα της διαχείρισης πόρων που η επίλυση του βασίζεται σε μια στρατηγική δυναμικής κατανομής πόρων μπορεί να διαιρεθεί σε δύο επιμέρους προβλήματα, το ένα αφορά τη διαχείριση πόρων σε δικτυακό επίπεδο και το άλλο σε επίπεδο συνδέσεων. Οι

αντικειμενικοί στόχοι της δυναμικής κατανομής πόρων είναι: η μεγιστοποίηση της χρησιμοποίησης των πόρων μέσα από την αποτελεσματική κατανομή τους, η επίτευξη της απόδοσης προτεραιότητας μεταξύ των κλήσεων των διαφόρων κλάσεων υπηρεσιών και τέλος η διασφάλιση της παροχής QoS στις κλήσεις που βρίσκονται σε εξέλιξη καθώς γίνονται αποδεκτές νέες κλήσεις από το δίκτυο.

Σε δικτυακό επίπεδο, το διαθέσιμο εύρος ζώνης θα πρέπει να κατανεμηθεί μεταξύ των χρηστών. Πολλοί παροχείς υπηρεσιών προσφέρουν πρόσβαση στο δίκτυο με ένα μη συνεργατικό τρόπο προσπαθώντας να μεγιστοποιήσουν τα έσοδα τους όταν κατανέμουν το εύρος ζώνης στις διάφορες συνδέσεις. Το πρόβλημα της κατανομής των πόρων μπορεί να μοντελοποιηθεί σαν ένα μη-συνεργατικό παίγνιο με τους διάφορους παροχείς υπηρεσιών σαν παίκτες. Η λύση προκύπτει πάλι από την ισορροπία Nash. Για την εξασφάλιση της υποστήριξης κινητικότητας, σε τέτοια προβλήματα ένα μέρος των πόρων θα πρέπει να δεσμεύεται για την εξυπηρέτηση των κλήσεων μεταπομπής. Οι νέες κλήσεις και οι κλήσεις μεταπομπής αλλά και ευρύτερα οι κλήσεις των διαφόρων κλάσεων υπηρεσιών που υποστηρίζονται από το δίκτυο θα πρέπει να μοιράζονται το διαθέσιμο εύρος ζώνης κατά τέτοιο τρόπο ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις QoS αλλά και οι επιδόσεις τους όσον αφορά τις πιθανότητες μη αποδοχής και τις πιθανότητες απόρριψης των κλήσεων. Συνεπώς, το πρόβλημα της κατανομής του εύρους ζώνης μεταξύ των κλήσεων μπορεί να οδηγηθεί σε μια διαπραγμάτευση μεταξύ των παικτών με στόχο την αποτελεσματική και δίκαιη κατανομή. Στην ουσία έχουμε τη διαμόρφωση ενός παιγνίου διαπραγμάτευσης μεταξύ των κλήσεων και του δικτύου. Στην περίπτωση αυτή, η επίτευξη ισορροπίας αποτελεί τη λύση του παιγνίου. Μέσα από τη δυναμική κατανομή του εύρους ζώνης επιτυγχάνουμε τη διαφοροποίηση ανάμεσα στις κλήσεις, κάτι που είναι επιθυμητό λόγω της υποστήριξης κλήσεων πολλαπλών κλάσεων υπηρεσιών με διαφορετικές προδιαγραφές QoS από το δίκτυο.

Από την άλλη πλευρά, το πρόβλημα της κατανομής εύρους ζώνης σε επίπεδο συνδέσεων ή σε επίπεδο κλήσεων μπορεί να αναχθεί και να μοντελοποιηθεί σαν μια αγορά (trading market). Το δίκτυο το οποίο προσφέρει και διαθέτει το εύρος ζώνης μπορεί να θεωρηθεί ότι λειτουργεί εγωιστικά στοχεύοντας στη μεγιστοποίηση της χρησιμότητας και των κερδών του μέσα από μια βέλτιστη στρατηγική. Στην κατάσταση ισορροπίας, οι στρατηγικές θα πρέπει να είναι ευσταθείς με την έννοια ότι όλοι οι συμμετέχοντες ικανοποιούνται από τη λύση που δίνεται από τις στρατηγικές των συμμετεχόντων. Η συνάρτηση κέρδους για το δίκτυο που προσφέρει το εύρος ζώνης θα πρέπει να υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη το κέρδος από την κατανομή του εύρους ζώνης αλλά και τη συνάρτηση κόστους που προκύπτει από την απώλεια χρησιμότητας εξαιτίας της ανακατανομής του

εύρους ζώνης που έχει ήδη δεσμευθεί στις κλήσεις που βρίσκονται σε εξέλιξη. Έτσι λοιπόν, διαμορφώνεται ένα μη-συνεργατικό παίγνιο σε επίπεδο κλήσεων το οποίο καθορίζει την κατανομή των πόρων στις κλήσεις που υποστηρίζει το δίκτυο [186]. Ο έλεγχος αποδοχής κλήσεων αξιοποιεί τη διαδικασία κατανομής πόρων στα πλαίσια περαιτέρω επεξεργασίας και βελτιστοποίησης της λειτουργίας του ώστε να ληφθεί η απόφαση για την αποδοχή ή μη μιας κλήσης στο δίκτυο.

5.3. Περιγραφή Αλγορίθμου Ελέγχου Αποδοχής Κλήσεων

Η ανάπτυξη του πιθανοτικού ελέγχου αποδοχής κλήσεων παρουσιάστηκε εκτενώς σε προηγούμενο κεφάλαιο. Υπενθυμίζουμε ότι η βασική ιδέα είναι η εισαγωγή μιας πιθανοτικής παραμέτρου για τον έλεγχο της τηλεπικοινωνιακής κίνησης. Στην ουσία ελέγχουμε το ρυθμό αποδοχής κάθε τύπου κλήσεων, μέσα από τον έλεγχο της ροής με βάση συγκεκριμένα κατώφλια, σύμφωνα με τις απαιτήσεις QoS των χρηστών, καθώς το τηλεπικοινωνιακό φορτίο του δικτύου αυξάνεται.

5.3.1. Περιγραφή Μοντέλου Κίνησης και Δικτυακές Παραδοχές

Στην ενότητα αυτή, θα περιγράψουμε το μοντέλο δικτύου στο οποίο στηρίζεται η ανάλυση της επέκτασης του πιθανοτικού σχήματος αποδοχής κλήσεων στο οποίο θα ενσωματωθεί το πλαίσιο κατανομής πόρων και τιμολόγησης που έχει αναπτυχθεί, με στόχο τη βελτιστοποίηση του σχήματος και την παροχή QoS σε κάθε υποστηριζόμενη κλάση υπηρεσίας. Θεωρούμε ένα κυψελωτό κινητό δίκτυο ασυρμάτων επικοινωνιών με πολλαπλές κλάσεις υπηρεσιών για υποστήριξη ευρυζωνικών εφαρμογών.

- Για τις ανάγκες της παρούσας ανάλυσης, θεωρούμε ότι το μελετούμενο δίκτυο χαρακτηρίζεται από ομογένεια, συνεπώς αρκεί να μελετήσουμε μια κυψέλη του δικτύου.
- Θεωρούμε ότι το δίκτυο έχει τη δυνατότητα εξυπηρέτησης U κλάσεων υπηρεσιών όπως π.χ. φωνή, μεταφορά δεδομένων κ.α. Οι διαφορετικοί τύποι κλήσεων έχουν διαφορετικά QoS χαρακτηριστικά όπως απαιτήσεις εύρους ζώνης και διάρκεια κλήσης. Επιπλέον θεωρούμε ότι οι κλήσεις υψηλότερων απαιτήσεων έχουν προτεραιότητα έναντι των άλλων τύπων κλήσεων [48],[77], [115].

- Θεωρούμε ότι C είναι η μέγιστη χωρητικότητα της κυψέλης εκφραζόμενη ως το συνολικό διαθέσιμο εύρος ζώνης το οποίο είναι μια πολύ κρίσιμη δικτυακή παράμετρος [63]. Οι πόροι που απαιτούνται από κάθε είδος κλήσης εκφράζονται σε μονάδες εύρους ζώνης BUs (bandwidth units) [80], [115], [129], [130].
- Για λόγους απλότητας, η εισερχόμενη κίνηση των πολλαπλών κλάσεων υπηρεσιών κατηγοριοποιείται σε δυο βασικούς τύπους, οπότε θα εξετάσουμε δυο κλάσεις υπηρεσιών, τις στενού εύρους ζώνης και τις μεγάλου εύρους ζώνης. Επιλέγεται μια γενική περιγραφή και κατηγοριοποίηση των κλάσεων, ώστε αυτή να είναι αντιπροσωπευτική για όλους τους τύπους κλήσεων [93], [115]. Οι πόροι που απαιτούνται από τα δυο αντιπροσωπευτικά είδη κλήσεων περιγράφονται με τις απαιτήσεις τους σε μονάδες εύρους ζώνης και συμβολίζονται με c_n και c_w για τις στενού εύρους και τις μεγάλου εύρους ζώνης, αντίστοιχα.
- Όπως είναι σύνηθες στη βιβλιογραφία, οι αφίξεις των κλήσεων θεωρούμε ότι ακολουθούν την κατανομή Poisson με ρυθμούς λ_w και λ_n για τις κλήσεις μεγάλου και στενού εύρους ζώνης, αντίστοιχα [49],[73],[74],[77],[115]. Επίσης, ως προς τις νέες κλήσεις και τις κλήσεις μεταπομπής κάθε κλάσης υπηρεσιών, αυτές θα αντιμετωπιστούν σε ενιαία βάση, αφού η βασική διάκριση των κλήσεων που μας ενδιαφέρει είναι ως προς την κλάση υπηρεσιών που ανήκουν. Ειδικότερα θεωρούμε ότι $\lambda_w = \lambda_{n,w} + \lambda_{h,w}$ και $\lambda_n = \lambda_{n,n} + \lambda_{h,n}$ όπου $\lambda_{n,w}$ οι νέες κλήσεις και $\lambda_{h,w}$ οι κλήσεις μεταπομπής της κλάσης υπηρεσιών ευρείας ζώνης ενώ $\lambda_{n,n}$, $\lambda_{h,n}$ οι αντίστοιχοι τύποι κλήσεων για τις κλήσεις της κλάσης υπηρεσιών στενού εύρους ζώνης. Η τακτική αυτή είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη στη διεθνή βιβλιογραφία [49],[73],[89],[126],[127],[128]. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονίσουμε και πάλι ότι ο έλεγχος αποδοχής κλήσεων, ανεξάρτητα από το είδος των κλήσεων, μελετάται σε επίπεδο κλήσεων και όχι επίπεδο πακέτων [134], [135]. Συνεπώς, για την περίπτωση μας οι παραδοχές που υιοθετήθηκαν είναι απόλυτα λογικές, αφού οι αφίξεις των κλήσεων εξαρτώνται από τον ανθρώπινο παράγοντα και το χρήστη, οπότε οι αφίξεις μπορούν να μοντελοποιηθούν με τη χρήση της κατανομής Poisson για την περιγραφή τους [135].
- Ο χρόνος εξυπηρέτησης των κλήσεων θεωρούμε ότι ακολουθεί την εκθετική κατανομή με μέσες τιμές $1/\mu_w$ και $1/\mu_n$ για τις κλήσεις μεγάλου εύρους και στενού εύρους ζώνης, αντίστοιχα [49],[74],[73],[77],[115]. Είναι αναγκαίο να σημειωθεί εδώ ότι, ο χρόνος εξυπηρέτησης των κλήσεων δεν ακολουθεί

απαραίτητα την εκθετική κατανομή εκτός και αν υπάρχουν συγκεκριμένες συνθήκες [108],[187]. Ειδικά, στην περίπτωση όπου έχουμε κίνηση δεδομένων, όπως έχουμε αναφέρει και σε προηγούμενη ενότητα, τότε αυτή παρουσιάζει longtailed χαρακτηριστικά και δε μπορεί να περιγραφεί με την εκθετική κατανομή [110]. Παρόλα αυτά, η παραδοχή της εκθετικής κατανομής είναι ευρύτατα αποδεκτή διότι μέσα από μια προσιτή μαθηματική ανάλυση, δίνει τη δυνατότητα εξαγωγής αναλυτικών τύπων για τον υπολογισμό των πιθανοτήτων μη αποδοχής κλήσεων. Επιπλέον, στη βιβλιογραφία έχει δειχθεί ότι η παραδοχή της εκθετικής κατανομής παρέχει σχετικά ικανοποιητική ακρίβεια στα αποτελέσματα [108],[115], [138].

- Λαμβάνοντας υπόψη τα προηγούμενα, η ένταση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης που εκφράζεται ως ο λόγος του ρυθμού άφιξης προς το συνολικό μέσο χρόνο εξυπηρέτησης θα δίνεται από τις σχέσεις $\rho_n = \lambda_n / \mu_n$ και $\rho_w = \lambda_w / \mu_w$ για τις κλήσεις στενού εύρους και τις κλήσεις με απαιτήσεις μεγάλου εύρους ζώνης, αντίστοιχα.

Στη συνέχεια, θα προχωρήσουμε στη συνοπτική παρουσίαση του μοντέλου πιθανοτικού ελέγχου που στηρίζεται στην παραπάνω περιγραφή κίνησης και τις σχετικές παραδοχές.

5.3.2. Πιθανοτικός Έλεγχος Αποδοχής Κλήσεων

Ο πιθανοτικος έλεγχος αποδοχής κλήσεων περιγράφεται αναλυτικά στο τρίτο κεφάλαιο της παρούσας διατριβής. Στην ενότητα αυτή, θα παρουσιάσουμε συνοπτικά το προτεινόμενο σχήμα με τις αναγκαίες προσθήκες και επεκτάσεις ώστε να επιτυγχάνεται ο έλεγχος των ροών κλήσεων κάθε τύπου, αλλά και η ενσωμάτωση των παιγνίων διαπραγμάτευσης για την κατανομή πόρων καθώς και την τιμολόγηση των κλήσεων. Το σχήμα πιθανοτικού ελέγχου αποδοχής κλήσεων βασίζεται στην αποδοχή των κλήσεων με κάποια πιθανότητα, ώστε να είναι δυνατός ο έλεγχος της ροής της τηλεπικοινωνιακής κίνησης κάθε κλήσης με κριτήριο την τρέχουσα κατάσταση του δικτύου. Η κύρια διαφοροποίηση σε σχέση με το αρχικό σχήμα που περιγράφηκε στο τρίτο κεφάλαιο, έγκειται στο γεγονός ότι εδώ χρησιμοποιούμε στη μελετούμενη επέκταση του σχήματος, δυο πιθανοτικές παραμέτρους για τον έλεγχο της ροής και των δυο κατηγοριών κλήσεων που υποστηρίζονται από το δίκτυο. Στην εξεταζόμενη περίπτωση, οι αντιπροσωπευτικοί τύποι κλήσεων αντιμετωπίζονται από το δίκτυο ανεξάρτητα, από τη στιγμή που κάθε κλήση δεν αλληλεπιδρά με την άλλη [73].

Στο προτεινόμενο σχήμα ελέγχου αποδοχής κλήσεων, το οποίο αποτελεί μια επέκταση του αρχικού σχήματος, χρησιμοποιούμε τις πιθανοτικές παραμέτρους $b_{(n_n+n_w)n}$ και $b_{(n_n+n_w)w}$, για τις κλήσεις στενού εύρους ζώνης και τις κλήσεις μεγάλου εύρους ζώνης, αντίστοιχα. Αυτές οι πιθανοτικές παράμετροι που ενσωματώνονται στο συγκεκριμένο σχήμα συμβολίζουν τις πιθανότητες αποδοχής κάθε κλήσης που εξαρτώνται από την κατάσταση του δικτύου. Συγκεκριμένα, οι τιμές των δυο παραμέτρων καθορίζονται κάθε φορά από το φορτίο του δικτύου, όπως αυτό καθορίζεται από τον αριθμό των κλήσεων που βρίσκονται σε εξέλιξη. Ειδικότερα, ο εκάστοτε συνολικός αριθμός των κλήσεων σε εξέλιξη είναι $n_n + n_w$, όπου n_n και n_w συμβολίζουν τον αριθμό των κλήσεων κάθε τύπου που βρίσκονται σε εξέλιξη στο δίκτυο. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειώσουμε ότι κάθε κατάσταση του δικτύου περιγράφεται από τον αριθμό των χρηστών που εξυπηρετούνται από αυτό κάθε στιγμή. Οι πιθανότητες αποδοχής που εισάγουμε στο σχήμα ελέγχου αποδοχής κλήσεων αποσκοπούν στον έλεγχο των μεταβάσεων καταστάσεων με τη χρήση μιας πιθανότητας κατά τη γέννηση των κλήσεων στο δίκτυο. Με τη χρήση των πιθανοτικών παραμέτρων αυτών επιτυγχάνουμε τον έλεγχο ροής του φορτίου. Με το δυναμικό τους καθορισμό επιτυγχάνεται η εισαγωγή στον έλεγχο αποδοχής κλήσεων της αλληλεπίδρασης του δικτύου με τους χρήστες που πραγματοποιούν τις κλήσεις.

Ο πιθανοτικός αλγόριθμος ελέγχου αποδοχής κλήσεων μπορεί να μοντελοποιηθεί με μια διαδικασία Markov δυο διαστάσεων, όπου η μεταβλητή κατάστασης είναι ένα διάνυσμα το οποίο ορίζεται από τον αριθμό των κλήσεων κάθε τύπου. Ο περιορισμένος χώρος καταστάσεων ορίζεται ως:

$$S = \left\{ n = \left(n_n, n_w \right); 0 \le \left(n_n c_n + n_w c_w \right) \le C \right\}.$$

όπου c_n και c_w είναι οι ελάχιστες απαιτούμενες μονάδες εύρους ζώνης για την αποδοχή μιας κλήσης κάθε τύπου, αντίστοιχα. Για τον έλεγχο των μεταβάσεων στις καταστάσεις χρησιμοποιούνται οι πιθανοτικές παράμετροι $b_{(n_n+n_w)n}$ και $b_{(n_n+n_w)w}$, που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Οι τιμές των πιθανοτήτων αποδοχής μειώνονται καθώς αυξάνεται το φορτίο και ο αριθμός των δεσμευμένων σε χρήση μονάδων εύρους ζώνης με στόχο να επιτευχθεί η ρύθμιση και ο έλεγχος της τηλεπικοινωνιακής κίνησης και η αποφυγή συμφόρησης στο δίκτυο.

