



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

**Έλεγχος Αποδοχής Κλήσεων, Κατανομή Πόρων και
Διαχείριση Κινητικότητας σε Ασύρματα Δίκτυα**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

του

ΓΕΩΡΓΙΟΥ Ι. ΤΣΙΡΟΠΟΥΛΟΥ

Διπλωματούχου Ηλεκτρολόγου Μηχανικού
και Μηχανικού Υπολογιστών Ε.Μ.Π. (2005)

Αθήνα, Ιούλιος 2010



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

Έλεγχος Αποδοχής Κλήσεων, Κατανομή Πόρων και Διαχείριση Κινητικότητας σε Ασύρματα Δίκτυα

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

του

ΓΕΩΡΓΙΟΥ Ι. ΤΣΙΡΟΠΟΥΛΟΥ

Διπλωματούχου Ηλεκτρολόγου Μηχανικού και Μηχανικού Υπολογιστών Ε.Μ.Π. (2005)

Συμβουλευτική Επιτροπή : Παναγιώτης Γ. Κωττής

Ιωάννης Δ. Κανελλόπουλος

Χρήστος Ν. Καψάλης

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 12^η Ιουλίου 2010.

.....
Παναγιώτης Γ. Κωττής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ιωάννης Δ. Κανελλόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Χρήστος Ν. Καψάλης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Μιχαήλ Ε. Θεολόγου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Φίλιπος Κωνσταντίνου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Αθανάσιος Δ. Παναγόπουλος
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

.....
Γεώργιος Π. Ευθύμογλου
Καθηγητής Πανεπιστημίου Πειραιώς

Αθήνα, Ιούλιος 2010

.....
Γεώργιος Ι. Τσιρόπουλος

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

Copyright © Γεώργιος Ι. Τσιρόπουλος, 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.

*Αφιερώνεται στους Γονείς μου,
Ιωάννη και Ευρυδίκη,
ως ελάχιστο δείγμα της ευγνωμοσύνης μου...
και στην Αδερφή μου
Ειρήνη-Ελένη,
για την συμπαράστασή της σε όλη αυτή τη διαδρομή.*

*Στην Ιερή Μνήμη του Πάππου μου,
Ευστράτιου.*

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Ο χώρος των θετικών επιστημών είναι ιδιαίτερα συναρπαστικός και θελκτικός καθώς δίνει τη δυνατότητα στο ανθρώπινο πνεύμα να μεγαλουργήσει και να αποκαλύψει το μεγαλείο του. Η συνεισφορά τους είναι ανεκτίμητη διότι χάρη στην προσήλωσή της θετικής σκέψης στο τρίπτυχο Παρατήρηση-Θεωρία-Πείραμα (επιβεβαίωση) έχουν κληροδοτήσει στην ανθρωπότητα μια πολύτιμη κληρονομιά και της έχουν δωρίσει αλήθειες αναλλοίωτες στο χρόνο και αναντίλεκτα καθοριστικές για την εξέλιξη της ανθρώπινης ιστορίας. Ενώ η μαγεία της επιστήμης βρίσκει απήχηση κατά κανόνα στους επιστήμονες και στους ερευνητές, οι κάθε μορφής εφαρμογές των θετικών επιστημών διευκολύνουν την καθημερινή ζωή των ανθρώπων και βελτιώνουν την ποιότητά της, αποδεικνύοντας έμπρακτα τη μεγάλη τους αξία.

Ο τομέας των Επικοινωνιών, Ασύρματων ή Ενσύρματων, αποτελεί από παράδειγμα της εφαρμογής των Θετικών Επιστημών στην υπηρεσία του ανθρώπου. Η ραγδαία ανάπτυξη που γνώρισε και γνωρίζει ο τομέας αυτός προάγει την επιστημονική έρευνα σε ανώτερα επίπεδα, υπαγορεύοντας παράλληλα την ανάγκη για ανάπτυξη νέων θεωριών.

Στα πλαίσια αυτής της απαίτησης εντάσσεται η συμβολή της παρούσας διδακτορικής διατριβής, η οποία αποτελεί το επιστέγασμα πενταετούς προσωπικής επίπονης ερευνητικής προσπάθειας που συντελέστηκε στο φιλόξενο περιβάλλον του Εργαστηρίου 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. Όπως υποδηλώνεται από τον τίτλο της Διατριβής, «Έλεγχος Αποδοχής Κλήσεων, Κατανομή Πόρων και Διαχείριση Κινητικότητας σε Ασύρματα Δίκτυα», αντικείμενο πραγμάτευσης αποτελούν

θέματα αποδοχής κλήσεων στα ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών καθώς και τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την κατανομή των διαθέσιμων πόρων των δικτύων μεταξύ των χρηστών, λαμβάνοντας ταυτόχρονα υπόψη τη δυνατότητα για υποστήριξη κινητικότητας των χρηστών. Ο κύριος επιστημονικός στόχος της Διατριβής είναι η παρουσίαση νέων αποτελεσματικών αλγόριθμων με στόχο την ενσωμάτωση δυναμικών και κατανεμημένων χαρακτηριστικών καθώς και την παροχή εγγυημένου επιπέδου ποιότητας υπηρεσιών.

Εκτός από τον καθαρά επιστημονικό στόχο της Διατριβής που εξασφαλίζεται μέσα από την πρωτοτυπία και καινοτομία του επιστημονικού έργου που περιγράφει, πρόσθετη μέριμνα του συγγραφέα αποτέλεσε ο προσιτός και κατανοητός χαρακτήρας της Διατριβής από τον αναγνώστη εκείνον, ο οποίος διαθέτει ένα βασικό μαθηματικό υπόβαθρο και στοιχειώδεις γνώσεις τηλεπικοινωνιών. Για το λόγο αυτό, επιλέχθηκε η κλασσική σειρά παρουσίασης, που στοχεύει στην ομαλή μετάβαση του αναγνώστη από τις βασικές έννοιες στις σύνθετες θεωρίες που αποτελούν το κύριο αντικείμενο της Διατριβής. Το εγχείρημα υπήρξε απαιτητικό, κυρίως λόγω της έκτασης του προς μελέτη αντικειμένου και της αμοιβαίας εξάρτησης των διαφόρων θεμάτων. Σημείο έντονου προβληματισμού αποτέλεσε η σειρά παρουσίασης των ενοτήτων και ο όγκος της πληροφορίας που τελικά συμπεριελήφθη.

Όσον αφορά τη βασική δομή της, η Διατριβή απαρτίζεται από πέντε κεφάλαια. Ειδικότερα, η Διατριβή ξεκινά με ένα εισαγωγικό κεφάλαιο, στο οποίο παρέχεται κατά χρονολογική σειρά μια γενική επισκόπηση των κυριότερων συστημάτων ασύρματων επικοινωνιών. Επιπλέον, παρουσιάζονται οι τεχνολογικές προκλήσεις που ανακύπτουν από την εφαρμογή των ασύρματων τεχνολογιών και οι περιορισμοί που απορρέουν από τη χρήση του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι βασικές έννοιες που αφορούν τους αλγόριθμους αποδοχής κλήσεων, όπως η ποιότητα υπηρεσιών, η διαχείριση ραδιοπόρων, η πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων. Επιπλέον, παρατίθενται και αναλύονται τα κριτήρια αποδοχής κλήσεων, παράλληλα με μια συστηματική διερεύνηση του τρόπου κατηγοριοποίησης των αλγόριθμων

αποδοχής κλήσεων σε ομάδες βάσει των χαρακτηριστικών τους. Στο τρίτο κεφάλαιο πραγματοποιείται μια εκτενής επισκόπηση των αλγόριθμων αποδοχής κλήσεων που έχουν προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία και προτείνεται ένας νέος αλγόριθμος, σημαντικό πλεονέκτημα του οποίου αποτελεί η βελτιωμένη επίδοση που επιτυγχάνει έναντι των αλγόριθμων αποδοχής κλήσεων που έχουν προταθεί έως σήμερα.

Στα επόμενα δύο κεφάλαια μελετάται υπό διαφορετικές οπτικές γωνίες ο αλγόριθμος που προτάθηκε στο τρίτο. Συγκεκριμένα, στο τέταρτο κεφάλαιο εξετάζεται η έννοια της δικαιοσύνης στην κατανομή των πόρων του δικτύου και στη διαδικασία αποδοχής κλήσεων. Για το λόγο αυτό, προτείνεται η τροποποίηση του νέου αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων αποδίδοντάς του δυναμικά χαρακτηριστικά, ώστε να βελτιστοποιείται η επίδοσή του ως προς το κριτήριο αυτό. Στο πέμπτο κεφάλαιο εξελίσσεται ο προτεινόμενος αλγόριθμος σε ένα δυναμικό-κατανεμημένο αλγόριθμο μέσω της ενσωμάτωσης σε αυτόν μιας τεχνικής για την κατανομή των πόρων του δικτύου μεταξύ των χρηστών. Με τον τρόπο αυτό προκύπτει ένα ενιαίο πλαίσιο κατανομής πόρων και ελέγχου αποδοχής κλήσεων, το οποίο αναθέτει την απόφαση αποδοχής ή αποκλεισμού στο χρήστη μεταβάλλοντας δυναμικά τις παραμέτρους του βάσει των μεταβολών της κατάστασης του δικτύου. Πρέπει να σημειωθεί ότι, για την επίτευξη αυτού του συνδυασμού, επιστρατεύονται συγκεκριμένα μοντέλα διαπραγματεύσεων της θεωρίας παιγνίων, τα οποία εξελίσσονται στην παρούσα Διατριβή ώστε να καλύπτουν τις ανάγκες υποστήριξης πολλαπλών παικτών-χρηστών με διαφορετικά χαρακτηριστικά.

Η εκπόνηση της διδακτορικής Διατριβής που ξεκίνησε το Δεκέμβριο του 2005 και ύστερα από μακρά και επίμοχθη προσπάθεια φτάνει στο πέρας της, προσέφερε σε εμένα μέγιστη ηθική ικανοποίηση. Παρά τη δυσκολία του εγχειρήματος, το αποτέλεσμα, αξιολογούμενο με ποσοτικά και ποιοτικά κριτήρια, δικαιώνει τις προσπάθειες που κατεβλήθησαν. Από την αρχή ήταν γνωστό ότι ο χώρος της έρευνας απαιτεί εύρος γνώσεων, αυστηρή πειθαρχία, καθημερινή προσπάθεια, προσωπικές θυσίες και αστείρευτη υπομονή. Η συστηματική μελέτη και η προσήλωση στους στόχους αποτέλεσαν τις βασικές παραμέτρους για την επίτευξη του τελικού αποτελέσματος. Αυτό

μπορεί να αναλυθεί σε δύο συνιστώσες. Η πρώτη συνιστώσα περιλαμβάνει την κατάκτηση μιας υψηλού επιπέδου μόρφωσης μέσω της εκπόνησης της Διατριβής. Η δεύτερη συνιστώσα εστιάζει στην κατάκτηση εκείνων των δεξιοτήτων που καθιστούν ικανό τον ερευνητή για ανακάλυψη νέας γνώσης. Απώτερο στόχο αποτελεί η μετάδοση αυτού του γνωστικού πλούτου και των αξιών που τη συνοδεύουν σε νεότερους ανθρώπους, γεγονός που συνοδεύεται από την ευχή να μου δοθεί αυτή η ευκαιρία.

Η ολοκλήρωση της διδακτορικής Διατριβής κατέστη δυνατή χάρη στην αμέριστη συμπαράσταση και την πολύτιμη βοήθεια ενός μεγάλου αριθμού ανθρώπων. Όλοι αυτοί, αλλά και ο καθένας τους ξεχωριστά, συνέβαλαν τα μέγιστα για την επιτυχημένη πορεία της ερευνητικής μου δραστηριότητας. Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να εκφράσω την απεριόριστη ευγνωμοσύνη μου και τις θερμές μου ευχαριστίες για την ηθική, πνευματική και έμπρακτη υποστήριξη που μου πρόσφεραν όλα αυτά τα χρόνια.

Καταρχήν, θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς και εγκάρδιες ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα Καθηγητή ΕΜΠ της διδακτορικής Διατριβής μου, κ. Παναγιώτη Γ. Κωττή. Τον ευχαριστώ θερμά για τη μεγάλη εμπιστοσύνη με την οποία με περιέβαλλε και τη υποστήριξη που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια της προσπάθειάς μου, από την στιγμή που έγινα δεκτός ως Υποψήφιος Διδάκτορας έως σήμερα. Η άρτια επιστημονική καθοδήγηση, η διαρκής βοήθεια και οι στοχευμένες παρατηρήσεις του αποτέλεσαν απτή και απαραίτητη αρωγή για την ολοκλήρωση της διδακτορικής Διατριβής μου. Η σημαίνουσα προσωπικότητά του στον επιστημονικό χώρο, το σπάνιο εύρος των γνώσεων και οι συμβουλές του με βοήθησαν να αξιοποιήσω αποτελεσματικά τις ικανότητές μου και να μπορέσω να αντεπεξέλθω στον απαιτητικό χώρο της επιστημονικής έρευνας. Το ενδιαφέρον του να με καταστήσει άρτιο κοινωνό του επιστημονικού λόγου, χαρακτηριστικά του οποίου είναι η σαφήνεια, η λιτότητα, η περιεκτικότητα και η ευκρίνεια ως προς την ανάλυση, συνέβαλε στην ολοκληρωμένη εκπαίδευσή μου κατά την αγαστή συνεργασία μας. Θα ήθελα επίσης να τον ευχαριστήσω ιδιαίτερος για τις υψηλές πνευματικές και επιστημονικές αξίες που μου μετέδωσε, καθώς αυτές αποτελούν τη

σημαντικότερη παρακαταθήκη μου για το μέλλον ως ικανού μηχανικού και άξιου επιστήμονα.

Ανάλογες ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω προς στο σεβαστό μου Καθηγητή ΕΜΠ κ. Ιωάννη Δ. Κανελλόπουλο. Θα ήθελα να επισημάνω το έντονο ενδιαφέρον του για την πρόοδο του επιστημονικού μου έργου και την ανυπολόγιστης αξίας βοήθεια που μου παρείχε στο μαθηματικό σκέλος της Διατριβής μου, γεγονός που πηγάζει από το απaráμιλλο γνωστικό υπόβαθρο και την ιδιαίτερη ευφυΐα που τον χαρακτηρίζει. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω των Λέκτορα ΕΜΠ κ. Αθανάσιο Δ. Παναγόπουλο, η συνεισφορά του οποίου υπήρξε καταλυτική για την ολοκλήρωση της διδακτορικής Διατριβής μου. Οι συμβουλές του και η άριστη γνώση του των σύγχρονων ερευνητικών θεμάτων διευκόλυναν τις προσπάθειές μου και τις έκαναν να τελεσφορήσουν.

Επιπρόσθετα, θα ήθελα να αποδώσω τις εγκάρδιες ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα Καθηγητή ΕΜΠ της διπλωματικής μου εργασίας και μέλος της επιτροπής αξιολόγησης της διδακτορικής Διατριβής, κ. Μιχαήλ Ε. Θεολόγου. Η απεριόριστη εκτίμηση και ο σεβασμός που τρέφω προς το πρόσωπό του οφείλονται στο γεγονός ότι υπήρξε ο Καθηγητής που μου έδωσε την έμπνευση και το έναυσμα για την πορεία που κατέληξε στην ολοκλήρωση της παρούσας Διατριβής. Επιπλέον, τις ειλικρινείς ευχαριστίες μου αποτείνω στους αξιότιμους Καθηγητές ΕΜΠ κ. Χρήστο Ν. Καψάλη και κ. Φίλιππο Κωνσταντίνου, για τη συνεργασία τους καθώς και για την τιμή που μου έκαναν αποδεχόμενοι να συμμετάσχουν στην επταμελή εξεταστική επιτροπή της Διατριβής μου. Η άρτια επιστημονική τους κατάρτιση και η αφοσίωση που χαρακτηρίζει το διδακτικό τους έργο μου ενέπνευσαν, ως προπτυχιακό και μεταπτυχιακό φοιτητή, την αγάπη για τη μάθηση και την έρευνα. Ιδιαίτερώς, θα ήθελα από καρδιάς να ευχαριστήσω τον αξιότιμο Καθηγητή κ. Γεώργιο Π. Ευθύμογλου, ο οποίος συμβάλει έμπρακτα στην επιστημονική μου πορεία, τιμώντας με μέσω της συμμετοχής του στην επταμελή εξεταστική επιτροπή της Διατριβής μου.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον αδελφικό μου φίλο, Δρ. ΕΜΠ Δημήτριο Γ. Στρατογιάννη, για την αμέριστη συμπαράσταση και αλληλοβοήθεια που επέδειξε κατά την κοινή μας πορεία. Η αγάπη του

για την έρευνα και τη γνώση, η πίστη του σε διαχρονικές αξίες και υψηλά ιδανικά καθώς και το ακέραιο ήθος που τον διακρίνει μας ενώνουν με μια σπάνια φιλία. Οι ατελείωτες ώρες κοινής δουλειάς που πολλές φορές κατέληγαν σε ολονύκτια εργασία, οι εντατικοί και εξαντλητικοί ρυθμοί που ακολουθήσαμε τα τελευταία χρόνια και οι κοινές θυσίες από την προσωπική μας ζωή δικαιώθηκαν από τα λαμπρά αποτελέσματα που επιτύχαμε. Δεν μπορεί να λησμονήσει κανείς και τις ευχάριστες στιγμές που περάσαμε στα ταξίδια μας σε συνέδρια στην Κρήτη, στην Ισλανδία και τη Ρωσία. Είμαι απολύτως βέβαιος ότι η φιλία μας θα αποδειχτεί δυνατή στο χρόνο, αποτελώντας και για τους δύο επιπρόσθετο κέρδος στην επιστημονική μας περιπλάνηση.

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. Η περίοδος που συνεργαστήκαμε μαζί στο Υπουργείο αποτελεί για εμένα ιδιαίτερα ευχάριστη ανάμνηση. Ακόμα, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου προς τον αδελφικό μου φίλο Διονύσιο Γ. Φραγκόπουλο και τον παιδικό μου φίλο Ιωάννη Σωτηρίου για τις ξέγνοιαστες στιγμές και την αμέριστη συμπαράσταση που απλόχερα μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια.

Σε προσωπικό επίπεδο, θα ήθελα από καρδιάς να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Ιωάννη και Ευρυδίκη, για την αγάπη τους, την υπομονή τους, τις θυσίες τους, την αμέριστη βοήθεια και τα απαραίτητα ψυχικά και συναισθηματικά εφόδια που μου παρέχουν καθημερινά για να ανταπεξέλθω στις υποχρεώσεις μου και να αφοσιωθώ απερίσπαστος στο επιστημονικό μου έργο. Θέλω να τονίσω ότι αποτελούν λαμπρό υπόδειγμα γονέων, επειδή εκτός από την πνευματική καλλιέργεια, φροντίζουν να με εφοδιάζουν με υψηλά ιδανικά και ηθικές αξίες. Επίσης, θέλω να την εκφράσω την απεριόριστη αγάπη μου για την αδερφή μου Ειρήνη-Ελένη, για την αγάπη και την καθημερινή και έμπρακτη συμπαράσταση που μου προσφέρει. Ολοκληρώνοντας αυτές τις γραμμές, θα ήθελα να εκφράσω την απεριόριστη

αγάπη μου σε όλα τα οικεία μου πρόσωπα και κυρίως στον παππού μου, Στράτο, η μνήμη του οποίου με συντρόφευε κατά τη συγγραφή της Διατριβής.

Γεώργιος Ι. Τσιρόπουλος

Αθήνα, 12 Ιουλίου 2010

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τις τελευταίες δεκαετίες έχει αναπτυχθεί πληθώρα συστημάτων ασύρματων επικοινωνιών με ποικίλα χαρακτηριστικά. Μια ανασκόπηση των συστημάτων αυτών και των σχετικών τεχνολογικών προκλήσεων παρουσιάζεται στο πρώτο κεφάλαιο της διατριβής. Για την αποτελεσματική διαχείριση του διαθέσιμου φάσματος παράλληλα με την παροχή του επιθυμητού επιπέδου ποιότητας υπηρεσιών στους χρήστες του δικτύου έχει επινοηθεί και υλοποιηθεί μια σειρά από λειτουργίες διαχείρισης ραδιοπόρων, όπως οι αλγόριθμοι αποδοχής κλήσεων.

Στο σύγχρονο περιβάλλον επικοινωνιών που έχει δημιουργηθεί από την ανάπτυξη των νέων ασύρματων δικτύων και την ανάγκη παροχής καινοτόμων υπηρεσιών πολυμεσικού περιεχομένου απαιτούνται νέες τεχνικές αντιμετώπισης των προβλημάτων που ανακύπτουν από τους τεχνολογικούς περιορισμούς, όπως η αποδοτική χρήση του διαθέσιμου φάσματος και η διαδικασία αποδοχής εισερχόμενων κλήσεων όπως περιγράφεται στο δεύτερο κεφάλαιο. Στο ίδιο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι ορισμοί και η ανάλυση των βασικών εννοιών της ποιότητας παροχής υπηρεσιών καθώς και οι θεμελιώδεις αρχές της διαχείρισης ραδιοπόρων και γίνεται εκτενής ανάλυση του τρόπου λειτουργίας και των κριτηρίων των αλγόριθμων αποδοχής κλήσεων. Τα κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την περιγραφή του τρόπου ταξινόμησης των αλγόριθμων αποδοχής κλήσεων σε κατηγορίες σύμφωνα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της αρχιτεκτονικής τους.

Αποσκοπώντας στη βελτίωση της επίδοσης των ασύρματων δικτύων, στο τρίτο κεφάλαιο προτείνεται ένας νέος αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων, ο πιθανοτικός αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων, που επιτυγχάνει βελτιωμένα αποτελέσματα σε σχέση με αντίστοιχους αλγόριθμους που έχουν προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία. Για την επιβεβαίωση της βελτιωμένης επίδοσης του προτεινόμενου πιθανοτικού αλγόριθμου παρουσιάζονται τρεις κατηγορίες αριθμητικών αποτελεσμάτων που συνοδεύονται από αντίστοιχα αποτελέσματα που έχουν προκύψει από προσομοιώσεις. Εκάστη των τριών κατηγοριών αποτελεσμάτων εξετάζει από διαφορετική θεώρηση τον τρόπο λειτουργίας του αλγόριθμου ώστε να διερευνηθεί πλήρως η επίδοσή του.

Η παροχή διαφορετικών επιπέδων ποιότητας υπηρεσιών ανάλογα με την κλάση υπηρεσιών έχει ως άμεσο αποτέλεσμα τη διαφοροποίηση της συμπεριφοράς του δικτύου αντίστοιχα προς τα χαρακτηριστικά κάθε εισερχόμενης κλήσης. Για το λόγο αυτό, στους αλγόριθμους αποδοχής κλήσεων χρησιμοποιούνται διαφορετικά επίπεδα προτεραιότητας,

που αντιστοιχούν στις υποστηριζόμενες κλάσεις υπηρεσιών. Η εφαρμογή μηχανισμών απόδοσης προτεραιότητας στις διάφορες κλάσεις εισερχόμενων κλήσεων έχει ως αποτέλεσμα τη μη ισότιμη αντιμετώπιση των διαφόρων κλάσεων υπηρεσιών από το δίκτυο, γεγονός που καθίσταται ιδιαίτερα έντονο όταν το δίκτυο λειτουργεί σε υψηλά επίπεδα φορτίου. Ο τρόπος μέτρησης του επιπέδου δικαιοσύνης που παρέχει ένας αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων καθώς και οι απαραίτητοι ορισμοί παρουσιάζονται στο τέταρτο κεφάλαιο. Στη συνέχεια, προτείνεται ένας αλγόριθμος απονομής δικαιοσύνης μεταξύ κλήσεων διαφορετικών κλάσεων υπηρεσιών ο οποίος ενσωματώνεται στους αλγόριθμους αποδοχής κλήσεων. Για την πληρέστερη κατανόηση της αποτελεσματικότητας του προτεινόμενου σχήματος απονομής δικαιοσύνης αναπτύσσεται η ενσωμάτωσή του στον πιθανοτικό αλγόριθμο αποδοχής κλήσεων. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η δυναμική απόκριση του πιθανοτικού αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων στις μεταβολές της τηλεπικοινωνιακής κίνησης που εξυπηρετεί η κυψέλη. Τα αποτελέσματα του ενοποιημένου αλγόριθμου, που παρουσιάζονται στο τέλος του τέταρτου κεφαλαίου, καταδεικνύουν τη βελτιωμένη επίδοση του δυναμικού πιθανοτικού αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων καθώς και την επιτυχία του με κριτήριο τη δίκαιη αντιμετώπιση των εισερχόμενων κλήσεων διαφορετικών κλάσεων υπηρεσιών.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η βελτιστοποίηση και επέκταση του πιθανοτικού ελέγχου αποδοχής κλήσεων μέσω της ενσωμάτωσης ενός κατάλληλου δυναμικού μηχανισμού κατανομής πόρων μεταξύ των κλήσεων των διαφόρων κλάσεων υπηρεσιών που υποστηρίζονται από το δίκτυο. Η επέκταση του πιθανοτικού αλγόριθμου ελέγχου αποδοχής κλήσεων βασίζεται στη θεωρία παιγνίων για τη διαπραγμάτευση των μεριδίων των πόρων που λαμβάνει κάθε χρήστης κατά την κατανομή των πόρων της κυψέλης μεταξύ των χρηστών. Για τον υπολογισμό της κατανομής των πόρων χρησιμοποιείται αρχικά ένα παίγνιο ανταγωνισμού μεταξύ δύο παιχτών. Στη συνέχεια, διατυπώνεται το παίγνιο με κατάλληλο τρόπο ώστε να είναι εφικτή η επέκτασή του για πολλούς παίκτες με διαφορετικό συντελεστή υποβάθμισης ώστε να περιγράφονται χρήστες με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Ακολουθεί η απόδειξη της ύπαρξης σημείου ισορροπίας του παιγνίου και η εύρεσή του.

Η συμπεριφορά των χρηστών περιγράφεται βάσει των μεριδίων των πόρων του δικτύου που αντιστοιχούν στις εισερχόμενες κλήσεις και της κατάστασης της κυψέλης του δικτύου. Κατ' αυτόν τον τρόπο υπολογίζονται οι πιθανοτικές παράμετροι του προτεινόμενου αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν τη σημαντική βελτίωση της επίδοσης του πιθανοτικού ελέγχου αποδοχής κλήσεων μέσω της

βελτιστοποίησης των πιθανοτικών παραμέτρων αποδοχής κλήσεων. Επιπλέον, επιτυγχάνεται η κατανομημένη συμπεριφορά του ενοποιημένου σχήματος αποδοχής κλήσεων και κατανομής πόρων του δικτύου.

ABSTRACT

During the last decades many wireless systems with different characteristics have been developed. An extensive review of wireless technologies along with the technological challenges arising from the evolution of wireless networks is presented in the first chapter of the thesis. To ensure both the effective management of the available spectrum and the provision of a guaranteed Quality of Service (QoS), many radio resource management algorithms have been proposed, including Call Admission Control (CAC) schemes.

The current communication environment is characterized by types of new wireless networks and the need to support new multimedia services. Thus, new techniques are required to deal with relevant technological problems, such as the effective use of the available spectrum and the admission control of incoming calls; these techniques are described in the second chapter. The basic definitions and the analysis of fundamental issues for QoS provision are also presented in chapter two along with the principles of radio resource management. Moreover, the basic functions of CAC schemes and the criteria taken into account in the decision making part are discussed. The chapter concludes by describing how CAC schemes are classified into groups based on their special features.

In the third chapter a novel CAC scheme is proposed, the Probabilistic Call Admission Control (PCAC) scheme, which improves the overall performance of wireless networks compared to other CAC schemes proposed in literature. This is verified through three sets of numerical results, which examine the proposed PCAC scheme from different aspects. The numerical results presented include both analytical and simulation results.

Each incoming call is treated differently by the network according to its characteristics; therefore, various QoS levels are supported by the network each one associated with a Service Class (SC). Accordingly, the CAC schemes employed use different admission levels for every SC supported. A priority assignment mechanism is embedded in the CAC schemes, to ensure that different admission levels are supported. The incorporation of priority levels introduces a dissimilar treatment of incoming calls. This drawback becomes worse when the network operates near congestion. Several ways to define and measure fairness in CAC are presented in chapter four. Also, dynamic PCAC is introduced, which constitutes a modified version of PCAC aiming to ensuring absolute fairness in the admission decision process among the SCs supported. Thus, the dynamic PCAC scheme adjusts the admission criteria to the status of the cell and the variation of the

incoming traffic load. The results presented demonstrate the improved performance of the proposed dynamic PCAC scheme, especially in terms of fairness.

In the last chapter of the thesis, an optimization technique for the PCAC scheme is introduced incorporating a dynamic resource allocation scheme. The optimization technique proposed is based on a game theoretical framework where a bargaining game takes place among the ongoing calls and the incoming ones to determine the resources that must be allocated to each call. In this framework, a well known bargaining game between two users is used, which is appropriately extended to support multiple users with heterogeneous discounting factors corresponding to different call characteristics. Furthermore, the proof for the existence and uniqueness of the perfect subgame equilibrium is given in closed form enabling its numerical calculation.