Θεωρούμε τη συνάρτηση $h(n)$

$$h(n) = \begin{cases} 1 & n \in S \\ 0 & n \notin S. \end{cases} \quad (5.1)$$

Οι πιθανότητες μετάβασης από την κατάσταση $n=(n_n,n_w)$ στην κατάσταση $n'=(n'_n,n'_w)$ συμβολίζεται με $\pi(n,n')$. Λαμβάνοντας υπόψη τις αρχές λειτουργίας του προτεινόμενου σχήματος ελέγχου αποδοχής κλήσεων αλλά και τη θεωρία Markov οι ρυθμοί μετάβασης των καταστάσεων θα είναι:

$$\pi\big((n_n,n_w),(n_n+1,n_w)\big)=h(n_n+1,n_w)\,b_{(n_n+n_w)n}\lambda_n \quad (5.2\alpha)$$

$$\pi\big((n_n,n_w),(n_n,n_w+1)\big)=h(n_n,n_w+1)\,b_{(n_n+n_w)w}\lambda_w \quad (5.2\beta)$$

$$\pi\big((n_n,n_w),(n_n-1,n_w)\big)=h(n_n-1,n_w)\,n_n\mu_n \quad (5.2\gamma)$$

$$\pi\big((n_n,n_w),(n_n,n_w-1)\big)=h(n_n,n_w-1)\,n_w\mu_w \quad (5.2\delta)$$

Με βάση τις σχέσεις μεταβάσεων καταστάσεων και τις βασικές αρχές της ανάλυσης Markov θα έχουμε την ακόλουθη κατάσταση σφαιρικής ισορροπίας:

$$\begin{aligned}&h(n_n,n_w)\Big(b_{(n_n+n_w-1)n}\lambda_n P(n_n-1,n_w)+b_{(n_n+n_w-1)w}\lambda_w P(n_n,n_w-1)\\&+\mu_n(n_n+1)P(n_n+1,n_w)+\mu_w(n_w+1)P(n_n,n_w+1)\Big)=\\&\Big(h(n_n+1,n_w)\,b_{(n_n+n_w)n}\lambda_n+h(n_n,n_w+1)\,b_{(n_n+n_w)w}\lambda_w\\&+h(n_n-1,n_w)\mu_n+h(n_n,n_w-1)\mu_w\Big)P(n_n,n_w).\end{aligned} \quad (5.3)$$

Η πιθανότητα σταθερής κατάστασης $P(n)$ θα δίνεται από τη σχέση:

$$P(n)=\frac{\prod_{k=1}^{n_n} b_{(k+n_w)n}\rho_n^{n_n}}{n_n!}\,\frac{\prod_{l=1}^{n_w} b_{(n_n+l)w}\rho_w^{n_w}}{n_w!}P(0) \quad (5.4)$$

όπου το $P(0)$ μας δίνεται από την εξίσωση κανονικοποίησης η οποία θα προκύπτει από τη σχέση:

$$P(0)^{-1}=\sum_{n\in S}\frac{\prod_{k=1}^{n_n} b_{(k+n_w)n}\rho_n^{n_n}}{n_n!}\,\frac{\prod_{l=1}^{n_w} b_{(n_n+l)w}\rho_w^{n_w}}{n_w!}. \quad (5.5)$$

Για την εξαγωγή της πιθανότητας σταθερής κατάστασης, θεωρούμε ότι οι αλυσίδες που συνθέτουν το πολυδιάστατο διάγραμμα Markov είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους και η μια δεν επηρεάζει την άλλη [73]. Θεωρούμε ουσιαστικά τις εισερχόμενες κλήσεις των υποστηριζόμενων κλάσεων υπηρεσιών ότι είναι ασυσχέτιστες μεταξύ τους. Η παραδοχή αυτή μας επιτρέπει την εξαγωγή της πιθανότητας σταθερής κατάστασης και κατ' επέκταση των σχέσεων των πιθανοτήτων μη αποδοχής κλήσεων για κάθε υποστηριζόμενη κλάση υπηρεσιών.

Συνεπώς, με βάση και τις στατικές κατανομές, οι πιθανότητες μη αποδοχής κλήσεων για τις κλήσεις των δυο κλάσεων υπηρεσιών που εξετάζουμε θα δίνονται αντίστοιχα από τις παρακάτω σχέσεις:

$$P_n^b = \sum_{n \in S} \left(1 - b_{(n_n + n_w)n}\right) P(n) \quad (5.6)$$

$$P_w^b = \sum_{n \in S} \left(1 - b_{(n_n + n_w)w}\right) P(n). \quad (5.7)$$

5.4. Ενσωμάτωση Σχήματος Τιμολόγησης στον Έλεγχο Αποδοχής Κλήσεων

Οι παραδοσιακές τεχνικές και αλγόριθμοι κατανομής πόρων σε πολλές περιπτώσεις δεν είναι επαρκείς για τη διασφάλιση και την παροχή εγγυήσεων QoS, ειδικά στις περιπτώσεις όπου το δίκτυο πλησιάζει την κατάσταση συμφόρησης. Όπως έχει γίνει προφανές τα τελευταία χρόνια, πρεπει να ενσωματωθεί στους συγκεκριμένους αλγορίθμους και ένα κατάλληλο σχήμα τιμολόγησης. Τα σχήματα που βασίζονται σε μοντέλα τιμολόγησης δεν εξετάζονται σαν ένα οικονομικό ζήτημα, όπου η τιμολόγηση γίνεται για να καλυφθούν τα έξοδα υποδομών και τα λειτουργικά έξοδα μέσα από τη χρέωση των τελικών χρηστών, αλλά αποτελούν ένα ικανό μέσο για τη διαχείριση πόρων, τον έλεγχο της τηλεπικοινωνιακής κίνησης και την αποφυγή φαινομένων συμφόρησης στο δίκτυο [188],[189]. Τα σχήματα αυτά έχουν πρόσφατα υιοθετηθεί για την κατανομή πόρων σε ασύρματα δίκτυα που υποστηρίζουν πολλαπλές κλάσεις υπηρεσιών. Ανεξάρτητα από το σχήμα ελέγχου αποδοχής κλήσεων που χρησιμοποιείται, όταν ο αριθμός των κλήσεων σε εξέλιξη είναι πολύ υψηλός τότε η πιθανότητα μη αποδοχής μιας νέας κλήσης ή μιας κλήσης μεταπομπής είναι γενικά σχετικά υψηλή. Με την εισαγωγή και ενσωμάτωση πολιτικών τιμολόγησης στα σχήματα ελέγχου αποδοχής κλήσεων, το δίκτυο μπορεί να αλληλεπιδρά άμεσα με τους χρήστες επηρεάζοντας τη συμπεριφορά τους μέσα από τον κατάλληλο καθορισμό τιμών. Στα σχήματα ελέγχου αποδοχής κλήσεων που βασίζονται στην τιμολόγηση, η τρέχουσα κατάσταση του δικτύου μπορεί να μεταβάλλει και τη συμπεριφορά των χρηστών μέσω της καταλληλης τιμολόγησης. Η ενσωμάτωση των διαδικασιών τιμολόγησης στον έλεγχο αποδοχής κλήσεων στοχεύει στην παροχή μιας αξιόπιστης λύσης για τη διαχείριση πόρων που ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις QoS των χρηστών.

Η έρευνα πάνω στους αλγορίθμους δυναμικής τιμολόγησης για κινητά δίκτυα επικοινωνιών ξεκίνησε το 2000 [190], [191]. Οι πρώτοι βασικοί αλγόριθμοι που προτάθηκαν

ήταν απλοί και βασίζονταν σε κοινά παραδεκτές αρχές. Μια βασική αρχή είναι ότι όσο η τιμή της κλήσης αυξάνεται, οι χρήστες έχουν την τάση είτε να μικραίνουν τη διάρκεια των κλήσεων τους είτε να περιορίζουν τον αριθμό των κλήσεων που πραγματοποιούν ή και τα δύο. Συνεπώς, μια στρατηγική τιμολόγησης μπορεί να αποδειχθεί ένα πολύ ισχυρό εργαλείο για τη διατήρηση του τηλεπικοινωνιακού φορτίου –εξαρτώμενου από το χρόνο συγκράτησης της κλήσης και τους χρόνους αφίξεων μεταξύ διαδοχικών κλήσεων– σε δεδομένο επίπεδο στο οποίο η ικανοποίηση του χρήστη είναι επαρκής. Παρόλα αυτά η φύση των ασύρματων δικτύων καθιστά αναγκαία να ληφθούν υπ' όψη παράμετροι, όπως η ελαστικότητα τιμής ως προς τη ζήτηση καθώς και η επίδραση των τιμών στη κινητικότητα των χρηστών. Τα στοιχεία αυτά καθιστούν ιδιαίτερα σύνθετη τη διαμόρφωση του μαθηματικού προβλήματος. Όμως η εισαγωγή των σχημάτων τιμολόγησης στον έλεγχο αποδοχής κλήσεων προσφέρει μια ικανή και ρεαλιστική μοντελοποίηση της συμπεριφοράς των χρηστών έναντι του αυξανόμενου φορτίου του δικτύου. Αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στο γεγονός ότι τα τιμολογιακά κίνητρα (τιμές) που εκφράζουν το κόστος των παρεχομένων υπηρεσιών είναι πολύ σημαντικά για τους χρήστες του δικτύου.

Η περιγραφή του χρησιμοποιούμενου σχήματος ελέγχου αποδοχής κλήσεων και η λειτουργία του καθώς και η εξαγωγή των αναλυτικών σχέσεων για τον υπολογισμό των πιθανοτήτων μη αποδοχής κλήσεων έγινε στη προηγούμενη ενότητα 5.3. Η διαδικασία της τιμολόγησης βασίζεται στον καθορισμό ενός κατωφλίου τιμολόγησης το οποίο αποτελεί την κανονική τιμή (normal price). Σαν κανονικές τιμές ορίζονται οι τιμές που γίνονται αποδεκτές από κάθε χρήστη με τις οποίες χρεώνεται για την πραγματοποίηση μιας κλήσης. Για την περίπτωση που εξετάζουμε, θεωρούμε v_{0n} και v_{0w} ως τις κανονικές τιμές για την πραγματοποίηση κλήσεων στενού και μεγάλου εύρους ζώνης, αντίστοιχα. Καθώς οι τιμές αλλάζουν δυναμικά σύμφωνα με τις συνθήκες του δικτύου, οι αντίστοιχες πραγματικές τιμές για τις κλήσεις στενού εύρους ζώνης και τις κλήσεις μεγάλου εύρους ζώνης είναι v_n και v_w, αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές υπολογίζονται δυναμικά μέσα από το παίγνιο διαπραγμάτευσης μεταξύ του δικτύου και των συνολικών μονάδων εύρους ζώνης που ζητά κάθε κλήση από τις κλάσεις υπηρεσιών που υποστηρίζονται από το δίκτυο. Οι τρέχουσες τιμές διαμορφώνονται μέσα από το παίγνιο διαπραγμάτευσης. Τα αποτελέσματα των τιμών μεταδίδονται από τους σταθμούς βάσης του δικτύου στους υποψήφιους χρήστες και τους πληροφορούν για τις τρέχουσες τιμές των πόρων, που είναι οι μονάδες εύρους ζώνης που είναι αναγκαίες για την πραγματοποίηση των κλήσεων κάθε τύπου.

Οι τιμές v_n και v_w που υπολογίζονται από το παίγνιο διαπραγμάτευσης καθώς και η αποδοχή των τιμών αυτών από τους εισερχόμενους στο δίκτυο χρήστες καθορίζουν σε

επόμενη φάση τις τιμές των πιθανοτήτων αποδοχής $b_{(n_n+n_w)n}$ και $b_{(n_n+n_w)w}$, για τις κλήσεις στενού εύρους ζώνης και τις κλήσεις μεγάλου εύρους ζώνης, αντίστοιχα. Όταν οι τιμές v_n και v_w δεν ξεπερνούν τις αντίστοιχες κανονικές τιμές v_{0n} και v_{0w} για τις κλήσεις κάθε τύπου, αυτό σημαίνει ότι το δίκτυο δεν είναι υπερβολικά φορτωμένο, άρα οι τιμές είναι αποδεκτές από τους χρήστες. Στην περίπτωση αυτή, οι τιμές των πιθανοτήτων αποδοχής, των παραμέτρων $b_{(n_n+n_w)n}$ και $b_{(n_n+n_w)w}$ είναι ίσες με τη μονάδα που σημαίνει ότι όλες οι κλήσεις γίνονται αποδεκτές. Ειδάλλως, οι τιμές των παραμέτρων $b_{(n_n+n_w)n}$ και $b_{(n_n+n_w)w}$ θα καθορίζονται από τη συμπεριφορά των χρηστών έναντι των μεταβολών των τιμών v_n και v_w, οι οποίες θα πρέπει να σημειωθεί ότι αυξάνονται καθώς αυξάνεται το φορτίο.

Η αντίδραση των χρηστών στις μεταβολές των τιμών περιγράφεται και ποσοτικοποιείται μέσα από κατάλληλες συναρτήσεις ζήτησης [95]. Οι τιμές των πιθανοτικών παραμέτρων $b_{(n_n+n_w)n}$ και $b_{(n_n+n_w)w}$, που αποτελούν τις πιθανότητες αποδοχής κλήσεων για τον έλεγχο των μεταβάσεων στο διάγραμμα καταστάσεων, καθορίζονται από τις συναρτήσεις ζήτησης που εκφράζουν την πρόθεση των χρηστών για την αποδοχή των τιμών v_n και v_w που έχουν προκύψει από το παίγνιο διαπραγμάτευσης. Για την περιγραφή και ποσοτικοποίηση της αντίδρασης των χρηστών στις μεταβολές των τιμών σε ευρυζωνικά δίκτυα τηλεπικοινωνιών που υποστηρίζουν πολλαπλές κλάσεις υπηρεσιών, έχει προταθεί από τη βιβλιογραφία η παρακάτω συνάρτηση ζήτησης [95], [192]:

$$D[v] = \exp\left(-\left(v/v_0 - 1\right)^2\right),\ v \geq v_0 \quad (5.8)$$

όπου $v \in \{v_n, v_w\}$ και $v_0 \in \{v_{0n}, v_{0w}\}$. Η συνάρτηση αυτή θα χρησιμοποιηθεί στη μελέτη μας για τον υπολογισμό της αντίδρασης των χρηστών όπως αυτή συνδυάζεται με την πιθανότητα αποδοχής των κλήσεων στο συγκεκριμένο σχήμα πιθανοτικού ελέγχου αποδοχής κλήσεων. Ειδικότερα, μέσα από τη συνάρτηση ζήτησης μπορούμε να εκτιμήσουμε το ποσοστό των χρηστών που αποδέχονται τις τιμές των διαπραγματεύσεων που είναι πάνω από τις κανονικές τιμές που έχουν προκαθορίσει οι χρήστες στην αρχική τους συμφωνία με τον πάροχο του δικτύου. Αυτές οι τιμές αποτελούν στην ουσία και τις πιθανότητες οι χρήστες των υποστηριζόμενων κλάσεων υπηρεσιών να αποδεχθούν τις τιμές v_n και v_w. Προφανώς, ισχύει ότι για τις κανονικές τιμές η συνάρτηση ζήτησης θα έχει τιμές $D[v_{0w}] = 1$ και $D[v_{0n}] = 1$, που σημαίνει ότι οι κανονικές τιμές είναι αποδεκτές από όλους τους χρήστες.

5.5. Παίγνια Κατανομής Πόρων και Διαπραγμάτευσης Τιμών

Όπως είναι κατανοητό για τον καθορισμό των πιθανοτήτων αποδοχής των κλήσεων των διαφόρων υπηρεσιών που υποστηρίζονται από το δίκτυο θα πρέπει να υπολογιστούν οι τιμές v_n και v_w αλλά και να γίνει η κατάλληλη κατανομή των πόρων. Οι κύριοι στόχοι της τιμολογιακής πολιτικής και των παιγνίων διαπραγμάτευσης είναι: α) η κατανομή των διαθέσιμων πόρων μεταξύ των διάφορων κλήσεων σύμφωνα με τα επίπεδα προτεραιότητας τους και β) ο δυναμικός καθορισμός των πιθανοτήτων αποδοχής των κλήσεων σύμφωνα με τις εκάστοτε συνθήκες κίνησης με στόχο την αποφυγή συμφόρησης και την παροχή εγγυήσεων ποιότητας υπηρεσίας στις κλήσεις που βρίσκονται σε εξέλιξη μέσα από τη σωστή τιμολόγηση. Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων αναπτύσσονται δύο παίγνια τα οποία είναι όμως αλληλοεξαρτώμενα μεταξύ τους.

Για την αντιμετώπιση του πρώτου στόχου διαμορφώνεται ένα παίγνιο ανταγωνισμού μεταξύ των κλήσεων των διαφορετικών κλάσεων υπηρεσιών. Το αποτέλεσμα του παιγνίου ανταγωνισμού είναι ο υπολογισμός των ποσοτήτων των πόρων που πρέπει να εκχωρηθούν σε κάθε τύπο κλήσης δεδομένων των τιμών, ώστε τα κέρδη του παρόχου από κλήση κάθε τύπου να είναι τα ίδια. Παράλληλα με το παίγνιο ανταγωνισμού μεταξύ των κλήσεων για την ορισμό των εκχωρούμενων πόρων εξελίσσεται και ένα παίγνιο διαπραγμάτευσης των τιμών για την εκχώρηση των πόρων, άρα και για την πραγματοποίηση των κλήσεων. Ο στόχος των παιγνίων είναι η μεγιστοποίηση των κερδών του παρόχου, ώστε να γίνει η βέλτιστη εκχώρηση πόρων αλλά συγχρόνως και η βέλτιστη τιμολόγηση τους λαμβάνοντας υπ' υπόψη τις απαιτήσεις QoS των διαφόρων κλάσεων υπηρεσιών. Έτσι, διαμορφώνεται ένα μοντέλο διαπραγμάτευσης Nash μεταξύ των δυο τύπων κλήσεων στενού και μεγάλου εύρους ζώνης και οι εκάστοτε τιμές καθορίζονται με την επίτευξη της ισορροπίας Nash NE (Nash Equilibrium) [193]. Ειδικότερα, οι τιμές που καθορίζονται από την ισορροπία Nash είναι οι τιμές που πρέπει να γίνουν δεκτές από τους χρήστες ώστε οι πραγματοποιούμενες κλήσεις να γίνουν αποδεκτές στο δίκτυο.

5.5.1. Κατανομή Πόρων και Παίγνιο Ανταγωνισμού

Για τον υπολογισμό των πόρων που πρόκειται να εκχωρηθούν σε κάθε τύπου κλήση που υποστηρίζονται από το δίκτυο διαμορφώνεται ένα παίγνιο ανταγωνισμού ως εξής:

- Οι δυο παίκτες που συμμετέχουν στο παίγνιο και ανταγωνίζονται για την εκχώρηση πόρων είναι οι δυο αντιπροσωπευτικοί τύποι κλήσεων, στενού και μεγάλου εύρους ζώνης. Κάθε τύπος κλήσης ζητά τους αναγκαίους πόρους από το δίκτυο ανάλογα με το συνολικό αριθμό των κλήσεων αυτού του τύπου που θα βρίσκονται σε εξέλιξη σε κάθε κατάσταση.
- Οι δυο τύποι κλήσεων ανταγωνίζονται για τις αναγκαίες μονάδες εύρους ζώνης και επιλέγουν τον αριθμό αναγκαίων πόρων ταυτόχρονα. Το τελικό αποτέλεσμα από την εκχώρηση των πόρων είναι η πραγματοποίηση κλήσεων.
- Οι δυο τύποι κλήσεων που αποτελούν τους παίκτες δε συνεργάζονται σε όλη τη διάρκεια και τη διαδικασία του ανταγωνισμού. Αυτή η θεώρηση είναι απόλυτα σύμφωνη με την παραδοχή που έγινε στην περιγραφή του συγκεκριμένου σχήματος ελέγχου αποδοχής κλήσεων, όπου θεωρείται ότι οι κλήσεις των διάφορων κλάσεων υπηρεσιών είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους. Η θεώρηση αυτή μας καθορίζει το ότι το παίγνιο είναι μη-συνεργατικό.
- Οι δυο τύποι κλήσεων που περιγράφουν τις αντίστοιχες κλάσεις υπηρεσιών επηρεάζουν αμφότερες τις συνολικές τους χρησιμότητες, καθώς η στρατηγική της μιας επηρεάζει τη χρησιμότητα της άλλης. Ειδικότερα, η χρησιμότητα μιας κλήσης είναι μια κατάλληλη αποσβεννύμενη εκθετική συνάρτηση των v_n και v_w. Οι αποφάσεις κάθε κατηγορίας κλήσεων επηρεάζουν την τιμή του τελικού προϊόντος που είναι οι πραγματοποιούμενες κλήσεις.

Ο συνολικός αριθμός των μονάδων εύρους ζώνης που ζητούνται για εκχώρηση από κάθε είδος κλήσης προκύπτει ως γινόμενο του αριθμού των χρηστών, που αποτελεί και τον αριθμό των κλήσεων, με τις απαιτούμενες μονάδες εύρους ζώνης για κάθε κλήση και δίνεται από τις σχέσεις: $x_n = c_n n_n$ και $x_w = c_w n_w$, για τις κλήσεις στενού και μεγάλου εύρους ζώνης, αντίστοιχα. Όπως είναι γνωστό οι δυο αντιπροσωπευτικές κλάσεις υπηρεσιών έχουν διαφορετικά QoS χαρακτηριστικά, άρα και διαφορετικές απαιτήσεις πόρων. Για τη διαφοροποίηση των απαιτήσεων των χρηστών κάθε κλάσης υπηρεσιών εισάγεται η παράμετρος t η οποία λαμβάνει τιμές στο διάστημα $t \in (0,1]$, έτσι ώστε να εκφράζει τη σχέση μεταξύ των απαιτήσεων κάθε τύπου κλήσης, σύμφωνα με τη σχέση $c_n = tc_w$. Συνεπώς, θα ισχύει η σχέση $x_n = tc_w n_n$. Αν η συνολική ζήτηση για μονάδες εύρους ζώνης σε κάθε κατάσταση είναι d, τότε η συνάρτηση ζήτησης μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$p(x_n, x_w) = d - sx_w - x_n \quad (5.9)$$

όπου η παράμετρος s με πεδίο τιμών $s \in (0,1]$ εισάγεται για να υποδηλωθεί η απόδοση προτεραιότητας μεταξύ των κλήσεων διαφορετικού τύπου. Στην ουσία, μέσω της εισαγωγής της παραμέτρου s εισάγουμε στη συνάρτηση ζήτησης ένα συντελεστή βαρύτητας της μιας κλάσης υπηρεσιών ως προς τη άλλη. Έτσι για παράδειγμα, αν η παράμετρος έχει τιμή ίση με τη μονάδα $s = 1$ τότε αυτό σημαίνει ότι όλοι οι τύποι κλήσεων έχουν την ίδια προτεραιότητα. Αν πάλι θεωρήσουμε ότι $s = 0.5$, τότε αυτό σημαίνει ότι οι κλήσεις στενού εύρους ζώνης θα έχουν διπλάσια προτεραιότητα σε σχέση με τις κλήσεις που απαιτούν μεγάλο εύρος ζώνης.

Οι τιμές για τους πόρους κάθε κλάσης υπηρεσιών καθορίζονται από τη διαπραγμάτευση μεταξύ του δικτύου και των κλήσεων. Δεδομένων των τιμών v_n και v_w και της συνάρτησης ζήτησης οι κλήσεις λαμβάνουν μέρος σε ένα παίγνιο ανταγωνισμού ώστε να προκύψουν οι συνολικοί πόροι που θα εκχωρηθούν σε κάθε τύπο κλήσεων στην κατάσταση ισορροπίας. Οι δυο τύποι κλήσεων που όπως έχουμε τονίσει αντιστοιχούν σε δυο αντιπροσωπευτικές κλάσεις υπηρεσιών οι οποίες ανταγωνίζονται ταυτόχρονα για το συνολικό αριθμό των BUs που θέλουν να τους εκχωρηθούν που κατ' επέκταση αντιστοιχεί και στο συνολικό αριθμό των χρηστών που μπορούν να εξυπηρετηθούν από κάθε κλάση υπηρεσιών, ανάλογα πάντα με τις απαιτήσεις κάθε μιας. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι δεδομένων των τιμών v_n για τις κλήσεις στενού εύρους ζώνης και v_w για τις κλήσεις μεγάλου εύρους ζώνης το οριακό κόστος κάθε κλήσης ως προς τις απαιτήσεις c_n των κλήσεων στενού εύρους ζώνης θα είναι v_n / t και v_w για τις κλήσεις μεγάλου εύρους ζώνης, αντίστοιχα. Τελικά, το βέλτιστο αποτέλεσμα του παιγνίου διαπραγμάτευσης για την εκχώρηση των πόρων προκύπτει στην κατάσταση ισορροπίας Cournot-Nash.

Στο σημείο αυτό, θα πρέπει να αναφέρουμε ότι το μοντέλο ανταγωνισμού Cournot είναι ένα οικονομικό μοντέλο το οποίο έχει χρησιμοποιηθεί για την περιγραφή της δομής ενός βιομηχανικού κλάδου όπου οι εταιρείες ανταγωνίζονται και αποφασίζουν ανεξάρτητα η καθεμία για την ποσότητα που πρέπει να παράγουν ταυτόχρονα. Το μοντέλο αυτό πήρε το όνομα του από τον Antoine Augustin Cournot (1801-1877) ο οποίος παρατήρησε τον ανταγωνισμό (δυοπώλιο) για την άντληση ύδατος από διάφορες πηγές και πρότεινε το μοντέλο αυτό. Πολλά χρόνια αργότερα τη δεκαετία του '50 ήρθε η επιβεβαίωση της ισορροπίας του οικονομικού μοντέλου του Cournot από το μεγάλο μαθηματικό και θεμελιωτή της θεωρίας παιγνίων John Nash. Για το λόγο αυτό, και σε ορισμένες περιπτώσεις στη βιβλιογραφία το σημείο ισορροπίας τέτοιων παιγνίων ανταγωνισμού αναφέρεται και ως Cournot-Nash [194]. Βέβαια, η βασική λογική σήμερα στα παίγνια

κατανομής πόρων βασίζεται στην καθαρή εφαρμογή της θεωρίας παιγνίων και στην επίτευξη της ισορροπίας Nash κατά τρόπο ώστε: α) να γίνεται αποτελεσματική εκχώρηση του εύρους ζώνης μεταξύ των κλήσεων, λαμβάνοντας υπόψη τις διαφορετικές ανάγκες και απαιτήσεις επίδοσης, β) τη δίκαιη κατανομή του και γ) την αξιοποίηση της τιμολόγησης με στόχο τη μεγιστοποίηση των κερδών για το δίκτυο [195].

Αυτό το οικονομικό μοντέλο ανταγωνισμού με κάποιες αναγκαίες επεκτάσεις μπορεί να αξιοποιηθεί και στην περίπτωση των ασύρματων δικτύων επικοινωνιών. Συγκεκριμένα, το πρόβλημα της εκχώρησης και κατανομής πόρων μπορεί να μοντελοποιηθεί σαν ένα παίγνιο ανταγωνισμού μεταξύ των κλήσεων και του δικτύου, πραγματοποιώντας τις αναγκαίες προσαρμογές. Επειδή το παίγνιο μελετάται σε επίπεδο δικτύου με ανταγωνιστές τις κλήσεις, τότε το περιβάλλον μπορεί να θεωρηθεί ως τέλειο –ιδανικό– από πλευράς ανταγωνισμού, απαλλαγμένο από τις ιδιαιτερότητες και τις στρεβλώσεις της πραγματικής αγοράς. Η μοντελοποίηση του προβλήματος της κατανομής πόρων με τη μορφή ενός γνωστού παιγνίου ανταγωνισμού μας εξασφαλίζει τόσο την ύπαρξη των καταστάσεων ισορροπίας Nash για τις καταστάσεις του δικτύου, όσο και το γεγονός ότι η λύση είναι βέλτιστη κατά Pareto (Pareto optimal) [175]. Στο σημείο αυτό, θα πρεπει να αναφέρουμε ότι στο παίγνιο οι παίκτες (δίκτυο και κλήσεις) θεωρούνται λογικοί, γεγονός που εξασφαλίζει την ισορροπία Nash [175].

Για την κατάσταση ισορροπίας προκύπτει το ακόλουθο βέλτιστο αποτέλεσμα εκχώρησης πόρων συναρτήσει των τιμών v_n και v_w για την πραγματοποίηση των αντίστοιχων κλήσεων κάθε κλάσης υπηρεσίας:

$$x_n\left(v_n, v_w\right) = \frac{d\left(2-s\right) + sv_w - 2v_n/t}{4-s^2} \quad (5.10)$$

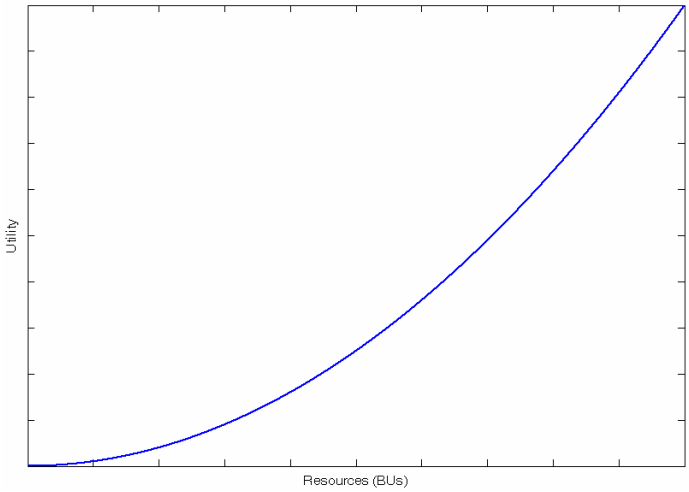
$$x_w\left(v_n, v_w\right) = \frac{d\left(2-s\right) + sv_n/t - 2v_w}{4-s^2} \quad (5.11)$$

όπου για κάθε κατάσταση θα ισχύει κάθε φορά ότι $x_n + x_w \le C$. Οι σχετικές αποδείξεις εξαγωγής των σχέσεων υπολογισμού για τα x_n και x_w συναρτήσει των τιμών των πόρων και των άλλων παραμέτρων, για την κατάσταση ισορροπίας του παιγνίου ανταγωνισμού παρέχονται αναλυτικά στη σχετική βιβλιογραφία [194], [196]. Επιπλέον, οι αντίστοιχες συναρτήσεις χρησιμότητας (utility functions) για τις κλήσεις στενού και μεγάλου εύρους ζώνης που ορίζονται από τη σχετική βιβλιογραφία [196] δίνονται από τις σχέσεις:

$$U_n\left(v_n, v_w\right) = \left(x_n\left(v_n, v_w\right)\right)^2 \quad (5.12)$$

$$U_w\left(v_n, v_w\right) = \left(x_w\left(v_n, v_w\right)\right)^2. \quad (5.13)$$

Οι συναρτήσεις χρησιμότητας που ορίζονται στις σχέσεις 5.12 και 5.13, επιλέγονται βάσει της κοινής παραδοχής ότι όσο περισσότεροι πόροι κατανέμονται σε μια κατηγορία κλήσεων τόσο αυξάνει η χρησιμότητα για αυτή, αλλά και η ικανοποίηση των αντίστοιχων χρηστών, αφού μπορεί να διεκπεραιωθεί μεγαλύτερος αριθμός κλήσεων και κατ' επέκταση να εξυπηρετηθεί μεγαλύτερος αριθμός χρηστών αυτής της κατηγορίας, μειώνοντας παράλληλα και την πιθανότητα μη αποδοχής τους από το δίκτυο.



Σχήμα 5.1: Γραφική παράσταση συνάρτησης χρησιμότητας

Με τον τρόπο αυτό, ποσοτικοποιείται το επίπεδο ικανοποίησης μέσα από τις ποσότητες των εκχωρούμενων πόρων [197]. Η έννοια της χρησιμότητας χρησιμοποιείται ευρύτατα στη μικροοικονομία και αναφέρεται στο επίπεδο ικανοποίησης που λαμβάνει ο λήπτης των αποφάσεων σαν αποτέλεσμα των ενεργειών του [173]. Ο ορισμός μιας συνάρτησης χρησιμότητας που να περιγράφεται από κάποιο κανόνα ή αξίωμα δεν υπάρχει. Συνεπώς, οποιαδήποτε συνάρτηση η οποία μπορεί να αντιστοιχεί τα στοιχεία ενός συνόλου σε μια δεδομένη σειρά μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν συνάρτηση χρησιμότητας αρκεί να ταιριάζει με τη φύση και τη δομή του μελετούμενου προβλήματος.

Προκειμένου λοιπόν να καταδείξουμε την ισχυρή εξάρτηση της ικανοποίησης των χρηστών από τους εκχωρούμενους πόρους, επιλέξαμε τις συναρτήσεις χρησιμότητας που περιγράφονται από τις σχέσεις 5.12 και 5.13. Οι προτεινόμενες συναρτήσεις χρησιμότητας, όπως θα δούμε πρόκειται να χρησιμοποιηθούν και στη συνέχεια, στο δεύτερο αλληλοεξαρτώμενο παίγνιο διαπραγμάτευσης τιμών, αφού τα δυο παίγνια συνδέονται μεταξύ τους αλλά και η διενέργεια τους γίνεται ταυτόχρονα.

5.5.2. Παίγνιο Διαπραγμάτευσης Nash και Δυναμική Τιμολόγηση

Παράλληλα, με το παίγνιο ανταγωνισμού μεταξύ των κλήσεων για την κατανομή και εκχώρηση των πόρων εξελίσσεται και ένα παίγνιο διαπραγμάτευσης μεταξύ των κλήσεων και του δικτύου για τον καθορισμό των τιμών πραγματοποίησης των κλήσεων. Τα δυο παίγνια εξελίσσονται ταυτόχρονα. Η ιδέα της χρήσης των παιγνίων διαπραγμάτευσης Nash και της λύσης του στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα δεν είναι καινούρια [195]. Η ιδέα αυτή προτάθηκε πρώτα σε δίκτυα μεταφοράς πακέτων δεδομένων [198].

Θεωρούμε ότι αντικειμενικός στόχος σε μια κυψέλη του δικτύου είναι η μεγιστοποίηση των εσόδων που λαμβάνει ο πάροχος του δικτύου μέσα από την κατανομή και εκχώρηση πόρων στους χρήστες για την πραγματοποίηση των κλήσεων, τα οποία υπολογίζονται από τη σχέση:

$$R\left(v_n, v_w\right) = v_n x_n\left(v_n, v_w\right) + v_w x_w\left(v_n, v_w\right). \quad (5.14)$$

Οι τιμές για την πραγματοποίηση των κλήσεων των υποστηριζόμενων κλάσεων υπηρεσιών v_n και v_w είναι το αντικείμενο διαπραγμάτευσης μεταξύ του δικτύου και των χρηστών που αντιπροσωπεύονται από τους δυο τύπους κλήσεων. Από την άλλη πλευρά, οι πόροι που εκχωρούνται μετά τον καθορισμό των v_n και v_w δεν είναι αντικείμενο διαπραγμάτευσης. Επιπλέον, θεωρούμε ότι οι διαπραγματεύσεις μεταξύ του δικτύου σε επίπεδο κυψέλης και των κλήσεων γίνονται ταυτόχρονα. Συγκεκριμένα και οι δυο τύποι κλήσεων διαπραγματεύονται ταυτόχρονα με το δίκτυο αλλά και ανεξάρτητα ο καθένας για τη δική της τιμή. Κατά τη διαπραγμάτευση μεταξύ της κυψέλης του δικτύου και ενός τύπου κλήσης και τα δύο μέρη λαμβάνουν υπόψη τους την τιμή που πληρώνει ο άλλος τύπος κλήσης, αφού η καθεμία επηρεάζει το αποτέλεσμα. Οι διαπραγματεύσεις αυτές μπορούν να μοντελοποιηθούν σαν ένα πρόβλημα διαπραγμάτευσης Nash στο οποίο η βέλτιστη λύση καταλήγει στην ισορροπία Nash [193], [199].