The users reaction varies according to the resources allocated to the respective incoming calls and the status of the cell. Thus, the probabilistic parameters of PCSC can be determined by appropriately formulating users reaction to the resource allocation outcome. The numerical results demonstrate the improved performance achieved by the integrated framework, since the operation of PCAC scheme is optimized through the dynamic calculation of the probabilistic parameters based on the result of the resource allocation algorithm. The integrated framework can be considered as a distributed one, since both the admission decision and the resource allocation are carried out on a user level.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	7
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	15
ABSTRACT	19
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	21
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	25
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	27
ΛΕΞΙΚΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ.....	29
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΝΤΜΗΣΕΩΝ	37
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ.....	41
1.1. Εισαγωγή.....	41
1.2. Η Εξέλιξη των Ασύρματων Δικτύων.....	44
1.2.1. Η Πρώιμη Κινητή Τηλεφωνία	44
1.2.2. Αναλογικά Κυψελωτά Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα	45
1.2.3. Ψηφιακά Κυψελωτά Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα.....	47
1.2.3.1. GSM.....	49
1.2.3.2. HSCSD και GPRS.....	50
1.2.3.3. D-AMPS	51
1.2.3.4. IS-95.....	51
1.2.4. Ασύρματα Συστήματα Μεταφοράς Δεδομένων.....	52
1.2.4.1. Συστήματα Δικτύων Ευρείας Περιοχής.....	53
1.2.4.2. Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα.....	54
1.2.4.3. Ασύρματα Δίκτυα Ασύγχρονου Τρόπου Μεταφοράς.....	56
1.2.4.4. Ασύρματα Δίκτυα Μικρής Εμβέλειας	56
1.2.5. Σταθερή Ασύρματη Πρόσβαση.....	58
1.2.6. Δορυφορικά Συστήματα Επικοινωνιών	59
1.2.7. Συστήματα Επικοινωνιών Τρίτης και Τέταρτης Γενιάς	61
1.3. Προκλήσεις.....	62
1.3.1. Μεταβλητότητα του Ασύρματου Μέσου	63
1.3.2. Διαχείριση Φάσματος.....	63

1.3.3.	Διαχείριση Ισχύος	64
1.3.4.	Ασφάλεια Δεδομένων.....	64
1.3.5.	Δρομολόγηση.....	65
1.3.6.	Διεπαφή με τα Ενσύρματα Δίκτυα	65
1.3.7.	Επιδράσεις στην Υγεία	65
1.4.	<i>Το Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα</i>	66
1.4.1.	Φασματικές Ζώνες και Χαρακτηριστικά Μετάδοσης	67
1.4.2.	Κανονισμοί Κατανομής Φάσματος.....	71
2.	ΠΑΡΟΧΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΠΟΔΟΧΗΣ ΚΛΗΣΕΩΝ.....	75
2.1.	<i>Εισαγωγή</i>	75
2.2.	<i>Θεμελιώδεις Έννοιες του Ελέγχου Αποδοχής Κλήσεων</i>	77
2.2.1.	Ποιότητα Παροχής Υπηρεσιών	77
2.2.2.	Διαχείριση Ραδιοπόρων	80
2.2.3.	Βασικές Αρχές Λειτουργίας του Ελέγχου Αποδοχής Κλήσεων	82
2.2.4.	Κλάσεις Υπηρεσιών.....	83
2.3.	<i>Επισκόπηση των Αλγόριθμων Αποδοχής Κλήσεων</i>	84
2.3.1.	Κριτήρια Αποδοχής.....	85
2.3.2.	Κατηγοριοποίηση των Αλγόριθμων Αποδοχής Κλήσεων	90
3.	ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΑΠΟΔΟΧΗΣ ΚΛΗΣΕΩΝ ΣΕ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ	99
3.1.	<i>Εισαγωγή</i>	99
3.2.	<i>Προδιαγραφές Χωρητικότητας και Χαρακτηριστικά Κίνησης του Δικτύου</i>	100
3.3.	<i>Πλήρης Διαμοιρασμός Πόρων (Complete Sharing)</i>	103
3.3.1.	Αλγόριθμος CS Μοναδικής Κλάσης Υπηρεσιών	103
3.3.1.1.	Ανάλυση Μεμονωμένης Κυψέλης	103
3.3.1.2.	Συνολική Ανάλυση του Δικτύου	109
3.3.2.	Αλγόριθμος CS Πολλαπλών Κλάσεων Υπηρεσιών	111
3.3.2.1.	Ανάλυση Μεμονωμένης Κυψέλης	111
3.3.2.2.	Συνολική Ανάλυση του Δικτύου	115
3.4.	<i>Αλγόριθμοι Δέσμευσης Καναλιών (Reservation Schemes)</i>	117
3.4.1.	Αλγόριθμος Αποδοχής Κλήσεων με Κανάλια Ασφαλείας (Guard Channel Scheme).....	119
3.4.1.1.	Ανάλυση Μεμονωμένης Κυψέλης	119
3.4.1.2.	Συνολική Ανάλυση του Δικτύου	121
3.4.2.	Αλγόριθμος Αποδοχής Κλήσεων με Πολλαπλά Κατώφλια (Multiple Thresholding Scheme) .	123
3.4.2.1.	Ανάλυση Μεμονωμένης Κυψέλης	123

3.4.2.2.	Συνολική Ανάλυση του Δικτύου	125
3.4.3.	Μειονεκτήματα της Χρήσης Κατωφλίων	127
3.5.	Πιθανοτικός Αλγόριθμος Αποδοχής Κλήσεων (<i>Probabilistic CAC Scheme</i>)	129
3.5.1.	Τμηματικός Αλγόριθμος Αποδοχής Περιορισμού Νέων Κλήσεων (<i>Fractional CAC Scheme</i>)..	132
3.5.1.1.	Ανάλυση Μεμονωμένης Κυψέλης	132
3.5.1.2.	Συνολική Ανάλυση του Δικτύου	135
3.5.2.	Πιθανοτικός Αλγόριθμος Αποδοχής Κλήσεων Πολλαπλών Κλάσεων Υπηρεσιών (<i>Thinning CAC Scheme</i>)	139
3.5.2.1.	Ανάλυση Μεμονωμένη Κυψέλης	139
3.5.2.2.	Συνολική Ανάλυση του Δικτύου	143
3.6.	Αριθμητικά Αποτελέσματα της Πιθανότητας μη Αποδοχής Εισερχόμενων Κλήσεων.....	145
3.6.1.	Επίδοση του Πιθανοτικού Αλγόριθμου Αποδοχής Κλήσεων για Δύο Κλάσεις Υπηρεσιών.....	146
3.6.2.	Επίδραση της Πιθανότητας Αποδοχής Εισερχόμενων Κλήσεων Χαμηλής Προτεραιότητας ..	151
3.6.3.	Συνδυασμένη Χρήση Δύο Πιθανοτήτων Αποδοχής Εισερχόμενων Κλήσεων	154
4.	ΔΙΚΑΙΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΠΟΡΩΝ ΜΕΣΩ ΤΟΥ ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΑΠΟΔΟΧΗΣ ΚΛΗΣΕΩΝ	161
4.1.	Εισαγωγή	161
4.2.	Δίκαιη Κατανομή των Πόρων	163
4.3.	Δείκτες Δικαιοσύνης.....	164
4.3.1.	Ιδιότητες των Δεικτών Δικαιοσύνης	165
4.3.2.	Ο Δείκτης Δικαιοσύνης του Jain	166
4.3.1.	Προτεινόμενοι Δείκτες Δικαιοσύνης	169
4.4.	Αξιολόγηση Επίδοσης του Πιθανοτικού Αλγόριθμου Αποδοχής Κλήσεων Βάσει Δεικτών Δικαιοσύνης.....	172
4.5.	Βελτιστοποίηση του Πιθανοτικού Αλγόριθμου Αποδοχής Κλήσεων προς την Επίτευξη Πλήρους Δικαιοσύνης.....	176
4.5.1.	Περιγραφή του Μοντέλου Δικτύου και του Ελέγχου Αποδοχής Κλήσεων	177
4.5.2.	Όφελος των Χρηστών (<i>Users Utility</i>)	180
4.5.3.	Δυναμικός Υπολογισμός της Βέλτιστης Τιμής της Πιθανοτικής Παραμέτρου.....	183
4.5.4.	Αριθμητικά Αποτελέσματα για το Δυναμικό Υπολογισμό της Πιθανοτικής Παραμέτρου.....	185
5.	ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΟΣ ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΑΠΟΔΟΧΗΣ ΚΛΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΠΟΡΩΝ.....	193
5.1.	Εισαγωγή	193
5.2.	Θεωρία Παιγνίων και Μοντέλα Διαπραγματεύσεων.....	196

5.2.1.	Διμερής Διαπραγμάτευση	198
5.2.1.1.	Περιγραφή του Παιγνίου Rubinstein-Ståhl	198
5.2.1.2.	Τέλεια Ισορροπία Υποπαιγνίου (Subgame-Perfect Equilibrium)	199
5.2.1.3.	Διερεύνηση του Συντελεστή Διαπραγμάτευσης.....	203
5.2.1.4.	Ορισμός του Τελεστή Διαπραγμάτευσης (Bargaining Operator).....	203
5.2.2.	Πολυμερής Διαπραγμάτευση	205
5.2.2.1.	Περιγραφή του Παιγνίου	206
5.2.2.2.	Θεώρημα Perron-Frobenius.....	206
5.2.2.3.	Τελεστής Διαπραγμάτευσης Πολλαπλών Παικτών	209
5.3.	Ύπαρξη Τέλειας Ισορροπίας στο Υποπαιγνιο Markov	211
5.3.1.	Διαπραγμάτευση Περρασμένου Χρόνου.....	211
5.3.2.	Διαπραγμάτευση Απεριόριστου Χρόνου	212
5.4.	Παραδείγματα Διαπραγματεύσεων	216
5.4.1.	Παράδειγμα 1 ^ο : Τριμερής Διαπραγμάτευση με Διαφορετικούς Συντελεστές Διαπραγμάτευσης	216
5.4.2.	Παράδειγμα 2 ^ο : Διαπραγμάτευση n-Παικτών με Ίδιους Συντελεστές Διαπραγμάτευσης	217
5.5.	Αναλυτικός Υπολογισμός του Σημείου Τέλειας Ισορροπίας.....	218
5.6.	Εφαρμογή της Θεωρίας Παιγνίων στους Αλγόριθμους Αποδοχής Κλήσεων	221
5.6.1.	Δυναμική Εκχώρηση των Πόρων του Δικτύου	222
5.6.2.	Υπολογισμός των Πιθανοτικών Παραμέτρων.....	223
5.6.2.1.	Μεταξύ Κλήσεων των Ίδιων Κλάσεων Υπηρεσιών	224
5.6.2.2.	Μεταξύ Διαφορετικών Κλάσεων Υπηρεσιών	225
5.6.3.	Περιγραφή του Δυναμικού Αλγόριθμου Αποδοχής Κλήσεων.....	226
5.7.	Αριθμητικά Αποτελέσματα.....	227
5.7.1.	Επίδοση του Παιγνίου Εκχώρησης Πόρων	227
5.7.2.	Επίδοση του Κατανεμημένου Πιθανοτικού Αλγόριθμου Αποδοχής Κλήσεων.....	231
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΛΗΣ ΟΥΡΑΣ ΑΝΑΜΟΝΗΣ.....		235
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΑΠΟΔΕΙΞΗ ΥΠΑΡΞΗΣ ΜΟΝΑΔΙΚΟΥ ΣΗΜΕΙΟΥ ΤΕΛΕΙΑΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ ΥΠΟΠΑΙΓΝΙΟΥ ΓΙΑ ΤΟ ΠΑΙΓΝΙΟ RUBINSTEIN-STÄHL.....		239
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		243
ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ ΕΡΓΟ.....		253

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1-1: Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.....	67
Σχήμα 3-1: Αλυσίδα Markov για το αλγόριθμο αποδοχής κλήσεων CS μοναδικής κλάσης υπηρεσιών με διαχωρισμό νέων και από διαπομπή κλήσεων.....	105
Σχήμα 3-2: Αλυσίδα Markov για το αλγόριθμο αποδοχής κλήσεων GC μοναδικής κλάσης υπηρεσιών με διαχωρισμό των κλήσεων σε νέες και από διαπομπή.....	120
Σχήμα 3-3: Αλυσίδα Markov για το πιθανοτικό αλγόριθμο αποδοχής κλήσεων μοναδικής κλάσης υπηρεσιών με διαχωρισμό νέων κλήσεων και κλήσεων από διαπομπή.....	137
Σχήμα 3-4: Διαγράμματα πιθανότητας μη αποδοχής RT και NRT κλήσεων για μεταβλητό RT φορτίο εισόδου.....	148
Σχήμα 3-5: Διαγράμματα πιθανότητας μη αποδοχής RT και NRT κλήσεων για μεταβλητό NRT φορτίο εισόδου.....	150
Σχήμα 3-6: Πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων NRT και RT υπό μεταβλητό RT φορτίο εισόδου.....	153
Σχήμα 3-7: Διαγράμματα πιθανότητας μη αποδοχής NRT και RT κλήσεων για μεταβλητό εισερχόμενο NRT φορτίο.....	154
Σχήμα 3-8: Πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων των δύο κλάσεων υπηρεσιών ως συνάρτηση του φορτίου εισόδου της πρώτης κλάσης υπηρεσιών όταν μεταβάλλεται η πιθανοτική παράμετρος a_u . Η πρώτη κλάση υπηρεσιών συμβολίζεται με SC1 (Service Class 1) και η δεύτερη με SC2 (Service Class 2).....	158
Σχήμα 3-9: Πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων των δύο κλάσεων υπηρεσιών ως συνάρτηση του εισερχόμενου φορτίου εισόδου της πρώτης κλάσης υπηρεσιών όταν μεταβάλλονται και οι δύο πιθανοτικοί παράμετροι. Η πρώτη κλάση υπηρεσιών συμβολίζεται με SC1 (Service Class 1) και η δεύτερη με SC2 (Service Class 2).....	159
Σχήμα 4-1: Διάγραμμα του δείκτη δικαιοσύνης F συναρτήσει του RT φορτίου εισόδου για τους αλγόριθμους PBRS και NRTL.....	173
Σχήμα 4-2: Διάγραμμα του δείκτη δικαιοσύνης F συναρτήσει του NRT φορτίου εισόδου για τους αλγόριθμους PBRS και NRTL.....	174
Σχήμα 4-3: Επίδοση των αλγόριθμων PBRS και NRTL ως προς το δείκτη δικαιοσύνης AFI για τα τρία σενάρια υπό μεταβλητό φορτίο εισόδου (a) RT και (b) NRT κλήσεων.....	175
Σχήμα 4-4: Όφελος των χρηστών νέων κλήσεων ως συνάρτηση της πιθανότητας μη αποδοχής νέων κλήσεων για μεταβλητές τιμές του συντελεστή αβεβαιότητας.....	187

Σχήμα 4-5: Συνολικό όφελος των χρηστών νέων και από διαπομπή κλήσεων ως συνάρτηση της πιθανοτικής παραμέτρου β	188
Σχήμα 4-6: Βέλτιστη τιμή της πιθανοτικής παραμέτρου β^* ως συνάρτηση του φορτίου εισόδου για διαφορετικά ποσοστά κλήσεων από διαπομπή.....	189
Σχήμα 4-7: Βέλτιστη τιμή της πιθανοτικής παραμέτρου β^* ως συνάρτηση του φορτίου εισόδου για διαφορετικά επίπεδα αποστροφής κινδύνου.....	190
Σχήμα 5-1: Τρόπος λειτουργίας του παιγνίου διαπραγμάτευσης.....	199
Σχήμα 5-2: Διάγραμμα της συνάρτησης ζήτησης συναρτήσει των κατώτερων και ανώτερων ορίων μονάδων χωρητικότητας.....	223
Σχήμα 5-3: Πλήθος μονάδων χωρητικότητας ανά χρήστη βάσει της σειράς εισόδου του χρήστη στο παίγνιο. Η χωρητικότητα της κυψέλης έχει οριστεί ίση με 50 μονάδες χωρητικότητας, δηλαδή $M_j = M = 50$	228
Σχήμα 5-4: Πλήθος μονάδων χωρητικότητας που αντιστοιχούν στον τελευταίο χρήστη ως συνάρτηση του συντελεστή διαπραγμάτευσης δ	230
Σχήμα 5-5: Μέγιστο πλήθος χρηστών που ικανοποιεί την απαίτηση για κατώτερο όριο μονάδων χωρητικότητας και μπορεί να εξυπηρετηθεί, ως συνάρτηση του συντελεστή διαπραγμάτευσης δ	231
Σχήμα 5-6: Διαγράμματα πιθανότητας μη αποδοχής των NRT και RT κλήσεων υπό μεταβλητό RT φορτίο για διάφορες τιμές του συντελεστή διαπραγμάτευσης δ	233
Σχήμα 5-7: Διαγράμματα πιθανότητας μη αποδοχής των NRT και RT κλήσεων υπό μεταβλητό NRT φορτίο για διάφορες τιμές του συντελεστή διαπραγμάτευσης δ	234

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1-1: Τα διάφορα συστήματα κινητών επικοινωνιών πρώτης γενιάς (1G) και οι χώρες όπου εγκαταστάθηκαν.	47
Πίνακας 1-2: Επίπεδα εκπεμπόμενης ισχύος και εκτιμώμενη εμβέλεια για το πρωτόκολλο επικοινωνίας Bluetooth.	57
Πίνακας 1-3: Ύψη δορυφορικών τροχιών.....	60
Πίνακας 1-4: Οι ζώνες φάσματος και οι εφαρμογές τους.....	69
Πίνακας 1-5: Τα διάφορα τμήματα της ζώνης των μικροκυμάτων και οι εφαρμογές τους..	70
Πίνακας 2-1: Κατηγοριοποίηση των αλγόριθμων αποδοχής κλήσεων.....	97
Πίνακας 3-1: Παράμετροι ανάλυσης και ορισμοί.....	107
Πίνακας 3-2: Τιμές των παραμέτρων του δικτύου για δύο κλάσεις υπηρεσιών με δεδομένη πιθανότητα αποδοχής NRT κλήσεων.....	147
Πίνακας 3-3: Τιμές παραμέτρων του δικτύου για δυο κλάσεις υπηρεσιών με μεταβλητή πιθανότητα αποδοχής NRT κλήσεων.....	152
Πίνακας 3-4: Τιμές παραμέτρων της κυψέλης του δικτύου κινητών επικοινωνιών για δυο κλάσεις υπηρεσιών.....	156
Πίνακας 3-5: Οι τιμές των πιθανοτικών παραμέτρων a_u και b_u σε σχέση με τα σημεία αλλαγής της τιμής τους που χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων του διαγράμματος του Σχήματος 3-8.....	157
Πίνακας 3-6: Οι τιμές των πιθανοτικών παραμέτρων a_u και b_u σε σχέση με τα σημεία αλλαγής της τιμής τους που χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων του διαγράμματος του Σχήματος 3-9.....	158
Πίνακας 4-1: Δείκτης δικαιοσύνης του Jain (JFI) για διάφορες γνωστές κατανομές.....	169
Πίνακας 4-2: Τιμές παραμέτρων του δικτύου για δύο κλάσεις υπηρεσιών με δεδομένη πιθανότητα αποδοχής NRT κλήσεων.....	173
Πίνακας 4-3: Ποσοστιαία αναλογία του φορτίου εισόδου για κάθε ροή εισερχόμενης κίνησης των τριών σεναρίων.....	176
Πίνακας 5-1: Μεριδία των παικτών σε κάθε χρονική περίοδο του παιγνίου.....	200
Πίνακας 5-2: Τιμές παραμέτρων του δικτύου για την εφαρμογή του κατανεμημένου πιθανοτικού αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων για δύο κλάσεις υπηρεσιών.....	232
Πίνακας B-1: Παράμετροι μέγιστου και ελάχιστου κέρδους για τους δύο παίκτες του παιγνίου Rubinstein-Stahl	240

ΛΕΞΙΚΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ

3rd Generation Partnership Project	Ομάδα Εργασίας 3GPP
Action Type	Είδος Πληροφορίας
Ad-hoc Networks	Κατά Περίπτωση Δίκτυα
Asynchronous Transfer Mode	Ασύγχρονος Τρόπος Μεταφοράς
Average Fairness Index	Μέσος Δείκτης Δικαιοσύνης
Backward Induction	Προς τα Πίσω Επαγωγή
Bandwidth Reservation	Δέσμευση Χωρητικότητας
Bandwidth Units	Μονάδες Χωρητικότητας
Bargaining Operator	Συντελεστής/Τελεστής Διαπραγμάτευσης
Base Station	Σταθμός Βάσης
Bit Error Ratio	Ποσοστό Λαθών
Bottleneck Resource	Στενότητα Πόρων
Boundedness	Περιορισμένο εύρος τιμών
Broadband Services	Ευρυζωνικές Υπηρεσίες
Broadcasting	Ευρυεκπομπή
Bursty Traffic	Εκρηκτική Κίνηση
Call	Κλήση
Call Admission Control	Αλγόριθμος Αποδοχής Κλήσεων
Call Blocking Probability	Πιθανότητα μη Αποδοχής Κλήσεων
Call Holding Time	Διάρκεια της Κλήσης
Carrier Sense Multiple Access	Πολλαπλή Πρόσβαση με Επαίσθηση Φέρουσας
Cell	Κυψέλη
Cell Residence Time	Χρόνος Παραμονής Εντός Κυψέλης
Cellular	Κυψελοειδές/Κυψελωτό
Cellular Networks	Κυψελοειδή ή Κυψελωτά Δίκτυα
Centralized	Συγκεντρωτικός
Channel Holding Time	Χρόνος Δέσμευσης του Καναλιού
Channels	Κανάλια
Closed Form Expression	Σχέση Κλειστής Μορφής
Co-Channel Interference	Ομοδιαυλική Παρεμβολή

Code Division Multiple Access	Πολλαπλή Πρόσβασης με Διαίρεση Κώδικα
Coefficient	Συντελεστής
Coefficient of Variation	Συντελεστής Μεταβλητότητας
Collaborative	Συνεργατικός
Column Stochastic	Κατά Στήλη Στοχαστικός
Common Pool	Κοινό Σύνολο
Communication Traffic Theory	Θεωρία Κίνησης Επικοινωνιών
Compact	Συμπαγές
Complete Knowledge	Πλήρη Γνώση
Complete Sharing	Πλήρης Διαμοιρασμού
Connection-Oriented	Συνδεοστρεφής
Constant	Σταθερά
Continuity	Συνέχεια
Continuous Time Markov Chain	Αλυσίδα Markov Συνεχούς Χρόνου
Data Throughput Rate	Ρυθμός Διέλευσης Δεδομένων
Digital Subscriber Line	Ψηφιακή Συνδρομητική Γραμμή
Discount Factor	Παράγοντα Υποβάθμισης
Discrete Event Simulator	Πρόγραμμα Προσομοίωσης Διακριτών Καταστάσεων
Discrimination Index	Δείκτης Διάκρισης
Distributed	Κατανεμημένος
e-Banking	Ηλεκτρονικές Τραπεζικές Υπηρεσίες
Eigenvalue	Ιδιοτιμή
e-mail Service	Υπηρεσία Ηλεκτρονικής Αλληλογραφίας
Emergency Call	Κλήση Εκτάκτου Ανάγκης
End-to-End Delay	Από Άκρο σε Άκρο Καθυστέρηση
Equilibrium	Σημείο Ισορροπίας
Error Correction	Διόρθωση Λαθών
Error Detection	Ανίχνευση Λαθών
Exponential	Εκθετικός
Fairness Quotient	Λόγος Δικαιοσύνης
Fiber Optics	Οπτικές Ίνες
File Transfer	Μεταφορά Αρχείων

Finite	Πεπερασμένο
Finite-Horizon Game	Πεπερασμένου Χρόνου Παίγνιο
First Generation Cellular Systems	Πρώτη Γενιά Κυψελωτών Συστημάτων
Fixed Wireless Access	Συστήματα Σταθερής Ασύρματης Πρόσβασης
Flow Control Schemes	Αλγόριθμοι (Σχήματα) Ελέγχου Ροής
Fourth Generation	Τέταρτη Γενιά
Fractional CAC Scheme	Τμηματικός Αλγόριθμος Αποδοχής Περιορισμού Νέων Κλήσεων
Frames	Πλαίσια
Frequency Channels	Κανάλια Συχνοτήτων
Frequency Division Multiple Access	Πολλαπλή Πρόσβαση με Διαίρεση Συχνότητας
Frequency Hopping	Αναπήδηση Συχνότητας
Frequency Modulation	Διαμόρφωση Συχνότητας
Frequency Reuse	Αναχρησιμοποίηση Συχνότητας
Game Theory	Θεωρία Παιγνίων
Gamma Rays	Ακτίνες γ
General Distribution	Γενική Κατανομή
Geosynchronous Earth Orbit	Γεωσύγχρονη Τροχιά
Global	Καθολικός
Grade of Centralization	Βαθμός Συγκέντρωσης
Grade of Optimality	Βαθμός Βέλτιστης Απόδοσης
Guard Channel Scheme	Αλγόριθμος Αποδοχής Κλήσεων με Κανάλια Ασφαλείας
Handover	Διαπομπή
Heuristic Function	Ευριστική Συνάρτηση
Hub	Κεντρικός Σταθμός / Πλήμνη
Ideal Fairness Quotient	Ιδανικός Λόγος Δικαιοσύνης
Idle Mode	Κατάσταση Αργίας
Incoming Rate	Ρυθμός Εισερχόμενης Κίνησης
Incomplete Knowledge	Μερική Γνώση
Infinite	Άπειρο / Μη Πεπερασμένο

Infinite-Horizon Bargaining	Διαπραγμάτευση Απεριόριστου Χρόνου
Infinite-Horizon Game	Παίγνιο μη Πεπερασμένου Χρόνου
Information Availability Level	Βαθμός Διαθεσιμότητας Πληροφορίας
Information Size	Όγκος Πληροφορίας
Infrared	Υπέρυθρη Ακτινοβολία
International Mobile Telecommunications	Διεθνείς Κινητές Επικοινωνίες
International Telecommunications Union	Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών
Internet	Διαδίκτυο
Internet Browsing	Περιήγηση του Παγκόσμιου Ιστού
Internet Protocol	πρωτόκολλο IP
Inter-System	Ενδοσυστημική
Intra-System	Διασυστημική
Invariant Measure	Αναλλοίωτο Μέτρο
Irreducible	Μη Αναγόμενη
Irreducible Stationary Markov Chain	Μη Αναγόμενη, Στάσιμη Αλυσίδα Markov
Isomorphic Games	Ισόμορφα Παίγνια
Jain's Fairness Index	Δείκτης Δικαιοσύνης του Jain
Last Mile Access	Πρόσβαση Τελευταίου Μιλίου
Link under Consideration	Είδος Ζεύξης
Local	Τοπικός
Local Loop	Τοπικός Βρόχος
Local Multipoint Distribution System	Τοπικό Πολυσημειακό Σύστημα Διανομής
Lognormal	Λογαριθμικός
Lognormal Distribution	Λογαριθμοκανονική Κατανομή
Long Range Dependence	Εξάρτηση από το Μήκος της Ουράς της Κατανομής
Long Wavelength	Μακρά Κύματα
Low Earth Orbit	Χαμηλή Τροχιά
Markov Equilibrium	Σημείο Ισορροπίας Markov
Medium Access Control	Έλεγχος Πρόσβασης στο Μέσο
Medium Earth Orbit	Μέση Τροχιά
Metric	Μετρική (Μέτρηση)
Microwaves	Μικροκύματα

Mixed Strategies	Μικτή Στρατηγική
Mobile Communication Network	Δίκτυο Κινητών Επικοινωνιών
Mobile Switching Center	Κέντρο Μεταγωγής Κινητού Τερματικού
Mobile Terminal	Κινητό Τερματικό
Mobility	Κινητικότητα
Modulation	Διαμόρφωση
Multimedia Message Service	Μηνύματα Πολυμεσικού Περιεχομένου
Multipath Propagation	Πολύοδης (Πολυδιαδρομικής) Μετάδοσης
Multiple Thresholding Schemes	αλγόριθμοι πολλαπλών κατωφλίων
Multipoint Multichannel Distribution System	Συστήματα Πολυσημειακής και Πολυκαναλικής Κατανομής
Narrowband Radio Modulation	Διαμόρφωση Στενού Εύρους Ζώνης
Nash Equilibrium	Σημείο Ισοροπίας Nash
ϵ -Nash Equilibrium	Σημείο Ισοροπίας ϵ -Nash
Near-Optimal / Sub-Optimal	Ημι-Βέλτιστος
Network Load	Φόρτος δικτύου
Network Resources	Πόροι Δικτύου
Next Generation Network	Δίκτυα Επόμενης Γενιάς
Non Real Time Limitation Scheme	Αλγόριθμος Περιορισμού Κλήσεων μη Πραγματικού Χρόνου
Non-Real Time Services	Υπηρεσίες μη Πραγματικού Χρόνου
Non-uniform	Μη Ομοιόμορφος
Online Gaming	Δικτυακά Παιχνίδια Πραγματικού Χρόνου
Optimal	Βέλτιστος
Packet Scheduling	Χρονοπρογραμματισμός Πακέτων Δεδομένων
Paging	Τηλεειδοποίηση
Peer-to-Peer	Ομότιμη
Per Call	Ανά Κλήση
Per Cell	Ανά Κυψέλη
Personal Area Network	Προσωπικό Δίκτυο Υπολογιστών
Personal Communication Networks	Δίκτυα Προσωπικών Επικοινωνιών
Personal Telecommunication Number	Προσωπικός (Ατομικός) Αριθμός Κλήσης