Θεωρούμε ότι οι τιμές v^*_n και v^*_w υποδηλώνουν τις τιμές ισορροπίας οι οποίες πληρώνονται από τις κλήσεις στενού και μεγάλου εύρους ζώνης, αντίστοιχα. Επίσης, θεωρούμε ότι G_i, $i \in \{n, w\}$ είναι το διάνυσμα του σημείου διαφωνίας το οποίο ορίζεται ως $G_i = \left(g_i, g\right) \in S_i$ όπου S_i είναι η ομάδα των εφικτών διανυσμάτων χρησιμότητας και εσόδων τα οποία περιγράφονται από την παρακάτω σχέση:

$$S_i = \left\{\left(U_i\left(v_i, v^*_j\right), R\left(v_i, v^*_j\right)\right); v_i \geq 0, j \in \{n, w\}, j \neq i\right\}. \quad (5.15)$$

Το στοιχείο σημείου διαφωνίας g_i αντιστοιχεί στις θέσεις διαπραγμάτευσης όπου δεν υπάρχουν οφέλη αλλά δεν υπάρχουν και ζημίες για τους υποστηριζόμενους τύπους κλήσεων (no loss no gain positions) και g είναι η αντίστοιχη τιμή των εσόδων.

Η λύση ισορροπίας Nash για το παίγνιο διαπραγμάτευσης για τον προσδιορισμό των τιμών για κάθε κλήση των υποστηριζόμενων κλάσεων υπηρεσιών, δεδομένου του αξιώματος συμμετρίας που παρουσιάζει, δίνεται από τη σχέση:

$$v^*_i = \arg\max_{v_i} \left(U_i\left(v_i, v^*_j\right) - g_i\right)\left(R\left(v_i, v^*_j\right) - g\right) \quad (5.16)$$

Όταν μια κλήση κάποιας υποστηριζόμενης κλάσης υπηρεσιών και το δίκτυο δεν καταλήξουν σε συμφωνία, τότε στη κλήση αυτή δεν εκχωρούνται μονάδες εύρους ζώνης και τα έσοδα από αυτή την κυψέλη του δικτύου είναι ίσα με αυτά που αποκτώνται μόνο από τις άλλες κλήσεις που εξυπηρετούνται από το δίκτυο. Στην περίπτωση αυτή, οι αντίστοιχες μονάδες εύρους ζώνης που κατανέμονται στις κλήσεις των υποστηριζόμενων κλάσεων υπηρεσιών όταν εξυπηρετείται μόνο ένας από τους τύπους κλήσεων επειδή οι διαπραγματεύσεις δεν καταλήγουν σε συμφωνία θα δίνονται από τις σχέσεις:

$$x^\circ_n\left(v_n\right) = \left(d - v_n/t\right)/2 \quad (5.17)$$

$$x^\circ_w\left(v_w\right) = \left(d - v_w\right)/2. \quad (5.18)$$

Σύμφωνα με την εργασία [200] των Binmore, Rubistein και Wolinsky η επίλυση της σχέσης 5.15 για την εξαγωγή των τιμών των εκχωρούμενων πόρων άρα και των πραγματοποιούμενων κλήσεων των υποστηριζόμενων κλάσεων υπηρεσιών θα οδηγήσει στις παρακάτω σχέσεις:

$$v^*_n = \arg\max_{v_n} U_n\left(v_n, v^*_w\right)\left(R\left(v_n, v^*_w\right) - v^*_w x^\circ_w\left(v^*_w\right)\right) \quad (5.19)$$

$$v^*_w = \arg\max_{v_w} U_w\left(v^*_n, v_w\right)\left(R\left(v^*_n, v_w\right) - v^*_n x^\circ_n\left(v^*_n\right)\right) \quad (5.20)$$

όπου v^*_n και v^*_w οι αντίστοιχες τιμές στην κατάσταση ισορροπίας Nash για τις κλήσεις στενού και μεγάλου εύρους ζώνης, αντίστοιχα. Ένα από τα βασικότερα αξιώματα της λύσης Nash για το ομώνυμο παίγνιο διαπραγμάτευσης που χρησιμοποιούμε είναι ότι η λύση Nash στην οποία καταλήγει το παίγνιο είναι βέλτιστη κατά Pareto, το οποίο σημαίνει ότι ορίζεται μια συμφωνία όπου κανένας παίκτης δεν μπορεί να αυξήσει την ωφέλεια του χωρίς να μειώσει την ωφέλεια του άλλου [175]. Το γεγονός ότι οι λύσεις που υπολογίστηκαν είναι βέλτιστες κατά Pareto διασφαλίζει την αποτελεσματικότητα και αποδοτικότητα της συνολικής λύσης του παιγνίου διαπραγμάτευσης Nash.

5.6. Αριθμητικά Αποτελέσματα και Αξιολόγηση Επίδοσης

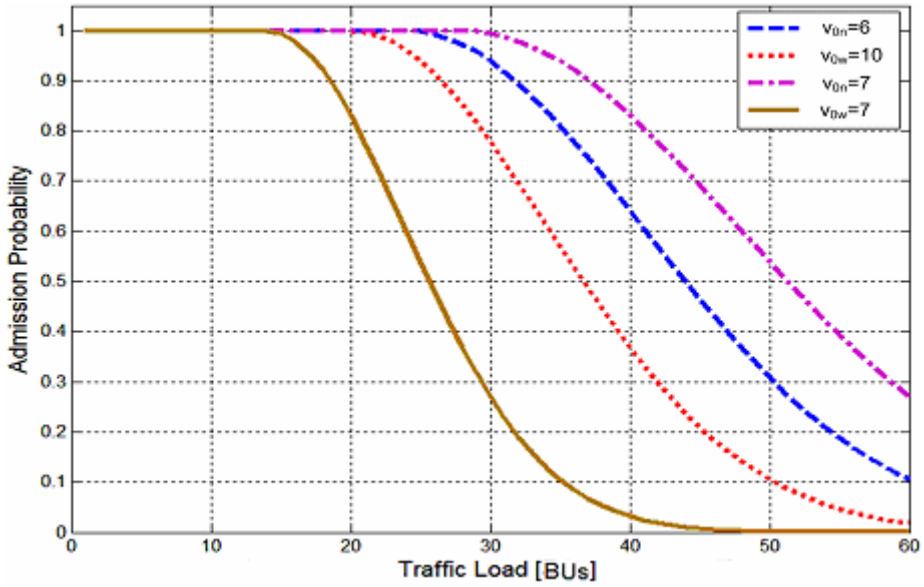
Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν τα αριθμητικά αποτελέσματα από τη βελτιστοποίηση του πιθανοτικού ελέγχου αποδοχής κλήσεων με τη χρήση θεωρίας παιγνίων και την ενσωμάτωση των σχημάτων κατανομής πόρων και δυναμικής τιμολόγησης. Στην ουσία πρόκειται να παρουσιαστούν ορισμένα ενδεικτικά αποτελέσματα της αξιολόγησης επίδοσης του αλγόριθμου GTPS και της δυνατότητας του να προσαρμόζεται στις συνθήκες φορτίου και κίνησης του δικτύου αλλά και στις απαιτήσεις QoS των χρηστών μέσα από το παίγνιο ανταγωνισμού για την κατανομή πόρων και τη διαπραγμάτευση των τιμών. Ειδικότερα, στο σχήμα αυτό έχουμε το δυναμικό καθορισμό των πιθανοτικών παραμέτρων για τον έλεγχο της κίνησης τόσο του φορτίου στενής ζώνης NB (narrow band) όσο και του φορτίου μεγάλου εύρους ζώνης WB (wide band). Η αξιολόγηση της βελτιστοποίησης του σχήματος θα γίνει σε σύγκριση με το παραδοσιακό σχήμα πιθανοτικού ελέγχου TPS (Traditional Probabilistic Scheme), όπου ο καθορισμός των πιθανοτικών παραμέτρων ήταν στατικός.

Όπως προαναφέρθηκε στο προτεινόμενο σχήμα πιθανοτικού ελέγχου αποδοχής κλήσεων ο δυναμικός καθορισμός των πιθανοτικών παραμέτρων γίνεται μέσω της συνάρτησης ζήτησης *D*. Ο υπολογισμός των πιθανοτήτων ανάγεται στο κατά πόσο οι χρήστες θα αποδεχθούν τις τιμές εκχώρησης των πόρων, άρα και πραγματοποίησης των κλήσεων, που θα προκύψουν από το παίγνιο διαπραγμάτευσης με το δίκτυο, δεδομένου ότι όσο αυξάνεται το φορτίο αυξάνονται και οι τιμές. Ο υπολογισμός των πιθανοτήτων γίνεται αφού καθοριστούν τα όρια τιμών τα οποία ο χρήστης θεωρεί ως αποδεκτά για την πραγματοποίηση των κλήσεων.

Στο σχήμα 5.2, απεικονίζονται οι βέλτιστες τιμές των πιθανοτικών παραμέτρων $b_{(n_n+n_w)n}$ και $b_{(n_n+n_w)w}$ που προκύπτουν από τη συνάρτηση ζήτησης (5.8) για διάφορα κατώφλια τιμών, εκφρασμένα σε νομισματικές μονάδες, σε συνδυασμό με τις τιμές v_n και v_w που υπολογίζονται από τα παίγνια διαπραγμάτευσης τιμών και κατανομής πόρων για όλες τις περιπτώσεις φορτίου στην κυψέλη. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται όλες οι τιμές των πιθανοτικών παραμέτρων που υπολογίζονται στις καταστάσεις ισορροπίας για κάθε περίπτωση συνολικού φορτίου μέχρι τη μέγιστη χωρητικότητα των *C=60* μονάδων εύρους ζώνης (BUs) που έχουμε ορίσει. Σε κάθε κατάσταση της κυψέλης από πλευράς φορτίου, εκφρασμένου σε μονάδες εύρους ζώνης, υπολογίζεται η κατάσταση ισορροπίας των διεξαγόμενων παιγνίων κατανομής πόρων και τιμολόγησης, και στη συνέχεια καθορίζονται

οι βέλτιστες πιθανότητες αποδοχής κάθε κλήσης για τις δεδομένες καταστάσεις του δικτύου από πλευράς φορτίου.

Πρόκειται να εξεταστούν δύο περιπτώσεις κατωφλίων τιμών για τις κλήσεις NB και WB, αντίστοιχα, ώστε να εξεταστεί η επίδραση τους στον τελικό καθορισμό των τιμών των πιθανοτήτων αποδοχής. Ειδικότερα, πρόκειται να εξεταστεί η περίπτωση όπου τα κατώφλια τιμών που ορίζονται για τους δυο τύπους κλήσεων είναι ίσα με $v_{0n} = v_{0w} = 7$ νομισματικές μονάδες. Επίσης, θα εξεταστεί η περίπτωση όπου ορίζονται διαφορετικές κανονικές τιμές για τις κλήσεις NB και WB. Συγκεκριμένα, ορίστηκαν $v_{0n} = 6$ και $v_{0w} = 10$. Ο ορισμός αυτός ακολουθεί το γενικό κανόνα της τηλεπικοινωνιακής αγοράς, όπου οι κλήσεις με μεγαλύτερες απαιτήσεις εκχώρησης πόρων για την πραγματοποίηση τους όπως οι κλήσεις WB είναι ακριβότερες σχέση με τις NB, διότι δεσμεύουν περισσότερους πόρους του δικτύου [95].



Σχήμα 5.2: Βέλτιστες τιμές πιθανοτικών παραμέτρων αποδοχής κλήσεων για μεταβαλλόμενο φορτίο δικτύου κάτω από διάφορα κατώφλια τιμών.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.2, σε καταστάσεις χαμηλού φορτίου οι εισερχόμενες κλήσεις χρεώνονται στις κανονικές τιμές v_{0n} και v_{0w}, οπότε οι τιμές των πιθανοτήτων αποδοχής και για τους δυο τύπους κλήσεων είναι ίσες με τη μονάδα. Στις καταστάσεις αυτές στο δίκτυο υπάρχει επάρκεια πόρων, οπότε δεν περιορίζεται η αποδοχή κανενός είδους κλήσεων, αφού οι προσφερόμενες τιμές από το δίκτυο είναι αποδεκτές από τους χρήστες, στους οποίους εκχωρούνται οι πόροι και πραγματοποιούνται οι κλήσεις. Στη συνέχεια, παρατηρώντας το σχήμα διαπιστώνουμε ότι καθώς το φορτίο αυξάνεται οι τιμές των

πιθανοτήτων αποδοχής μειώνονται προοδευτικά επιτυγχάνοντας τον έλεγχο των κλήσεων, φτάνοντας μέχρι το μηδέν στις καταστάσεις πολύ υψηλού φορτίου, όπου στόχος είναι αποκλειστικά η αποφυγή της συμφόρησης. Ο ρυθμός με τον οποίο μειώνονται οι τιμές των πιθανοτικών παραμέτρων εξαρτάται τόσο από τα κατώφλια τιμών που έχουμε ορίσει, όσο και από την προτεραιότητα των κλήσεων, αλλά και τις QoS απαιτήσεις κάθε μιας, όπως αυτές εκφράζονται από τις διαφορετικές απαιτήσεις σε πόρους.

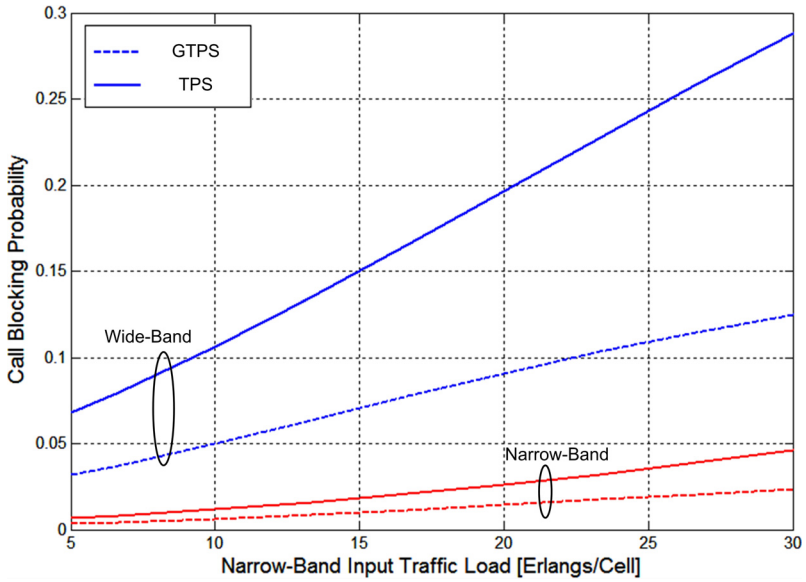
Στην περίπτωση όπου έχουμε ορίσει ίδια κατώφλια τιμών για τις κλήσεις NB και WB, οι διαφορετικές τιμές των πιθανοτήτων αποδοχής οφείλονται στις τιμές που έχουν καθοριστεί από τις καταστάσεις ισορροπίας που έχουν καταλήξει τα παίγνια εκχώρησης πόρων και διαπραγμάτευσης τιμών. Στις τιμές αυτές που έχουν καθοριστεί από τα παίγνια αυτά επιδρούν και άλλοι παράγοντες, όπως τα επίπεδα προτεραιότητας που έχουν αποδοθεί σε συγκεκριμένες κατηγορίες κλήσεων που υποστηρίζονται από το δίκτυο –στην παρούσα μελέτη θεωρούμε τις κλήσεις NB ως υψηλότερης προτεραιότητας– αλλά και οι διαφορετικές απαιτήσεις εκχώρησης πόρων για την πραγματοποίηση κάθε τύπου κλήσεων. Συγκεκριμένα, παρατηρούμε ότι στην περίπτωση των ίδιων κανονικών τιμών οι πιθανότητες αποδοχής των NB κλήσεων είναι υψηλότερες από αυτές των WB για τις ίδιες καταστάσεις φορτίου, που οφείλεται στην απόδοση προτεραιότητας στην κλάση υπηρεσιών των NB κλήσεων.

Οι τιμές των πιθανοτικών παραμέτρων για κάθε τύπο κλήσης που απεικονίζονται στο σχήμα 5.1 μας δείχνουν ότι καθώς αυξάνεται το φορτίο στο δίκτυο οπότε αυξάνονται και οι τιμές, μικρότερος αριθμός χρηστών θα τις αποδέχεται, με αποτέλεσμα τη μείωση των τιμών των πιθανοτικών παραμέτρων, άρα και τη μικρότερη είσοδο των χρηστών στο δίκτυο. Επιπλέον, οι κλήσεις WB χρεώνονται υψηλότερες τιμές σε σχέση με τις NB λόγω της αυξημένης ζήτησης σε μονάδες εύρους ζώνης. Με βάση τη λογική αυτή, στη δεύτερη περίπτωση που εξετάστηκε ορίστηκαν ως κανονικές τιμές οι $v_{0n} = 6$ και $v_{0w} = 10$ για τις κλήσεις NB και WB, αντίστοιχα. Στην περίπτωση αυτή παρατηρούμε ότι όσο χαμηλότερες είναι οι κανονικές τιμές που έχουν ορίσει οι χρήστες για τις κλήσεις, τόσο πιο γρήγορα θα αρχίσουν να μειώνονται οι πιθανότητες αποδοχής της υπέρβασης τους. Παράλληλα, παρατηρούμε ότι αν οι κανονικές τιμές είναι χαμηλές τότε το δίκτυο κατά τη διαπραγμάτευση θα τις υπερβεί ταχύτερα καθώς θα αυξάνεται το τηλεπικοινωνιακό του φορτίο. Αυτό είναι εμφανές από το ότι μόλις οι τιμές που προκύπτουν από τα παίγνια διαπραγμάτευσης ξεπερνούν τα κατώφλια των κανονικών τιμών, τότε οι τιμές των πιθανοτήτων αποδοχής θα αρχίσουν να μειώνονται σταδιακά. Ακόμα, παρατηρούμε ότι και σε αυτή την περίπτωση διατηρείται η επίδραση του μηχανισμού απόδοσης προτεραιότητας

που έχει ενσωματωθεί τόσο στον αλγόριθμο κατανομής πόρων όσο και στο σχήμα ελέγχου αποδοχής κλήσεων.

Επίσης, στο σχήμα 5.2 παρατηρούμε ότι η μείωση των πιθανοτήτων αποδοχής $b_{(n_n+n_w)w}$ για τις κλήσεις WB είναι ταχύτερη σχέση με την αντίστοιχη για τις τιμές της $b_{(n_n+n_w)n}$, αφού οι τιμές για τις κλήσεις WB είναι υψηλότερες. Επιπλέον, η κλίση των καμπύλων πιθανοτήτων που σχεδιάζονται δείχνουν την ταχύτητα περιορισμού της αποδοχής των νέων κλήσεων, η οποία εξαρτάται από τις απαιτήσεις κάθε τύπου κλήσεων, ενώ οι αντίστοιχες απόλυτες τιμές των πιθανοτικών παραμέτρων υποδεικνύουν τις σχετικές προτεραιότητες μεταξύ των διαφόρων τύπων κλήσεων που υποστηρίζονται από το δίκτυο.