Point-to-Multipoint	Σημειο-Πολυσημειακή
Point-to-Point	Δισημειακή
Poisson Distribution	Κατανομή Poisson
Primitive	Πρωταρχικός
Proactive	Προληπτικός
Probabilistic Call Admission Control Scheme	Πιθανοτικός Αλγόριθμος Αποδοχής Κλήσεων
Probabilistic Channel Reservation Scheme	Αλγόριθμος Δέσμευσης Καναλιών Βάσει Πιθανοτήτων
Probability Distribution	Κατανομή Πιθανότητας
Public Switched Telephone Network	Δημόσιο Δίκτυο
QoS Renegotiation Technique	Τεχνική Επαναδιαπραγμάτευσης της Παρεχόμενης Ποιότητας Υπηρεσιών
QoS Restoration Mechanism	Μηχανισμός Αποκατάστασης της Παρεχόμενης Ποιότητας Υπηρεσιών
Quality of Service	Ποιότητα Υπηρεσιών
Radio	Ραδιοκύματα
Radio Resource Management	Διαχείριση των Διαθέσιμων Ραδιοπόρων
Radio Resource Unit	Μονάδα Ραδιοπόρων
Rate Adaptive Service	Υπηρεσία Προσαρμοστικού Ρυθμού
Reactive	Κατασταλτικός
Real Time	Πραγματικού Χρόνου
Real Time Services	Υπηρεσίες Πραγματικού Χρόνου
Reducible	Αναγόμενος
Reservation Schemes	Αλγόριθμοι Δέσμευσης Καναλιών
Rigid Division-Based CAC Scheme	Αλγόριθμος Σταθερής Δέσμευσης Πόρων
Risk Aversion	Αποστρόφη Κινδύνου
Roaming	Περιογωγή
Round Trip Delay	Καθυστέρηση Κυκλικής Διαδρομής
Rubinstein-Stähl Model of Strategic Bargaining	Μοντέλο Διαπραγμάτευσης Rubinstein-Stähl
Scale	Κλίμακα
Second Generation Cellular Systems	Δεύτερη Γενιά Κυψελωτών Συστημάτων

Semi-Local	Ημι-Τοπικός
Service Classes	Κλάσεις Υπηρεσιών
Service Level Agreement	Επίπεδο Παροχής / Συμφωνία Στάθμης Υπηρεσιών
Service Session	Σύνοδος Υπηρεσίας
Service Time	Χρόνος Εξυπηρέτησης
Session Continuity	Συνέχειας της Υπηρεσίας/Συνόδου
Short Message Service	Υπηρεσίες Σύντομων Μηνυμάτων
Signal to Interference Ratio	Λόγος Σήματος προς Παρεμβολή
Signal to Noise and Interference Ratio	Λόγου Σήματος προς Θόρυβο και Παρεμβολή
Signal to Noise Ratio	Σηματοθορυβικός Λόγος
SM-band systems	Συστήματα στη Φασματική Περιοχή ISM
Smooth Process	Ομαλή Διαδικασία
Spatial Distribution of Users	Χωρική Κατανομή των Χρηστών
Spread Spectrum Technique	Τεχνική Φασματικής Εξάπλωσης
Stationary Markov Equilibrium	Στάσιμο Σημείο Ισορροπίας Markov
Steady State Probability	Πιθανότητα Σταθερής Κατάστασης
Steepest Descent Method	Μέθοδος της Πλέον Απότομης Πτώσεως
Subgame-Perfect Equilibrium	Τέλεια Ισορροπία Υποπαιγνίου
Third Generation	Τρίτη Γενιά
Threshold	Κατώφλιο
Throughput	Ρυθμοαπόδοση
Time Division Multiple Access	Πολλαπλή Πρόσβαση με Διαίρεση Χρόνου
Time Slots	Χρονοθυρίδες
Time Window Policy	Πολιτική Χρονικού Παραθύρου
Token-Passing Bus Access	Πρόσβασης Δίαυλου με Σκυτάλη
Traditional Approach	Κλασική Προσέγγιση
Traffic Load Control	Έλεγχος Φορτίου Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης
Traffic Model	Πρότυπο Εισερχόμενης Κίνησης
Traffic Patterns	Πρότυπα Κίνησης
Truncated State Property	Ιδιότητα των Διακριτών Καταστάσεων

Ultraviolet	Υπεριώδης Ακτινοβολία
Uniform	Ομοιόμορφος
Universal Mobile Telecommunication System	Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Επικοινωνιών
US Federal Communications Commission	Εθνική/Ομοσπονδιακή Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών των Ηνωμένων Πολιτειών
Users Utility	Όφελος Χρηστών
Video on Demand	Βίντεο Κατά Απαίτηση
Videoconference	Τηλεδιάσκεψη/Εικονοδιάσκεψη
Visible Light	Ορατή Ακτινοβολία
Voice Services	Φωνητικές Υπηρεσίες
Weakly Pareto Dominant	Ασθενώς Κυρίαρχη Στρατηγική Pareto
Web Browsing	Περιήγηση Διαδικτύου
Wide Area Data Systems	Συστήματα Δεδομένων Ευρείας Περιοχής
Wired Networks	Ενσύρματα Δίκτυα
Wireless ATM	Ασύρματου ATM
Wireless Communication Services	Τηλεπικοινωνιακές Υπηρεσίες
Wireless Communication Systems	Συστήματα Ασύρματων Επικοινωνιών
Wireless Communications	Ασύρματες Επικοινωνίες
Wireless Data Systems	Ασύρματα Δίκτυα Μεταφοράς Δεδομένων
Wireless Local Area Network	Ασύρματο Τοπικό Δίκτυο
Wireless Networks	Ασύρματα Δίκτυα
Wireless Transmission	Ασύρματη Μετάδοση
World Radiocommunication Conference	Παγκόσμια Διάσκεψη Ραδιοεπικοινωνιών
X-Rays	Ακτίνες X

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΝΤΜΗΣΕΩΝ

1G	First Generation Cellular Systems
2G	Second Generation Cellular Systems
3G	Third Generation
3GPP	3rd Generation Partnership Project
4G	Fourth Generation
A/D	Analog to Digital
AFI	Average Fairness Index
AMPS	Advanced Mobile Phone System
ATM	Asynchronous Transfer Mode
BER	Bit Error Ratio
BS	Base Station
BU	Bandwidth Unit
CAC	Call Admission Control
CBP	Call Blocking Probability
CDMA	Code Division Multiple Access
CDPD	Cellular Digital Packet Data
CoV	Coefficient of Variation
CRT	Cell Residence Time
CS	Complete Sharing
CSMA	Carrier Sense Multiple Access
CTMC	Continuous Time Markov Chain
D-AMPS	Digital AMPS
DFWMAC	Distributed Foundation Wireless MAC
DI	Discrimination Index
DSL	Digital Subscriber Line
EFL	Extreme Low Frequency
EHF	Extra High Frequency
ETSI	European Telecommunications Standard Institute
FCC	Federal Communications Commission
FM	Frequency Modulation
FQ	Fairness Quotient

FWA	Fixed Wireless Access
GC Scheme	Guard Channel Scheme
GEO	Geosynchronous Earth Orbit
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Groupe Speciale Mobile
HF	High Frequency
HIPERLAN	High Performance European Radio LAN
HSCSD	High Speed Circuit Switched Data
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IETF	Internet Engineering Task Force
IFQ	Ideal Fairness Quotient
IMTS	Improved Mobile Telephone System
IP	Internet Protocol
IR	Infrared
ISM	Industrial, Scientific and Medical
ITU	International Telecommunications Union
JFI	Jain's Fairness Index
LEO	Low Earth Orbit
LF	Low Frequency
LMDS	Local Multipoint Distribution System
LRD	Long Range Dependence
LW	Long Wave
LW	Long Wavelength
MAC	Medium Access Control
MDC4800	Mobile Data communications 4800
MEO	Medium Earth Orbit
MF	Medium Frequency
MMDS	Multipoint Multichannel Distribution System
MMS	Multimedia Message Service
MSC	Mobile Switching Center
MT	Mobile Terminal
MTS	Mobile Telephone System
MW	Medium Wave

NGN	Next Generation Networks
NMT	Nordic Mobile Telephony
NRT	Non Real Time
NRTL Scheme	Non Real Time Limitation Scheme
PAN	Personal Area Network
PBRs Scheme	Probabilistic Channel Reservation Scheme
PSTN	Public Switched Telephone Network
PTN	Personal Telecommunication Number
PTT	Push To Talk
QoS	Quality of Service
RD-LAP	Radio Data Link Access Protocol
RRM	Radio Resource Management
RRU	Radio Resource Unit
RT	Real Time
SC	Service Class
SHF	Super High Frequency
SIR	Signal to Interference Ratio
SLA	Service Level Agreement
SMS	Short Message Service
SNIR	Signal to Noise and Interference Ratio
SNR	Signal to Noise Ratio
SW	Short Wave
TACS	Total Access Communication System
TDMA	Time Division Multiple Access
UHF	Ultra High Frequency
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
UV	Ultraviolet
VHF	Very High Frequency
VLF	Very Low Frequency
VoIP	Voice over Internet Protocol
WATM	Wireless ATM
WLAN	Wireless Local Area Network
WRC	World Radiocommunication Conference

IMT

International Mobile Telecommunications

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή στα Ασύρματα Δίκτυα

1.1. Εισαγωγή

Το σύγχρονο τηλεπικοινωνιακό περιβάλλον έχει κατά κύριο λόγο διαμορφωθεί υπό την επίδραση δύο σημαντικών παραγόντων. Ο πρώτος σχετίζεται με την ευρεία χρήση της ασύρματης τεχνολογίας για παροχή τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών (Wireless Communication Services) και ο δεύτερος με την παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών (Broadband Services) υψηλής ποιότητας υπηρεσίας (Quality of Service, QoS). Η τεχνολογία της ασύρματης μετάδοσης (Wireless Transmission) αναπτύσσεται για περισσότερο από έναν αιώνα, εντούτοις, η εκτεταμένη χρήση της για παροχή τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών διαδόθηκε μόλις τα τελευταία 15 με 20 χρόνια, δημιουργώντας ένα νέο τομέα για έρευνα και ανάπτυξη, τον τομέα των ασύρματων επικοινωνιών (Wireless Communications). Σήμερα, ο κλάδος αυτός αποτελεί το πλέον ταχέως αναπτυσσόμενο τμήμα της βιομηχανίας των επικοινωνιών. Τα συστήματα ασυρμάτων επικοινωνιών (Wireless Communication Systems), όπως για παράδειγμα τα κυψελοειδή ή κυψελωτά δίκτυα (cellular networks), η ασύρματη (cordless) και η δορυφορική (satellite) τηλεφωνία καθώς και τα ασύρματα τοπικά δίκτυα (Wireless Local Area Networks, WLANs) αποτελούν ένα αναπόσπαστο τμήμα της ανθρώπινης δραστηριότητας. Για να γίνει αντιληπτό το μέγεθος της αναπτυξιακής τάσης που

χαρακτηρίζει την αγορά των ασύρματων επικοινωνιών σε παγκόσμιο επίπεδο αξίζει να αναφερθεί ότι εντός των επόμενων ετών οι χρήστες ασύρματων υπηρεσιών παγκοσμίως αναμένεται να υπερβούν σε πλήθος τους αντίστοιχους χρήστες ενσύρματων υπηρεσιών. Αυτή η τάση αποδίδεται κυρίως στα πλεονεκτήματα που διαθέτουν τα ασύρματα δίκτυα σε σχέση με τα ενσύρματα, καθιστώντας τα πρώτα περισσότερο προσιτά και εύχρηστα. Τα πλεονεκτήματα αυτά εντοπίζονται κυρίως στη δυνατότητα υποστήριξης της κινητικότητας (mobility) των χρηστών, στην ταχεία και εύκολη εγκατάσταση ενός ασύρματου δικτύου καθώς και στο μειωμένο κόστος υποδομής που απαιτείται.

Τα δίκτυα κινητών επικοινωνιών (Mobile Communication Networks) είναι εξ ορισμού ασύρματα δίκτυα. Σε ένα ασύρματο δίκτυο απαιτείται η ικανοποιητική ποιότητα της σύνδεσης μεταξύ του χρήστη με το σταθμό βάσης. Στα δίκτυα κινητών επικοινωνιών, λόγω της ανάγκης για υποστήριξη της κινητικότητας των χρηστών, αυξάνεται σε μεγάλο βαθμό η πολυπλοκότητα που απαιτείται για την ικανοποίηση της απαίτησης αυτής. Είναι όμως εύκολα αντιληπτό ότι η πρόσθετη αυτή δυνατότητα δίνει σαφές πλεονέκτημα στους χρήστες των δικτύων κινητών επικοινωνιών, διότι τους επιτρέπει να μετακινούνται καθώς χρησιμοποιούν τις υπηρεσίες του δικτύου. Το κινητό τερματικό δεν έχει αποκλειστική ζεύξη επικοινωνίας με συγκεκριμένο σταθμό βάσης (Base Station, BS), αλλά του εκχωρείται εκάστοτε ένα προσωρινό κύκλωμα επικοινωνίας με το σταθμό βάσης που καλύπτει την περιοχή όπου βρίσκεται. Συνεπώς, ο αριθμός καταλόγου με τον οποίο καλείται το κινητό τερματικό (Mobile Terminal, MT) δεν προσδιορίζει συγκεκριμένο σταθμό βάσης, όπως συμβαίνει στις σταθερές ασύρματες επικοινωνίες, αλλά το σταθμό βάσης με τον οποίο είναι εκάστοτε συνδεδεμένο το κινητό τερματικό σε αντιστοιχία με τη φυσική θέση του χρήστη. Στην περίπτωση εισερχόμενης κλήσης χρειάζεται πρώτα να εντοπιστεί ο σταθμός βάσης από τον οποίο εξυπηρετείται το κινητό τερματικό και, στη συνέχεια, να προωθηθεί η κλήση μέσω του σταθμού βάσης προς τη συσκευή.

Στα δίκτυα προσωπικών επικοινωνιών (Personal Communication Networks) δεν υφίσταται μονοσήμαντη σχέση του κινητού τερματικού με το χρήστη, γεγονός που τα διαφοροποιεί σε σχέση με τα δίκτυα κινητών επικοινωνιών. Κάθε χρήστης είναι εφοδιασμένος με προσωπικό (ατομικό) αριθμό κλήσης (Personal Telecommunication Number, PTN), τον οποίο μπορεί να εισάγει σε κάθε κινητό ή σταθερό τερματικό και, στη συνέχεια, το σύστημα επικοινωνιών αναλαμβάνει να αντιστοιχίσει τον PTN με τον αποκλειστικό αριθμό του τερματικού. Βάσει αυτής της αντιστοιχίας, το δίκτυο προσωπικών επικοινωνιών προωθεί της εισερχόμενες κλήσεις του χρήστη στο τερματικό με το οποίο

είναι εκάστοτε συνδεδεμένος, προσφέροντας μεγαλύτερο βαθμό ελευθερίας στους χρήστες σε σχέση με τα δίκτυα κινητών επικοινωνιών. Επιπλέον, οι χρήστες ενός δικτύου PCN έχουν τη δυνατότητα να επικοινωνήσουν με οποιονδήποτε άλλο χρήστη ανεξάρτητα από τη φυσική του θέση και το τερματικό που χρησιμοποιεί.

Τα ασύρματα δίκτυα διευκολύνουν την επικοινωνία προσφέροντας αυξημένη λειτουργικότητα. Αυτή αποδίδεται κυρίως στη μεγάλη μείωση του κόστους εγκατάστασης και λειτουργίας καθώς και στην ταχεία εγκατάσταση, αφού δεν απαιτείται σχεδόν καθόλου καλωδίωση. Τα θετικά χαρακτηριστικά που διαθέτουν τα ασύρματα συστήματα επικοινωνιών προσφέρουν τις ακόλουθες δυνατότητες:

- Ανάπτυξη δικτύων επικοινωνιών σε εκτεταμένες γεωγραφικά περιοχές με δυσμενή μορφολογικά χαρακτηριστικά ή/και με μικρή πυκνότητα πληθυσμού. Περιοχές με δυσμενή από τηλεπικοινωνιακή άποψη μορφολογικό ανάγλυφο αποτελούν τα ποτάμια, οι ορεινοί όγκοι ακόμα και οι ανοιχτές θάλασσες. Τα σχετικά προβλήματα αντιμετωπίζονται με την ανάπτυξη κατάλληλων ασύρματων δικτύων στις περιοχές αυτές. Επιπλέον, λόγω του χαμηλού κόστους εγκατάστασής τους, τα ασύρματα δίκτυα, μπορούν με οικονομικό τρόπο να εξυπηρετήσουν περιοχές με αραιή πυκνότητα πληθυσμού και κατ' επέκταση περιοχών όπου το κόστος εγκατάστασης ενσύρματων δικτύων κρίνεται απαγορευτικό.
- Αποφυγή εκτεταμένης καλωδίωσης. Πολλές φορές δεν υπάρχει η δυνατότητα εγκατάστασης καλωδίων συνεπώς η χρήση ασύρματου δικτύου είναι η μόνη λύση. Χαρακτηριστική περίπτωση αποτελούν τα ιστορικά και διατηρητέα κτίρια στο εσωτερικό των οποίων η εγκατάσταση καλωδίων είναι αδύνατη.
- Ανάπτυξη προσωρινών δικτύων επικοινωνιών. Είναι συχνό φαινόμενο να εγκαθίστανται προσωρινά ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών που καλύπτουν τις ανάγκες μιας ομάδας χρηστών για περιορισμένο χρονικό διάστημα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα γραφεία τύπου σε μεγάλες αθλητικές διοργανώσεις.

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν προηγουμένως γίνεται σαφές ότι η εγκατάσταση ασύρματων δικτύων επικοινωνιών, όπως π.χ. τα ασύρματα τοπικά δίκτυα, αποτελεί μια οικονομικά συμφέρουσα επιλογή προσφέροντας αυξημένη ευελιξία στον πάροχο τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών και την απαιτούμενη ποιότητα υπηρεσιών στο χρήστη.

Ταυτόχρονα, το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την εγκατάσταση ενός ασύρματου δικτύου είναι πολύ μικρότερο συγκριτικά με αυτό για ένα ενσύρματο.

Στο εισαγωγικό κεφάλαιο θα γίνει μια σύντομη περιγραφή της εξέλιξης των ασύρματων δικτύων από την εποχή των πρωτοπόρων της ασύρματης τεχνολογίας (Morse και Marconi) μέχρι τη σύγχρονη εποχή της πληθώρας διαφορετικών ασύρματων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων. Στη συνέχεια, θα παρουσιαστούν οι προκλήσεις που προκύπτουν σε τεχνολογικό και επιστημονικό επίπεδο. Το πρώτο κεφάλαιο ολοκληρώνεται με σύντομη περιγραφή των χαρακτηριστικών του φάσματος και των κανονισμών που διέπουν την κατανομή και χρήση του.

1.2. Η Εξέλιξη των Ασύρματων Δικτύων

Η ασύρματη μετάδοση χρονολογείται στις αρχές της ιστορίας του ανθρώπινου είδους. Ως ασύρματη επικοινωνία μπορεί να νοηθεί η χρήση σημάτων καπνού, σημάτων από συστήματα καθρεπτών ή από κινούμενες σημαίες κ.α. Εντούτοις, ως απαρχή των ασύρματων δικτύων, όπως εννοούνται σήμερα, θεωρείται η πρώτη ασύρματη μετάδοση σήματος που πραγματοποιήθηκε το 1895 από το Marconi, λίγο μετά την εφεύρεση της τηλεφωνίας. Στα επόμενα έξι χρόνια επιτεύχθηκε η μετάδοση τηλεπικοινωνιακού σήματος διπλής κατεύθυνσης μεταξύ Ευρώπης και Αμερικής. Στα χρόνια που ακολούθησαν, η έρευνα στην εξέλιξη των ασύρματων επικοινωνιών προχώρησε με εντατικούς ρυθμούς επιτυγχάνοντας το 1915 την πραγματοποίηση της πρώτης ασύρματης επικοινωνίας μεταξύ πλοίων.

1.2.1. Η Πρώιμη Κινητή Τηλεφωνία

Το 1946 παρουσιάστηκε σε 25 πόλεις των Ηνωμένων Πολιτειών το πρώτο σύστημα κινητών επικοινωνιών, γνωστό ως Mobile Telephone System (MTS). Λόγω των τεχνολογικών περιορισμών της εποχής οι πομποδέκτες του MTS ήταν ογκώδεις και μπορούσαν να μεταφερθούν μόνο επί οχημάτων. Για το λόγο αυτό η μοναδική πρακτική χρησιμότητα τους περιορίστηκε στην επικοινωνία μεταξύ κινητών οχημάτων και του σταθμού βάσης. Το MTS υπήρξε ένα αναλογικό σύστημα που υποστήριζε διπλής κατεύθυνσης μετάδοση μέσω κοινού καναλιού και για τις δύο κατευθύνσεις (half-duplex): αυτό σήμαινε ότι ο χρήστης μπορεί κάθε στιγμή να βρίσκεται σε μια από τις δύο καταστάσεις: α) λήψης ή β) εκπομπής σήματος. Για την εναλλαγή μεταξύ των δύο

καταστάσεων, ο χρήστης έπρεπε να πιέσει ένα διακόπτη στο κινητό τερματικό, χαρακτηριστικό για το οποίο ο συγκεκριμένος τρόπος επικοινωνίας πολλές φορές αναφέρεται με την ορολογία Push To Talk (PTT).

Σε κάθε περιοχή που κάλυπτε το σύστημα MTS εγκαθίστατο ένας σταθμός βάσης ο οποίος περιείχε έναν πομποδέκτη υψηλής ισχύος για να εξυπηρετεί κινητά τερματικά που βρίσκονταν σε μεγάλες αποστάσεις. Στις περιπτώσεις όπου κάποια περιοχή δε μπορούσε να εξυπηρετηθεί μόνο από ένα σταθμό βάσης έπρεπε να εγκατασταθεί και δεύτερος σταθμός σε πολύ μεγάλη απόσταση από τον πρώτο για να αποφευχθούν αλληλοπαρεμβολές, αφού η ζώνη συχνοτήτων που χρησιμοποιούσε το σύστημα ήταν κοινή για όλους τους σταθμούς βάσης. Λόγω της μεγάλης απόστασης, η απευθείας ζεύξη του τερματικού με το σταθμό βάσης ήταν αδύνατη. Για το λόγο αυτό υπήρχαν πολλαπλά σημεία λήψης του σήματος εντός της περιοχής κάλυψης που αναμετέδιδαν το σήμα προς το σταθμό βάσης. Η μεταγωγή των κλήσεων προς τους χρήστες ήταν χειροκίνητη από το διαχειριστή του συστήματος που ήταν επιφορτισμένος με την προώθηση των εισερχόμενων κλήσεων προς τους χρήστες.

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, τα μειονεκτήματα του MTS ήταν πολλαπλά σημαντικότερα των οποίων ήταν το μεγάλο μέγεθος των κινητών τερματικών, η χειροκίνητη μεταγωγή των κλήσεων, ο περιορισμένος αριθμός διαθέσιμων καναλιών (συνήθως τρία διαθέσιμα κανάλια ανά σταθμό βάσης) κ.α. Το 1960 παρουσιάστηκε η βελτιωμένη έκδοση του MTS (Improved Mobile Telephone System, IMTS), που χρησιμοποιούσε 23 κανάλια ανά σταθμό βάσης και αυτόματο σύστημα μεταγωγής κλήσεων υποστηρίζοντας ταυτόχρονη επικοινωνία και κατά τις δύο κατευθύνσεις (full-duplex).

1.2.2. Αναλογικά Κυψελωτά Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα

Η αναποτελεσματική χρήση του φάσματος και η μειωμένη χωρητικότητα του συστήματος IMTS σε συνδυασμό με την υψηλή απαιτούμενη ισχύ εκπομπής που προκαλούσε παρεμβολές σε γειτονικά συστήματα οδήγησαν στην αντικατάστασή του από ένα νέο σύστημα κινητών επικοινωνιών. Αυτό αναπτύχθηκε μεταξύ του 1950 και 1960 στα εργαστήρια της AT&T Bell Laboratories και υποστήριζε τη δόμηση του δικτύου με βάση το κυψελωτό πρότυπο, δίνοντας το έναυσμα για επανάσταση στο χώρο των κινητών επικοινωνιών. Για να γίνει αντιληπτό το μέγεθος της ανάπτυξης που ακολούθησε αναφέρεται χαρακτηριστικά ότι ούτε οι επιστήμονες της εποχής δεν μπόρεσαν να προβλέψουν την επερχόμενη ραγδαία εξέλιξη καθώς οι αρχικές εκτιμήσεις τους έκαναν λόγο για 1 εκατομμύριο χρήστες δικτύων κινητής τηλεφωνίας παγκοσμίως στο τέλος του 20^{ου} αιώνα,

ενώ το 2000 οι εγγεγραμμένοι χρήστες μόνο στις Ηνωμένες Πολιτείες υπερέβαιναν τα 100 εκατομμύρια.

Η αυθεντικότητα της ιδέας ανάπτυξης ενός δικτύου κινητών επικοινωνιών με βάση το κυψελωτό πρότυπο αποδίδεται στον D. H. Ring (1947) (1). Το πρότυπο αυτό υποστηρίζει την αντικατάσταση των σταθμών βάσης ευρείας κάλυψης από έναν αριθμό σταθμών βάσης με μικρότερη εμβέλεια. Η περιοχή κάλυψης κάθε νέου σταθμού βάσης ονομάστηκε κυψέλη (cell), από όπου προέκυψε και η ονομασία του προτύπου (cellular). Για την εξυπηρέτηση μιας περιοχής απαιτούνται πολλές κυψέλες, τοποθετημένες γειτονικά χωρίς όμως να επικαλύπτονται. Το διαθέσιμο φάσμα χωρίζεται σε κανάλια και κάθε κυψέλη χρησιμοποιεί διαφορετικό υποσύνολο καναλιών σε σχέση με τη γειτονική της. Το ίδιο υποσύνολο καναλιών χρησιμοποιείται από απομακρυσμένες μεταξύ τους κυψέλες εξασφαλίζοντας την ελαχιστοποίηση των αντίστοιχων αλληλοπαρεμβολών. Η τεχνική αυτή είναι γνωστή ως αναχρησιμοποίηση συχνότητας (frequency reuse) και επιτρέπει την πολλαπλή χρησιμοποίηση του ίδιου καναλιού εντός του δικτύου, αυξάνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο το βαθμό αξιοποίησης του διαθέσιμου φάσματος συχνοτήτων. Κάθε σταθμός βάσης συνδέεται κατά προτίμηση ενσύρματα με το κέντρο μεταγωγής κινητού τερματικού (Mobile Switching Center, MSC) που είναι συνδεδεμένο απευθείας με αντίστοιχα MSC ή με MSC δευτέρου βαθμού. Η κλιμάκωση μεταξύ των MSC – που εκτός των άλλων είναι υπεύθυνα για την κατανομή των καναλιών στους σταθμούς βάσης που ελέγχουν – μπορεί να συνεχιστεί ανάλογα με τον τρόπο οργάνωσης και το μέγεθος του δικτύου.

Η μικρή γεωγραφική κάλυψη που υποστηρίζει κάθε σταθμός βάσης δημιουργεί την ανάγκη για υποστήριξη κινητικότητας μεταξύ των χρηστών χωρίς να υποβαθμιστεί η ποιότητα υπηρεσιών των κλήσεων που βρίσκονται σε εξέλιξη. Το πρόβλημα αυτό επιλύεται μέσω της διαδικασίας διαπομπής (handover) που ήταν αδύνατο να επιτευχθεί την εποχή όπου προτάθηκε για πρώτη φορά η ιδέα του κυψελωτού συστήματος. Στα χρόνια που ακολούθησαν, η τεχνολογική πρόοδος στον τομέα της μικροηλεκτρονικής, της τηλεπικοινωνιακής ηλεκτρονικής ραδιοσυχνοτήτων και των κέντρων μεταγωγής έκανε εφικτή την υποστήριξη διαπομπής με τρόπο αδιαφανή προς το χρήστη.

Η πρώτη γενιά των κυψελωτών συστημάτων (First Generation Cellular Systems, 1G) (2) σχεδιάστηκε στα τέλη του 60, αλλά η υλοποίησή τους έγινε πολύ αργότερα, στις αρχές του 80, λόγω των ρυθμιστικών προβλημάτων που ανέκυψαν. Τα κυψελωτά συστήματα 1G μπορούν να θεωρηθούν απόγονοι των MTS/IMTS καθώς και αυτά υπήρξαν αναλογικά συστήματα. Η πρώτη δοκιμαστική εγκατάσταση ενός πλήρως λειτουργικού συστήματος 1G

έγινε στο Σικάγο των Ηνωμένων Πολιτειών το 1978, ενώ το πρώτο σύστημα για εμπορική εκμετάλλευση, γνωστό ως Advanced Mobile Phone System (AMPS), λειτούργησε στην ίδια χώρα το 1982 υποστηρίζοντας υπηρεσίες φωνής. Παρόμοια συστήματα χρησιμοποιήθηκαν και σε άλλες χώρες (Πίνακας 1-1), καίτοι το AMPS είναι το μόνο που χρησιμοποιείται ευρέως ακόμα και σήμερα. Όλα αυτά τα συστήματα είναι αναλογικά, χρησιμοποιώντας διαμόρφωση συχνότητας (Frequency Modulation, FM) για τη μετάδοση της φωνής και υποστηρίζουν διαπομπή με κριτήριο την ισχύ του σήματος λήψης στο σταθμό βάσης. Κάθε σταθμός βάσης διαχειρίζεται ένα σύνολο καναλιών που του έχουν απονεμηθεί από τον αντίστοιχο MSC, αποδίδοντας ένα κανάλι σε κάθε εισερχόμενη κλήση. Η επικοινωνία εντός του ενσύρματου τμήματος του δικτύου καθώς και μεταξύ του δικτύου με το Δημόσιο Δίκτυο (Public Switched Telephone Network, PSTN) χρησιμοποιεί την τεχνολογία της μεταγωγής πακέτου.

Σύστημα Κινητών Επικοινωνιών	Χώρες
Πρώτης Γενιάς (1G)	
Advanced Mobile Phone System (AMPS)	Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής, Αυστραλία
Total Access Communication System (TACS)	Ηνωμένο Βασίλειο, Ιταλία, Ισπανία, Αυστρία, Ιρλανδία, Ιαπωνία
Nordic Mobile Telephony (NMT)	Ελβετία, Ολλανδία, Ουγγαρία, Πολωνία, Βουλγαρία, Σλοβενία, Σλοβακία, Τσεχία, Σερβία, Τουρκία, Κροατία, Βοσνία, Ρωσία, Χώρες της Βαλτικής

Πίνακας 1-1: Τα διάφορα συστήματα κινητών επικοινωνιών πρώτης γενιάς (1G) και οι χώρες όπου εγκαταστάθηκαν.

1.2.3. Ψηφιακά Κυψελωτά Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα

Τα αναλογικά κυψελωτά συστήματα αποτέλεσαν το πρώτο βήμα για τη βιομηχανία της κινητής τηλεφωνίας. Παρά τη μεγάλη επιτυχία που σημείωσαν, είχαν ένα πλήθος από μειονεκτήματα τα οποία περιόριζαν την επίδοσή τους. Τα μειονεκτήματα αυτά λύθηκαν με την έλευση της δεύτερης γενιάς των κυψελωτών συστημάτων (Second Generation Cellular Systems, 2G) (2), που υποστηρίζουν ψηφιακή αναπαράσταση του σήματος. Η ψηφιοποίηση

του σήματος πραγματοποιείται με χρήση μετατροπέα (Analog to Digital converter, A/D converter), που δέχεται το αναλογικό σήμα και το μετατρέπει σε ακολουθία συμβόλων που διαμορφώνει το φέρον σήμα. Η έξοδος του A/D μετατροπέα είναι το ψηφιακά διαμορφωμένο σήμα. Στο δέκτη επιτελείται η αντίστροφη διαδικασία προς μετατροπή του ψηφιακού σήματος λήψης σε αναλογικό.

Τα πλεονεκτήματα των ψηφιακών συστημάτων έναντι των αναλογικών συνοψίζονται ως εξής:

- Τα αναλογικά συστήματα αντιμετωπίζουν σημαντικά προβλήματα από παρεμβολές των αναλογικών σημάτων μεταξύ τους, με συνέπεια τη μεγάλη διακύμανση στην ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών φωνής. Αντιθέτως, τα ψηφιακά συστήματα υποστηρίζουν τεχνικές ανίχνευσης (error detection) και διόρθωσης λαθών (error correction) με αποτέλεσμα τη σημαντική βελτίωση της ποιότητας του σήματος λήψης (3; 4). Επιπλέον, εφόσον εφαρμόζονται τεχνικές συμπίεσης των ψηφιακών δεδομένων, αυξάνεται σε ακόμα μεγαλύτερο βαθμό η αποδοτική χρήση του διαθέσιμου φάσματος.
- Στα αναλογικά συστήματα αποδίδεται ένα φέρον ανά χρήστη, ανεξάρτητα από το αν ο χρήστης μεταδίδει πληροφορία μέσω του φέροντος αυτού ή όχι. Αντιθέτως, στα ψηφιακά συστήματα, κάθε φέρον εξυπηρετεί πολλούς χρήστες καθώς αυτοί είτε εκπέμπουν σε διαφορετικές χρονοθυρίδες (time slots) είτε χρησιμοποιούν διαφορετικό κώδικα (5; 6). Επιπλέον, οι χρονοθυρίδες ή οι κώδικες διατίθενται στους χρήστες μόνο όταν πρόκειται να μεταδώσουν δεδομένα, διαφορετικά, δε δεσμεύονται πόροι του δικτύου.
- Η ψηφιοποιημένη κίνηση μπορεί εύκολα να κρυπτογραφηθεί ώστε να παρέχει αυξημένα επίπεδα ασφάλειας αποτρέποντας την υποκλοπή πληροφορίας από μη αδειοδοτημένα τερματικά (7; 8). Η δυνατότητα κρυπτογράφησης στα αναλογικά συστήματα είναι αδύνατη με συνέπεια τα αναλογικά σήματα να μεταδίδονται χωρίς προστασία. Απόρροια αυτού είναι η δυνατότητα εύκολης υποκλοπής των συνομιλιών αλλά και των σημάτων ελέγχου του δικτύου. Στην πράξη, αυτό αποτέλεσε ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα των συστημάτων 1G καθώς σε πολλές περιπτώσεις υποκλέπτονται συνομιλίες.

Ένα πλήθος από διαφορετικά συστήματα 2G έχουν αναπτυχθεί παγκοσμίως, τα οποία εκτός από υπηρεσίες φωνής υποστηρίζουν και ένα σύνολο νέων υπηρεσιών, όπως οι υπηρεσίες σύντομων μηνυμάτων (Short Message Service, SMS), εμφάνισης του αριθμού

κλήσης, μεταφοράς δεδομένων κ.α. Τα συστήματα 2G αναβαθμίστηκαν με την πάροδο των χρόνων και την πρόοδο της τεχνολογίας σχηματίζοντας τα συστήματα 2,5G που υποστηρίζουν ταχύτερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων (9).

1.2.3.1. GSM

Για την υποστήριξη συστημάτων 2G στην Ευρώπη απονεμήθηκε αρχικά φάσμα στην περιοχή των 900 MHz και στη συνέχεια στην περιοχή των 1800 MHz. Οι πρώτες ενέργειες στην Ευρώπη ξεκίνησαν το 1982, οπότε και ιδρύθηκε η ομάδα εργασίας με το όνομα Groupe Speciale Mobile (GSM) που αργότερα μετονομάστηκε σε Global System for Mobile Communications, αποσκοπώντας να καθορίσει ένα κοινό πρότυπο για όλη την Ευρώπη. Το αποτέλεσμα ήταν το ομώνυμο με την ομάδα πρότυπο GSM που αποτελεί το πλέον δημοφιλές πρότυπο συστημάτων 2G αφού από το 1999 οι εγγεγραμμένοι χρήστες σε GSM δίκτυα αυξάνονται παγκοσμίως με ρυθμό μεγαλύτερο του ενός εκατομμυρίου ανά εβδομάδα (10). Η μεγάλη διείσδυση στην αγορά που γνωρίζει το σύστημα GSM οφείλεται αφενός στην αυξημένη επίδοση που επιτυγχάνει και αφετέρου στο ότι αποτελεί το αποκλειστικό πρότυπο συστημάτων 2G για ολόκληρη την Ευρώπη. Το γεγονός αυτό απλοποιεί την υποστήριξη υπηρεσιών περιαγωγής (roaming) μεταξύ διαφορετικών χωρών και παρόχων υπηρεσιών.

Το πρώτο εμπορικό σύστημα GSM λειτούργησε το 1982 στη φασματική περιοχή των 900 MHz. Ασφαλώς, υπάρχουν και συστήματα GSM τα οποία λειτουργούν στη ζώνη των 1800 MHz, με την ονομασία DCS 1800, αλλά και στη ζώνη των 1900 MHz, με τα τελευταία να είναι κυρίως διαδεδομένα στην Αμερική.

Ο τρόπος λειτουργίας του συστήματος GSM περιλαμβάνει το διαχωρισμό του διατιθέμενου φάσματος σε κανάλια συχνοτήτων (frequency channels), που οργανώνονται σε πλαίσια (frames). Κάθε πλαίσιο είναι εκ νέου οργανωμένο σε χρονοθυρίδες που χρησιμοποιούνται για να δημιουργηθούν τα κανάλια τα οποία εξυπηρετούν την εισερχόμενη κίνηση από τους χρήστες και τις λειτουργίες ελέγχου του δικτύου. Η εισερχόμενη κίνηση που υποστηρίζει ένα σύστημα GSM προέρχεται είτε από υπηρεσίες φωνής ή χαμηλού ρυθμού δεδομένων (περίπου 14.4 kbps).

1.2.3.2. HSCSD και GPRS

Πρόσθετο πλεονέκτημα των συστημάτων GSM αποτελεί η δυνατότητα που παρέχουν για υποστήριξη μεταγενέστερων τεχνολογιών για υπηρεσίες που απαιτούν υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, όπως χαρακτηριστικά είναι οι υπηρεσίες High Speed Circuit Switched Data (HSCSD) και General Packet Radio Service (GPRS) (11). Η τεχνολογία HSCSD αποτελεί μικρή αναβάθμιση του GSM, αποδίδοντας περισσότερες από μια χρονοσχισμές σε κάθε τερματικό. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να διατεθούν 2, 3 ή 4 χρονοσχισμές για την εξυπηρέτηση των χρηστών επιτυγχάνοντας ρυθμούς μετάδοσης των 28.8, 43.2 και 57.6 kbps αντίστοιχα. Επιπλέον, υποστηρίζει ασύμμετρους ρυθμούς μετάδοσης για τις ζεύξεις downlink και uplink επιτρέποντας με τον τρόπο αυτό την αποδοτικότερη εκμετάλλευση της χωρητικότητας του δικτύου. Μειονέκτημα του συστήματος HSCSD αποτελεί η αυξημένη κατανάλωση ενέργειας καθώς η ταυτόχρονη μετάδοση και λήψη σε πολλαπλές χρονοσχισμές απαιτεί περισσότερη ενέργεια σε σχέση με τα συστήματα GSM όπου γίνεται χρήση μιας μόνο χρονοσχισμής ανά κινητό τερματικό. Εξετάζοντας αυτή τη δυνατότητα από την άλλη όψη, καθώς η λήψη πληροφορίας έχει μικρότερες απαιτήσεις για κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με την εκπομπή προκύπτει ότι τα συστήματα HSCSD είναι αποδοτικά για ασύμμετρες υπηρεσίες, όπως είναι η περιήγηση του παγκόσμιου ιστού, όπου η κίνηση της ζεύξης downlink είναι σαφώς μεγαλύτερη συγκριτικά με τη ζεύξη uplink.

Το σύστημα GPRS έχει τον ίδιο τρόπο λειτουργίας με το HSCSD, αποδίδοντας στους χρήστες περισσότερες χρονοσχισμές ανά πλαίσιο. Η διαφορά μεταξύ των δύο τεχνολογιών έγκειται στο ότι τα συστήματα GSM και HSCSD βασίζονται στη μεταγωγή κυκλώματος, ενώ τα συστήματα GPRS στη μεταγωγή πακέτου. Επομένως, ένα GSM ή HSCSD κινητό τερματικό που κάνει χρήση υπηρεσιών περιήγησης του παγκόσμιου ιστού με ρυθμό μετάδοσης 14.4 kbps δεσμεύει ένα πλήρες κύκλωμα 14.4 kbps από τη διαθέσιμη χωρητικότητα του συστήματος GSM/HSCSD για όλη τη διάρκεια της σύνδεσης. Λαμβάνοντας υπόψη ότι κατά τη διάρκεια της σύνδεσης χρησιμοποιείται η ζεύξη downlink για τη λήψη πληροφορίας της ιστοσελίδας και λιγότερο η ζεύξη uplink για μετάδοση πληροφορίας από το τερματικό στο σταθμό βάσης, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η διαθέσιμη χωρητικότητα του δικτύου χρησιμοποιείται αναποτελεσματικά. Στα συστήματα GPRS, ένας διάυλος χωρητικότητας 14.4 kbps διατίθεται σε περισσότερους από ένα χρήστες, δεδομένου ότι δε θα απαιτήσουν οι χρήστες ταυτόχρονα τη μέγιστη διαθέσιμη ταχύτητα. Κάθε χρήστης είναι συνδεδεμένος με πολύ χαμηλό ρυθμό μετάδοσης στο δίκτυο,

ο οποίος αυξάνεται στην περίπτωση όπου υπάρξει αίτημα από το χρήστη για προβολή μιας ιστοσελίδας. Τα GPRS κινητά τερματικά υποστηρίζουν συμμετρική ή ασύμμετρη κίνηση διαφορετικών ρυθμών μετάδοσης από τα 14.4 έως τα 115.2 kbps.

1.2.3.3. D-AMPS

Σε αντίθεση με την Ευρώπη όπου υιοθετήθηκε το κοινό πρότυπο συστήματος GSM, στις Ηνωμένες Πολιτείες χρησιμοποιήθηκαν περισσότερα από ένα πρότυπα. Τα πρότυπα IS-54 και IS-136, της οικογένειας προτύπων Digital AMPS (D-AMPS), χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά το 1993 και το 1996 αντίστοιχα, με το δεύτερο να αποτελεί επέκταση του πρώτου υποστηρίζοντας πρόσθετες λειτουργίες και χαρακτηριστικά. Το πρότυπο D-AMPS επιτυγχάνει τριπλάσια χωρητικότητα σε σχέση με το AMPS και υποστηρίζει χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων έως και 3 kbps. Η εξέλιξη της τεχνολογίας και η απαίτηση για υποστήριξη κίνησης πακέτων δεδομένων οδήγησε στην πλέον εξελιγμένη έκδοση του D-AMPS, το D-AMPS+, το οποίο προσφέρει ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων από 9.6 έως 19.2 kbps, αρκετά χαμηλότερους από τους αντίστοιχους των GPRS/HSCSD. Επιπλέον, μια ακόμα επέκταση των συστημάτων D-AMPS αποτελεί το πρότυπο Cellular Digital Packet Data (CDPD), το οποίο μπορεί να λειτουργήσει επί των προτύπων D-AMPS και AMPS προσφέροντας τους ίδιους ρυθμούς δεδομένων με το D-AMPS+. Βασικά πλεονεκτήματά του είναι το μειωμένο κόστος συγκριτικά με το D-AMPS+ και το γεγονός ότι το CDPD αποτελεί το μοναδικό τρόπο για τη μετάδοση δεδομένων μέσω των αναλογικών δικτύων τεχνολογίας AMPS.

1.2.3.4. IS-95

Το 1993 προτυποποιήθηκε ένα ακόμα σύστημα 2G γνωστό ως IS-95, ή αλλιώς cdmaOne, το οποίο εγκαταστάθηκε το 1995 κυρίως στη Νότια Κορέα και το Χονγκ-Κονγκ. Αργότερα, το 1996, εγκαταστάθηκε και στις Ηνωμένες Πολιτείες. Το σύστημα IS-95 βασίζεται στη μέθοδο πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση κώδικα (Code Division Multiple Access, CDMA), η οποία υποστηρίζει τη χρήση του ίδιου καναλιού από περισσότερα του ενός κινητά τερματικά υπό την προϋπόθεση ότι κάθε κινητό τερματικό από αυτά που μοιράζονται το ίδιο κανάλι κάνει χρήση διαφορετικού κώδικα. Με τον τρόπο αυτό στα δίκτυα κινητών επικοινωνιών τεχνολογίας CDMA είναι δυνατό γειτονικές κυψέλες να χρησιμοποιούν τα ίδια κανάλια, καθιστώντας με τον τρόπο αυτό το IS-95 το πρώτο σύστημα που διαθέτει αυτή τη δυνατότητα. Ο τρόπος σχεδίασης του IS-95, καθώς και το

γεγονός ότι λειτουργεί στο ίδιο φάσμα συχνοτήτων με το AMPS, επιτρέπουν στο IS-95 να υποστηρίζει κινητά τερματικά που λειτουργούν και με τα δύο συστήματα. Οι ρυθμοί δεδομένων που υποστηρίζει το IS-95 είναι από 4.8 έως 14.4 kbps, ενώ η επέκτασή του γνωστή με το όνομα IS-95b ή αλλιώς cdmaTwo υποστηρίζει ρυθμούς δεδομένων έως και 115.2 kbps, επιτρέποντας στα κινητά τερματικά να χρησιμοποιούν μέχρι και 8 διαφορετικούς κώδικες ταυτόχρονα.

1.2.4. Ασύρματα Συστήματα Μεταφοράς Δεδομένων

Τα κυβελωτά δίκτυα κινητών επικοινωνιών αρχικά ήταν προσανατολισμένα για μετάδοση υπηρεσιών φωνής και για το λόγο αυτό στην αρχική τους γενιά ήταν αναλογικά. Σε αντίθεση με τα κυβελωτά δίκτυα, τα ασύρματα δίκτυα μεταφοράς δεδομένων (Wireless Data Systems) βασίζονται στον ψηφιακό τρόπο μετάδοσης του σήματος. Χαρακτηριστικό των υπηρεσιών δεδομένων είναι η εκρηκτικότητα της κίνησης, δηλαδή σε περίπτωση όπου δεν υπάρχουν δεδομένα προς μετάδοση τα κινητά τερματικά βρίσκονται σε κατάσταση αναμονής, ενώ όταν υπάρξουν τότε το κινητό τερματικό που επιθυμεί να μεταδώσει τα δεδομένα μπορεί να απαιτήσει μεγαλύτερο από το συμφωνημένο ρυθμό μετάδοσης. Το πρώτο ασύρματο δίκτυο μεταφοράς δεδομένων αναπτύχθηκε το 1971 στο πανεπιστήμιο της Χαβάης στα πλαίσια του προγράμματος με την ονομασία ALOHANET. Η βασική ιδέα προέβλεπε τη δημιουργία ενός ασύρματου δικτύου διπλής κατεύθυνσης για τη μεταφορά δεδομένων χωρίς να χρησιμοποιούνται τηλεφωνικά καλώδια, που θα εξυπηρετούσε τέσσερα διαφορετικά νησιά, με τον κεντρικό σταθμό στο νησί Oahu. Συνεπώς, υλοποιήθηκε μια αρχιτεκτονική αστέρα, με τον κεντρικό υπολογιστή να έχει το ρόλο του κεντρικού σταθμού (hub). Οποιαδήποτε επικοινωνία μεταξύ δύο υπολογιστών του δικτύου πραγματοποιείται μέσω του κεντρικού σταθμού, έχοντας ως μειονέκτημα τη μειωμένη αποδοτικότητα ως προς τη συνολική καθυστέρηση μετάδοσης της πληροφορίας από άκρο σε άκρο (end-to-end delay) που επιτυγχάνεται η οποία αντισταθμίζεται μερικώς από την απλή δομή του δικτύου. Στο ALOHANET δεν υπάρχει πρόβλεψη για υποστήριξη κινητικότητας, σε αντίθεση με τα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα δεδομένων όπου η κινητικότητα του χρήστη είναι μια από τις σημαντικότερες προδιαγραφές που πρέπει να πληρούνται.

1.2.4.1. Συστήματα Δικτύων Ευρείας Περιοχής

Τα ασύρματα συστήματα δεδομένων ευρείας περιοχής (Wide Area Data Systems) υποστηρίζουν χαμηλή ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων, μέσω της οποίας παρέχονται υπηρεσίες μηνυμάτων, ηλεκτρονικού ταχυδρομείου και τηλεειδοποίησης (paging) (12). Μερικά από τα σημαντικότερα ασύρματα συστήματα δεδομένων ευρείας περιοχής είναι τα ακόλουθα:

- Συστήματα τηλεειδοποίησης. Πρόκειται για κυψελωτά συστήματα απλής κατεύθυνσης επικοινωνίας τα οποία υποστηρίζουν πολύ χαμηλούς ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων. Τα πρώτα συστήματα τηλεειδοποίησης μετέδιδαν μόνο ένα bit πληροφορίας με σκοπό την ενημέρωση του χρήστη για το γεγονός ότι κάποιος θέλει να επικοινωνήσει μαζί του. Οι επόμενες γενιές των συστημάτων αυτών υποστηρίζουν πλέον εξελιγμένες υπηρεσίες, όπως τη μεταφορά απλών μηνυμάτων στον τελικό χρήστη ή και ενός αριθμού επικοινωνίας με τον καλούντα. Ο τρόπος λειτουργίας τους βασίζεται στην ευρυεκπομπή (broadcasting) του μηνύματος τηλεειδοποίησης από τους σταθμούς βάσης, οπότε δεν προκύπτει ανάγκη για γνώση της θέσης του χρήστη ούτε για εξελιγμένα πρωτόκολλα δρομολόγησης της κίνησης. Τα υψηλά επίπεδα ισχύος εκπομπής έχουν ως αποτέλεσμα τη δυνατότητα για απλούστευση του υλισμικού και του λογισμικού των τερματικών συσκευών, οι οποίες είναι πολύ μικρές σε μέγεθος. Στις Ηνωμένες Πολιτείες εμφανίστηκαν συστήματα τηλεειδοποίησης διπλής κατεύθυνσης επικοινωνίας, με τις ανάλογες συσκευές να είναι αρκετά μεγαλύτερες, βαρύτερες, ακριβότερες και περισσότερο απαιτητικές από πλευράς κατανάλωσης ενέργειας σε σχέση με τις αντίστοιχες της απλής κατεύθυνσης επικοινωνίας. Η ελκυστικότητα των συστημάτων αυτών μειώνεται διαρκώς καθώς είναι ανταγωνιστικά με τα κυψελωτά συστήματα κινητών επικοινωνιών τα οποία προσφέρουν σαφώς περισσότερες ολοκληρωμένες υπηρεσίες.
- Mobitex. Πρόκειται για ένα σύστημα μεταγωγής πακέτου το οποίο αναπτύχθηκε από την Ericsson για υπηρεσίες τηλεμετρίας, το οποίο υποστηρίζει ρυθμούς δεδομένων της τάξης των 8 kbps. Το σύστημα αυτό έχει τη δυνατότητα να καλύπτει ευρείες περιοχές μέσω σταθμών βάσης που πρέπει να εγκαθίστανται σε σημεία με μεγάλο υψόμετρο σχετικά με την περιοχή που εξυπηρετούν. Η πρόσβαση στο μέσο γίνεται βάσει πρωτοκόλλου παρόμοιου

με το ALOHA. Το 1998 εγκαταστάθηκαν στις Ηνωμένες Πολιτείες μερικά συστήματα Mobitex παρέχοντας υπηρεσίες Internet χαμηλού ρυθμού μετάδοσης.

- Ardis. Πρόκειται για ένα σύστημα μεταγωγής πακέτου παρόμοιο με το Mobitex. Το Ardis, γνωστό και ως DataTAC, αναπτύχθηκε από τις εταιρίες IBM και Motorola και εμφανίστηκε σε δύο εκδόσεις: α) την MDC4800 (Mobile Data communications 4800) με ρυθμό δεδομένων 4.8 kbps και β) την RD-LAP (Radio Data Link Access Protocol) με ρυθμό δεδομένων 192 kbps, που είναι συμβατή με την MDC4800. Η τεχνική κάλυψη των περιοχών είναι παρόμοια με αυτή του Mobitex, χρησιμοποιώντας λίγους σταθμούς βάσης, τοποθετημένων σε σχετικά μεγάλο ύψος. Επίσης, το πρωτόκολλο του Ardis για την πρόσβαση στο μέσο είναι παρόμοιο με το ALOHA.

1.2.4.2. Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα

Τα ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLANs) χρησιμοποιούνται για να παρέχουν γρήγορη μεταφορά δεδομένων σε εντοπισμένες χωρικά περιοχές, όπως για παράδειγμα ένα κτίριο ή ένα εκπαιδευτικό ίδρυμα (2; 13; 14). Η ανάπτυξη των ασύρματων τοπικών δικτύων ξεκίνησε στα μέσα του '80, όταν η εθνική επιτροπή τηλεπικοινωνιών των Ηνωμένων Πολιτειών (US Federal Communications Commission, FCC) αποφάσισε να αποδεσμεύσει ένα μέρος του φάσματος για βιομηχανική, επιστημονική και ιατρική χρήση. Αυτή η φασματική περιοχή είναι γνωστή με την ονομασία ISM (Industrial, Scientific and Medical band). Στα πρώτα χρόνια που ακολούθησαν την απελευθέρωση της ζώνης ISM εμφανίστηκαν στην αγορά πολλά προϊόντα τα οποία ήταν ασύμβατα μεταξύ τους διαχωρίζοντας την αγορά των προϊόντων αυτών σε πολλά επιμέρους τμήματα. Η έλλειψη ενός κοινού προτύπου ήταν εμφανής. Για το λόγο αυτό στα τέλη του '80 συγκροτήθηκε από την IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) η ομάδα εργασίας με την ονομασία 802.4 για την ανάπτυξη μιας μεθόδου πρόσβασης δίαυλου με σκυτάλη (token-passing bus access). Η ομάδα εργασίας κατέληξε ότι η μέθοδος αυτή είναι ακατάλληλη για τον έλεγχο του ασύρματου μέσου και πρότεινε τη δημιουργία ενός εναλλακτικού προτύπου. Στη συνέχεια, η εκτελεστική επιτροπή του προγράμματος IEEE 802 αποφάσισε τη συγκρότηση της ομάδας εργασίας με την ονομασία IEEE 802.11, η οποία υπήρξε υπεύθυνη για τον καθορισμό των προτύπων του φυσικού υποστρώματος και του ελέγχου πρόσβασης στο μέσο (Medium Access Control, MAC) των ασύρματων τοπικών δικτύων. Το πρώτο

πρότυπο που προέκυψε από αυτή την ομάδα εργασίας υποστήριζε ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων μέχρι 2 Mbps χρησιμοποιώντας είτε την τεχνική της φασματικής εξάπλωσης (spread spectrum technique) είτε μετάδοση με υπέρυθη ακτινοβολία. Το Σεπτέμβριο του 1999 εγκρίθηκαν από το τμήμα προτύπων της IEEE δύο ακόμα πρότυπα συμπληρωματικά προς τα αρχικά. Το πρώτο είναι γνωστό ως 802.11b και επεκτείνει τις δυνατότητες του υπάρχοντος προτύπου, λειτουργεί στη ζώνη συχνοτήτων των 2.4 GHz και επιτυγχάνει ρυθμό μετάδοσης μέχρι και 11 Mbps. Το δεύτερο πρότυπο, γνωστό και ως IEEE 802.11a, λειτουργεί στη ζώνη συχνοτήτων των 5 GHz της περιοχής του ISM φάσματος και επιτυγχάνει ρυθμό μετάδοσης από 20 έως 54 Mbps. Όλα αυτά τα πρότυπα χρησιμοποιούν το ίδιο MAC πρωτόκολλο γνωστό ως DFWMAC (Distributed Foundation Wireless MAC), το οποίο ανήκει στην κατηγορία των πρωτοκόλλων πολλαπλής πρόσβασης με επαίσθηση φέρουσας (Carrier Sense Multiple Access, CSMA) και είναι κατάλληλα προσαρμοσμένο για ασύρματα μέσα. Το πρωτόκολλο IEEE 802.11 αναφέρεται πολλές φορές και ως ασύρματο Ethernet και μπορεί να λειτουργεί σε δύο διαφορετικές καταστάσεις: α) την κεντροποιημένη διάρθρωση και β) την τοπική διασύνδεση χρηστών μεταξύ τους προς σχηματισμό κατά περίπτωση δικτύων (ad-hoc networks). Τα ad-hoc ασύρματα δίκτυα υποστηρίζουν ομότιμη επικοινωνία (peer-to-peer) μεταξύ των χρηστών και δημιουργούνται για την ικανοποίηση εκτάκτων αναγκών για επικοινωνία. Στην περίπτωση αυτή δεν απαιτείται ύπαρξη υποδομής και οι λειτουργίες ελέγχου του δικτύου είναι καταναμημένες σε όλη την έκτασή του. Στην κεντροποιημένη διάρθρωση, η κεντρική υποδομή του ασύρματου δικτύου χρησιμοποιεί ασύρματο ή ενσύρματο τρόπο μετάδοσης μεγάλης χωρητικότητας για τη διασύνδεσή τους με το κεντρικό δίκτυο. Στην περίπτωση αυτή το κινητό τερματικό έχει πρόσβαση στο ασύρματο μέσο ύστερα από συνεννόηση με το σταθμό βάσης, ο οποίος στη συνέχεια μπορεί να μεταβιβάσει την πληροφορία στο δίκτυο κορμού.