Η επίδραση της ενσωμάτωσης των αλγορίθμων κατανομής πόρων και δυναμικής τιμολόγησης με χρήση θεωρίας παιγνίων στην επίδοση του σχήματος πιθανοτικού ελέγχου αποδοχής κλήσεων και η αξιολόγηση της παρουσιάζεται στο σχήμα 5.3. Ειδικότερα, παρουσιάζεται η επίδοση του σχήματος ως προς τις πιθανότητες μη αποδοχής κλήσεων κάθε τύπου συναρτήσει μεταβλητού φορτίου στενής ζώνης. Στο πλαίσιο αυτό γίνεται η συγκριτική παρουσίαση των επιδόσεων του σχήματος GTPS, όπου αφενός ο καθορισμός των πιθανοτικών παραμέτρων γίνεται δυναμικά με τη χρήση της θεωρίας παιγνίων και μεταβάλλονται ανάλογα με την τρέχουσα κατάσταση του δικτύου, βάσει των διαδικασιών που περιγράφηκαν παραπάνω, και αφετέρου του παραδοσιακού πιθανοτικού σχήματος TPS όπου οι πιθανότητες είναι στατικές και εξωτερικά επιβαλλόμενες.



Σχήμα 5.3: Πιθανότητες μη αποδοχής κλήσεων και συγκριτική επίδοση των σχημάτων TPS και GTPS συναρτήσει μεταβαλλόμενου φορτίου.

Οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στη συγκριτική αξιολόγηση της επίδοσης είναι: $C = 60$, t=0.5, s=0.5, $\lambda_n = 1/30$, $\lambda_w = 1/20$, $\mu_w = 1/400$ ενώ οι κανονικές τιμές v_{0n}, v_{0w} για τις κλήσεις NB και WB θα είναι αντίστοιχα 6 και 10 μονάδες. Για τις ανάγκες της αξιολόγησης επιλέγουμε ως μεταβαλλόμενο το φορτίο κλήσεων NB στο οποίο η παράμετρος μ_n θα κυμαίνεται από 1/180 έως 1/900. Το φορτίο αυτό επιλέγεται ενδεικτικά ως μεταβαλλόμενο, διότι έχουμε μεγαλύτερη απόδοση προτεραιότητας σε αυτή την κλάση. Αυτό συμβαίνει διότι οι υπηρεσίες φωνής που έχουν μικρότερες απαιτήσεις εύρους ζώνης (NB calls) είναι μη ανεκτής καθυστέρησης και θα πρέπει να έχουν μικρότερη πιθανότητα μη αποδοχής, ώστε να εξυπηρετηθούν άμεσα από το δίκτυο. Αντίθετα, οι κλήσεις μεταφοράς δεδομένων απαιτούν μεγαλύτερο εύρος ζώνης (WB calls) για την ταχύτερη μεταφορά των δεδομένων, αλλά είναι ανεκτής καθυστέρησης με αποτέλεσμα να μπορούν να ανεχθούν υψηλότερη πιθανότητα μη αποδοχής [115]. Στο παραδοσιακό πιθανοτικό σχήμα χρησιμοποιούμε σαν τιμές των πιθανοτικών παραμέτρων τις $b_{(n_n+n_w)n} = 0.8$ και $b_{(n_n+n_w)w} = 0.4$ για τις κλήσεις NB και WB, αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές είναι στατικές και προκαθορισμένες. Σαν σημεία αλλαγής της πολιτικής αποδοχής, όπου γίνεται η εφαρμογή των στατικών πιθανοτικών παραμέτρων στο σχήμα TPS, έχουν επιλέγει τα αντίστοιχα κατώφλια που είναι T_n=50 και T_w=48. Αντίθετα, στο σχήμα GTPS έχουμε την προοδευτική εφαρμογή των βέλτιστων πιθανοτικών παραμέτρων σε κάθε κατάσταση του δικτύου βάσει, των συνολικών δεσμευμένων πόρων. Στην ουσία στο GTPS, ο καθορισμός της θέσης του «κατωφλιού αποκοπής» και μη αποδοχής των νέων εισερχόμενων κλήσεων καθώς και η αυστηρότητα του γίνεται δυναμικά μέσα από τον καθορισμό των τιμών των πιθανοτικών παραμέτρων.

Όπως φαίνεται από το σχήμα 5.3, το σχήμα GTPS όπου έχουμε το δυναμικό καθορισμό των βέλτιστων πιθανοτικών παραμέτρων, βελτιώνει σημαντικά την επίδοση της πολιτικής ελέγχου αποδοχής κλήσεων, αφού επιτυγχάνει σημαντικά χαμηλότερες πιθανότητες μη αποδοχής κλήσεων και για τις δυο κατηγορίες κλήσεων που εξετάζουμε. Εδώ θα πρέπει να τονίσουμε ότι η σημαντικά βελτιωμένη συμπεριφορά είναι απόρροια της καλύτερης διαχείρισης των πόρων του δικτύου και της δυναμικής λειτουργίας του σχήματος βάσει της τρέχουσας κατάστασης του δικτύου. Ειδικότερα, για τις κλήσεις NB έχουμε χαμηλότερες πιθανότητες μη αποδοχής τους λόγω της απόδοσης μεγαλύτερης προτεραιότητας σε αυτές σε σχέση με τις κλήσεις WB. Επιπλέον, λόγω της υψηλότερης χρέωσης των κλήσεων WB, οι τιμές των πιθανοτικών παραμέτρων, όπως αυτές απεικονίζονται και στο σχήμα 5.2, είναι χαμηλότερες σε σχέση με αυτές των κλήσεων NB.

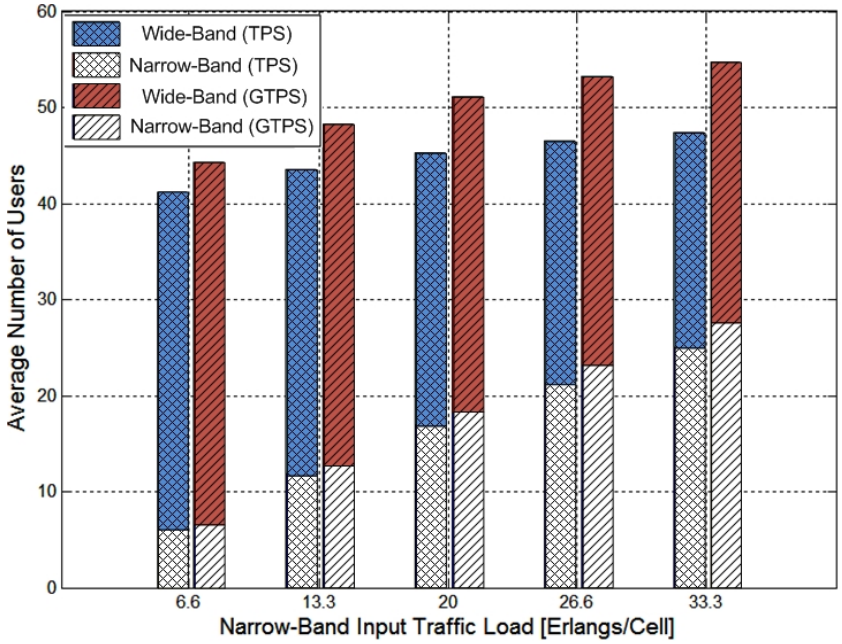
Αυτό επιδρά σαφώς και στις πιθανότητες μη αποδοχής των αντιστοιχών κλήσεων, αφού οι πιθανότητες μη αποδοχής των κλήσεων WB είναι υψηλότερες σε σχέση με τις NB.

Επιπλέον, στο σχήμα 5.3 είναι εμφανές ότι με τη χρήση του GTPS επιτυγχάνεται μεγαλύτερη βελτίωση στις πιθανότητες μη αποδοχής των κλήσεων WB σε σχέση με τη βελτίωση της απόδοσης του σχήματος για τις NB κλήσεις. Αυτό οφείλεται εν μέρει στο ότι η τιμή της στατικής πιθανοτικής παραμέτρου που χρησιμοποιήθηκε στο σχήμα TPS για τις ανάγκες των προσομοιώσεων είναι αρκετά χαμηλή $b_{(n_n+n_w)w} = 0.4$, αλλά και στο ότι η επίδραση του σχήματος δυναμικής τιμολόγησης και η ποσοτικοποίηση της αντίδρασης των χρηστών WB στις μεταβολές των τιμών των κλήσεων είναι πιο ρεαλιστική προς τις συνθήκες του δικτύου. Όπως επίσης και στο ότι ο αλγόριθμος βέλτιστης εκχώρησης πόρων με τη χρήση θεωρίας παιγνίων έχει μεγαλύτερη επίδραση στις κλήσεις WB οι οποίες αιτούνται να τους εκχωρηθούν μεγαλύτερες ποσότητες πόρων από το δίκτυο.

Στο σχήμα 5.4, απεικονίζεται ο μέσος αριθμός των χρηστών βάσει των κλήσεων κάθε τύπου που μπορούν να εξυπηρετηθούν, συναρτήσει μεταβλητού φορτίου NB, τόσο για το παραδοσιακό σχήμα TPS όσο και για το σχήμα GTPS. Στο διάγραμμα 5.4, παρουσιάζονται σε μεικτές στήλες τα σχετικά αποτελέσματα, παρέχοντας τις πληροφορίες τόσο για το συνολικό αριθμό χρηστών που μπορούν να εξυπηρετηθούν, όσο και τους μέγιστους επιμέρους αριθμούς για κάθε κατηγορία. Ειδικότερα, έχουν επιλεγεί κάποιες αντιπροσωπευτικές καταστάσεις φορτίου, για τις οποίες έχουν υπολογιστεί ο μέσος αριθμός χρηστών που μπορεί να εξυπηρετηθεί θεωρητικά από το δίκτυο, ώστε να είναι εφικτή η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της βελτιστοποίησης του πιθανοτικού ελέγχου αποδοχής κλήσεων ως προς τη χρησιμοποίηση του δικτύου και των διαθέσιμων πόρων. Για τις ανάγκες των υπολογισμών αυτών χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες τιμές παραμέτρων που είχαμε και στα προηγούμενα αριθμητικά αποτελέσματα για την αξιολόγηση της πολιτικής ελέγχου αποδοχής κλήσεων.

Είναι φανερό, από τα αποτελέσματα ότι η ενσωμάτωση των σχημάτων κατανομής πόρων και δυναμικής τιμολόγησης με τη χρήση θεωρίας παιγνίων, βελτιώνει σημαντικά τη χρησιμοποίηση του δικτύου, καθώς μπορεί να εξυπηρετηθεί μεγαλύτερος αριθμός χρηστών και να διεκπεραιωθεί μεγαλύτερος αριθμός κλήσεων. Με τον τρόπο αυτό, αυξάνεται σημαντικά η χρησιμότητα του δικτύου αλλά και τα συνολικά έσοδα του παρόχου από τις πραγματοποιούμενες κλήσεις. Άλλωστε, τα δυο αυτά χαρακτηριστικά αποτέλεσαν και τους επιμέρους στόχους μεγιστοποίησης των παιγνίων. Η σημαντικά βελτιωμένη επίδοση είναι φυσικά αποτέλεσμα και των σημαντικά χαμηλότερων πιθανοτήτων μη αποδοχής κλήσεων που επιτυγχάνονται από το GTPS σε σχέση με τον αλγόριθμο TPS. Άρα, ο δυναμικός

έλεγχος της ροής του φορτίου στο δίκτυο που πραγματοποιείται από τον αλγόριθμο GTPS οδηγεί σε σημαντικά βελτιωμένα χαρακτηριστικά χρησιμοποίησης των πόρων του δικτύου σε σχέση με τα παραδοσιακά σχήματα.



Σχήμα 5.4: Μέσος αριθμός χρηστών-κλήσεων σε εξέλιξη- για μεταβλητό φορτίο τηλεπικοινωνιακής κίνησης Narrow Band.

Συνεπώς, ο προτεινόμενος αλγόριθμος GTPS που προέκυψε ως το αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης του πιθανοτικού ελέγχου αποδοχής κλήσεων μέσω της χρήσης θεωρίας παιγνίων αποτελεί την υλοποίηση μιας ρεαλιστικής και αποτελεσματικής πολιτικής ελέγχου αποδοχής κλήσεων και διαχείρισης πόρων που βελτιώνει σημαντικά την απόδοση και τη χωρητικότητα του δικτύου. Τα αριθμητικά αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι το προτεινόμενο σχήμα επιτυγχάνει αξιόλογες επιδόσεις σε σχέση με το παραδοσιακό σχήμα TPS και αποτελεί μια αξιόπιστη λύση για την παροχή ενός ολοκληρωμένου σχήματος κατανομής πόρων, δυναμικής τιμολόγησης και ελέγχου αποδοχής κλήσεων σε σύγχρονα ασύρματα ευρυζωνικά δίκτυα επικοινωνιών.

Κεφάλαιο 6ο

Συμπεράσματα και Υποδείξεις για Μελλοντική Έρευνα

6.1. Συμπεράσματα

Στο τελευταίο κεφάλαιο, πραγματοποιείται μια σύντομη ανασκόπηση των βασικότερων θεμάτων τα οποία μελετήθηκαν και επιπλέον παρουσιάζονται τα βασικά συμπεράσματα της παρούσας διατριβής. Η συνολική αυτή παρουσίαση των συμπερασμάτων συνδράμει στην κατανόηση του σκοπού της διατριβής αλλά και στην πληρέστερη παρουσίαση των προβλημάτων που μελετήθηκαν καθώς και της συμβολής της συγκεκριμένης ερευνητικής εργασίας στην αντιμετώπιση τους.

Στην παρούσα διατριβή μελετήθηκαν θέματα διαχείρισης πόρων, ελέγχου αποδοχής κλήσεων και αξιολόγησης επίδοσης που αφορούν στα σύγχρονα ασύρματα ευρυζωνικά δίκτυα επικοινωνιών, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις σύγχρονες εξελίξεις στο θέμα. Η διαχείριση ραδιοπόρων διαδραματίζει σημαντικότατο ρόλο στην παροχή QoS στα ασύρματα συστήματα επικοινωνιών. Επιπλέον, η ενσωμάτωση νέων υπηρεσιών, όπως η δυνατότητα μεταφοράς δεδομένων, δημιουργεί νέες προκλήσεις στα θέματα διαχείρισης πόρων, όσον αφορά την ανάλυση των παραμέτρων ποιότητας υπηρεσίας (QoS). Τα θέματα αυτά αναλύονται εκτενώς στο δεύτερο κεφάλαιο της διατριβής.

Στα πλαίσια αυτά, στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται η αντιστοίχιση και η ενσωμάτωση των υφιστάμενων μοντέλων δικτυακών υπηρεσιών στις υφιστάμενες κλάσεις υπηρεσιών των δικτύων ασυρμάτων και κινητών επικοινωνιών. Έπειτα παρουσιάζονται δυο αρχιτεκτονικές διαχείρισης πόρων. Η πρώτη αρχιτεκτονική προορίζεται αποκλειστικά για κυψελωτά δίκτυα επικοινωνιών ενώ η δεύτερη αφορά δίκτυα επόμενης γενιάς, λαμβάνοντας υπόψη τις ανάγκες

για διαλειτουργικότητα μεταξύ διαφορετικών τεχνολογιών ασύρματης πρόσβασης. Η ανάγκη για διαλειτουργικότητα εισάγει έναν επιπρόσθετο παράγοντα στις διαδικασίες διαχείρισης των δικτυακών πόρων. Αυτό σημαίνει ότι τα συνεργαζόμενα συστήματα πρέπει να υιοθετήσουν πιο ευέλικτους μηχανισμούς ανάθεσης πόρων, που από την μια θα επιτρέπουν στο εκάστοτε δίκτυο να αντεπεξέλθει στις απαιτήσεις ενός ανταγωνιστικού περιβάλλοντος και από την άλλη, θα συμβάλλουν στην σωστή διαχείριση ολόκληρου του ραδιοφάσματος προς όφελος του χρήστη. Μέσα από τη μελέτη των προτεινόμενων αρχιτεκτονικών συμπεραίνουμε ότι η προτεινόμενη διαστρωματική προσέγγιση ανταποκρίνεται καλύτερα στις ανάγκες των δικτύων επόμενης γενιάς αφού μπορεί μέσα από το τμήμα του διαχειριστή QoS, που αποτελεί τη βασική καινοτομία, να ενσωματώσει έναν ενιαίο μηχανισμό διαχείρισης πόρων και παροχής ποιότητας υπηρεσίας. Προς αυτή λοιπόν την κατεύθυνση, αναπτύσσονται αλγόριθμοι βέλτιστης κατανομής πόρων και ελέγχου αποδοχής κλήσεων, με βασικό γνώμονα την εξισορρόπηση της ροής του τηλεπικοινωνιακού φορτίου, τα κριτήρια ποιότητας των υποστηριζόμενων υπηρεσιών αλλά και τα χαρακτηριστικά των απαιτήσεων των χρηστών.

Για την επίτευξη των στόχων στην διατριβή παρουσιάστηκε το πιθανοτικό σχήμα ελέγχου αποδοχής κλήσεων το οποίο μελετήθηκε εκτενώς στο τρίτο κεφάλαιο της παρούσας διατριβής. Το σχήμα αυτό ενσωματώνει υφιστάμενα σχήματα και αλγορίθμους αποδοχής κλήσεων σε ένα ενιαίο πλαίσιο επιτυγχάνοντας με τον τρόπο αυτό να αξιοποιήσει τα πλεονεκτήματα τους και επιτυγχάνει τελικά σημαντικά ανώτερη απόδοση. Το γενικευμένο πλαίσιο ελέγχου αποδοχής κλήσεων επιτυγχάνει τη εύρυθμη λειτουργία των δικτύων πολλαπλών υπηρεσιών, αποδίδοντας τα κατάλληλα επίπεδα προτεραιότητας σε κάθε κλάση υπηρεσιών, παρέχοντας παράλληλα προτεραιότητα και στις κλήσεις μεταπομπής. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός αριθμού πιθανοτικών παραμέτρων, όπου με την κατάλληλη επιλογή των τιμών τους μπορούμε να καθορίσουμε τα επίπεδα προτεραιότητας, την αυστηρότητα των κατωφλίων αλλά και την κατανομή πόρων. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος επιδεικνύει σημαντικά βελτιωμένη επίδοση σε επίπεδο πιθανοτήτων μη αποδοχής κλήσεων, που αποτελεί το βασικότερο κριτήριο επίδοσης σε σχέση με τους παραδοσιακούς αλγορίθμους ελέγχου αποδοχής κλήσεων.