Εκτός από το πρότυπο IEEE 802.11, ένα ακόμα πρότυπο αναπτύχθηκε στην Ευρώπη από τον οργανισμό ETSI (European Telecommunications Standard Institute) από την ομάδα εργασίας RES10. Το πρότυπο αυτό ονομάστηκε HIPERLAN (High Performance European Radio LAN) και αναφέρεται στα δύο χαμηλότερα στρώματα, φυσικό και MAC, προσφέροντας ταχύτητες μετάδοσης μεταξύ των 2 και 25 Mbps. Η πρώτη έκδοση του πρωτοκόλλου, το HIPERLAN 1, λειτουργεί στη ζώνη των 5.2 GHz χρησιμοποιώντας διαμόρφωση στενού εύρους ζώνης (narrowband radio modulation). Το πρωτόκολλο για την πρόσβαση στο μέσο ανήκει και στην περίπτωση του HIPERLAN 1 στην κατηγορία των CSMA πρωτοκόλλων. Αν και προσφέρει μεγαλύτερο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων από το

IEEE 802.11, το HIPERLAN 1 είναι λιγότερο ελκυστικό από αυτό λόγω κυρίως των μεγαλύτερων σταθμών βάσης που απαιτεί. Η χρήση του είναι παρόμοια με αυτή του IEEE 802.11 καθώς μπορεί να λειτουργεί είτε σε δίκτυα με κεντροποιημένη διάρθρωση είτε σε ad-hoc δίκτυα. Η δεύτερη έκδοση του πρωτοκόλλου, HIPERLAN 2, λειτουργεί στη ζώνη των 5 GHz και επιτυγχάνει ρυθμούς δεδομένων μέχρι 54 Mbps (15). Το πρωτόκολλο για την πρόσβαση στο μέσο είναι διαφορετικό από αυτό της πρώτης έκδοσης του πρωτοκόλλου καθώς βασίζεται στην τεχνική της πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση χρόνου (Time Division Multiple Access, TDMA) (16). Το HIPERLAN 2 χρησιμοποιείται συνήθως ως δίκτυο κορμού στα ψηφιακά κυψελωτά συστήματα επικοινωνιών.

1.2.4.3. Ασύρματα Δίκτυα Ασύγχρονου Τρόπου Μεταφοράς

Το 1991 συγκροτήθηκε ένα φόρουμ (ATM Forum) για τη μελέτη και πρόταση τρόπων ενσωμάτωσης της τεχνολογίας του ασύγχρονου τρόπου μεταφοράς (Asynchronous Transfer Mode, ATM) στα ασύρματα τηλεπικοινωνιακά συστήματα. Μια ομάδα εργασίας του φόρουμ, που δημιουργήθηκε το 1996, ξεκίνησε να ασχολείται με την τεχνολογία του ασύρματου ATM (Wireless ATM, WATM), το οποίο συνδυάζει τα πλεονεκτήματα της κινητικότητας που υποστηρίζουν τα ασύρματα δίκτυα με τους ευέλικτους τρόπους κατανομής των πόρων και την ποιότητα υπηρεσίας των κλασσικών δικτύων ATM. Οι ιδιότητες των δικτύων ATM, οι οποίες είναι απαραίτητες για την ασύρματη παροχή πολυμεσικών υπηρεσιών, δεν είναι διαθέσιμες από τα κλασσικά τοπικά δίκτυα καθώς τα τελευταία δεν έχουν τη δυνατότητα για ασύγχρονο τρόπο μεταφοράς δεδομένων.

Με την πρόοδο της τεχνολογίας προτάθηκαν διάφορα πρότυπα δικτύων WATM. Η σημαντικότερη προσπάθεια για τη δημιουργία ενός προτύπου τοπικού δικτύου που συνδυάζει τις δυνατότητες των WATM δικτύων είναι το HIPERLAN 2. Πρόκειται για ένα πρότυπο συμβατό με την τεχνολογία ATM και χρησιμοποιεί πακέτα δεδομένων σταθερού μήκους. Όπως περιγράφηκε προηγουμένως, το HIPERLAN 2 επιτυγχάνει ταχύτητες μέχρι 54 Mbps στο φυσικό στρώμα και είναι δυνατό να υποστηρίξει την απαιτούμενη ποιότητα υπηρεσιών προς το χρήστη λόγω της συνδεοστρεφούς (connection-oriented) φύσης του.

1.2.4.4. Ασύρματα Δίκτυα Μικρής Εμβέλειας

Τα ασύρματα δίκτυα μικρής εμβέλειας, γνωστά και ως προσωπικά δίκτυα υπολογιστών (Personal Area Networks, PANs), έχουν μικρότερη εμβέλεια από τα τοπικά

ασύρματα δίκτυα προσφέροντας υπηρεσίες όπου απαιτείται πολύ μικρή απόσταση επικοινωνίας (της τάξης μερικών μέτρων). Η πρώτη προσπάθεια για τη δημιουργία ενός προτύπου για δίκτυα PAN έγινε από την Ericsson το 1994. Το πρότυπο αυτό ονομάστηκε Bluetooth¹ και σκοπός του ήταν η επίτευξη επικοινωνίας μεταξύ του κινητού τηλεφώνου και των διαφόρων περιφερειακών βοηθητικών συσκευών που το συνοδεύουν (17). Το Bluetooth είναι πλέον ένα ανοικτό πρωτόκολλο διαθέσιμο σε κάθε εταιρεία που θέλει να το χρησιμοποιήσει. Πλέον, έχει υιοθετηθεί σχεδόν από όλες τις εταιρείες τηλεπικοινωνιών παγκοσμίως και πολλά προϊόντα της αγοράς το υποστηρίζουν. Λειτουργεί στη ζώνη συχνοτήτων μεταξύ των 2.4 και 2.485 GHz, η οποία ανήκει στη μη αδειοδοτημένη φασματική περιοχή ISM, κάνοντας χρήση της τεχνικής διαμόρφωσης φασματικής εξάπλωσης (spread spectrum technique modulation) με αναπήδηση συχνότητας (frequency hopping) ονομαστικού ρυθμού 1600hops/sec (18). Υποστηρίζει κανάλια φωνής χωρητικότητας 64kbps διπλής κατεύθυνσης επικοινωνίας και κανάλια δεδομένων ασύγχρονου τρόπου μεταφοράς σε ρυθμούς που φθάνουν μέχρι και τα 721 kbps. Η εμβέλεια επικοινωνίας του πρωτοκόλλου είναι από 10 έως 100 m ανάλογα με την κλάση στην οποία ανήκει το κινητό τερματικό (Πίνακας 1-2).

Κλάση κινητού τερματικού	Μέγιστη επιτρεπτή ισχύς εκπομπής		Εκτιμώμενη εμβέλεια (m)
	mW	dBm	
Κλάση #1	100	20	100
Κλάση #2	2,5	4	22
Κλάση #3	1	0	6

Πίνακας 1-2: Επίπεδα εκπεμπόμενης ισχύος και εκτιμώμενη εμβέλεια για το πρωτόκολλο επικοινωνίας Bluetooth.

Ένα ακόμα πρότυπο για δίκτυα PAN είναι το HomeRF, για το οποίο συγκροτήθηκε ομάδα εργασίας το 1998 από μεγάλες εταιρείες τηλεπικοινωνιών (Motorola, Siemens, Philips). Το HomeRF λειτουργεί στη ζώνη των 2.4 GHz, έχει εμβέλεια 50 m και

¹ Το όνομα Bluetooth αποδίδεται στο βασιλιά της Δανίας και της Νορβηγίας Harald I, ο οποίος τον 10^ο αιώνα προσπάθησε να ενώσει τις διάφορες φυλές της Δανίας μεταξύ τους, δημιουργώντας ένα ενωμένο βασίλειο.

επιτυγχάνει ταχύτητες μέχρι 10 Mbps (19). Το 2003 η ομάδα εργασίας διαλύθηκε καθώς το Bluetooth, το οποίο είναι ανταγωνιστικό προς το HomeRF, είχε σαφώς υπερισχύσει στην αγορά των επικοινωνιών.

Το 1999 ο οργανισμός IEEE αποφάσισε τη σύσταση ομάδας εργασίας με την ονομασία 802.15 για την ανάπτυξη ενός προτύπου για δίκτυα PAN (20). Αρχικά, ο στόχος της ήταν η επίτευξη διαλειτουργικότητας μεταξύ των προτύπων Bluetooth και HomeRF (21). Μετά την υπερίσχυση του προτύπου Bluetooth, πολλές από τις συστάσεις των αρχικών εκδόσεων του υιοθετήθηκαν από την ομάδα εργασίας 802.15. Οι υπάρχουσες εκδόσεις του πρωτοκόλλου IEEE 802.15 υποστηρίζουν ταχύτητες δεδομένων από 11 μέχρι 55 Mbps.

1.2.5. Σταθερή Ασύρματη Πρόσβαση

Σε αντίθεση με τα συστήματα κινητών επικοινωνιών, τα συστήματα σταθερής ασύρματης πρόσβασης (Fixed Wireless Access, FWA) δε διαθέτουν τη δυνατότητα υποστήριξης της κινητικότητας των χρηστών. Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο για την παροχή σύνδεσης υψηλού ρυθμού μετάδοσης σε επίπεδο τοπικού βρόχου (local loop), γνωστού και ως πρόσβαση τελευταίου μιλίου (last mile access). Οι κύριοι ανταγωνιστές των δικτύων αυτών είναι οι τεχνολογίες των οπτικών ινών (fiber optics) και των ψηφιακών συνδρομητικών γραμμών (Digital Subscriber Line, DSL).

Τα συστήματα σταθερής ασύρματης πρόσβασης υποστηρίζουν είτε δισημειακή (point-to-point) είτε σημείο-πολυσημειακή (point-to-multipoint) σύνδεση. Στην πρώτη περίπτωση ο πάροχος υπηρεσιών χρησιμοποιεί πομποδέκτη με ξεχωριστή κεραία ανά χρήστη, ενώ στη δεύτερη περίπτωση ένας πομποδέκτης με μια κεραία χρησιμοποιείται για πολλούς χρήστες. Η δεύτερη περίπτωση είναι η πλέον ελκυστική από τους παρόχους υπηρεσιών σταθερής ασύρματης πρόσβασης καθώς εξυπηρετούνται ταυτόχρονα πολλοί χρήστες με μια κεραία. Οι κεραίες αυτές είναι κατάλληλα τοποθετημένες έτσι ώστε να προσφέρουν κάλυψη σε μια περιοχή σχηματίζοντας κυψελωτή αρχιτεκτονική. Οι διαφορές τους από τα κλασικά κυψελωτά συστήματα είναι ότι δεν υπάρχει επικάλυψη μεταξύ των κυψελών, υπάρχει αναχρησιμοποίηση όλου του διαθέσιμου φάσματος σε κάθε κυψέλη και δεν υποστηρίζεται κινητικότητα των χρηστών καθώς οι χρήστες θεωρούνται ακίνητοι. Η τεχνολογία της σταθερής ασύρματης πρόσβασης χρησιμοποιείται κυρίως για την παροχή υπηρεσιών διαδικτύου (Internet) στους χρήστες. Τα κυριότερα συστήματα αυτής της κατηγορίας των δικτύων είναι τα ακόλουθα:

- Συστήματα που λειτουργούν στη φασματική περιοχή ISM (ISM-band systems). Τα συστήματα αυτά λειτουργούν στη συχνότητα των 2.4 GHz της ζώνης ISM και για τη διαμόρφωση του σήματος χρησιμοποιείται η τεχνική της φασματικής εξάπλωσης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το πρότυπο IEEE 802.11b, συστήματα του οποίου λειτουργούν σε κυψελωτή δομή παρέχοντας χωρητικότητα 11 Mbps ανά κυψέλη. Όταν το σύστημα λειτουργεί με σημείο-πολυσημειακή διάρθρωση, η χωρητικότητα της κυψέλης μοιράζεται μεταξύ των χρηστών που βρίσκονται εντός της ίδιας κυψέλης. Η ακτίνα των κυψελών είναι περίπου 8 km.
- Συστήματα πολυσημειακής και πολυκαναλικής κατανομής (Multipoint Multichannel Distribution System, MMDS). Τα συστήματα MMDS χρησιμοποιούν τη φασματική ζώνη μεταξύ των συχνοτήτων 2.1 και 2.7 GHz, η οποία χρησιμοποιείται διεθνώς για μετάδοση αναλογικού τηλεοπτικού σήματος. Η δομή τους είναι κυψελωτή και η ακτίνα κάθε κυψέλης φτάνει τα 45 km. Η μεγάλη τιμή της ακτίνας της κυψέλης είναι εφικτή αν ληφθεί υπόψη ότι: α) η εκπομπή γίνεται σε αδειοδοτημένη περιοχή του φάσματος, με συνέπεια να μην προκαλούνται παρεμβολές και β) είναι επιτρεπτή η εκπομπή σήματος σε υψηλά επίπεδα ισχύος. Η μέγιστη χωρητικότητα της κυψέλης του συστήματος MMDS είναι 36 Mbps. Επιπλέον, το σύστημα υποστηρίζει ασύμμετρη χωρητικότητα για τις ζεύξεις uplink και downlink με τις μέγιστες τιμές να είναι 256 kbps και 5 Mbps, αντίστοιχα.
- Τοπικό πολυσημειακό σύστημα διανομής (Local Multipoint Distribution System, LMDS). Τα συστήματα LMDS λειτουργούν σε υψηλές συχνότητες (στην περιοχή των 30 GHz) με αποτέλεσμα οι κυψέλες των συστημάτων αυτών να είναι μικρότερης εμβέλειας. Η ακτίνα των κυψελών των συστημάτων LMDS κυμαίνεται από 1 μέχρι 2 km ενώ η μέγιστη χωρητικότητά τους είναι 155 Mbps.

1.2.6. Δορυφορικά Συστήματα Επικοινωνιών

Η εποχή των δορυφορικών επικοινωνιών ξεκίνησε το 1957 με την εκτόξευση του δορυφόρου Sputnik από τη Σοβιετική Ένωση, οι τηλεπικοινωνιακές δυνατότητες του οποίου ήταν πολύ περιορισμένες. Ο πρώτος αμιγώς τηλεπικοινωνιακός δορυφόρος εκτοξεύτηκε το 1962 από τη NASA με την ονομασία AT&T Telestar 1. Το 1963

ακολούθησε μια εξελιγμένη έκδοσή του ο δορυφόρος Telestar 2. Από εκείνη την εποχή μέχρι σήμερα η τεχνολογία των δορυφορικών επικοινωνιών γνωρίζει μεγάλη πρόοδο. Τα αντίστοιχα δορυφορικά συστήματα έχουν αναπτυχθεί σε τέτοιο βαθμό ώστε να είναι εφικτή η παροχή πληθώρας υπηρεσιών όπως, για παράδειγμα, υπηρεσίες δεδομένων, φωνής, ευρυεκπομπής τηλεοπτικού σήματος, παροχής υπηρεσιών διαδικτύου και υπηρεσιών σε κινητά τερματικά (22).

Οι τροχιές των δορυφόρων ταξινομούνται σε τρεις διαφορετικές κατηγορίες, οι οποίες κατά αύξουσα σειρά υψόμετρου είναι οι ακόλουθες: α) χαμηλής τροχιάς (Low Earth Orbit, LEO) β) μέσης τροχιάς (Medium Earth Orbit, MEO) γ) γεωσύγχρονης τροχιάς (Geosynchronous Earth Orbit, GEO). Οι αποστάσεις των δορυφόρων από τη Γη για κάθε μια από τις τρεις κατηγορίες τροχιών αναγράφονται στον Πίνακα 1-3. Επίσης, υπάρχει και μια ειδική κατηγορία δορυφόρων οι οποίοι κινούνται σε ελλειπτικές τροχιές γύρω από τη Γη και συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα της μικρής καθυστέρησης που επιτυγχάνουν τα δορυφορικά συστήματα των LEO τροχιών με τη σταθερότητα των δορυφορικών συστημάτων GEO.

Κατηγορία δορυφορικής τροχιάς	Απόσταση δορυφόρου από τη Γη (km)	
	Ελάχιστη-Μέγιστη	Σύνηθες Εύρος
LEO	100-1000	850-950
MEO	1.000-35.786	20.200-20.650
GEO	35.786	35.786

Πίνακας 1-3: Ύψη δορυφορικών τροχιών.

Τα τελευταία χρόνια έχουν επικρατήσει τα δορυφορικά συστήματα που λειτουργούν στη LEO τροχιά. Αυτό οφείλεται στα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν συγκριτικά με τις υπόλοιπες κατηγορίες, δηλαδή: α) τη μικρή καθυστέρηση μετάδοσης και β) τα μικρά σε μέγεθος κινητά τερματικά που απαιτούνται γεγονός που τα καθιστά ανταγωνιστικά προς τα αντίστοιχα τερματικά των κυβελωτών συστημάτων επικοινωνιών. Διάφορα εμπορικά δορυφορικά συστήματα LEO έχουν εμφανιστεί μεταξύ των οποίων τα Globalstar και Iridium να είναι τα πλέον διαδεδομένα. Μέσω των δικτύων τους, τα οποία σχηματίζουν ένα πυκνό δίκτυο τηλεπικοινωνιακών δορυφόρων στην LEO τροχιά, προσφέρονται υπηρεσίες φωνής και δεδομένων επιτυγχάνοντας ρυθμούς που προσεγγίζουν τα 10 kbps.

1.2.7. Συστήματα Επικοινωνιών Τρίτης και Τέταρτης Γενιάς

Η μεγάλη επιτυχία που γνώρισαν τα συστήματα 2G και η μεγάλη αποδοχή που έχουν από την αγορά οφείλεται κυρίως στις υπηρεσίες φωνής που προσφέρουν. Οι υπηρεσίες αυτές απαιτούν χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης τους οποίους τα συστήματα 2G μπορούν να υποστηρίξουν. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια οι άνθρωποι χρησιμοποιούν τα κινητά τερματικά τους και για άλλες υπηρεσίες. Μερικές από τις λιγότερο απαιτητικές σε πόρους του δικτύου είναι οι υπηρεσίες φωνής, περιήγησης ιστού (web browsing) και ανάγνωσης ηλεκτρονικής αλληλογραφίας, ενώ οι περισσότερο απαιτητικές είναι οι υπηρεσίες τηλεδιάσκεψης (video conferencing), πραγματικού χρόνου (real time) και εκρηκτικής κίνησης (bursty traffic). Ο ρυθμός μετάδοσης που επιτυγχάνουν τα συστήματα 2G δεν επαρκεί για την παροχή των υπηρεσιών αυτών.

Το 1992 ξεκίνησε από τη Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunications Union, ITU) μια ερευνητική προσπάθεια για την ανάπτυξη ενός νέου προτύπου συστημάτων κινητών επικοινωνιών, γνωστού με την ονομασία πρότυπο Διεθνών Κινητών Επικοινωνιών 2000 (International Mobile Telecommunications 2000, IMT). Το νέο πρότυπο είναι ικανό να υποστηρίξει υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης με αποτέλεσμα να καθιστά εφικτή την παροχή νέων υπηρεσιών. Στο πλαίσιο του προτύπου IMT 2000 έχουν αναπτυχθεί πολλά συστήματα κινητών επικοινωνιών τρίτης γενιάς (Third Generation, 3G) (23; 24; 25), όπως τα ακόλουθα:

- EDGE: Ο τρόπος πρόσβασης στο μέσο των συστημάτων EDGE βασίζεται στην πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση χρόνου. Ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης που προσφέρουν είναι 473 kbps και είναι συμβατά με τα συστήματα GSM και IS-136.
- cdma2000: Το σύστημα αυτό είναι πλήρως συμβατό με το IS-95 προσφέροντας ρυθμούς μετάδοσης μέχρι και 2 Mbps.
- UMTS: Το παγκόσμιο σύστημα κινητών επικοινωνιών (Universal Mobile Telecommunication System, UMTS) είναι το πλέον διαδεδομένο σύστημα 3G. Για την προτυποποίηση του συστήματος UMTS συγκροτήθηκε η ομάδα εργασίας 3GPP (3rd Generation Partnership Project) η οποία βασίστηκε στις εξελιγμένες προδιαγραφές του συστήματος GSM. Το έργο της ομάδας εργασίας 3GPP περιλαμβάνει την προτυποποίηση των προδιαγραφών του UMTS για την ασύρματη διεπαφή, το δίκτυο κορμού και τη δομή των

υπηρεσιών. Η πλέον διαδεδομένη έκδοση του UMTS βασίζεται στο πρότυπο WCDMA για την πρόσβαση στο ασύρματο μέσο. Το WCDMA χρησιμοποιεί την πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση κώδικα και ευρέα κανάλια εύρους 5MHz, επιτυγχάνοντας ρυθμούς μέχρι 2 Mbps. Σε αντίθεση με τα συστήματα EDGE και cdma2000, το UMTS απαιτεί νέους σταθμούς βάσης σε σχέση με τα παλαιότερα συστήματα όπως το GSM και απονομή νέας ζώνης συχνοτήτων. Ωστόσο, οι βασικές ιδέες ανάπτυξης και δομής του δικτύου παραμένουν ίδιες με αυτές των δικτύων GSM. Επίσης, τα κινητά τερματικά του UMTS είναι συμβατά με τα συστήματα GSM επιτρέποντας τη διπλή λειτουργία μεταξύ των δύο υποστηριζόμενων τεχνολογιών.

Το μέλλον των ασύρματων δικτύων ανήκει στις ενοποιημένες αρχιτεκτονικές, όπου όλα τα συστήματα λειτουργούν με βάση τη μετάδοση πακέτων δεδομένων χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο IP (Internet Protocol). Με τον τρόπο αυτό οι διαφορετικές ασύρματες τεχνολογίες θα δημιουργήσουν μια κοινή δομή, ο τρόπος λειτουργίας της οποίας θα είναι αδιαφανής προς το χρήστη ανεξάρτητα από την ασύρματη τεχνολογία πρόσβασης που χρησιμοποιείται κάθε φορά. Ο στόχος αυτός αποτελεί την πρόκληση για τη νέα γενιά κυβελωτών συστημάτων, γνωστών και ως συστήματα τέταρτης γενιάς (Fourth Generation, 4G), τα οποία θα εμφανιστούν στην αγορά των επικοινωνιών μετά το 2010 (26; 27) και θα παρέχουν στους χρήστες υπηρεσίες φωνής, μεταφοράς δεδομένων, βίντεο και άλλες υπηρεσίες πολυμεσικού περιεχομένου (28). Αναμφίβολα, μέχρι την εμφάνιση των συστημάτων 4G στην αγορά τηλεπικοινωνιών και τη διάθεσή τους προς χρήση, πολλά από τα επιμέρους χαρακτηριστικά τους είναι πιθανό να αλλάξουν ανάλογα με την εξέλιξη της ίδιας της αγοράς και των αναγκών των ανθρώπων.

1.3. Προκλήσεις

Ο ασύρματος τρόπος μετάδοσης και η ανάγκη για υποστήριξη κινητικότητας αποτελούν κοινά χαρακτηριστικά των μοντέρνων ασύρματων δικτύων από τα οποία προκύπτει ένα πλήθος τεχνολογικών προκλήσεων. Μέσω της ανάλυσης των αντίστοιχων απαιτήσεων είναι δυνατό να επιτευχθεί ο σχεδιασμός αποδοτικών ασύρματων δικτύων. Οι περισσότερες τεχνολογικές προκλήσεις περιγράφονται στην υποενότητα που ακολουθεί.

1.3.1. Μεταβλητότητα του Ασύρματου Μέσου

Σε αντίθεση με το ενσύρματο, το ασύρματο μέσο παρουσιάζει υψηλό βαθμό μεταβλητότητας ως προς τα χαρακτηριστικά της ασύρματης μετάδοσης. Η μεταβλητότητα του ασύρματου μέσου οφείλεται σε πολλούς παράγοντες όπως η αυξημένη εξασθένηση, ο θόρυβος, η παραμόρφωση που υφίσταται το σήμα στον πομπό και στο δέκτη, η ανάκλαση και η διάθλαση του σήματος λόγω φυσικών εμποδίων. Επιπλέον, παρενέργειες στη λήψη του σήματος μπορεί να προκληθούν από το φαινόμενο της πολύοδης (πολυδιαδρομικής) μετάδοσης (multipath propagation), που οφείλεται στην ανάκλαση του σήματος, από τη σχετική κίνηση μεταξύ πομπού και δέκτη κ.α. Η τυχαία φύση όλων αυτών των παραγόντων κάνει εξαιρετικά δύσκολη την πρόβλεψη της παραμόρφωσης του σήματος και συνεπώς της μεταβλητότητας του μέσου. Επομένως, κατά το σχεδιασμό ενός ασύρματου δικτύου πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η μεταβλητότητα του ασύρματου διαύλου μέσω της ανάπτυξης αποδοτικών αλγόριθμων πρόβλεψης της συμπεριφοράς του διαύλου και της ενσωμάτωσης στο σύστημα τεχνικών αντιστάθμισης των φαινομένων υποβάθμισης της ποιότητας του σήματος.

1.3.2. Διαχείριση Φάσματος

Η κατανομή του φάσματος στα διάφορα συστήματα πρέπει να διέπεται από αυστηρούς κανόνες και διαδικασίες. Για το λόγο αυτό έχουν συγκροτηθεί διάφοροι οργανισμοί, όπως ο ETSI στην Ευρώπη και ο FCC στις Ηνωμένες Πολιτείες, που είναι υπεύθυνοι για την αποδοτική κατανομή και χρήση του φάσματος. Οι πάροχοι ασύρματων επικοινωνιών αγοράζουν την αντίστοιχη άδεια για την περιοχή φάσματος που σκοπεύουν να χρησιμοποιήσουν καταβάλλοντας ένα σχετικά υψηλό τίμημα. Επομένως, ο πάροχος υπηρεσιών, που επιδιώκει την ταχεία απόσβεση της επένδυσής του, υποχρεώνεται στην αποδοτική χρήση της φασματικής περιοχής που πληρώνει. Επιπλέον, η έλλειψη διαθέσιμου φάσματος οδηγεί στην ανάπτυξη νέων τεχνολογιών αύξησης της φασματικής απόδοσης και στην ανάπτυξη νέων τεχνολογιών που λειτουργούν σε υψηλότερες περιοχές του φάσματος, όπου λειτουργούν λιγότερα συστήματα σε σχέση με τις περιοχές φάσματος χαμηλότερων συχνοτήτων. Οι πρόσθετες τεχνολογικές προκλήσεις που έχουν να αντιμετωπίσουν τα συστήματα υψηλών συχνοτήτων περιλαμβάνουν την ανάπτυξη κατάλληλου εξοπλισμού που θα επιτυγχάνει παραπλήσια απόδοση με συγκρίσιμο κόστος με τα ασύρματα συστήματα χαμηλότερων συχνοτήτων.

1.3.3. Διαχείριση Ισχύος

Σε αντίθεση με τα τερματικά των ενσύρματων δικτύων, τα οποία δεν έχουν κανένα περιορισμό ως προς την κατανάλωση ισχύος, τα κινητά τερματικά τροφοδοτούνται από μπαταρίες η διάρκεια ζωής των οποίων είναι περιορισμένη. Για το λόγο αυτό απαιτείται επαναφόρτιση της μπαταρίας σε τακτά χρονικά διαστήματα, γεγονός ανεπιθύμητο. Επιπλέον, απαιτείται το μέγεθος και το βάρος της μπαταρίας να είναι σχετικά μικρό για να διευκολύνεται η κινητικότητα του χρήστη. Ωστόσο, η τεχνολογία στον τομέα των μπαταριών δεν επιτρέπει την κατασκευή μπαταριών πολύ μικρού βάρους και μεγέθους που προσφέρουν μεγάλη διάρκεια λειτουργίας του κινητού τερματικού. Επομένως, μεγάλο μέρος της τεχνολογικής έρευνας αποσκοπεί στην ανάπτυξη φορητών ηλεκτρονικών συσκευών με εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση ισχύος, η οποία είναι ανάλογη προς: α) τη χωρητικότητα (C), β) το τετράγωνο της τάσης λειτουργίας (V) και γ) τη συχνότητα χρονισμού (F) του ηλεκτρονικού κυκλώματος. Η ανάπτυξη ενεργειακά αποδοτικών κινητών τερματικών περιλαμβάνει την αντιμετώπιση ενός ή περισσότερων από τις παραμέτρους που επηρεάζουν την κατανάλωση ισχύος μέσω της ανάπτυξης ηλεκτρικών κυκλωμάτων που επιτυγχάνουν: α) μεγαλύτερο βαθμό ολοκλήρωσης των κυκλωμάτων VLSI που χρησιμοποιούνται αποσκοπώντας στη μείωση της συνολικής χωρητικότητας του κυκλώματος, β) χαμηλότερη τάση λειτουργίας και γ) μικρότερη συχνότητα χρονισμού (29).

Συμπληρωματικά προς τις προηγούμενες τεχνικές, ο περιορισμός της κατανάλωσης ισχύος από τα κινητά τερματικά μπορεί να επιτευχθεί έως ένα βαθμό με την υλοποίηση δικτύων που είναι κεντρικά ελεγχόμενα στα οποία οι περισσότερες λειτουργίες εκτελούνται στους σταθμούς βάσης που δεν υπόκεινται σε περιορισμούς κατανάλωσης ισχύος. Επιπλέον, μεγάλη σημασία αποδίδεται στην ανάπτυξη τεχνικών που θέτουν εκτός λειτουργίας τμήματα των φορητών τερματικών όταν αυτά θα βρίσκονται σε κατάσταση αργίας (idle mode).

1.3.4. Ασφάλεια Δεδομένων

Η ασφάλεια κατά τη μετάδοση πληροφορίας αποτελεί ένα σημαντικό ζήτημα για όλα τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα είτε είναι ενσύρματα είτε ασύρματα. Ωστόσο, ο ασύρματος τρόπος μετάδοσης είναι ακόμα λιγότερο ασφαλής σε σχέση με τον ενσύρματο, αφού η πρόσβαση στο ασύρματο μέσο είναι πολύ ευκολότερη με την ενσύρματη γραμμή. Η υποκλοπή του σήματος στα ενσύρματα δίκτυα απαιτεί την προσωρινή διακοπή της μετάδοσης και την παρεμβολή απευθείας στο φυσικό μέσο, δηλαδή το καλώδιο, που

παρεμβάλλεται μεταξύ πομπού και δέκτη. Αντιθέτως, για την υποκλοπή του σήματος στα ασύρματα δίκτυα αρκεί ένας δέκτης που μπορεί να βρίσκεται αρκετά μακριά από τον πομπό. Η εξασφάλιση ασφάλειας κατά τη μετάδοση πληροφορίας μέσω των διαφόρων τύπων δικτύων επικοινωνιών αποτελεί σημαντική πρόκληση ιδιαίτερος για ορισμένα είδη υπηρεσιών όπως οι ηλεκτρονικές τραπεζικές υπηρεσίες (e-banking), οι συναλλαγές με δημόσιους φορείς κ.α.