Η επικύρωση της ακρίβειας του θεωρητικού μοντέλου πραγματοποιήθηκε με κατάλληλες προσομοιώσεις, τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζουν μικρές αποκλίσεις από τα αριθμητικά αποτελέσματα των αναλυτικών τύπων, γεγονός που καταδεικνύει την ακρίβεια της ανάλυσης αλλά και την εύρυθμη λειτουργία του αλγορίθμου. Επιπλέον, θα πρέπει να τονίσουμε ότι με βάση τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων με

τη χρήση της παραδοχής της εκθετικής και της λογαριθμοκανονικής κατανομής για την περιγραφή του χρόνου συγκράτησης καναλιού, με τη δεύτερη να θεωρείται ως πιο ρεαλιστική προς την πραγματική κατάσταση του χρόνου συγκράτησης καναλιού, συμπεραίνουμε ότι αυτή η παραδοχή έχει μικρή επίδραση στα αποτελέσματα επίδοσης του πιθανοτικού ελέγχου αποδοχής κλήσεων, όταν αυτός εξετάζεται σε επίπεδο κλήσεων. Τέλος, από τα αποτελέσματα συνολικά μπορούμε να συμπεράνουμε ότι ο πιθανοτικος έλεγχος αποδοχής κλήσεων είναι σε θέση να προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα στην ορθή διαχείριση των πόρων και τον αποτελεσματικό έλεγχο αποδοχής κλήσεων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο πραγματοποιείται η αξιολόγηση της επίδοσης του προτεινόμενου σχήματος πιθανοτικού ελέγχου αποδοχής κλήσεων με βάση τα κριτήρια της απόδοσης προτεραιότητας, της δικαιοσύνης στην εξυπηρέτηση των κλήσεων αλλά και τη διεκπεραιωτικότητα των κλήσεων, χρησιμοποιώντας κατάλληλους δείκτες. Τα αποτελέσματα του προηγούμενου κεφαλαίου χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή των σχετικών συμπερασμάτων ως προς την εκπλήρωση των στόχων σχεδιασμού του ελέγχου αποδοχής κλήσεων. Τα αριθμητικά αποτελέσματα αλλά και τα αποτελέσματα των σχετικών προσομοιώσεων παρουσιάζουν τις σημαντικά βελτιωμένες επιδόσεις του πιθανοτικού ελέγχου αποδοχής κλήσεων συγκριτικά με τα παραδοσιακά σχήματα σε όλα τα προαναφερθέντα κριτήρια. Συγκεκριμένα, συμπεραίνουμε ότι ανάλογα με τις τιμές των πιθανοτικών παραμέτρων δίνεται η δυνατότητα δυναμικής μεταβολής των χαρακτηριστικών σχεδιασμού του προτεινόμενου αλγορίθμου με βάση τα χαρακτηριστικά του τρέχοντος τηλεπικοινωνιακού φορτίου. Ειδικότερα, διαπιστώνεται ότι μέσα από την κατάλληλη επιλογή των τιμών των πιθανοτικών παραμέτρων που χρησιμοποιούμε μπορούμε να βελτιώσουμε συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του αλγορίθμου. Αυτό γίνεται δίνοντας έμφαση είτε στη σχετική απόδοση προτεραιότητας μεταξύ των υποστηριζόμενων κλάσεων υπηρεσιών, είτε στη δικαιοσύνη στην εξυπηρέτηση των κλήσεων ώστε να μην παρατηρούνται φαινόμενα υψηλών πιθανοτήτων μη αποδοχής κλήσεων κάποιων κλάσεων υπηρεσιών, αλλά και στην αύξηση της διεκπεραιωτικοτητας των κλήσεων από το δίκτυο.

Στο πέμπτο κεφάλαιο της διατριβής προτείνεται η βελτιστοποίηση του πιθανοτικού ελέγχου αποδοχής κλήσεων με τη χρήση της θεωρίας παιγνίων. Στα πλαίσια αυτά, αναπτύχθηκε ένα πλαίσιο βελτιστοποίησης της λειτουργίας του προτεινόμενου σχήματος, με το δυναμικό καθορισμό των τιμών των πιθανοτικών παραμέτρων βάσει της τρέχουσας κάθε φορά κατάστασης του δικτύου, μέσα από την ενσωμάτωση σε αυτό των κατάλληλων μηχανισμών διαχείρισης πόρων και δυναμικής τιμολόγησης. Αυτό επιτυγχάνεται μέσα από ένα παίγνιο ανταγωνισμού για την κατανομή πόρων και ένα παίγνιο διαπραγμάτευσης τιμών

που διαμορφώνονται κατάλληλα για τις ανάγκες του περιγραφόμενου προβλήματος. Μέσα από το πλαίσιο αυτό οι πιθανοτικές παράμετροι εξάγονται από την απόκριση των χρηστών στο αποτέλεσμα της διαπραγμάτευσης τιμών, όπως καθορίζεται από μια κατάλληλη συνάρτηση ζήτησης. Με την εφαρμογή της διαδικασίας αυτής επιτυγχάνουμε τη δυναμική και ρεαλιστική λειτουργία του προτεινόμενου κατανεμημένου σχήματος η οποία προσαρμόζεται στις εκάστοτε συνθήκες του δικτύου. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η αποτελεσματική εκχώρηση των πόρων αλλά και η βελτιστοποίηση της χρήσης τους, που έχει ως αποτέλεσμα καλύτερες επιδόσεις για τον έλεγχο αποδοχής κλήσεων όλων των κλάσεων υπηρεσιών που υποστηρίζονται από το δίκτυο.

Τα αποτελέσματα των σχετικών προσομοιώσεων καταδεικνύουν τη σημαντική βελτίωση των επιδόσεων του προτεινόμενου σχήματος, το οποίο επιτυγχάνει σημαντικά χαμηλότερες πιθανότητες αποδοχής κλήσεων για όλες τις υποστηριζόμενες κλάσεις υπηρεσιών σε σχέση με το απλό πιθανοτικό σχήμα. Αυτό είναι αποτέλεσμα της βελτίωσης της χρησιμοποίησης των πόρων αλλά και του δυναμικού υπολογισμού των πιθανοτικών παραμέτρων με βάση κάθε φορά τις συνθήκες του δικτύου. Κύριο αποτέλεσμα της επίτευξης χαμηλότερων πιθανοτήτων μη αποδοχής κλήσεων είναι η σημαντική αύξηση του αριθμού των χρηστών που εξυπηρετούνται και των κλήσεων που διεκπεραιώνονται από το δίκτυο.

6.2. Υποδείξεις για Μελλοντική Έρευνα

Τέλος, στην παρούσα ενότητα καταγράφονται υποδείξεις για περαιτέρω συνέχιση της έρευνας στον τομέα της διαχείρισης πόρων σε ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών με βάση τα μέχρι τώρα ερευνητικά αποτελέσματα της παρούσας διατριβής. Οι σημαντικότερες από αυτές αναφέρονται στη συνέχεια:

- Πλήρης ανάπτυξη και ενσωμάτωση των τεχνικών βελτιστοποίησης με τη χρήση της θεωρίας παιγνίων, στο γενικευμένο –πλήρες– μοντέλο πιθανοτικού ελέγχου αποδοχής κλήσεων. Σκοπός είναι να έχουμε τη βέλτιστη κατανομή πόρων και επίτευξη δικαιοσύνης μεταξύ των εξυπηρετουμένων κλήσεων. Κατ' επέκταση με βάση τα κριτήρια αυτά θα προκύψει ο υπολογισμός των πιθανοτικών παραμέτρων για την επίτευξη των στόχων αυτών, οι οποίες θα αφορούν την εξυπηρέτηση τόσο των κλήσεων διαφορετικών κλάσεων υπηρεσιών αλλά και της διάκρισης των κλήσεων κάθε κλάσης σε νέες και κλήσεις μεταπομπής. Με τη βελτιστοποίηση θα επιτευχθεί η πλήρης προσαρμογή της κατανομής πόρων αλλά και του μοντέλου πιθανοτικού

ελέγχου αποδοχής κλήσεων στις ανάγκες δυναμικής απόκρισης στη λειτουργία των ασυρμάτων δικτύων επικοινωνιών.

- Ολοκλήρωση στον υπολογισμό των πιθανοτικών παραμέτρων κριτηρίων με βάση το λόγο σήματος προς παρεμβολή. Συγκεκριμένα, για κάθε νέα εισερχόμενη κλήση θα υπολογίζεται ο λόγος σήματος προς παρεμβολή και η πιθανότητα αποδοχής πλέον θα υπολογίζεται, εκτός από τα κριτήρια της επάρκειας πόρων, και με βάση την επάρκεια του σήματος για την πραγματοποίηση μιας κλήσης. Ειδικότερα, ο υπολογισμός των πιθανοτικών παραμέτρων που καθορίζουν τις μεταβάσεις των καταστάσεων του δικτύου θα γίνεται μέσα από τον υπολογισμό της πιθανότητας ο λόγος σήματος προς θόρυβο και παρεμβολή να υπερβεί ένα κατώφλι, που θα αποτελεί το ελάχιστο για την πραγματοποίησης της σύνδεσης. Στην ουσία πρόκειται για την ενσωμάτωση των θεμάτων διάδοσης και του φυσικού στρώματος στο πιθανοτικο έλεγχο αποδοχής κλήσεων, ώστε να λαμβάνει υπόψη του και τα χαρακτηριστικά της ζεύξης του τερματικού με το σταθμό βάσης αλλά και την επίδραση της κατάστασης του καναλιού.
- Ενσωμάτωση και χρήση νέων μοντέλων τηλεπικοινωνιακής κίνησης και κινητικότητας στο σχεδιασμό και την ανάλυση των σχημάτων ελέγχου αποδοχής κλήσεων. Τα νέα μοντέλα κινητικότητας μπορεί πιθανώς να μη διατηρούν τις ιδιότητες Markov, γεγονός που απαιτεί μια εντελώς νέα μαθηματική προσέγγιση και ανάλυση. Θα δοθεί όμως η δυνατότητα μελέτης των προβλημάτων ελέγχου αποδοχής κλήσεων όχι μόνο σε επίπεδο κλήσεων (call level) αλλά και σε επίπεδων πακέτων δεδομένων (packet-level). Στα πλαίσια αυτά, εντάσσεται και η εφαρμογή διαστρωματικών αρχιτεκτονικών για τη βελτίωση της απόδοσης των σχημάτων ελέγχου αποδοχής κλήσεων και την επίτευξη παροχής QoS σε κάθε επίπεδο.
- Επέκταση της μελέτης των θεμάτων διαχείρισης πόρων και της ανάπτυξης του πιθανοτικού ελέγχου αποδοχής κλήσεων για τις ανάγκες συστημάτων γνωστικών επικοινωνιών (cognitive communications). Με τις εξελίξεις και τη ραγδαία αύξηση στα ασύρματα συστήματα επικοινωνίας και τις σχετικές εφαρμογές, το κλασικό σύστημα αδειοδότησης και της αποκλειστικής χρήσης του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος οδηγείται στα όριά του, καθώς πλέον πολύ λίγες περιοχές του φάσματος είναι ελεύθερες. Ωστόσο, αρκετές έρευνες που πραγματοποιήθηκαν από οργανισμούς όπως η Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών FCC (Federal Communications Commission) στις Η.Π.Α. κατέδειξαν ότι μεγάλες περιοχές του ήδη αδειοδοτημένου φάσματος παραμένουν ανενεργές για σημαντικά χρονικά

διαστήματα σε ορισμένες γεωγραφικές περιοχές. Μια νέα επαναστατική τεχνολογία που αποσκοπεί στην αποδοτικότερη χρησιμοποίηση του φάσματος είναι οι γνωστικές επικοινωνίες (Cognitive Radio). Η τεχνολογία αυτή θα υποστηρίζει "έξυπνα" τερματικά τα οποία θα είναι ενήμερα για το ασύρματο περιβάλλον τους και, ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες και τις ανάγκες των χρηστών, θα προσαρμόζουν κάποιες παραμέτρους της μετάδοσής τους, με πιο σημαντικό το εύρος ζώνης μετάδοσης. Με άλλα λόγια, ένα Cognitive Radio θα ανιχνεύει το φάσμα και θα εντοπίζει φασματικές οπές (spectrum holes), περιοχές δηλαδή του φάσματος που τη δεδομένη στιγμή δεν χρησιμοποιούνται από τον πρωταρχικό χρήστη τους, και θα χρησιμοποιεί αυτές τις οπές για να μεταδώσει πληροφορία. Επιπλέον, το Cognitive Radio θα είναι ικανό να αναγνωρίζει ακριβώς τα συστήματα επικοινωνίας που υπάρχουν γύρω του (3G, WLAN κ.α.) και θα μπορεί να συνδέεται σε αυτά, εφ' όσον ο χρήστης διαθέτει την κατάλληλη άδεια. Εδώ, η χρήση του δυναμικού πιθανοτικού ελέγχου αποδοχής κλήσεων θα χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο της εισόδου χρηστών στο δίκτυο με κριτήρια τη διαθεσιμότητα του φάσματος και το κατά πόσο υπάρχει δυνατότητα εξυπηρέτησης τους, ακολουθώντας τη διάκριση των χρηστών σε αδειοδοτημένους και μη.

Βιβλιογραφία - Αναφορές

1. G. Gomez and R. Sanchez, "End-to-end quality of service over cellular networks", John Wiley, West Sussex England, 2005.
2. M. C. Chuah and Q. Zhang, "Design and performance of 3G wireless networks and wireless LANs", Springer, New York, U.S.A., 2006.
3. H. H. Chen, "Next Genetation CDMA Technologies", John Wiley, West Sussex England, 2007.
4. M. Cardei, I. Cardei and D.-Z. Du, "Resource Management in Wireless Networking", Springer Science, Boston, U.S.A., 2005.
5. T. Halonen, J. Romero and J. Melero, "GSM, GPRS and EDGE performace", John Wiley, West Sussex, England, 2003.
6. M. R. Karim and M. Sarraf, "W-CDMA and CDMA-2000 for 3G mobile networks", Mc Graw Hill, U.S.A., 2002.
7. B. Xie, A. Kumar and D. Agrawal, "Enabling multiservice on 3G and beyond: challenged and directions", *IEEE Wireless Communications*, vol. 15, no. 3, pp. 66-72, Jun. 2008.
8. F. Muratore, "UMTS Mobile telecommunications for the future", John Wiley, West Sussex England, 2001.
9. H. Holma and A. Toskala, "HSDPA/HSUPA for UMTS, high speed radio access for mobile communications", John Wiley, Sussex England, 2006.
10. 3GPP, "TS 25.308 Technical Specification Group Radio Access; High Speed Downlink Packet Access (HSDPA); Overal Description", Dec. 2004.
11. E. Dahlman, H. Ekström, A. Furuskär, Y. Jading, J. Karlsson, M. Lundevall, and S. Parkvall, "The 3G Long-Term Evolution - radio interface concepts and performance Evaluation," *in Proc. IEEE Vehicular Technology Conference (VTC) '06,* pp. 137-141, May 2006.
12. 3GPP, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception", (Release 8), TS 36.101 V8.4.0, 2008.
13. L. Nuayami, "WiMAX Technology for broadband wireless access", John Wiley, West Sussex England, 2007.
14. C. Ekluno, R. B. Marks, K. L. Stanwood and S. Wang, "IEEE Standard 802.16: A technical overview of the WirelessMAN air interface for broadband wireless access", *IEEE Communications Magazine,* vol. 40 , no. 6, pp. 98-107, Jun. 2002.
15. A. Ghosh, D. R. Wolter, J. G. Andrews and R. Chen, "Broadband wireless access with WiMAX/802.16: Current performance benchmarks and future potential", *IEEE Communications Magazine*, vol. 43, no. 2, pp. 129-136, Feb. 2005.

16. D. Niyato, E. Hossain and J. Diamond, "IEEE 802.16/WiMAX-based broadband wireless access and its application for telemedicine/e-health services", *IEEE Wireless communications*, vol. 14, no. 1, pp. 72-83, Feb. 2007.

17. D. G. Stratogiannis G. I. Tsiropoulos, J. D. Kanellopoulos and P. G. Cottis, "4G Wireless Networks: Architectures, QoS Support and Dynamic Resource Management", *Wireless Network Traffic and Quality of Service Support: Trends and Standards*, IGI Global, Pennsylvania, USA, to appear in 2010.

18. M. Shi, X. Shen and J. Mark, "IEEE 802.11 roaming and authentication in wireless LAN/cellular mobile networks", *IEEE Wireless Communications,* vol. 11, no. 4, pp. 66-75, Aug. 2004.

19. W. Song and W. Zhuang, "QoS provisioning via admision control in Cellular/Wireless LAN interworking", *in Proc. 2nd International Conference on Broadband Networks '05 (BroadNets 2005)*, vol. 1, pp. 543-550, 2005.

20. W. Song, H. Jiang, W. Zhuang and X. Shen, "Resource management for QoS support in Cellular/WLAN interworking", *IEEE Network*, vol. 19, no. 5, pp. 12-18, Sep-Oct. 2005.

21. A. K. Salkintzis, C. Fors and R. Pazhyannur, "WLAN-GPRS integration for next generation mobile data networks", *IEEE Wireless Communications,* vol. 9, no. 5, pp. 112-124, Oct. 2002.

22. M. Buddhikot, G. Chandranmenon, S. Han, Y. W. Lee, S. Miller and L. Salgareli, "Integration of 802.11 and third-generation wireless data networks", *in Proc. IEEE INFOCOM '03*, pp. 503-512, 2003.

23. X. Wang, J. Mellor and K. Al-Begain, "Towards providing QoS for intergrated cellular and WLAN networks", *in Proc. 4th Annual Postgraduate Symposium on the Convergence of Telecommunications (PGNET'03)*, pp. 207-211, 2003.

24. R. Braden, L. Zhang, S. Berson, S. Herzog, and S. Jamin, "Resource ReSerVation Protocol (RSVP) – Version 1 Functional Specification", RFC 2205, IETF, 1997.

25. Y. W. Lee, S. Kim, J. Park and S. H. Kim, "A lightweight implementation of RSVP-TE protocol for MPLS-TE signaling", *Computer Communications*, vol. 30, no. 6, pp. 1199-1204, Mar. 2007.