1.3.5. Δρομολόγηση

Σε αντίθεση με τα ενσύρματα δίκτυα, η τοπολογία ενός ασύρματου δικτύου αλλάζει δυναμικά με το χρόνο λόγω της τυχαίας κίνησης των χρηστών εντός της περιοχής κάλυψής του δικτύου. Επομένως, προκύπτει η ανάγκη για υποστήριξη

- αποδοτικών τεχνικών εντοπισμού του κινητού τερματικού και
- σχημάτων διαπομπής που διατηρούν τη συνέχεια της κλήσης όταν το κινητό τερματικό αλλάζει σταθμό βάσης εξυπηρέτησης.

Στην περίπτωση των ad-hoc δικτύων, όπου ενδεχομένως κανένα τμήμα του δικτύου δεν είναι σταθερό, απαιτούνται ιδιαίτερα αποδοτικά πρωτόκολλα δρομολόγησης που λαμβάνουν υπόψη τη δυναμική μεταβολή της θέσης των κόμβων του δικτύου.

1.3.6. Διεπαφή με τα Ενσύρματα Δίκτυα

Η πρόσβαση των χρηστών ενός ασύρματου δικτύου σε ένα ενσύρματο κορμού έχει ιδιαίτερη σημασία, καθώς επιτρέπει την παροχή νέων υπηρεσιών, όπως η μεταφορά αρχείων, η λήψη και αποστολή ηλεκτρονικής αλληλογραφίας και γενικότερα η πρόσβαση στο διαδίκτυο. Για την πραγματοποίηση και διευκόλυνση της διασύνδεσης ασύρματων και ενσύρματων δικτύων απαιτείται η ανάπτυξη κατάλληλων πρωτοκόλλων και διεπαφών. Η μεταφορά της πληροφορίας από το ένα δίκτυο στο άλλο αποτελεί τεχνολογική πρόκληση, ιδιαίτερος όταν τα επιμέρους πρωτόκολλα επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται από τα δίκτυα είναι διαφορετικά.

1.3.7. Επιδράσεις στην Υγεία

Το συνεχώς αυξανόμενο πλήθος των ασύρματων δικτύων δημιούργησε πολλές ανησυχίες σχετικά με την επίδραση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στον άνθρωπο

οργανισμό. Η ανησυχία της κοινής γνώμης εστιάστηκε κυρίως στα κυψελωτά συστήματα για τους εξής λόγους:

- Η ισχύς εκπομπής των κυψελωτών συστημάτων είναι υψηλότερη αυτής που εκπέμπουν άλλα ασύρματα δίκτυα όπως π.χ. τα τοπικά ασύρματα δίκτυα ή τα προσωπικά δίκτυα υπολογιστών.
- Τα κινητά τερματικά λειτουργούν πολύ κοντά στον ανθρώπινο εγκέφαλο.
- Όταν τα κινητά τερματικά χρησιμοποιούνται για τηλεφωνικές κλήσεις, εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητικά κύματα στο σύνολο της διάρκειας της κλήσης, σε αντίθεση με άλλα ασύρματα δίκτυα, όπως τα WLAN, όπου το κινητό τερματικό εκπέμπει ανά μικρά χρονικά διαστήματα λόγω της εκρηκτικής φύσης της κίνησης.

Ασφαλώς πρέπει να περάσουν αρκετά χρόνια ακόμα μέχρι η επίπτωση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στον ανθρώπινο οργανισμό να προσδιοριστεί με ακρίβεια.

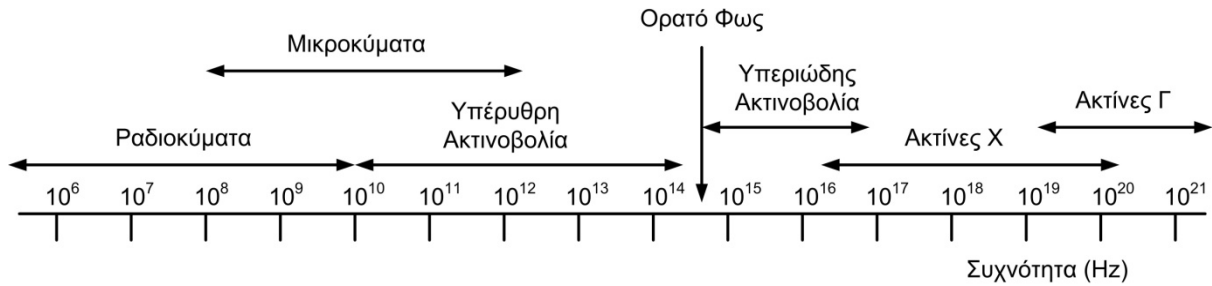
1.4. Το Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα

Η ύπαρξη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων προβλέφθηκε από το Βρετανό φυσικό James Maxwell το 1865, ενώ παρατηρήθηκαν εργαστηριακά για πρώτη φορά από το Γερμανό φυσικό Heinrich Hertz το 1887. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα δημιουργούνται από κινούμενα ηλεκτρικά φορτία και διαδίδονται στο χώρο. Η εκπομπή/λήψη τους καθίσταται εφικτή με χρήση κεραιών λειτουργία που αποτελεί τη βάση των ασύρματων επικοινωνιών.

Τα δύο χαρακτηριστικά ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος είναι το μήκος κύματος (λ) και η συχνότητά του (f), τα οποία συνδέονται με τη σχέση

$$c = \lambda f, \quad (1.1)$$

όπου c είναι η σταθερή ταχύτητα του φωτός στο κενό. Αφού η παράμετρος c είναι σταθερά, κάθε μήκος κύματος αντιστοιχίζεται σε μια συγκεκριμένη συχνότητα και αντίστροφα. Επομένως, κάθε ηλεκτρομαγνητικό κύμα μπορεί να περιγραφεί μόνο από το μήκος κύματος ή τη συχνότητά του, με το δεύτερο τρόπο να έχει επικρατήσει έναντι του πρώτου.



Σχήμα 1-1: Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.

1.4.1. Φασματικές Ζώνες και Χαρακτηριστικά Μετάδοσης

Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα διαιρείται σε περιοχές οι οποίες ονομάζονται φασματικές ζώνες. Τα ακριβή όρια μεταξύ των διαφόρων φασματικών ζωνών δεν είναι σαφώς ορισμένα όπως φαίνεται από το σχήμα Σχήμα 1.1.

Στο Σχήμα 1-1 ο άξονας των συχνοτήτων είναι σε λογαριθμική κλίμακα, οπότε, η μετάβαση από μια περιοχή σε μια άλλη δε γίνεται κατά γραμμικό τρόπο, ενώ το εύρος των φασματικών ζωνών ποσοτικοποιείται σε τάξεις μεγέθους. Συνεπώς, οι φασματικές ζώνες που αντιστοιχούν σε υψηλότερες συχνότητες είναι σημαντικά μεγαλύτερου εύρους και μπορούν να μεταφέρουν περισσότερα δεδομένα. Ωστόσο, οι φασματικές ζώνες που βρίσκονται υψηλότερα του ορατού φάσματος σπάνια χρησιμοποιούνται για ασύρματη μετάδοση σημάτων για διάφορους λόγους, ο σημαντικότερος από τους οποίους είναι η υψηλή απόσβεση των ραδιοκυμάτων στις συχνότητες αυτές.

Στη συνέχεια, ακολουθεί σύντομη περιγραφή των διαφόρων φασματικών ζωνών όπως έχουν διαταχθεί σε αύξουσα τιμή συχνότητας. Με βάση τα χαρακτηριστικά διάδοσης και τις άλλες ιδιότητές τους, οι φασματικές ζώνες των ραδιοκυμάτων και των μικροκυμάτων είναι οι σημαντικότερες για εμπορική εκμετάλλευση στα ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών.

- **Ραδιοκύματα (Radio).** Τα ραδιοκύματα² καταλαμβάνουν το κατώτερο τμήμα του φάσματος ξεκινώντας από τις συχνότητες λίγων kHz. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι υψηλότερες συχνότητες υποστηρίζουν υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης. Επομένως, το κατώτερο τμήμα του φάσματος των ραδιοκυμάτων χρησιμοποιείται για μετάδοση τηλεοπτικών και ραδιοφωνικών

² Τα ραδιοκύματα ήταν τα πρώτα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που χρησιμοποιήθηκαν για ασύρματη επικοινωνία από τον Guglielmo Marconi στις αρχές του 1900.

σημάτων, ενώ το ανώτερο στα ασύρματα συστήματα επικοινωνιών τα οποία απαιτούν τη μετάδοση μεγάλου όγκου δεδομένων. Ωστόσο, η αύξηση της συχνότητας επιφέρει αντίστοιχη αύξηση στην απόσβεση των ραδιοκυμάτων. Στο φαινόμενο αυτό οφείλεται το ότι, στη ραδιοφωνία, τα μακρά κύματα (Long Wavelength, LW) μεταδίδονται από ένα σταθμό εκπομπής σε πολλές χώρες ενώ τα VHF κύματα (Very High Frequency) μπορούν να καλύψουν μόνο γεωγραφικά περιορισμένες περιοχές. Εντούτοις, η μειωμένη εμβέλεια των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων αποτελεί πλεονέκτημα για τα ασύρματα συστήματα επικοινωνιών καθώς επιτρέπει την αναχρησιμοποίηση συχνότητας στην οποία στηρίζεται η λειτουργία των κυψελωτών συστημάτων. Στη ραδιοφωνία χρησιμοποιείται επίσης η ζώνη συχνοτήτων HF (High Frequency) με κύριο χαρακτηριστικό τη δυνατότητα κάλυψης πολύ μεγάλων γεωγραφικών περιοχών. Η δυνατότητα αυτή οφείλεται στην ανάκλαση που υφίστανται τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα της ζώνης HF στην ιονόσφαιρα παρέχοντας πολύ μεγάλη εμβέλεια. Ο τρόπος μετάδοσης αυτός αποτελούσε τη μοναδική λύση επικοινωνίας μεγάλων αποστάσεων μέχρι την αξιοποίηση των δορυφορικών επικοινωνιών. Στον Πίνακα 1-4 παρουσιάζονται οι διάφορες ζώνες των ραδιοκυμάτων μαζί με τις εφαρμογές τους.

- Μικροκύματα (Microwaves). Η υψηλότερη περιοχή των ραδιοσυχνοτήτων (UHF, SHF και EHF) είναι γνωστή ως μικροκύματα, ονομασία που οφείλεται στο μικρό μήκος κύματος που χαρακτηρίζει τα ραδιοκύματα αυτής της ζώνης. Λόγω του μεγάλου εύρους ζώνης που προσφέρουν, τα μικροκύματα έχουν ένα ευρύ πεδίο εφαρμογών στις ασύρματες επικοινωνίες. Ωστόσο, μειονέκτημα αποτελεί η μεγάλη εξασθένηση που εμφανίζουν όταν στη διάδοσή τους παρεμβάλλονται διάφορα αντικείμενα. Τα τμήματα της ζώνης των μικροκυμάτων και τα αντίστοιχα πεδία των εφαρμογών παρουσιάζονται στον Πίνακα 1-5.
- Υπέρυθρη ακτινοβολία (Infrared, IR). Η υπέρυθρη περιοχή του φάσματος βρίσκεται κάτω από τη συχνότητα της ορατής ερυθρής ακτινοβολίας. Υπέρυθρη ακτινοβολία εκπέμπουν τα θερμά σώματα, η συχνότητα της οποίας εξαρτάται από τη θερμοκρασία του σώματος. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το ανθρώπινο σώμα, το οποίο εκπέμπει υπέρυθρη ακτινοβολία την οποία αξιοποιεί η τεχνολογία της νυχτερινής όρασης. Το φάσμα των υπέρυθρων ακτινοβολιών βρίσκει εφαρμογή σε ορισμένα συστήματα

Συχνότητα	Ονομασία φασματικής ζώνης	Εφαρμογές
<3 KHz	Extreme Low Frequency (EFL)	Επικοινωνίες υποβρυχίων
3 KHz – 30 KHz	Very Low Frequency (VLF)	Θαλάσσιες επικοινωνίες
20 KHz – 300 KHz	Low Frequency (LF) ή Long Wave (LW)	AM ραδιοφωνία
300 KHz – 3 MHz	Medium Frequency (MF) ή Medium Wave (MW)	AM ραδιοφωνία
3 MHz – 30 MHz	High Frequency (HF) ή Short Wave (SW)	AM ραδιοφωνία
30 MHz – 300 MHz	Very High Frequency (VHF)	FM ραδιοφωνία, τηλεόραση
300 MHz – 3 GHz	Ultra High Frequency (UHF)	Τηλεόραση, κυψελωτά συστήματα ασύρματων επικοινωνιών
3 GHz – 30 GHz	Super High Frequency (SHF)	Δορυφορικές επικοινωνίες
30 GHz – 300 GHz	Extra High Frequency (EHF)	Δορυφορικές επικοινωνίες, ραντάρ

Πίνακας 1-4: Οι ζώνες φάσματος και οι εφαρμογές τους.

ασύρματων επικοινωνιών, όπως το πρότυπο τοπικής ασύρματης δικτύωσης IEEE 802.11. Άλλα συστήματα ασύρματων επικοινωνιών επιτυγχάνουν τη μετάδοση πληροφορίας είτε διαχέοντας την υπέρυθρη ακτινοβολία στο χώρο είτε χρησιμοποιώντας ζεύξεις υπέρυθρης ακτινοβολίας σημείου προς σημείο.

- Ορατή ακτινοβολία (Visible light). Η μικρή περιοχή των συχνοτήτων που παρεμβάλλονται μεταξύ της υπέρυθρης και υπεριώδους ακτινοβολίας αντιστοιχεί στην ορατή ζώνη του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (Σχήμα 1-1).

Συχνότητα	Ονομασία φασματικής ζώνης	Εφαρμογές
0,4 GHz – 1,5 GHz	L	Ευρεκπομπή, κυβελωτά συστήματα ασύρματων επικοινωνιών
1,5 GHz – 5,2 GHz	S	Κυβελωτά συστήματα ασύρματων επικοινωνιών
3,9 GHz – 6,2 GHz	C	Δορυφορικές επικοινωνίες
5,2 GHz – 10,9 GHz	X	Σταθερά ασύρματα δίκτυα, δορυφορικές επικοινωνίες
10,9 GHz – 36 GHz	K	Σταθερά ασύρματα δίκτυα, δορυφορικές επικοινωνίες
36 GHz – 46 GHz	Q	Σταθερά ασύρματα δίκτυα
46 GHz – 56 GHz	V	Δορυφορικές επικοινωνίες επόμενης γενιάς
56 GHz – 100 GHz	W	Κυβελωτά συστήματα ασύρματων επικοινωνιών επόμενης γενιάς

Πίνακας 1-5: Τα διάφορα τμήματα της ζώνης των μικροκυμάτων και οι εφαρμογές τους.

- Υπεριώδης ακτινοβολία (Ultraviolet, UV). Η υπεριώδης φασματική ζώνη βρίσκεται πάνω από τη συχνότητα της ιώδους ακτινοβολίας του ορατού φάσματος. Πηγή υπεριώδους ακτινοβολίας αποτελούν ο ήλιος και ειδικοί λαμπτήρες. Η υπεριώδης ακτινοβολία είναι επικίνδυνη για τον ανθρώπινο οργανισμό.
- Ακτίνες X (X-Rays). Οι ακτίνες X, γνωστές και ως ακτίνες Röntgen, χαρακτηρίζονται από μικρότερα μήκη κύματος συγκριτικά με τις ακτίνες γ. Όπως και η υπεριώδης ακτινοβολία, οι ακτίνες X είναι επικίνδυνες για τον ανθρώπινο οργανισμό καθώς μπορούν να διεισδύσουν στα ανθρώπινα κύτταρα. Η χρήση των ακτίνων X εστιάζεται κυρίως στην ιατρική, όπως για παράδειγμα στην ακτινογραφία.
- Ακτίνες γ (Gamma Rays). Οι ακτίνες γ καταλαμβάνουν το υψηλότερο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Λόγω της υψηλής συχνότητας, οι ακτίνες γ μπορούν να μεταφέρουν μεγάλες ποσότητες ενέργειας. Συνήθως εκπέμπονται

από ραδιενεργά υλικά, όπως το κοβάλτιο 60 και το καίσιο 137. Οι ακτίνες γ είναι εξαιρετικά επιβλαβείς για τον άνθρωπο επειδή μπορούν να διεισδύσουν πολύ εύκολα στον ανθρώπινο οργανισμό και τα κύτταρά του. Επομένως, είναι ακατάλληλες για χρήση στις ασύρματες επικοινωνίες. Η χρήση τους περιορίζεται μόνο σε συγκεκριμένες ιατρικές και μηχανολογικές εφαρμογές.

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία της περιοχής του φάσματος κάτω από το ορατό φάσμα δε θεωρείται επιβλαβής για τον ανθρώπινο οργανισμό. Εντούτοις, δεν είναι απόλυτα ασφαλής καθώς προκαλεί τοπική αύξηση της θερμοκρασίας.

1.4.2. Κανονισμοί Κατανομής Φάσματος

Τα ασύρματα δίκτυα χρησιμοποιούν τον ελεύθερο χώρο για μετάδοση του σήματος σε αντίθεση με τα ενσύρματα που χρησιμοποιούν τα καλώδια. Ο ασύρματος διάυλος ουσιαστικά μοιράζεται από πολλά ασύρματα συστήματα τα οποία λειτουργούν ταυτόχρονα. Για τη διασφάλιση της ελάχιστης δυνατής παρεμβολής μεταξύ των ασύρματων συστημάτων επιβάλλονται κανονισμοί στη χρήση του φάσματος.

Οι κανονισμοί για τα ασύρματα συστήματα επιβάλλονται σε δύο επίπεδα: α) σε επίπεδο χώρας από την αντίστοιχη ρυθμιστική αρχή και β) σε παγκόσμιο επίπεδο από την ITU που είναι υπεύθυνη για την κατανομή του φάσματος. Η ITU εκδίδει οδηγίες που πρέπει να τηρούνται από τα κράτη έτσι ώστε να είναι εφικτή η χρήση του ίδιου εξοπλισμού σε όλο τον κόσμο. Για τη διευκόλυνση της εφαρμογής των κανονισμών του φάσματος η Γη έχει χωριστεί από τον οργανισμό ITU σε τρία τμήματα: α) το πρώτο τμήμα αποτελείται από την Αμερικανική ήπειρο, β) το δεύτερο τμήμα περιλαμβάνει τις ηπείρους της Ευρώπης και της Αφρικής καθώς και τις χώρες της πρώην Σοβιετικής Ένωσης και γ) το τρίτο τμήμα περιλαμβάνει τις υπόλοιπες χώρες της Ασίας και την Ωκεανία. Ανάλογα με τις εξελίξεις στο χώρο των ασύρματων επικοινωνιών ανά 5 με 7 χρόνια διοργανώνεται από την ITU η Παγκόσμια Διάσκεψη Ραδιοεπικοινωνιών (World Radiocommunication Conference, WRC) που αποσκοπεί στη συζήτηση θεμάτων που σχετίζονται με τους κανονισμούς του φάσματος.

Οι κρατικοί οργανισμοί επιβολής κανονισμών αποφασίζουν για τον τρόπο αδειοδότησης τμημάτων του φάσματος στους παρόχους ασύρματων υπηρεσιών σε επίπεδο κράτους. Οι αποφάσεις των κρατικών οργανισμών συχνά λαμβάνουν υπόψη εκτός από τα αμιγώς τεχνολογικά θέματα και άλλα κοινωνικής και πολιτικής φύσης. Ακόμα, πολλές

λεπτομέρειες του τρόπου αδειοδότησης διαφέρουν από χώρα σε χώρα με αποτέλεσμα οι επιμέρους πολιτικές να διαφέρουν. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο τρόπος αδειοδότησης φασματικών περιοχών από την Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών των ΗΠΑ (Federal Communications Commission, FCC) και την αντίστοιχη επιτροπή της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Η FCC αδειοδοτεί τη χρήση συγκεκριμένων φασματικών περιοχών στους παρόχους ασύρματων υπηρεσιών χωρίς να επιβάλλει περιορισμούς για τις υπηρεσίες που προσφέρονται μέσω αυτής. Η αντίστοιχη επιτροπή της Ευρωπαϊκής Ένωσης, αντιθέτως, δεσμεύει τους παρόχους ασύρματων επικοινωνιών ως προς την παροχή συγκεκριμένων υπηρεσιών μέσω της διαδικασίας αδειοδότησης τμημάτων του φάσματος. Αυτή η διαφοροποίηση επιτρέπει την ανάπτυξη κοινών προτύπων δικτύου όπως είναι το επιτυχημένο πρότυπο GSM για την Ευρώπη που έχει επικρατήσει τα τελευταία χρόνια και σε άλλες χώρες εκτός Ευρωπαϊκής Ένωσης. Η αδειοδότηση των παρόχων υπηρεσιών για τα ασύρματα συστήματα 3G αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα αδειοδότησης για την παροχή συγκεκριμένων υπηρεσιών.

Η αδειοδότηση των παρόχων υπηρεσιών επιτυγχάνεται με έναν από τους εξής τρόπους:

- Αξιολόγηση προσφορών. Πρόκειται για την παλαιότερη μέθοδο αδειοδότησης. Οι ενδιαφερόμενοι υποβάλλουν τις προσφορές τους στον κρατικό οργανισμό αδειοδότησης. Οι διάφορες προσφορές υποβάλλονται σε αξιολόγηση και ανάλογα με τα τεχνικά, οικονομικά κ.α. κριτήρια που εξετάζονται προκύπτει αντίστοιχη απόφαση. Πολλές φορές, όμως, ορισμένοι αξιολογητές επιδεικνύουν εύνοια προς ορισμένες προσφορές κυρίως για οικονομικούς και πολιτικούς λόγους, με αποτέλεσμα να μην είναι πλήρως διαφανής ο τρόπος αδειοδότησης. Επιπλέον, στην περίπτωση όπου οι προσφορές είναι πολλές απαιτείται μεγάλο χρονικό διάστημα για την αξιολόγησή τους, με αποτέλεσμα να προκύπτει καθυστέρηση στην έκδοση της άδειας. Ακόμα, επιβαρύνονται σε κόστος τόσο ο κρατικός οργανισμός όσο και οι υποψήφιοι πάροχοι. Ωστόσο, πολλές χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, όπως η Σουηδία, η Φιλανδία, η Δανία, η Γαλλία και η Ισπανία, χρησιμοποιούν ακόμα αυτή τη μέθοδο, η οποία χρησιμοποιήθηκε για την αδειοδότηση των ασύρματων συστημάτων 3G στις χώρες αυτές.
- Τυχαία επιλογή. Αυτός ο τρόπος αδειοδότησης εξαλείφει τα προβλήματα που δημιουργούνται από τη διαδικασία της αξιολόγησης προσφορών. Στην

περίπτωση αυτή, οι υποψήφιοι πάροχοι καταθέτουν τις προσφορές τους στον κρατικό οργανισμό ο οποίος επιλέγει τυχαία μια πρόταση. Η αυξημένη ταχύτητα με την οποία λαμβάνεται η απόφαση αδειοδότησης αποτελεί πλεονέκτημα της μεθόδου, ενώ, αντιθέτως, ως μειονέκτημα καταλογίζεται η δυνατότητα συμμετοχής στη διαδικασία εταιρειών που δεν έχουν σχέση με τον κλάδο των τηλεπικοινωνιών. Στην περίπτωση αυτή οι εταιρίες που λαμβάνουν την άδεια τη μεταπωλούν σε εταιρείες του κλάδου των τηλεπικοινωνιών, αυξάνοντας με τον τρόπο αυτό το κόστος για τον τελικό χρήστη και τη συνολική καθυστέρηση της διαδικασίας παροχής υπηρεσιών.

- Δημοπρασία άδειας φάσματος. Βάση της μεθόδου αυτής αποτελεί το γεγονός ότι το φάσμα είναι περιορισμένο με αποτέλεσμα να είναι ακριβή η άδεια χρήσης του. Η διαδικασία ξεκινάει με την ανακοίνωση από τον κρατικό οργανισμό διαχείρισης του φάσματος της έναρξης υποβολής αιτήσεων για τη δημοπράτηση της άδειας. Ακολουθεί δημοπρασία μεταξύ των υποψηφίων παρόχων και αυτός που τελικά λαμβάνει την άδεια καταβάλλει ένα πολύ υψηλό συνήθως τίμημα. Πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου αποτελούν αφενός τα υψηλά έσοδα του κράτους από την πώληση αδειών χρήσης του φάσματος και αφετέρου η απαίτηση για αποδοτική χρήση του φάσματος. Ενδεικτικά, το 2000 τα έσοδα από τη χορήγηση αδειών χρήσης του φάσματος για ασύρματα συστήματα 3G στο Ηνωμένο Βασίλειο ανήλθαν στο ποσό των 40 δισεκατομμυρίων δολαρίων. Ωστόσο, το υψηλό τίμημα που καταβάλλουν οι πάροχοι υπηρεσιών, τους αναγκάζει να μετακυλήσουν το κόστος στους χρήστες των ασύρματων δικτύων. Επίσης, έχει παρατηρηθεί ότι τα έσοδα των παρόχων από τη χρήση ενός τμήματος του φάσματος μερικές φορές υπερεκτιμώνται με αποτέλεσμα να μην επιτυγχάνουν να αποπληρώσουν το κόστος της άδειας και να οδηγούνται σε χρεωκοπία. Η μέθοδος της δημοπρασίας αδειών χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1989 στη Νέα Ζηλανδία και αργότερα υιοθετήθηκε από άλλες χώρες όπως οι ΗΠΑ και οι χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Όπως γίνεται αντιληπτό από τα προηγούμενα, η αδειοδότηση της χρήσης του φάσματος αποτελεί μια απαραίτητη διαδικασία με μεγάλο κόστος για τους παρόχους. Ωστόσο, ο οργανισμός ITU έχει δεσμεύσει σε παγκόσμια κλίμακα ένα τμήμα του φάσματος περί την περιοχή των 2.4 GHz που αποδίδεται ελεύθερο προς χρήση. Στην πράξη, η

φασματική ζώνη αυτή χρησιμοποιείται από τα ασύρματα τοπικά δίκτυα και τα προσωπικά δίκτυα υπολογιστών. Επιπλέον, στις ΗΠΑ και τον Καναδά διατίθενται ελεύθερες προς χρήση οι περιοχές γύρω από τα 900 MHz και τα 5 GHz.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Παροχή Ποιότητας Υπηρεσιών και Έλεγχος Αποδοχής Κλήσεων

2.1. Εισαγωγή

Η παροχή εγγυημένου επιπέδου ποιότητας υπηρεσιών στα ασύρματα συστήματα επικοινωνιών συνδέεται στενά με την αποδοτική χρήση των πόρων του δικτύου και τη μεγιστοποίηση του πλήθους των εξυπηρετούμενων χρηστών. Επιπλέον, τα τελευταία χρόνια αυξάνεται συνεχώς η ανάγκη για νέες υπηρεσίες πολυμεσικού περιεχομένου που απαιτούν υψηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Συνεπώς, λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις των ασύρματων δικτύων σε συνδυασμό με το περιορισμένο φάσμα συχνοτήτων που διατίθεται σε κάθε σύστημα γίνεται αντιληπτό ότι υφίσταται η ανάγκη ανάπτυξης αποδοτικών αλγόριθμων αποδοχής κλήσεων (Call Admission Control, CAC). Οι αλγόριθμοι αποδοχής κλήσεων χρησιμοποιούνται για να διασφαλίσουν ότι η αποδοχή μιας νέας κλήσης (call) από ένα δίκτυο δε θα παραβιάσει τη συμφωνία στάθμης ως προς το επίπεδο παροχής υπηρεσιών (Service Level Agreement, SLA) των κλήσεων που βρίσκονται σε εξέλιξη. Ως κλήση θεωρείται κάθε σύνοδος υπηρεσίας (service session) που υποστηρίζεται από το δίκτυο. Ένας αποδοτικός αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων οφείλει να:

- εξασφαλίζει έναν ενιαίο μηχανισμό απονομής προτεραιότητας μεταξύ: α) των νέων κλήσεων και των κλήσεων από διαπομπή και β) μεταξύ των κλήσεων που ανήκουν σε διαφορετικές κλάσεις υπηρεσιών (Service Classes, SCs),
- επιτυγχάνει χαμηλή πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων (Call Blocking Probability, CBP),
- επιτυγχάνει δίκαιη κατανομή των πόρων του δικτύου μεταξύ των χρηστών,
- εξασφαλίζει υψηλό βαθμό αξιοποίησης των διαθέσιμων πόρων και
- αποτρέπει τη συμφόρηση του δικτύου.