26. B. Moon and H. Aghvami, "DiffServ extensions for QoS provisioning in IP mobiltiy environments", *IEEE Wireless Communications*, vol. 10, no. 5, pp. 38-44, Oct. 2003.

27. D. Wu, "QoS provisioning in wireless networks", *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 5, no. 8, pp. 957-969, Dec. 2005.

28. S. Blake, D. Black, M. Carlson, E. Davies, Z. Wang, and W. Weiss, "An Architecture for Differentiated Services", RFC 2475, IETF, 1998.

29. E. Mykoniati, C. Charalampous, P. Georgatsos, T. Damilatis, D. Goderis, and G. Trimintzios, "Admission control for providing QoS in IP DiffServ networks: the TEQUILA approach", *IEEE Communications, special issue on QoS Advances: the European IST Premium IP Projects*, vol. 41, no. 1, pp. 38-44, 2003.

30. A. Veres, A. T. Campbell, M. Barry and Sun Li-Hsiang, "Supporting service differentiation in wireless packet networks using distributed control", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 19, no. 10, pp. 2081-2093, Oct. 2001.

31. D. Niyato and E. Hossain, "Call admission control for Qos provisioning in 4G wireless networks: Issues and approaches", *IEEE Network*, vol. 19, no. 5, pp. 5-11, Sep-Oct. 2005.

32. 3GPP23.107. "Quality of Service (QoS) Concept and Architecture", (Release 5). TS 23.107 V5.11.0., 2003.

33. R. Braden, D. Clark and S. Shenker, "Integrated Services in the Internet Architecture: an Overview", RFC 1633, IETF, 1994.

34. D. Awduche, L. Berger, D. Gan, T. Li, V. Srinivasan and G. Swallow, "RSVP-TE: Extensions to RSVP for LSP Tunnels", RFC 3209, IETF, 2001.

35. J. Wroclawski, "Specification of the Controlled-Load Network Element Service", RFC 2211, IETF, 1997.

36. S. Shenker, C. Patridge and R. Guerin, "Specification of Guaranteed Quality of Service", RFC 2212, IETF, 1997.

37. V. Jacobson, K. Nichols and K. Poduri, "An Expedited Forwarding PHB", RFC 2598, IETF, 1999.

38. J. Heinanen, F. Baker, W. Weiss and J. Wroclawski, "Assured Forwarding PHB Group", RFC 2597, IETF, 1999.

39. Y. Bernet, P. Ford, R. Yavatkar, F. Baker, F. Zhang, M. Speer et al., "A framework for integrated services operation over Diffserv networks", RFC 2998, IETF, 2000.

40. Q. Liu, S. Zhou and G. B. Giannakis, "Cross-Layer scheduling with prescribed QoS guarantees in adaptive wireless networks", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 23, no. 5, pp. 1056-1066, May 2005.

41. S. Shakkottai, T. S. Rappaport and P. C. Karlsson, "Cross-Layer design for wireless network", *IEEE Communications Magazine*, vol. 41, no. 10, pp. 74-80, Oct. 2003.

42. S. Liang and D. Hatzinakos, "A Cross-Layer architecture of wireless sensor networks for target tracking", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 15, no. 1, pp. 145-158, Feb. 2007.

43. X. Zhang and Q. Du, "Cross-Layer modeling for QoS-driven multimedia multicast/broadcast over fading channels", *IEEE Communications Magazine*, vol. 45, no. 8, pp. 62-70, Aug. 2007.

44. J. Tang and X. Zhang, "Cross-Layer resource allocation over wireless relay networks for quality of service provisioning", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 25, no. 4, pp. 645-656, May 2007.

45. F. Ishizaki and G. U. Hwang, "Cross-Layer design and analysis of wireless networks using the effective bandwidth function", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 6, no. 9, pp. 3214-3219, Sep. 2007.

46. Q. Zhang and Y. Q. Zhang, "Cross-Layer design for QoS support in multihop wireless networks", *Proceedings of the IEEE*, vol. 96, no. 1, pp. 64-76, Jan. 2008.

47. F. Yu, V.W.S. Wong, and V.C.M. Leung, "A new QoS provisioning method for adaptive multimedia in cellular wireless networks", *in Proc. IEEE INFOCOM 2004*, pp. 2130-2141, Mar. 2004.

48. M. H. Ahmed, "Call Admission Control in Wireless Networks: A Comprehensive Survey", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 7, no. 1, pp. 50-66, 2005.

49. M. Ghaderi and R. Boutaba, "Call admission control in mobile cellular networks: A comprehensive survey", *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 6, no. 1, pp. 69-93, Feb. 2003.

50. Y. Haung and J. Ho, "Distributed call Admission control for a heterogeneous PCS network computer", *IEEE Trans. Comp.*, vol. 51, no. 12, pp. 1400-1409, Dec. 2002.

51. M. Naghshineh and M. Schwartz, "Distributed call admission control in mobile/wireless networks", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 14, no. 4, pp. 711-717, May 1996.

52. J. W. Mark, T. C. Wong, M. Jin, B. Bensaou, and K. C. Chua, "Resource allocation for multiclass services in cellular systems", *in Proc. IEEE Int. Conf. Communication Systems, 2000, Session T3-1 Cellular System*, Nov. 2000.

53. S. H. Jung, J. W. Hong and C. H. Lie, "Quality of service management scheme for adaptive service in wireless/mobile multimedia cellular networks", *IEICE Trans. On Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Science*, vol. E88-B, no. 11, pp. 4317-4327, 2005.

54. B. M. Epstein and M. Schwartz, "Reservation strategies for multimedia traffic in a wireless environment", *in Proc. IEEE VTC '95*, vol. 1, pp. 165-169, July 1995.

55. B. Li, L. Li, B. Li, K. M. Sivalingam and X. R. Cao, "Call admission control for voice/data integrated cellular networks: performance analysis and comparative study", *J. Sel. Areas Commun.*, vol. 22, no. 4, pp. 706-718, May 2004.

56. T.-C. Chau, K.Y.M. Wong and B. Li, "Optimal call admission control with QoS guarantee in a voice/data integrated cellular network", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 5, no. 5, pp. 1133-1141, May 2006.

57. D. Hong and S. S. Rappaport, "Traffic model and performance analysis for cellular mobile radio telephone systems with prioritized and nonprioritized handoff procedures", *IEEE Trans. On Veh. Technol.*, vol. 35, no. 3, pp. 77-92, Mar. 1986.

58. J. Y. Lee, J-G Choi, K. Park and S. Bahk, "Realistic cell-oriented adaptive admission control for QoS support in wireless multimedia networks", *IEEE Trans. On Veh. Technol.*, vol. 52, no. 3, pp. 512-524, May 2003.

59. K. Kim and Y. Han, "A Call admission control with thresholds for multi-rate traffic in CDMA systems", *in Proc. VTC 2000*, vol. 2, pp. 830-834, 2000.

60. T. Liu and J. Silvester, "Joint admission/congestion control for wireless CDMA systems supporting integrated services", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 16, no. 6, pp.845-857, 1998.

61. J. Wu, "Performance analysis of QoS-based voice/data CDMA systems", *Wireless Pers. Commun.*, vol. 13, no. 3, pp. 223-236, Jun. 2000.

62. M. Ahmed and S. Mahmoud, "QoS-based admission control algorithm for integrated services voice/data in wideband DS-CDMA with switched beam Antennas", *Wireless Pers. Commun.*, vol. 6, no. 12, pp. 1400-1409, Dec. 2002.

63. Y. Haung and J. Ho, "Distributed call admission control for a heterogeneous PCS network", *IEEE Trans. On Computers*, vol. 51, no. 12, pp. 1400-1409, Dec. 2002.

64. J. Yao, W. Mark, T. C. Wong, Y. H. Chew, K. M. Lye and K. C. Chua, "Virtual partitioning resource allocation for multiclass traffic in cellular systems with QoS constraints", *IEEE Trans. On Veh. Technol.*, vol. 53, no. 3, pp. 847-864, May 2004.

65. E. Stevens-Navarro and Y. W. S. Wong, "Virtual partitioning for connection admission control in cellular/WLAN interworking", *in Proc. WCNC 2008*, pp. 2039-2044, Apr. 2008.

66. J. Wang, Q. Zeng and D. P. Agarwal, "Performance analysis of pre-emptive and priority reservation handoff schemes for integrated service based wireless mobile networks," *IEEE Trans. On Mobile. Computing*, vol. 2, no. 1, pp. 65-75, Jan-Mar. 2003.

67. H. Ferng, H. Lin, W. C. Teng, Y. C. Tsai and C. C. Peng, "A channel allocation scheme with dynamic priority for wireless mobile networks", *in Proc. VTC 2004*, pp. 1143-1147, 2004.

68. I. Katzela and M. Naghshineh, "Channel assingment schemes for cellular mobile telecommunication systems: A comprehensive survey", *IEEE Personal Communications Magazine*, vol. 3, no. 3, pp. 10-31, Jun. 1996.

69. X. Wu and K. L. Yeung, "Efficient channel borrowing strategy for multimedia wireless networks", *in Proc. IEEE GLOBECOM 1998*, vol. 1, pp. 126-131, Nov. 1998.

70. C. J. Chang, T. T. Su and Y. Y. Chiang, "Analysis of a cutoff priority cellular radio system with finite queueing and reneging/droping," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 2, no. 2, pp. 166-175, Apr. 1994.

71. P. Lin and Y. B. Lin, "Channel allocation for GPRS", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 50, no. 2, pp. 375-384, Mar. 2001.

72. W. Li and X. Chao, "Modelling and performance evaluation of a cellular mobile network", *IEEE Transactions on Networking* , vol. 12, no. 1, pp. 131-145, Feb. 2004.

73. W. Li and X. Chao, "Call admission control for an adaptive heterogeneous multimedia mobile network", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 6, no. 2, pp. 515-524, Feb. 2007.

74. Y. Fang and Y. Zhang, "Call admission control schemes and performance analysis in wireless mobile networks", *IEEE Trans. On Veh. Technol.*, vol. 51, no 2, pp. 371-382, Mar. 2002.

75. B. M. Epstein and M. Schwartz, "Predictive QoS-based admission control for multiclass traffic in cellular wireless networks", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 18, no. 3, pp. 523-534, Mar 2000.

76. R. Ramjee, D. Towsley and R. Nagarajan, "On optimal call admission control in cellular networks", *Wireless Networks*, vol. 3, no. 1, pp. 29-41, Mar. 1997.

77. Y. Fang, "Thinning Schemes for Call Admission Control in Wireless Networks", *IEEE Trans. Comput..*, vol. 52, no 5, pp. 685-687, May 2003.

78. E. Yavuz and V. C. M. Leung, "Efficient methods for performance evaluations of call admission control schemes in multi-service cellular networks", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 7, no. 9, pp. 3468-3476, Sep. 2008.

79. E. Yavuz and V. C. M. Leung, "Computationally efficient method to evaluate the performance of guard-channel-based call admission control in cellular networks", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 55, no. 4, pp. 1412-1424, Jul. 2006.

80. X. Wang, F. Fan and Y. Pan, "A more realistic thinning scheme for call admission control in multimedia wireless networks", *IEEE Transactions on Computers*, vol. 57, no. 8, pp. 1143-1147, Aug. 2008.

81. D. Zhao, X. Shen and J. Mark, "Call admission control for heterogeneous services in wireless networks communications", *in Proc. IEEE Int'l. Conf. Commun. 2000 (ICC' 00)*, vol. 2, pp. 964-968, 2000.

82. D. Zhao, X. Shen, and J. Mark, "Efficient call admission control for heterogeneous services in wireless mobile ATM networks", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 38, no. 10, pp. 72-78, Oct. 2000.

83. E. Z. Tragos, G. I. Tsiropoulos, G. T. Karetsos and S. A. Kyriazakos, "Admission control for QoS support in heterogeneous 4G wireless networks", *IEEE Network,* vol. 22, no. 3, pp. 30-37, May-June 2008.

84. B. Li, C. Lin, S. T. Chanson, "Analysis of a hybrid cutoff priority scheme for multiple classes of traffic in multimedia wireless networks", *Wireless Networks (WINET)*, vol. 4, no. 4, pp. 279-290, Jun. 1998.

85. T. Kwon, S. Kim and M. Naghshineh, "Threshold-type call admission control in wireless/mobile multimedia networks using prioritized adaptive framework", *IEE Elect. Lett.*, vol. 36, pp. 852-854, Apr. 2000.

86. A. Malla, M. El-Kadi, S. Olariu and P. Todorova, "A fair resource allocation protocol for Multimedia Wireless Networks", *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.*, vol. 14, no. 1, Jan. 2003.

87. X. Chen and Y. Fang, "An adaptive bandwidth reservation scheme in multimedia wireless networks", *Proc. IEEE Global Telecommun. Conf. 2003 (GLOBECOM '03),* pp. 2830 – 2834, 2003.

88. J. Ni, D.H.K. Tsang, S. Tatikonda and B. Bensaou, "Threshold and reservation based call admission control policies for multiservice resource-sharing systems", *in IEEE INFOCOM '05*, vol. 2, pp. 773 – 783, Mar. 2005.

89. S. Kim, T. Kwon and Y. Choi, "Call admission control for prioritized adaptive multimedia services in wireless/mobile networks", *in Proc. VTC 2000*, vol. 2, pp. 1536-1540, 2000.

90. L. Huang, S. Kumar and C. C.-J. Kuo, "Adaptive resource allocation for multimedia QoS management in wireless networks", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 53, no. 2, pp. 547-558, Mar. 2004.

91. C. T. Chou and K. G. Shin, "Analysis of combined adaptive bandwidth allocation and admission control in wireless networks", *in Proc. IEEE INFOCOM 2002*, vol. 2, pp. 676-684, Jun. 2002.

92. C. T. Chou and K. G. Shin, "Analysis of adaptive bandwidth allocation in wireless networks with multilevel degradable quality of service", *IEEE Trans. On Mobile. Computing*, vol. 3, no. 1, pp. 5-17, Jan.-Mar. 2004.

93. S. K. Das, S. K. Sen, K. Basu and H. Lin, "A framework for bandwidth degradation and call admission control schemes for multiclass traffic in next-generation wireless networks", *J. Sel. Areas Commun.*, vol. 21, no. 10, pp. 1790-1802, Dec. 2003.

94. H. Heredia – Ureta, F. A. Cruz – Perez and L. Ortigoza – Guerrero, "Capacity optimization in multiservice mobile wireless networks with multiple fractional channel reservation", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 52, no. 6, pp.1519 – 1539, Nov. 2003.

95. J. Hou, J. Yang and S. Papavassiliou, "Intergration of pricing with call admission control to meet QoS requirements in cellular networks", *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 13, no. 9, pp. 898-910, Sep. 2002.

96. R. Jain and E. Knightly, "A framework for design and evaluation of admission control algorithms in multi-service mobile networks", *in Proc. INFOCOM 1999*, vol. 3, pp. 1027-1035, Mar. 1999.

97. C. Chao and W. Chen, "Connection admission control for mobile multiple-class personal communication networks", *J. Sel. Areas Commun.*, vol. 15, no. 8, pp. 1618-1626, Oct. 1997.

98. W. Jeon and D. Jeong, "Call admission control for mobile multimedia communications with traffic asymmetry between uplink and downlink", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 50, no. 1, pp. 59 – 66, Jan. 2001.

99. X. Yang, G. Feng and D.S.C. Kheong, "Call admission control for multiservice wireless networks with bandwidth asymmetry between uplink and downlink", *IEEE Trans. on Veh. Technol.*, vol. 55, no. 1, pp. 360 – 368, Jan. 2006.

100. Z. Liu and M. E. Zarki, "SIR-based call admission control for DS-CDMA cellular systems", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 12, no. 4, pp. 638-644, May 1994.

101. I. M. Kim, B. C. Shin and D. J. Lee, "SIR-based call admission control by intercell interference prediction for DS-CDMA systems", *IEEE Communications Letters*, vol. 4, no. 1, pp. 29-31, Jan. 2000.

102. K. I. Kim and S. H. Kim, "A light call admission control with inter-cell and inter-service fairness in heterogeneous packet radio networks", *IEICE Transactions on Communications*, vol. E88-B, no. 10, pp. 4064-4073, 2005.

103. D. Ayyagari and A. Ephremides, "Admission control with priorities: Approaches for multi-rate wireless systems", Mobile Networks and Application, vol. 4, no. 3, pp. 209-218, Oct. 1999.

104. M. A. Haleem, D. Avidor and R. Valenzuela, "Fixed wireless access system with autonomous resource assignment", *in Proc. 9th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications 1998 (PIMRC'98)*, vol. 3, pp. 1438-1442, Sep. 1998.

105. M. Casoni, G. Immovilli and M. L. Merani, "Admission control in T/CDMA systems supporting voice and data applications", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 1, no. 3, pp. 540 – 548, Jul. 2002.

106. S. Singh, V. Krishnamurthy and H. V. Poor, "Integrated voice/data call admission control for wireless DS-CDMA systems", *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 50, no. 6, pp. 1483-1495, Jun. 2002.

107.G. Bolch, S. Greiner, H. de Meer, and K. S. Trivedi, "Queuing Networks and Markov Chains", John Wiley, New York, U.S.A., 1998.

108.M. Fang, I. Chlamtac and Y.-B. Lin, "Channel occupancy times and handoff rate for mobile computing and PCS networks", *IEEE Trans. Comput.*, vol. 47, no. 6, pp 679-692, Jun. 1998.

109.M. Fang and I. Chlamtac, "Teletraffic analysis and mobility modelling of PCS networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 47, no. 7, pp. 1062-1072, Jul. 1999.

110.S. Wu, K. Y. Michael Wong and B. Li, "A dynamic call admission policy with precision QoS guarantee using stochastic control for mobile wireless networks", *IEEE/ACM Trans. On Networking*, vol. 10, no. 2, pp. 257-271, Apr. 2002.

111.M. Rajaratnam and F. Takawira, "Nonclassical traffic Modeling and performance analysis of cellular mobile networks with and without channel reservation", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 49, no. 3, pp. 817-834, May 2000.

112.H. Zeng and I. Chlamtac, "Adaptive guard channel allocation and blocking probability estimation in PCS networks", *Computer Networks*, vol. 43, no. 2, pp. 163-176, Oct. 2003.

113.S. Cho, "Channel holding time analysis of mobile satellite networks", *IEICE Transactions on Communications,* vol. E89-B, no. 3, pp. 1027-1029, 2006.

114.G. Paschos, I. Politis, and S. A. Kotsopoulos, "A Quality of service negotiation-based admission control scheme for WCDMA mobile wireless multiclass services", *IEEE Trans. on Veh. Technol.*, vol. 54, no. 5, pp. 1875 – 1886, Sep. 2005.

115.Y. Zhang, Y. Xiao and H. H. Chen, "Queuing analysis for OFDM subcarrier allocation in broadband wireless multiservice networks", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 7, no. 10, pp. 3951-3961, Oct. 2008.

116.D. G. Stratogiannis, G. I.Tsiropoulos and P. G. Cottis, "Call admission control in Wireless Networks: Probabilistic approach and efficiency evaluation", *in Proc. IEEE IWCMC 2008*, pp. 712-717, Aug. 2008.

117.G. I. Tsiropoulos, D. G. Stratogiannis, P.G. Cottis and J. D. Kanellopoulos, "Efficiency evaluation of class-based call admission control schemes for wireless communications", *in Proc. ISWCS 2008*, pp. 69-73, Oct. 2008.

118.Y. Guo, and H. Chaskar, "Class-based quality of service over air interfaces in 4G mobile networks", *IEEE Communications Magazine*, vol. 40, no. 3, pp. 132-137, Mar. 2002.

119.R. Ramjee, R. Nagarajan, and D. Towsley, "On optimal call admission control in cellular networks", *in Proc. IEEE INFOCOM '96*, pp. 43-50, Mar. 1996.

120.B. M. Epstein and M. Schwartz, "Reservation strategies for multimedia traffic in a wireless environment", *in Proc. IEEE VTC '95*, vol. 1, pp. 165-169, July 1995.

121.J.L. Vasquez – Avila, F. A. Cruz-Perez, and L.O. –Guerrero, "Performance analysis of fractional guard channel policies in mobile cellular networks", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 5, no. 2, pp. 301-305, Feb. 2006.

122.Y. B. Lin, S. Mohan and A. Noerpel, "Queuing priority channel assignment strategy for PCS handoff and initial access", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 43, no. 3, pp. 704-712, Aug. 1994.

123.W. Li and A. S. Alfa, "Channel reservation for hand-off calls in a PCS network", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 17, no. 7, pp. 1318-1325, Jan. 2000.

124.E. Pinsky, A. Conway, and W. Liu, "Blocking formulae for the Engset model", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 42, no. 6, pp. 2213-2214, Jun. 1994.

125.Y. B. Lin and A. Noerpel, "The sub-rating channel assignment strategy for pcs hand-offs", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 45, no. 1, pp. 122-130, Feb. 1996.

126.Y. Xiao and C. Chen, "Improving degradation and fairness for mobile adaptive multimedia wireless networks", *in Proc. IC3N* 2001, pp. 598-601, 2001.

127.Y. Xiao, C. Chen and Y. Wang, "Fair bandwidth allocation for multiclass of adaptive multimedia services in wireless/mobile networks", *in Proc. VTC* '01, vol. 3, pp. 2081-2085, 2001.

128.T. Kwon, Y. Choi, C. Bisdikian and M. Naghsineh, "Call admission control of adaptive multimedia in wireless/mobile networks", *in Proc. 1st ACM International Workshop on Wireless Mobile Multimedia '98*, pp. 111-116, 1998.

129.C. W. Leong, W. Zhuang, Y. Cheng, and L. Wang, "Call admission control for integrated on/off voice and best-effort data services in mobile cellular communications", *IEEE Transactions on Communications,* vol. 52, no. 5, pp. 778-790, May 2004.

130.T. Bejaoui and N. Nasser, "Efficient call admission control for 4G wireless networks", *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 9, no. 4, pp. 489-499, Apr. 2009.

131.M. Mirhakkak, N. Schult, and D. Thomson, "Dynamic bandwidth management and adaptive applications for a variable bandwith wireless environment", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications,* vol. 19, no. 10, pp. 1984-1997, Oct. 2001.

132.A. Z. Melikov and A.T. Babayev, "Refined approximations for performance analysis and optimization of queuing model with guard channels for handovers in cellular networks", *Computer Communications*, vol. 29, no. 3, pp. 1386-1392, May 2006.

133.E. Stevens-Navarro, A.H. Mohsenian-Rad and V. Wong, "Connection admission control for multiservice integrated Cellular/WLAN system", *IEEE Trans. On Veh. Technol.*, vol. 57, no. 6, pp. 3789-3800, Nov. 2008.

134.L. Z. Ribeiro and L.A. DaSilva, "A framework for the dimensioning of broadband mobile networks supporting wireless Internet services", *IEEE Wireless Commun.*, vol. 9, no. 3, pp. 6-13, Jun. 2002.

135.S.-S. Tzeng and H.-Y. Lu, "Dual-threshold admission control for non-real-time traffic in wireless data networks", *Computer Communications*, vol. 31, no. 10, pp. 2428-2434, 2008.

136.T. P. Yum and K. L. Yeung, "Blocking and handoff performance analysis of directed retry in cellular mobile systems", *IEEE Trans. On Veh. Technol.*, vol. 44, no. 3, pp. 645-650, Aug. 1995.

137.X. Wu, K. Yeung and J. Hu, "Efficient channel borrowing strategy for real-time services in multimedia wireless networks", *IEEE Trans. On Veh. Technol*, vol. 49, no. 4, pp. 1273-1284, Jul. 2000.

138.D. G. Stratogiannis, G. I. Tsiropoulos, J. D. Kanellopoulos and P. G. Cottis, "Probabilistic call admission control in wireless multiservice networks", *IEEE Communications Letters*, vol. 13, no. 10, Oct. 2009.

139.Y. Fang, I. Chlamtac, Y.-B. Lin, "Modeling PCS networks under general call holding time and cell residence time distributions", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 5 no. 6, pp.893-906, Dec. 1997.

140.C. Jedrycki and V.C.M. Leung, "Probability distribution of channel holding time in cellular telephone systems", *in Proc. 46th IEEE Vehicular Technology Conf. (VTC '96)*, vol. 1, pp. 247-251, May 1996.

141.F. Barcelo and J. Jordan, "Channel holding time distribution in cellular telephony", *in Proc. Int. Conf. Wireless Communications*, pp. 125-134, Aug. 1999.

142.E. A. Yavuz and V. C. M. Leung, "Modelling channel occupancy times for voice traffic in cellular networks", *in Proc. IEEE International Conference on Communications 2007 (ICC'07)*, pp. 332 - 337, June 2007.

143.M. Zonoozi and P. Dassanayake, "User mobility modelling and characterization of mobility patterns", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications,* vol. 15, no. 7, pp. 1239-1252, Sep. 1997.

144.Y. Fang and I. Chlamtac, "Analytical generalized results for the handoff probability in wireless networks", *IEEE Transactions on Communications*, vol. 50, no. 3, pp. 396-399, Mar. 2002.

145.E. Xhafa and O. K. Tonguz, "Does mixed lognormal distribution channel holding time affect the handover performance of guard channel scheme?", *in Proc. IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM'03)*, vol. 6, pp. 3452-3456, Dec. 2003.

146.A. E. Xhafa and O. K. Tonguz, "Handover performance of priority schemes in pcs networks", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 57, no. 1, pp. 565-577, Jan. 2008.

147.Y.-R, Haung, Y. B. Lin, and J. M. Ho, "Performance analysis for voice/data integration on a finite-buffer mobile system", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 49, no. 2, pp. 367-378, Mar. 2000.

148.L. Kleinrock, "Queing Systems Volume II: Computer Applications. New York: Wiley 1975, ch. 3.

149.M. Ghaderi and R. Boutaba, "Call admission control for voice/data integration in broadband wireless networks", *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 5, no. 3, pp. 193-207, Mar. 2006.

150.A. Sang, X. Wang and M. Madihian, "Real-Time QoS in enhanced 3G cellular packet systems of a shared downlink channel", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 6, no.5, pp. 1803-1812, May 2007.

151.Y. C. Lai and Y. D. Lin, "A novel admission control for fairly admitting wideband and narrowband calls", *IEEE Communications Letters*, vol. 7, no. 4, Apr. 2003.

152.B. Rong, Y. Qian and K. Lu, "Downlink call admission control in multiservice WiMax networks", *in Proc. IEEE ICC '07*, pp. 5082-5087, Jun 2007.

153.Y. C. Lai, Sheng–Fu Tsai, "Some fair measurement-based admission controls", *in Proc. GLOBECOM 2001*, vol. 4, pp. 2566-2570, 2001.

154.K. I. Kim, S.-K. Noh, Y. H. Hwang and S. H. Kim, "A traffic behaviour-aware fair call admission control for heterogeneous services in wireless networks", *in Proc. CCNC 2004*, vol. 1, pp. 210-215, Jan. 2004.

155.S. Xu and B. Xu, "A fair admission control scheme for multimedia wireless network", *in Proc. WCNMC 2005*, vol. 2, pp. 859-862, Sep. 2005.

156.P. Pace and E. Natalizio, "Wireless communication networks via aerial platforms: Dynamic fair power sharing admission control for UMTS real traffic sources", *in Proc. IEEE ICTMICC 2007*, pp. 616-621, May 2007.

157.I. Racuinica, A. Menouni and C. Bonnet, "An oppurtunistic scheduling with fairness for NRT traffic in presence of RT traffic for UMTS/TDD", *in Proc. WPMC 2004*, vol. 2, pp. 586-589, Sep. 2004.

158.N. Nasser and H. Hassanein, "An optimal and fair call admission control policy for seamless handoff in multimedia wireless networks with QoS guarantees", *in Proc. IEEE GLOBECOM '04*, pp. 3926 – 3930, Nov. 2004.

159.N. Nasser and H. Hassanein, "Optimized bandwidth allocation with fairness and service differentiation in multimedia wireless networks", *Wirel. Commun. Mob. Comput.*, vol. 8, no. 4, pp. 501-511, May 2008.

160.B. Rong, Y. Qian, K. Lu, H. H. Chen and M. Guizani "Call admission control optimization in WiMAX networks", *IEEE Trans. On Veh. Technol.*, vol. 57, no. 4, pp. 2509-2522, Jul. 2008.

161.C. W. Ahn and R. S. Raakrishna, "QoS provisioning dynamic connection-admission control for multimedia wireless networks using a Hopfield neural network", *IEEE Trans. On Veh. Technol.*, vol. 53, no. 1, pp. 106-117, Jan. 2004.

162.J. Virapanicharoen and W. Benjapolakul, "Fair-efficient guard bandwidth coefficients selection in call admission control for mobile multimedia communications using framework of game theory", *IEICE Trans. On Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Science*, vol. E88-A, no. 7, pp. 1869-1880, 2005.

163.J. Virapanicharoen and W. Benjapolakul, "A game theoretic framework for fair-efficient threshold parameters selection in call admission control for CDMA mobile multimedia systems", *IEICE Trans. On Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Science*, vol. E90-A, no. 7, pp. 1280-1291, 2007.

164.Z. Dziong and L. G. Mason, "Fair-efficient call admission control policies for broadband networks-A game theoretic framework", *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 4, no. 1, pp. 123-136, Feb. 1996.

165.H. Zhang, X. Fang and Q. Yuan, "A game theory-based fairness call admission control scheme for CDMA systems", *in Proc. CHINACOM '07*, pp. 1021-1025, Aug. 2007.

166.Y. H. Hwang, S. K. Noh, "A call admission control scheme for heterogeneous service considering fairness in wireless networks", *in Proc. ACIS 2005*, pp. 688-692, 2005.

167.Y. C. Lai, Y. D. Lin, "A fair admission control for large-bandwidth multimedia applications", *in Proc. ICDCSW 2002*, pp. 317-322, 2002.

168.R. H. Hwang and C. F. Chi, "Fairness in QoS guaranteed networks", *in Proc. ICC 2003*, vol. 1, pp. 218-222, 2003.

169.S. Chung and J. Lee, "Call admission control in cellular multiservice netowrks using virtual partitioning with priority networks", *in Proc. IEEE ICON 2000*, pp. 8-12, Sep. 2000.

170.B. Epstein and M. Schwartz, "Predictive QoS-based admission control for multiclass traffic in cellular wireless networks", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 18, no. 3, pp. 523- 534, Mar. 2000.

171.M. Dianati, X. Shen and S. Naik, "A new fairness index for radio resource allocation on wireless networks", *in Proc. IEEE WCNC 2005*, vol. 2, pp. 712-717, 2005.

172.R. Jain, D. Chiu, W. Hawe, "A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer system", DEC Research Report TR-301, 1984.

173.C. U. Saraydar, N. B. Mandayam and D. J. Goodman, "Efficient power control via pricing in wireless data networks", *IEEE Trans. Commun.*, vol. 50, no. 2, pp. 291- 303, Feb. 2002.

174.D. G. Stratogiannis, G. I. Tsiropoulos, J. D. Kanellopoulos and P.G. Cottis, "Price Bargaining Integration with Dynamic Call Admission Control in Wireless Multiservice Networks", *in Proc. ICUMT 2009*, pp. 1-6, Oct. 2009.

175.D. Niyato and E. Hossain, "Radio resource management games in wireless networks: An approach to bandwidth allocation and admission control for polling service in IEEE 802.16", *IEEE Wireless Commun.*, vol. 14, no. 1, pp. 27-35, Feb. 2007.

176.P. Ghosh, K. Basu and S. Das, "A Game Theory-based pricing strategy to support single/multiclass job allocation schemes for bandwidth-constrained distributted computing schemes", *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.*, vol. 18, no. 3, pp. 289-306, Mar. 2007.

177.K. D. Lee and V. C. M. Leung, "Fair allocation of subcarrier and power in an OFDMA wireless mesh network", *J. Sel. Areas Commun.*, vol. 24, no. 11, pp. 2051- 2060, Nov. 2006.

178.Z. Han, Z. Ji and K.J.R. Liu, "Fair multiuser channel allocation for OFDMA networks using Nash bargaining solutions and coalitions", *IEEE Trans. Commun.*, vol. 53, no. 8, pp. 1366-1376, Aug. 2005.

179.J. Virapanicharoen and W. Benjapolakul, "Fair-efficient threshold parameters selection in call admission control for CDMA mobile multimedia communications using game theoretic framework", *in Proc. CCNC 2005*, pp. 439-444, 2005.

180.L. Berlemann, G. R. Hiertz, B. H. Walke and S. Mangold, "Radio resource sharing games: enabling QoS support in unlicensed bands", *IEEE Network*, vol. 19, no. 4, pp. 59-65, Jul.-Aug. 2005.

181.H. Lin, M. Chatterjee, S. K. Das and K. Basu, "ARC: An integrated admission and rate control framework for competitive wireless CDMA data networks using non cooperative games", *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 4, no. 3, pp. 243-258, May-Jun. 2005.

182.Z. Han, Z. Ji and K. J. R. Liu, "Power minimization for multi-cell OFDM networks using distributed non-cooperative game approach, *in Proc. GLOBECOM '04*, vol. 6, pp. 3742-3747, Nov. –Dec. 2004.

183.Y. Pan, A. Nix and M. Beach, "A game theoretic approach to distributed resource allocation for OFDMA-based relaying networks", *in Proc. PIMRC '08*, pp. 1-5, Sep. 2008.

184.V. Saristrava, J. Neel, A. B. Mackkenzie, R. Menon, L. A. DaSilva, J. E. Hicks, J. H. Reed and R. P. Gilles, "Using game theory to analyze wireless ad hoc networks", *IEEE Communications Surveys & Tutorials,* vol. 7, no. 4, pp. 46-56, 2005.

185.D. Niyato and E. Hossain, "A cooperative game framework for bandwidth allocation in 4G heterogeneous wireless networks", *in Proc. International Conference on Communications 2006 (ICC'06)*, vol. 2, pp. 1418-1422, 2006.

186.D. Niyato and E. Hossain, "Competitive pricing in heterogeneous wireless access networks: Issues and approaches", *IEEE Network*, vol. 22, no. 6, pp. 4-11, 2008.

187.E. Chlebus and W. Ludwin, "Is handoff traffic really poissonian", *in Proc. IEEE ICUPC 1995*, pp. 348-353, 1995.

188.I. C. Paschalidis and J. N. Tsitsiklis, "Congestion-dependent pricing of network services", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 8, no. 2, pp. 171-184, Apr. 2000.

189.X. Rang and H. Schulzrinne, "Pricing network resources for adaptive applications", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 14, no. 3, pp. 506-519, Jun. 2006.

190.E. D. Fitkov-Norris and A. Khanifar, "Dynamic pricing in mobile communication systems", *in Proc. First International Conference on 3G Mobile Communication Technology*, pp. 416-420, 2000.

191.E. D. Fitkov-Norris and A. Khanifar, "Dynamic pricing in cellular networks, a mobility model with a provider-oriented approach", *in Proc. Second International Conference on 3G Mobile Communication Technology*, pp. 63-67, 2001.

192.P. Fishburn and A. Odlyzko, "Dynamic behavior of differential pricing and quality of service options for the internet", *Decision Support Systems*, vol. 28, pp. 123-126, Mar. 2000.

193.J. F. Nash, "Non-cooperative games", *Ann. Math.* vol. 54, pp. 289-295, 1951.

194.R. Marshall and A. Merlo, "Pattern Bargaining" *Federal Reserve Bank of Minneapolis Research Department Staff Report 220*, Nov. 1996.

195.H. Yaiche, R. Mazumdar and C. Rosenberg, "A Game theoretic framework for bandwith allocation and pricing in Broaband Netowks", *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 8, no. 5, pp. 667-678, Oct. 2000.

196.J. Tirole, "*Theory of Industrial Organisation*", MIT Press, U.S.A., 1988.

197.S. Sengupta, S. Anand, M. Chatterjee and R. Chandramouli, "Dynamic pricing for service provisioning and network selection in heterogeneous networks", *Physical Communication*, vol. 2, no. 1-2, pp. 138-150, 2009.

198.R. R. Mazumdar, L. Mason and C. Douligeris, "Fairness in network optimal flow control: Optimality of product forms", *IEEE Trans. Commun.*, vol. 39, no. 5, pp. 775-782, May 1991.

199.X. R. Cao, H.-X. Shen, R. Milito and P. Wirth, "Internet pricing with a game thoretical approach: Concepts and examples", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 10, no. 2, pp. 208-216, Apr. 2002.

200.K. Binmore, A. Rubinstein, and A. Wolinsky, "The Nash Bargaining Solution in Economic Modelling", *Rand Journal of Economics*, vol. 17, no. 2, pp. 176-188, 1986.