Οι αλγόριθμοι αποδοχής κλήσεων για ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών έχουν μελετηθεί ευρέως για διάφορες αρχιτεκτονικές δικτύου και στρατηγικές παροχής υπηρεσιών των παρόχων. Για την εφαρμογή ενός αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων οι εισερχόμενες κλήσεις κατηγοριοποιούνται σε κλάσεις υπηρεσιών, έκαστη των οποίων έχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και απαιτήσεις ποιότητας. Ο αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων χειρίζεται κάθε εισερχόμενη κλήση αντίστοιχα προς: α) την κλάση υπηρεσιών στην οποία ανήκει η κλήση, β) τα κριτήρια που πρέπει να ληφθούν υπόψη και γ) τις αρχές λειτουργίας του. Η βασική αρχή λειτουργίας της πλειοψηφίας των αλγόριθμων αποδοχής κλήσεων περιλαμβάνει έναν αποδοτικό τρόπο διαχείρισης των πόρων του δικτύου, οι οποίοι μπορεί να είναι είτε τα διαθέσιμα κανάλια (channels) του συστήματος είτε μονάδες χωρητικότητας (Bandwidth Units, BUs). Επιπλέον, αρκετές φορές χρησιμοποιούνται κατώφλια (thresholds) που περιορίζουν την αποδοχή χρηστών χαμηλής προτεραιότητας αποσκοπώντας στην εξασφάλιση της επιθυμητής ποιότητας υπηρεσιών στους χρήστες υψηλής προτεραιότητας. Τελευταίοι αλγόριθμοι αποδοχής κλήσεων χρησιμοποιούν ταυτόχρονα κατώφλια σε συνδυασμό με μεταβλητές πιθανότητες αποδοχής των χρηστών χαμηλής προτεραιότητας, αποσκοπώντας στο δυναμικό έλεγχο της εισερχόμενης κίνησης του δικτύου.

Άλλοι αλγόριθμοι αποδοχής κλήσεων βασίζονται στο κριτήριο αποδοχής μιας νέας κλήσης στο σηματοθορυβικό λόγο (Signal to Noise Ratio, SNR) που πρέπει να υπερβαίνει συγκεκριμένο όριο ώστε να είναι εφικτή η εξασφάλιση προκαθορισμένου επιπέδου ποιότητας υπηρεσιών. Στις περιπτώσεις αυτές, η απόδοση του αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων βασίζεται στις συνθήκες διάδοσης και στην κινητικότητα των χρηστών. Επιπλέον, στις περιπτώσεις όπου η τρέχουσα κίνηση του δικτύου είναι υψηλή είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν τεχνικές επαναδιαπραγμάτευσης της τρέχουσας κατανομής πόρων του δικτύου με στόχο να εξοικονομηθούν οι απαραίτητοι πόροι για την εξυπηρέτηση χρηστών υψηλής προτεραιότητας. Επιπλέον, εκτός των προηγούμενων τεχνικών, ο ρυθμός αποδοχής

κλήσεων μπορεί να ελεγχθεί μέσω δυναμικών αλγόριθμων τιμολόγησης των υπηρεσιών όπου το κριτήριο αποδοχής μιας κλήσης εξαρτάται από τη βούληση του χρήστη να αποδεχθεί το κόστος της υπηρεσίας που αιτείται.

Στο πρώτο μέρος του κεφαλαίου αναλύονται οι θεμελιώδεις έννοιες που χρησιμοποιούνται στους αλγόριθμους αποδοχής κλήσεων όπως χαρακτηριστικά είναι η ποιότητα παροχής υπηρεσιών, η διαχείριση ραδιοπόρων και οι κλάσεις υπηρεσιών. Οι έννοιες αυτές είναι εξαιρετικά σημαντικές για την κατανόηση των βασικών αρχών των αλγόριθμων αποδοχής κλήσεων και της μεγάλης σημασίας που έχουν για την ορθή και αποδοτική λειτουργία ενός δικτύου. Στο δεύτερο μέρος του κεφαλαίου αναλύονται τα διάφορα κριτήρια που χρησιμοποιούν οι αλγόριθμοι αποδοχής κλήσεων για την αποδοχή μιας εισερχόμενης κλήσης. Κάθε αλγόριθμος χαρακτηρίζεται από το κριτήριο αποδοχής που χρησιμοποιεί. Επίσης, η αποδοτικότητα του αλγόριθμου εξαρτάται άμεσα από την καταλληλότητα του κριτηρίου αποδοχής για το δίκτυο όπου εφαρμόζεται.

2.2. Θεμελιώδεις Έννοιες του Ελέγχου Αποδοχής Κλήσεων

2.2.1. Ποιότητα Παροχής Υπηρεσιών

Ένας από τους βασικότερους στόχους της κοινωνίας της πληροφορίας είναι η ευρεία διάδοση και εφαρμογή των τεχνολογιών επικοινωνιών και πληροφοριών προσφέροντας νέες δυνατότητες και ευκαιρίες στους χρήστες των υπηρεσιών. Η προσφορά αυτών των υπηρεσιών στους χρήστες πραγματοποιείται μέσω ενσύρματων (Wired Networks) ή ασύρματων δικτύων (Wireless Networks). Η χρήση των ασύρματων δικτύων προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα όπως ευελιξία, χαμηλό κόστος, ταχεία και εύκολη εγκατάσταση. Επιπλέον, τα ασύρματα δίκτυα έχουν τη δυνατότητα να εγκαθίστανται εύκολα ακόμα και σε περιοχές με έντονο γεωγραφικό ανάγλυφο παρέχοντας υπηρεσίες στις πλέον απομακρυσμένες και δυσπρόσιτες περιοχές. Ωστόσο, μειονεκτήματα των ασύρματων δικτύων αποτελούν η περιορισμένη χωρητικότητά τους, η μεγαλύτερη καθυστέρηση και το υψηλότερο ποσοστό λαθών (Bit Error Ratio, BER) που εμφανίζουν σε σχέση με τα ενσύρματα δίκτυα. Τα μειονεκτήματα αυτά σε συνδυασμό με το περιορισμένο φάσμα έχει ως αποτέλεσμα τον περιορισμό του δικτύου ως προς τους διαθέσιμους πόρους και τις λειτουργικές δυνατότητες. Επομένως, η παροχή ενός εγγυημένου επιπέδου ποιότητας υπηρεσιών από ένα ασύρματο δίκτυο αποτελεί σύνθετη και πολύπλοκη διαδικασία.

Το σύγχρονο τηλεπικοινωνιακό περιβάλλον περιλαμβάνει πλήθος παρόχων υπηρεσιών και ασύρματων δικτύων τα οποία χρησιμοποιούν διαφορετικές τεχνολογίες πρόσβασης. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την απαίτηση υποστήριξης αυξημένου βαθμού κινητικότητας των χρηστών αυξάνει τη δυσκολία παροχής εγγυημένου επιπέδου ποιότητας υπηρεσιών σε όλη την περιοχή κάλυψης ενός ασύρματου δικτύου. Η επίλυση του προβλήματος αυτού γίνεται ακόμα δυσκολότερη όταν αυξάνει το πλήθος των παρεχόμενων υπηρεσιών. Οι παρεχόμενες υπηρεσίες μπορεί να είναι είτε πραγματικού (Real Time Services, RT Services) είτε μη πραγματικού χρόνου (Non-Real Time Services, NRT Services). Επιπλέον, εκτός των κλασικών υπηρεσιών όπως οι υπηρεσίες φωνής, ηλεκτρονικού ταχυδρομείου, περιήγησης ιστού, αποστολής μηνυμάτων και μεταφοράς αρχείων, οι νέες υπηρεσίες πολυμεσικού περιεχομένου, όπως η εικονοδιάσκεψη (videoconference), η υπηρεσία VoIP (Voice over Internet Protocol) και οι διαδικτυακές πολυμεσικές εφαρμογές που υποστηρίζονται από τα δίκτυα ασύρματων επικοινωνιών νέας γενιάς, απαιτούν υψηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, μικρότερη καθυστέρηση και διατήρηση της συνέχειας της υπηρεσίας/συνόδου (session continuity). Η διακύμανση των βασικών παραμέτρων του δικτύου, δηλαδή του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, της καθυστέρησης μετάδοσης των πακέτων και του BER, αποτελεί έναν ακόμα κριτήριο επίδοσης της ποιότητας των υπηρεσιών του δικτύου. Η διατήρηση των παραμέτρων αυτών σε αποδεκτά επίπεδα είναι εξαιρετικά δύσκολη, ιδιαιτέρως όταν οι εξυπηρετούμενοι χρήστες χαρακτηρίζονται από αυξημένο βαθμό κινητικότητας.

Η ποιότητα παροχής υπηρεσιών αποτελεί τη σημαντικότερη παράμετρο κάθε ασύρματου δικτύου επικοινωνιών. Ωστόσο, δεν υπάρχει συγκεκριμένος ορισμός της ποιότητας υπηρεσιών αλλά οι ορισμοί διαφοροποιούνται αντίστοιχα ως προς το επίπεδο και τις λειτουργίες του δικτύου στις οποίες βασίζεται. Επομένως, η ποιότητα υπηρεσιών γίνεται αντιληπτός κατά διαφορετικό τρόπο. Υπό μια γενική θεώρηση, η ποιότητα υπηρεσιών αναφέρεται στο σύνολο των μηχανισμών και λειτουργιών του δικτύου που αποσκοπούν στην παροχή εγγυήσεων για παροχή αποδεκτού και σταθερού επιπέδου υπηρεσιών. Στα κλασικά δίκτυα σταθερών επικοινωνιών η ποιότητα υπηρεσιών ορίστηκε από την ITU σε σχέση με το πρότυπο X.902, ως «ένα σύνολο από ποιοτικές απαιτήσεις της συλλογικής συμπεριφοράς δύο ή περισσότερων αντικειμένων» (30). Ο όρος αντικείμενα αναφέρεται σε οποιαδήποτε από τις παραμέτρους του δικτύου με αποτέλεσμα ο ορισμός αυτός να είναι πολύ γενικός ώστε πρακτικά να μη χρησιμοποιείται στην ανάλυση δικτύων. Στο πλαίσιο των δικτύων ATM ο οργανισμός IETF (Internet Engineering Task Force) όρισε την

ποιότητα υπηρεσιών στη σύσταση FRC 1946 ως εξής: «Η αύξηση των απαιτήσεων για παροχή υπηρεσιών πραγματικού χρόνου συνοδεύεται από αντίστοιχη αύξηση στις απαιτήσεις του δικτύου ως προς την παροχή υπηρεσιών εγγυημένου επιπέδου. Αυτό προϋποθέτει ότι οι λειτουργίες και η υποδομή του δικτύου έχουν τη δυνατότητα να υποστηρίξουν την αίτηση, εκκίνηση και παροχή της υπηρεσίας καθώς και την αξιόπιστη μετάδοση των δεδομένων που απαιτούνται. Το σύνολο αυτών των λειτουργιών αναφέρεται ως δέσμευση χωρητικότητας (bandwidth reservation) και ποιότητα υπηρεσιών.»

Ο ορισμός της ποιότητας υπηρεσιών διαφέρει σε σχέση με τους προηγούμενους αν ληφθούν υπόψη τα χαρακτηριστικά των σύγχρονων τηλεπικοινωνιακών δικτύων που υποστηρίζουν υπηρεσίες πραγματικού χρόνου και πολυμεσικού περιεχομένου. Γενικά, οι υπηρεσίες πραγματικού χρόνου είναι απαιτητικότερες σε σχέση με τις υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου καθώς απαιτείται συγκριτικά βελτιωμένη επίδοση του δικτύου. Επιπλέον, είναι γνωστό ότι οι πολυμεσικές υπηρεσίες δεσμεύουν περισσότερους πόρους του δικτύου σε σχέση με τις κλασικές υπηρεσίες τηλεπικοινωνιών. Επομένως, η παροχή συγκεκριμένου επιπέδου ποιότητας υπηρεσιών είναι δυσκολότερη όταν οι προσφερόμενες υπηρεσίες εμφανίζουν τουλάχιστον ένα από τα προηγούμενα δύο χαρακτηριστικά, βάσει των οποίων η ποιότητα παροχής υπηρεσιών ορίζεται ως «το σύνολο των ποσοτικών και ποιοτικών χαρακτηριστικών ενός κατανεμημένου πολυμεσικού συστήματος που είναι απαραίτητα για την επίτευξη της απαιτούμενης λειτουργικότητας μιας εφαρμογής» (31). Στη παρούσα διατριβή η ποιότητα παροχής υπηρεσιών εξετάζεται ως ένα μετρήσιμο χαρακτηριστικό επίδοσης του ασύρματου δικτύου. Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά του δικτύου που θα εξεταστεί είναι η ικανότητά του να εξυπηρετήσει νέες κλήσεις ή κλήσεις προερχόμενες από διαπομπή. Το χαρακτηριστικό αυτό καθώς και τα υπόλοιπα μετρήσιμα χαρακτηριστικά επίδοσης ενός δικτύου θα οριστούν στα επόμενα κεφάλαια.

Εκτός από τον ορισμό της ποιότητας υπηρεσιών που χρησιμοποιείται κάθε φορά στις αναλύσεις των συστημάτων επικοινωνιών, ένα άλλο κρίσιμο θέμα είναι ο τρόπος με τον οποίο γίνεται αντιληπτή η ποιότητα παροχής υπηρεσιών από τους χρήστες. Στην περίπτωση αυτή η ποιότητα παροχής υπηρεσιών μπορεί να οριστεί με βάση τον τρόπο απεικόνισης των δεδομένων στους χρήστες του δικτύου και το βαθμό ικανοποίησής τους. Η ποσοτικοποίηση της ποιότητας υπηρεσιών γίνεται μέσω ενός πλήθους παραμέτρων και χαρακτηριστικών επίδοσης του δικτύου που εξετάζονται, όπως ο ρυθμός διέλευσης δεδομένων (data throughput rate), το ποσοστό εμφάνισης λαθών, η καθυστέρηση μετάδοσης των πακέτων

δεδομένων, η πιθανότητα μη διαθεσιμότητας του δικτύου και της ασύρματης ζεύξης, η πιθανότητα μη αποδοχής και απόρριψης μιας κλήσης, ο χρόνος απόκρισης του δικτύου κ.α. Κάθε παράμετρος πρέπει να κυμαίνεται εντός συγκεκριμένου εύρους τιμών και κάθε τιμή των παραμέτρων αυτών αντιστοιχεί σε καθορισμένο επίπεδο ποιότητας υπηρεσιών. Επίσης, κάθε παρεχόμενη υπηρεσία χαρακτηρίζεται από διαφορετικό υποσύνολο τιμών των παραμέτρων της ποιότητας υπηρεσιών.

2.2.2. Διαχείριση Ραδιοπόρων

Η ταχεία ανάπτυξη των ασύρματων δικτύων επικοινωνιών σε συνδυασμό με την αύξηση του πλήθους των χρηστών και των υπηρεσιών πολυμεσικού περιεχομένου περιορίζονται κυρίως από το περιορισμένο εύρος φάσματος που διατίθεται σε κάθε ασύρματο σύστημα από τους διεθνείς οργανισμούς. Επομένως, εξαιρετική σημασία έχει η αποδοτική διαχείριση των διαθέσιμων ραδιοπόρων (Radio Resource Management, RRM), δηλαδή η ανάθεση των πόρων του δικτύου μεταξύ των χρηστών σε αντιστοιχία με τις ανάγκες και τις αντίστοιχες προτεραιότητές τους έτσι ώστε να προσφερθεί η απαιτούμενη ποιότητα υπηρεσιών. Ειδικότερα, η διαχείριση ραδιοπόρων στα ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών αποσκοπεί στη βελτίωση της επίδοσης του δικτύου, την αύξηση της χωρητικότητάς του σε επίπεδο εξυπηρετούμενων χρηστών και την παροχή εγγυημένου επιπέδου ποιότητας υπηρεσιών. Η χωρητικότητα που μετριέται σε bits/s/Hz/BS ή σε Erlang/MHz/site, αναφέρεται στο μέγιστο φορτίο κίνησης που μπορεί να εξυπηρετήσει ένα δίκτυο υπό τον περιορισμό ότι το παρεχόμενο επίπεδο ποιότητας υπηρεσιών είναι αποδεκτό. Οι κύριοι παράγοντες που περιορίζουν τη χωρητικότητα ενός ασύρματου δικτύου επικοινωνιών σχετίζονται με:

- τις απαιτήσεις των χρηστών για αποδεκτό επίπεδο ποιότητας υπηρεσιών, το οποίο καθορίζεται από την καθυστέρηση μετάδοσης των πακέτων δεδομένων, τη μέση διάρκεια κλήσης, τον ελάχιστο αποδεκτό ρυθμό μετάδοσης κ.α.,
- το θόρυβο και την ομοδιαυλική παρεμβολή (co-channel interference) που χαρακτηρίζουν το δίαυλο μετάδοσης,
- τις λειτουργίες ελέγχου της ισχύος εκπομπής οι οποίες α) υπόκεινται σε περιορισμούς συμβατότητας με άλλες ασύρματες υπηρεσίες και β) εξαρτώνται από το βαθμό κινητικότητας των χρηστών.

Η διαχείριση ραδιοπόρων περιλαμβάνει ένα σύνολο λειτουργιών και μηχανισμών οι οποίοι ελέγχουν τη χρήση των περιορισμένων πόρων του δικτύου μέσω της κατανομής των μονάδων ραδιοπόρων (Radio Resource Units, RRUs) στις διάφορες κλήσεις. Οι μονάδες ραδιοπόρων ορίζονται κατά διαφορετικό τρόπο σε κάθε ασύρματο δίκτυο ανάλογα με το σύστημα πολλαπλής πρόσβασης που χρησιμοποιείται. Στα συστήματα πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση συχνότητας (Frequency Division Multiple Access, FDMA) οι μονάδες ραδιοπόρων αντιστοιχούν σε συγκεκριμένο εύρος ζώνης για κάθε φέρουσα συχνότητα, ενώ στα συστήματα πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση χρόνου (Time Division Multiple Access, TDMA) σε ζεύγος παραμέτρων που περιλαμβάνει τη φέρουσα συχνότητα και την αντίστοιχη χρονοθυρίδα εκπομπής. Τέλος, στα συστήματα πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση κώδικα (Code Division Multiple Access, CDMA) ομοίως ορίζεται ζεύγος παραμέτρων που αποτελείται από την ακολουθία κωδικών που χρησιμοποιείται και το επίπεδο της ισχύος εκπομπής.

Οι μονάδες ραδιοπόρων κατηγοριοποιούνται σε τρεις κύριες κατηγορίες ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του συστήματος από τα οποία εξαρτώνται (32). Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι μονάδες ραδιοπόρων που βασίζονται στα χαρακτηριστικά του φυσικού στρώματος του διαύλου μετάδοσης και περιλαμβάνουν τεχνικές διαχείρισης της συχνότητας ή του χρόνου, όπως είναι ο έλεγχος φορτίου τηλεπικοινωνιακής κίνησης (traffic load control), η κατανομή και δέσμευση καναλιών, ο έλεγχος του ρυθμού μετάδοσης και ο χρονοπρογραμματισμός των πακέτων δεδομένων (packet scheduling). Στη δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνονται οι μονάδες ραδιοπόρων που βασίζονται σε τεχνικές ελέγχου της ισχύος εκπομπής του σταθμού βάσης ή του κινητού τερματικού, οι οποίες πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τους περιορισμούς ως προς την ενδοσυστημική (inter-system) και διασυστημική (intra-system) παρεμβολή καθώς και τις συστάσεις που αφορούν την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα με άλλες αδειοδοτημένες υπηρεσίες. Η τρίτη κατηγορία περιλαμβάνει τις μονάδες ραδιοπόρων που εξαρτώνται από την απόδοση των σχημάτων διαχείρισης του δικτύου όπως είναι η δρομολόγηση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης, ο έλεγχος αποδοχής κλήσεων, ο έλεγχος συμφόρησης του δικτύου, οι λειτουργίες διαχείρισης της κινητικότητας των χρηστών, οι αλγόριθμοι διαχείρισης κλήσεων από διαπομπή και οι λειτουργίες ανάθεσης σταθμού βάσης στους χρήστες του δικτύου.

2.2.3. Βασικές Αρχές Λειτουργίας του Ελέγχου Αποδοχής Κλήσεων

Ο έλεγχος αποδοχής κλήσεων αποτελεί θεμελιώδη μηχανισμό διαχείρισης ραδιοπόρων για την παροχή ποιότητας υπηρεσιών σε ασύρματα συστήματα επικοινωνιών. Οι αλγόριθμοι αποδοχής κλήσεων χρησιμοποιούνται από τα δίκτυα για να διασφαλιστεί ότι η αποδοχή μιας νέας κλήσης από το δίκτυο δε θα παραβιάσει τη σύμβαση για το επίπεδο παροχής υπηρεσιών των χρηστών των οποίων οι κλήσεις βρίσκονται σε εξέλιξη. Κατά τη λήψη της απόφασης για την αποδοχή ενός νέου χρήστη από το δίκτυο λαμβάνονται υπόψη διάφοροι αντιφατικοί πολλές φορές παράγοντες, μερικοί από τους οποίους είναι η αποδοτική χρησιμοποίηση των πόρων του δικτύου, η μεγιστοποίηση των εσόδων από την παροχή υπηρεσιών, η διασφάλιση της δικαιοσύνης μεταξύ των χρηστών κ.α. (33; 34). Επιπλέον, οι αλγόριθμοι αποδοχής κλήσεων περιορίζουν το πλήθος των κλήσεων που μπορούν να γίνουν αποδεκτές από το δίκτυο υιοθετώντας διαφορετικά επίπεδα προτεραιότητας για τους χρήστες, υποστηρίζουν διαφορετικά επίπεδα ποιότητας υπηρεσιών και αποτρέπουν τη συμφόρηση του δικτύου. Η αίτηση ενός χρήστη για εξυπηρέτηση είναι δυνατόν να μη γίνει δεκτή από το δίκτυο. Η αντίστοιχη πιθανότητα φραγής της κλήσης, είναι γνωστή ως πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων (Call Blocking Probability, CBP) και εξαρτάται άμεσα από τον αλγόριθμο αποδοχής κλήσεων που εφαρμόζεται. Ένας αποδοτικός αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων πρέπει να επιτυγχάνει τη χαμηλότερη δυνατή πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων.

Η πρακτική εφαρμογή του ελέγχου αποδοχής κλήσεων είναι εξαιρετικά δύσκολη καθώς η τηλεπικοινωνιακή κίνηση στα σύγχρονα δίκτυα έχει χαοτική συμπεριφορά, εμφανίζοντας άλλοτε συνεχή ροή υψηλού ρυθμού δεδομένων και άλλοτε μη προβλέψιμη εκρηκτική κίνηση (bursty traffic). Η δυσκολία πρόβλεψης της κίνησης αυξάνεται ακόμα περισσότερο στα ασύρματα συστήματα επικοινωνιών λόγω της κινητικότητας των χρηστών και της μεταβλητότητας των χαρακτηριστικών του φυσικού μέσου μετάδοσης. Στην περίπτωση των κλήσεων που απαιτούν διαπομπή, ιδιαίτερα σημαντική είναι η αδιάλειπτη παροχή υπηρεσιών κατά την εξέλιξη της διαπομπής εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα αποδεκτό επίπεδο ποιότητας υπηρεσιών. Κατά τη διάρκεια μιας κλήσης ένας χρήστης μπορεί να διασχίσει τα όρια εξυπηρέτησης γειτονικών κυψελών του δικτύου αρκετές φορές, οπότε απαιτείται αντίστοιχο πλήθος διαπομπών. Ωστόσο, είναι δυνατό η εκάστοτε νέα κυψέλη να μην έχει αρκετούς διαθέσιμους πόρους για να εξυπηρετήσει μια κλήση από διαπομπή με αποτέλεσμα την απόρριψή της. Η αντίστοιχη πιθανότητα του εξαναγκασμένου τερματισμού μιας κλήσης καλείται πιθανότητα απόρριψης κλήσεων (Call Dropping Probability, CDP).

Είναι γενικά αποδεκτό ότι οι χρήστες ενός συστήματος ασύρματων επικοινωνιών είναι περισσότερο ευαίσθητοι στην απόρριψη μιας κλήσης σε σχέση με τη μη αποδοχή μιας κλήσης. Επομένως, ένας αποδοτικός αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων πρέπει να επιτυγχάνει τη χαμηλότερη δυνατή πιθανότητα απόρριψης κλήσεων. Ένας τρόπος μείωσης της τελευταίας βασίζεται στην υιοθέτηση υψηλότερης προτεραιότητας στις κλήσεις που προέρχονται από διαπομπή σε σχέση με τις νέες κλήσεις του δικτύου. Αυτό έχει ως άμεση συνέπεια την επιβολή διαφορετικών κριτηρίων για την αποδοχή των κλήσεων.

Σημαντική παράμετρος για κάθε αλγόριθμο αποδοχής κλήσεων είναι η ταχύτητα εκτέλεσής του καθώς η εφαρμογή του πραγματοποιείται σε πραγματικό χρόνο. Επιπλέον, κάθε στιγμή απαιτείται να είναι διαθέσιμη η τρέχουσα κατάσταση των διαθέσιμων πόρων κάθε σταθμού βάσης που αποτελεί δεδομένο εισόδου του αλγόριθμου. Ο σχεδιασμός και η εφαρμογή του αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων απαιτεί μεγάλη προσοχή καθώς πρέπει να ελαχιστοποιούνται οι λανθασμένες απορρίψεις και αποδοχές χρηστών. Ως λανθασμένη απόρριψη θεωρείται η μη αποδοχή μιας κλήσης αν και υπάρχουν αρκετοί διαθέσιμοι πόροι για την εξυπηρέτησή της. Στην περίπτωση αυτή η χρήση της χωρητικότητας του δικτύου δε βελτιστοποιείται και τα έσοδα του παρόχου δε μεγιστοποιούνται. Αντιθέτως, ο όρος λανθασμένη αποδοχή αναφέρεται στην αποδοχή μιας εισερχόμενης κλήσης μολονότι όλοι οι πόροι του δικτύου είναι δεσμευμένοι. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του βαθμού ικανοποίησης των χρηστών αφού το δίκτυο δεν μπορεί να προσφέρει ένα εγγυημένο επίπεδο παροχής υπηρεσιών και η πιθανότητα απόρριψης κλήσεων αυξάνεται.

2.2.4. Κλάσεις Υπηρεσιών

Οι παλαιότερες γενιές των ασύρματων συστημάτων επικοινωνιών χρησιμοποιούσαν απλά μοντέλα μορφοποίησης της εισερχόμενης κίνησης τα οποία βασίζονταν στο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Αυτός ο τρόπος διαχείρισης της τηλεπικοινωνιακής κίνησης ήταν τότε ρεαλιστικός καθώς τα δίκτυα υποστήριζαν μόνο την υπηρεσία μετάδοσης φωνής. Αντιθέτως, τα σύγχρονα ασύρματα συστήματα επικοινωνιών υποστηρίζουν πλήθος διαφορετικών υπηρεσιών με αποτέλεσμα την ανάγκη κατάταξης της εισερχόμενης κίνησης σε διακριτές κατηγορίες. Κάθε κατηγορία τηλεπικοινωνιακής κίνησης αναφέρεται με τον όρο κλάση υπηρεσιών. Η διαδικασία που ακολουθείται για να καθοριστεί σε ποια κατηγορία ανήκει κάθε εισερχόμενη κλήση ονομάζεται κατηγοριοποίηση των κλήσεων. Κάθε κλάση υπηρεσιών έχει διαφορετικές απαιτήσεις ως προς τα χαρακτηριστικά του δικτύου (ρυθμός μετάδοσης δεδομένων, μέγιστη επιτρεπτή καθυστέρηση μετάδοσης των

πακέτων, διάρκεια κλήσης κ.α.) οι οποίες εγκυβόνται το επιθυμητό επίπεδο παροχής υπηρεσιών. Επομένως, οι κλήσεις των χρηστών πρέπει να αντιμετωπίζονται διαφορετικά από το δίκτυο ανάλογα με την κλάση υπηρεσιών στην οποία ανήκουν. Στην περίπτωση αυτή, μολονότι οι μηχανισμοί ελέγχου του δικτύου είναι ιδιαίτερα σύνθετοι, οι λειτουργίες παροχής ποιότητας υπηρεσιών και διαχείρισης των πόρων του δικτύου επιτρέπουν μεγαλύτερο βαθμό ευελιξίας. Σημαντικό πλεονέκτημα του συγκεκριμένου τρόπου διαχείρισης της εισερχόμενης κίνησης αποτελεί το διαφορετικό επίπεδο προτεραιότητας που παρέχεται στις διάφορες κλήσεις ανάλογα με την κλάση υπηρεσιών στην οποία ανήκουν. Κάθε επίπεδο προτεραιότητας είναι άμεσα συνδεδεμένο με τα χαρακτηριστικά του επιπέδου ποιότητας παροχής υπηρεσιών της αντίστοιχης κλάσης υπηρεσιών, την τιμολογιακή πολιτική που εφαρμόζεται από τον πάροχο και την αντίστοιχη συμφωνία στάθμης των παρεχόμενων υπηρεσιών. Η κατηγοριοποίηση των εισερχόμενων κλήσεων διευκολύνει το διαχειριστή του δικτύου να μεταχειρίζεται κατά διαφορετικό τρόπο κλήσεις που ανήκουν σε διαφορετικές κλάσεις υπηρεσιών ως προς τον απαιτούμενο ρυθμό μετάδοσης, τη διαδικασία λήψης απόφασης για την αποδοχή της κλήσης, την τιμολογιακή πολιτική που εφαρμόζεται κ.α.

Ένας συνήθης διαχωρισμός των εισερχόμενων κλήσεων που εφαρμόζεται συχνά στα ασύρματα συστήματα επικοινωνιών κατηγοριοποιεί τις κλήσεις σε κλήσεις πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου με βάση τις απαιτήσεις ως προς την καθυστέρηση μετάδοσης (34). Αντίστοιχα προς το αν η σχετική απαίτηση είναι αυστηρή ή χαλαρή, μια κλήση χαρακτηρίζεται ως πραγματικού ή μη πραγματικού χρόνου. Στα σύγχρονα συστήματα ασυρμάτων επικοινωνιών που υποστηρίζουν πολυμεσικές εφαρμογές απαιτείται μια ευρύτερη ταξινόμηση των κλήσεων του δικτύου σε περισσότερες κλάσεις υπηρεσιών π.χ. φωνητικές, μετάδοσης μηνυμάτων, περιήγησης ιστού, μεταφοράς αρχείων, τηλεσυνεδρίασης κ.α. Επομένως, εκτός από την καθυστέρηση πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και άλλες παράμετροι, όπως ο απαιτούμενος ρυθμός μετάδοσης και η διάρκεια της κλήσης (28).

2.3. Επισκόπηση των Αλγόριθμων Αποδοχής Κλήσεων

Στόχος των αλγόριθμων αποδοχής κλήσεων είναι η λήψη απόφασης για την αποδοχή ή μη ενός χρήστη από το δίκτυο. Η απόφαση αυτή βασίζεται σε πλήθος κριτηρίων τα οποία εξαρτώνται από τις προδιαγραφές του επιπέδου ποιότητας υπηρεσιών της κλάσης

υπηρεσιών στην οποία ανήκει η κλήση. Έχουν προταθεί διάφοροι αλγόριθμοι αποδοχής κλήσεων οι οποίοι διαφέρουν είτε ως προς τα χαρακτηριστικά του δικτύου στα οποία βασίζουν την απόφασή τους ή ως προς την αρχιτεκτονική τους. Στις υποενότητες που ακολουθούν εξετάζονται τα χαρακτηριστικά του δικτύου που λαμβάνονται υπόψη για τη λήψη της απόφασης αποδοχής ενώ στη συνέχεια αναλύεται ο τρόπος ταξινόμησης των αλγόριθμων αποδοχής κλήσεων σε κατηγορίες.

2.3.1. Κριτήρια Αποδοχής

Οι προδιαγραφές για τα χαρακτηριστικά του δικτύου που πρέπει να ικανοποιούνται για να προσφερθεί αποδεκτό επίπεδο ποιότητας υπηρεσιών είναι καθορισμένες, σε αντίθεση με τις τιμές των παραμέτρων του δικτύου οι οποίες μεταβάλλονται με το χρόνο. Επομένως, ο αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων που χρησιμοποιείται κατά περίπτωση πρέπει να εξασφαλίζει ότι το δίκτυο θα είναι σε θέση να προσφέρει αποδεκτό επίπεδο παροχής υπηρεσιών καθ' όλη τη διάρκεια μιας κλήσης. Τα συνήθη κριτήρια αποδοχής κλήσεων περιγράφονται αναλυτικά στη συνέχεια.

- **Φόρτος δικτύου/Πόροι του δικτύου (Network load/resources):** Οι περιορισμένοι πόροι που διαθέτει ένα σύστημα ασυρμάτων επικοινωνιών αποτελούν το σημαντικότερο παράγοντα που πρέπει να ληφθεί υπόψη για την αποδοχή μιας κλήσης. Στην περίπτωση αυτή, εκτιμάται το φορτίο του δικτύου όπως αναμένεται να προκύψει μετά την αποδοχή μιας κλήσης και εφόσον αυτό βρίσκεται κάτω από συγκεκριμένο κατώφλι τότε η κλήση γίνεται αποδεκτή, ειδάλλως αποκλείεται. Οι περισσότεροι αλγόριθμοι αποδοχής κλήσεων χειρίζονται διαφορετικά τις κλήσεις που προέρχονται από διαπομπή σε σχέση με τις νέες κλήσεις για το λόγο αυτό ένα τμήμα των πόρων/καναλιών συνήθως δεσμεύεται για την αποκλειστική εξυπηρέτηση κλήσεων από διαπομπή, με αποτέλεσμα τα κριτήρια αποδοχής νέων κλήσεων να είναι αυστηρότερα σε σχέση με αυτά των κλήσεων από διαπομπή. Αυτό έχει ως συνέπεια την υιοθέτηση υψηλότερων κατωφλίων αποδοχής για τις νέες κλήσεις σε σχέση με τις κλήσεις από διαπομπή. Οι αλγόριθμοι αποδοχής κλήσεων που χρησιμοποιούν αυτήν την τεχνική καλούνται αλγόριθμοι δέσμευσης καναλιών (Guard Channel Schemes, GC Schemes) (35).
- **Κατάσταση διαύλου/Ποιότητα ζεύξης:** Όλα τα συστήματα ασυρμάτων επικοινωνιών χρησιμοποιούν ως κοινό μέσο μετάδοσης τον αέρα. Ο

ασύρματος δίαυλος υπόκειται σε παρεμβολές από το ίδιο ή από άλλα ασύρματα συστήματα επικοινωνιών και κινητά τερματικά που βρίσκονται σε λειτουργία κοντά στην περιοχή όπου βρίσκεται ο χρήστης ή/και ο σταθμός βάσης. Η ποσοτικοποίηση των παρεμβολών γίνεται μέσω μετρήσεων της ισχύος λήψης του σήματος στο κινητό τερματικό και της ισχύος των παρεμβολών. Ο αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων αποδέχεται μία νέα κλήση εφόσον εκτιμά ότι η ποιότητα του ασύρματου διαύλου μπορεί να διατηρηθεί πάνω από ένα καθορισμένο κατώφλι. Η ποιότητα του ασύρματου διαύλου είναι το αποτέλεσμα μιας συνάρτησης των ποιοτικών χαρακτηριστικών του, όπως ο σηματοθορυβικός λόγος, ο λόγος σήματος προς παρεμβολή (Signal to Interference Ratio, SIR) κ.α. Με βάση αυτή τη συνάρτηση ορίζεται η τιμή του κατωφλίου η οποία αντιστοιχεί στις ελάχιστες επιτρεπτές τιμές των παραμέτρων της. Αν η αποδοχή της κλήσης έχει ως αποτέλεσμα την ελάττωση της ποιότητας του καναλιού που πρόκειται να αποδοθεί στο χρήστη ή άλλων ενεργών καναλιών κάτω από κάποιο ορισμένο επίπεδο, η εισερχόμενη κλήση δε γίνεται αποδεκτή. Οι αλγόριθμοι αποδοχής κλήσεων που βασίζονται στο κριτήριο αποδοχής στην ποιότητα του ασύρματου διαύλου χρησιμοποιούν την τιμή του λόγου σήματος προς παρεμβολή ή του λόγου σήματος προς θόρυβο και παρεμβολή (Signal to Noise and Interference Ratio, SNIR) για τη λήψη απόφασης περί αποδοχής μιας κλήσης ή όχι (36).

- Απαιτήσεις ως προς το επίπεδο ποιότητας υπηρεσιών/Περιεχόμενο της κλήσης: Κάθε εισερχόμενη κλήση απαιτεί από το δίκτυο αποδεκτό επίπεδο ποιότητας υπηρεσιών ως προς διάφορα κρίσιμα μεγέθη, όπως π.χ. η μέση καθυστέρηση, ο ρυθμός μετάδοσης, το ποσοστό λαθών μετάδοσης. Για το λόγο αυτό, οι κλήσεις ταξινομούνται σε κλάσεις υπηρεσιών των οποίων τα κριτήρια αποδοχής διαφέρουν με κριτήριο το απαιτούμενο επίπεδο ποιότητας υπηρεσιών και την τρέχουσα κατάσταση του δικτύου. Επομένως, κάθε αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων υποστηρίζει συγκεκριμένο πλήθος διαφορετικών κλάσεων υπηρεσιών. Η απλούστερη περίπτωση απαντάται στα ασύρματα συστήματα 2G των οποίων οι αλγόριθμοι αποδοχής κλήσεων υποστηρίζουν μόνο μία κλάση υπηρεσιών, τις υπηρεσίες φωνής. Η αυξανόμενη ανάγκη εξυπηρέτησης μεγαλύτερου εύρους υπηρεσιών και η εξέλιξη νέων τεχνολογιών οδήγησε στην ανάπτυξη των ασύρματων συστημάτων 2,5G, 3G και των δικτύων επόμενης γενιάς (Next Generation

Networks, NGN) τα οποία υποστηρίζουν πολλαπλές κλάσεις υπηρεσιών (37; 38). Για το λόγο αυτό, τα τελευταία χρόνια έχουν προταθεί εξελιγμένοι αλγόριθμοι αποδοχής κλήσεων οι οποίοι διακρίνουν τις εισερχόμενες κλήσεις σε κλάσεις υπηρεσιών ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του απαιτούμενου επιπέδου ποιότητας υπηρεσιών τους, τα οποία λαμβάνονται υπόψη κατά τη διαδικασία λήψης της απόφασης αποδοχής/αποκοπής (28; 39). Η σχεδίαση αλγόριθμων αποδοχής κλήσεων καθίσταται δυσκολότερη και πιο απαιτητική καθώς αυξάνει το πλήθος των κλάσεων υπηρεσιών που υποστηρίζονται με αποτέλεσμα την αύξηση της πολυπλοκότητας και των προβλημάτων που αντιμετωπίζονται κατά την εφαρμογή τους στην πράξη.

- Προτεραιότητα της κλήσης/Προτεραιότητα της κλάσης υπηρεσιών: Η απόδοση διαφορετικών επιπέδων προτεραιότητας στις διάφορες κλάσεις υπηρεσιών αποτελεί συνήθη μέθοδο για τα συστήματα ασυρμάτων επικοινωνιών που υποστηρίζουν πολλαπλές κλάσεις υπηρεσιών. Η αποδοχή κλήσεων είναι άμεσα συνδεδεμένη με την ιεράρχηση των κλάσεων υπηρεσιών, με αποτέλεσμα οι όροι αποδοχής κλήσεων χαμηλής προτεραιότητας είναι αυστηρότεροι σε σύγκριση με κλήσεις υψηλής προτεραιότητας. Επομένως, στην περίπτωση όπου το δίκτυο υποστηρίζει υπηρεσίες φωνής και μεταφοράς δεδομένων, οι οποίες κατατάσσονται στις υπηρεσίες πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου αντίστοιχα, η αποδοχή μιας φωνητικής κλήσης έχει μεγαλύτερη πιθανότητα να γίνει αποδεκτή έναντι μιας κλήσης για μεταφορά δεδομένων. Επιπλέον, μπορούν να αποδοθούν διαφορετικές προτεραιότητες σε κλήσεις της ίδιας κλάσης υπηρεσιών ανάλογα με την κατηγορία χρηστών στην οποία ανήκει ο χρήστης με βάση το συμβόλαιό του. Ιδιαίτερη περίπτωση αποτελούν οι κλήσεις από διαπομπή και οι κλήσεις εκτάκτου ανάγκης (emergency calls) στις οποίες αποδίδεται υψηλός βαθμός προτεραιότητας ανεξάρτητα από την κλάση υπηρεσιών και την κατηγορία χρήστη στην οποία ανήκουν (33).
- Χαρακτηριστικά κινητικότητας των χρηστών: Η μεταβολή της εισερχόμενης κίνησης σε μια κυψέλη και γενικότερα σε ένα ασύρματο δίκτυο λόγω της κινητικότητας των χρηστών είναι δύσκολο να προβλεφθεί με ακρίβεια. Καθώς οι χρήστες που πραγματοποιούν μια κλήση κινούνται και διασχίζουν τα νοητά όρια των κυψελών αλλάζουν ταυτόχρονα σταθμό βάσης από τον οποίο εξυπηρετούνται. Οι κλήσεις αυτές αποτελούν κλήσεις από διαπομπή για τη

νέα κυψέλη που καλείται να τις εξυπηρετήσει, γεγονός που σημαίνει ότι ο αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων τους αποδίδει αυτόματα το μέγιστο βαθμό προτεραιότητας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη χρήση ελαστικότερων κριτηρίων αποδοχής των κλήσεων από διαπομπή σε σχέση με τις νέες κλήσεις. Όταν η νέα κυψέλη δε διαθέτει τους απαραίτητους πόρους για να εξυπηρετήσει μια κλήση από διαπομπή, αυτή απορρίπτεται αυξάνοντας την αντίστοιχη πιθανότητα απόρριψης κλήσεων. Οι συγκεκριμένοι αλγόριθμοι αποδοχής κλήσεων εστιάζουν στην εφαρμογή διαφορετικών κριτηρίων αποδοχής μεταξύ νέων κλήσεων και κλήσεων από διαπομπή σε αντίθεση με τους αλγόριθμους αποδοχής κλήσεων πολλαπλών κλάσεων υπηρεσιών οι οποίοι εφαρμόζουν διαφορετικά κριτήρια αποδοχής μεταξύ κλήσεων διαφορετικών κλάσεων υπηρεσιών (32).

- Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων: Οι αλγόριθμοι αποδοχής κλήσεων εγγυώνται ότι οι κλήσεις που γίνονται αποδεκτές θα διαθέτουν τουλάχιστον τον ελάχιστο απαιτούμενο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Ασφαλώς, κάθε κλάση υπηρεσιών έχει ένα άνω όριο ως προς τον απαιτούμενο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων (40). Ο αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων προσπαθεί να αποδώσει σε κάθε κλήση που γίνεται αποδεκτή το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων μεταξύ της ελάχιστης και μέγιστης απαίτησης, βασίζοντας την απόφασή του στο πλήθος των πόρων του δικτύου που είναι διαθέσιμοι κατά τη λήψη της απόφασης αποδοχής/αποκοπής μιας κλήσης. Ταυτοχρόνως, προσπαθεί να μειώσει στο ελάχιστο το ποσοστό μη αποδοχής.

Πολλές φορές οι αλγόριθμοι αποδοχής κλήσεων έχουν ενσωματωμένη μια λειτουργία επαναδιαπραγμάτευσης του επιπέδου ποιότητας υπηρεσιών (QoS renegotiation) των κλήσεων που βρίσκονται σε εξέλιξη αποσκοπώντας στην αποδοτικότερη χρήση των πόρων του δικτύου και την ελαχιστοποίηση της πιθανότητας μη αποδοχής. Η λειτουργία αυτή ενεργοποιείται όταν οι διαθέσιμοι πόροι του δικτύου δεν επαρκούν για την αποδοχή μιας εισερχόμενης κλήσης. Η τεχνική της επαναδιαπραγμάτευσης του επιπέδου ποιότητας υπηρεσιών περιλαμβάνει τη μείωση του ρυθμού μετάδοσης των κλήσεων που βρίσκονται σε εξέλιξη σε ένα χαμηλότερο επίπεδο το οποίο δεν υπολείπεται της ελάχιστης απαίτησης του επιπέδου ποιότητας υπηρεσιών για την αντίστοιχη κλάση υπηρεσιών. Κατ' αυτόν τον τρόπο εξοικονομούνται πόροι του δικτύου για την αποδοχή μιας εισερχόμενης κλήσης. Ο ρυθμός

μετάδοσης των κλήσεων που υπέστησαν υποβάθμιση μπορεί αργότερα να αποκατασταθεί ή ακόμα και να αυξηθεί σε σχέση με τον αρχικό εφόσον απελευθερωθούν πόροι του δικτύου λόγω τερματισμού άλλων κλήσεων.

- Βελτιστοποίηση των εσόδων του δικτύου: Η μεγιστοποίηση των εσόδων του δικτύου αποτελεί σημαντική απαίτηση κάθε αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων και επιτυγχάνεται με την αποδοτική χρήση των πόρων του δικτύου. Ωστόσο, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι αυστηροί περιορισμοί ως προς τη συνολική διαθέσιμη χωρητικότητα του δικτύου και τις εγγυήσεις για το επίπεδο παροχής υπηρεσιών που προσφέρει το δίκτυο στους χρήστες. Κάθε κλήση που γίνεται αποδεκτή από το δίκτυο δε σχετίζεται μόνο με την απολαβή που προέρχεται από τα έσοδα του παρόχου, αλλά και με αντίστοιχη ποινή στην περίπτωση που μειωθεί το επίπεδο ποιότητας υπηρεσιών των κλήσεων που βρίσκονται σε εξέλιξη. Εκτός από τα έσοδα η απολαβή του δικτύου μπορεί να σχετίζεται και με το πλήθος των εξυπηρετούμενων χρηστών ή/και με το βαθμό αποδοτικής χρησιμοποίησης της διαθέσιμης χωρητικότητας του δικτύου. Αντιθέτως, η ποινή μπορεί να σχετίζεται με τη μείωση του προσφερόμενου επιπέδου ποιότητας υπηρεσιών. Επομένως, μπορεί να γραφεί η επόμενη ποιοτική σχέση για το γενικό ορισμό της απολαβής του δικτύου

$$\text{Απολαβή} = f(\text{εσόδων}) + g(\text{πλήθους χρηστών}) - h(\text{μείωσης QoS}). \quad (2-1)$$

Ο προσδιορισμός της βέλτιστης σχέσης μεταξύ της απολαβής και της ποινής σε πραγματικό χρόνο αποτελεί ένα πολύπλοκο πρόβλημα (41). Οι αλγόριθμοι αποδοχής κλήσεων που βασίζονται σε τέτοιου τύπου κριτήρια καλούνται αλγόριθμοι αποδοχής κλήσεων με βελτιστοποίηση εσόδων (revenue optimization CAC schemes).

- Δικαιοσύνη κατανομής των διαθέσιμων πόρων του δικτύου: Οι αλγόριθμοι αποδοχής κλήσεων που βασίζονται στην απονομή διαφορετικών επιπέδων προτεραιότητας μεταξύ των χρηστών συχνά αντιμετωπίζουν σημαντικό πρόβλημα καθώς οι υψηλής προτεραιότητας κλήσεις ενδεχομένως μονοπωλούν τους πόρους του δικτύου (34). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του ρυθμού και της αντίστοιχης πιθανότητας μη αποδοχής εισερχόμενων κλήσεων χαμηλής προτεραιότητας. Ωστόσο, το φαινόμενο αυτό δεν παρατηρείται μόνο μεταξύ κλήσεων διαφορετικών κλάσεων υπηρεσιών που χαρακτηρίζονται από διαφορετική προτεραιότητα, αλλά και μεταξύ

κλήσεων της ίδιας κλάσης υπηρεσιών ανάλογα με τα χαρακτηριστικά κινητικότητας των χρηστών ή/και τη συμφωνία στάθμης των παρεχόμενων υπηρεσιών. Οι αλγόριθμοι αποδοχής κλήσεων οφείλουν να λαμβάνουν πρόνοια για την εξασφάλιση δίκαιης αντιμετώπισης των εισερχόμενων κλήσεων από το δίκτυο. Με βάση χαρακτηριστικές παραμέτρους του δικτύου όπως ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων και η πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων πρέπει να εξασφαλίζουν ότι καμία κλάση υπηρεσιών δε θα μονοπωλήσει τους πόρους του δικτύου.

2.3.2. Κατηγοριοποίηση των Αλγόριθμων Αποδοχής Κλήσεων

Λόγω της μεγάλης σημασίας των αλγόριθμων αποδοχής κλήσεων για την ομαλή λειτουργία ενός ασύρματου δικτύου επικοινωνιών και την παροχή εγγυημένου επιπέδου ποιότητας υπηρεσιών, έχουν προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία πολλοί αλγόριθμοι αποδοχής κλήσεων, έκαστος των οποίων έχει διαφορετική δομή και τρόπο λειτουργίας (32). Η διάκριση των αλγόριθμων αποδοχής κλήσεων σε κατηγορίες βασίζεται κυρίως στα διαφορετικά κριτήρια που χρησιμοποιούνται για τη λήψη της απόφασης/αποκοπής μιας κλήσης ή/και στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της δομής κάθε αλγόριθμου. Τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται στους αλγόριθμους αποδοχής κλήσεων σχετίζονται συνήθως με τις παραμέτρους βάσει των οποίων προσδιορίζεται το επίπεδο ποιότητας υπηρεσιών. Όπως παρουσιάζεται στη συνέχεια, κάθε αρχιτεκτονική που χρησιμοποιείται από τους αλγόριθμους έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Η επιλογή μεταξύ των διαφορετικών σχεδιαστικών προτύπων που χρησιμοποιούνται στους αλγόριθμους αποδοχής κλήσεων γίνεται βάσει των χαρακτηριστικών της ασύρματης τεχνολογίας του δικτύου, του πλήθους των κλάσεων υπηρεσιών που υποστηρίζει, των γεωγραφικών ιδιαιτεροτήτων της περιοχής κάλυψης του δικτύου κ.α.

Σημαντικό χαρακτηριστικό σχεδίασης των αλγόριθμων αποδοχής κλήσεων είναι ο βαθμός συγκέντρωσης (grade of centralization), ο οποίος εξαρτάται από το σημείο στο οποίο λαμβάνεται η απόφαση αποδοχής/αποκοπής μιας κλήσης. Σύμφωνα με την παράμετρο αυτή, οι αλγόριθμοι διακρίνονται σε συγκεντρωτικούς (centralized), καταναμημένους (distributed) και συνεργατικούς (collaborative) (42).

Στους συγκεντρωτικούς αλγόριθμους, η απόφαση αποδοχής/αποκλεισμού μιας κλήσης λαμβάνεται στο κέντρο μεταγωγής συνδρομητών το οποίο είναι υπεύθυνο για τη

διαχείριση των κλήσεων των συνδρομητών του δικτύου (43). Στην περίπτωση αυτή, η πληροφορία για την κατάσταση της κυψέλης μεταφέρεται από κάθε σταθμό βάσης στο MSC όπου λαμβάνεται η απόφαση για την αποδοχή ή όχι μιας κλήσης και, στη συνέχεια, ενημερώνεται ο αντίστοιχος σταθμός βάσης για τον τρόπο με τον οποίο θα αποκριθεί στο αίτημα εξυπηρέτησης. Σημαντικό πλεονέκτημα των συγκεντρωτικών αλγόριθμων αποδοχής κλήσεων αποτελεί η αυξημένη επίδοση και αποτελεσματικότητα που επιτυγχάνουν, λόγω, κυρίως, του γεγονότος ότι έχουν πλήρη γνώση της κατάστασης όλων των κυψελών του δικτύου. Από την άλλη πλευρά, μειονέκτημα αποτελεί η αυξημένη πολυπλοκότητά τους και η απαίτηση για συνεχή επικοινωνία του MSC με όλους τους σταθμούς βάσης, γεγονός που επιβαρύνει το δίκτυο με πρόσθετη κίνηση. Επομένως, η εφαρμογή τους σε μεγάλα δίκτυα πολλαπλών κυψελών είναι πρακτικά αδύνατη.

Στους κατανεμημένους αλγόριθμους αποδοχής κλήσεων, η απόφαση για την αποδοχή/αποκοπή μιας κλήσης λαμβάνεται στο σταθμό βάσης ή από το ίδιο το κινητό τερματικό (44; 45). Πρέπει να σημειωθεί ότι στην τελευταία περίπτωση ο βαθμός συγκέντρωσης είναι ο ελάχιστος δυνατός. Κατ' αυτόν τον τρόπο, η απόφαση αποδοχής σε μια κυψέλη λαμβάνεται ανεξάρτητα από την κατάσταση των άλλων κυψελών του δικτύου. Οι κατανεμημένοι αλγόριθμοι παρουσιάζουν μεγαλύτερο βαθμό αξιοπιστίας σε σχέση με τους συγκεντρωτικούς αλγόριθμους. Επιπλέον, είναι ευκολότερη η εφαρμογή τους στην πράξη. Ωστόσο, μειονέκτημα των κατανεμημένων αλγόριθμων αποτελεί η μειωμένη επίδοση που επιτυγχάνουν λόγω άγνοιας της κατάστασης των γειτονικών κυψελών, πληροφορία που είναι διαθέσιμη μόνο στους συγκεντρωτικούς αλγόριθμους (46).

Οι συνεργατικοί αλγόριθμοι βασίζονται σε υβριδική σχεδίαση των αλγόριθμων, η οποία διαθέτει χαρακτηριστικά τόσο από συγκεντρωτικούς όσο και από κατανεμημένους αλγόριθμους (47). Στους συνεργατικούς αλγόριθμους η πληροφορία για την κατάσταση των κυψελών μεταδίδεται μεταξύ μόνο γειτονικών κυψελών. Εντούτοις, η απόφαση για τον τρόπο κατανομής των πόρων της κυψέλης και την αποδοχή/αποκλεισμός των κλήσεων λαμβάνεται στο σταθμό βάσης κάθε κυψέλης. Κατ' αυτόν τον τρόπο, οι συνεργατικοί αλγόριθμοι επιτυγχάνουν να συνδυάσουν πλεονεκτήματα των συγκεντρωτικών και κατανεμημένων αλγόριθμων. Ωστόσο, σημαντικό μειονέκτημα παραμένει η ανάγκη για ανταλλαγή πληροφορίας μεταξύ των κυψελών γεγονός που αυξάνει την κίνηση του δικτύου.

Οι αλγόριθμοι αποδοχής κλήσεων μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες ανάλογα προς το αν βασίζονται σε πρότυπα περιγραφής κίνησης (traffic descriptor based) ή

σε μετρήσεις της κατάστασης του δικτύου (measurement based) και ονομάζονται προληπτικοί (proactive) ή κατασταλτικοί (reactive), αντίστοιχα. Οι αλγόριθμοι της πρώτης κατηγορίας έχουν στη διάθεσή τους πρότυπα περιγραφής της κίνησης βάσει των οποίων υπολογίζουν αν η αποδοχή μιας νέας κλήσης θα έχει ως συνέπεια το συνολικό φορτίο της κυψέλης να υπερβεί τη χωρητικότητά της (48; 49; 50). Στην περίπτωση αυτή, η κλήση αποκλείεται, ειδάλλως γίνεται αποδεκτή. Την απλούστερη περίπτωση προληπτικού αλγόριθμου αποτελεί ο αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων Simple Sum που εξασφαλίζει ότι η συνολική απαίτηση σε πόρους των εξυπηρετούμενων κλήσεων δε θα υπερβεί τη χωρητικότητα της κυψέλης (28). Στην περίπτωση αυτή, για μια εισερχόμενη κλήση ισχύει

$$m + b \leq M, \quad (2-2)$$

όπου m είναι το σύνολο των κατειλημμένων πόρων της κυψέλης του δικτύου, b είναι η μέγιστη απαίτηση σε πόρους της εισερχόμενης κλήσης και M είναι η χωρητικότητα της κυψέλης. Ωστόσο, στα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών που υποστηρίζουν πολυμεσικές υπηρεσίες, η κίνηση έχει εκρηκτικά χαρακτηριστικά, με αποτέλεσμα οι αλγόριθμοι αποδοχής κλήσεων που χρησιμοποιούν πρότυπα περιγραφής κίνησης να υπερεκτιμούν τις απαιτήσεις των κλήσεων σε πόρους δικτύου. Αυτό συμβαίνει καθώς τα πρότυπα που εφαρμόζονται χρησιμοποιούν τις μέγιστες απαιτήσεις σε πόρους των κλήσεων. Από την άλλη πλευρά, οι αλγόριθμοι της κατηγορίας αυτής είναι απλοί και εύκολοι στην υλοποίηση και, για το λόγο αυτό, ευρέως διαδομένοι.

Οι αλγόριθμοι αποδοχής κλήσεων που βασίζονται σε μετρήσεις της κατάστασης του δικτύου, δηλαδή στις τρέχουσες τιμές των χαρακτηριστικών του, χρησιμοποιούν συνήθως το φορτίο της κυψέλης, το ποσοστό λανθασμένων μεταδόσεων πακέτων δεδομένων, το πλήθος των κατειλημμένων καναλιών κ.α. (51; 28; 52). Οι τιμές των χαρακτηριστικών αυτών μετρώνται μέσω κατάλληλου μηχανισμού που είναι ενσωματωμένος στον αλγόριθμο αποδοχής κλήσεων. Είναι φανερό ότι, οι μετρήσεις των χαρακτηριστικών του δικτύου αποτελούν περισσότερο αξιόπιστα στοιχεία της κατάστασής του από τα πρότυπα περιγραφής κίνησης· επομένως, οι κατασταλτικοί αλγόριθμοι είναι αποδοτικότεροι των προληπτικών αλγόριθμων. Ένα από τα σημαντικότερα τμήματα των αλγόριθμων αποδοχής κλήσεων που βασίζονται σε μετρήσεις του δικτύου αποτελεί ο μηχανισμός λήψης μετρήσεων (53). Οι τιμές των χαρακτηριστικών του δικτύου μπορεί να προκύπτουν είτε από απευθείας μετρήσεις που επαναλαμβάνονται περιοδικά σύμφωνα με μια πολιτική χρονικού παραθύρου (time window policy) (54), είτε από τον υπολογισμό μιας μέσης τιμής σύμφωνα με τρέχουσες ή/και παλαιότερες μετρήσεις (55; 56). Πρέπει να σημειωθεί ότι οι

περισσότεροι αλγόριθμοι αποδοχής κλήσεων στα ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών CDMA βασίζονται σε μετρήσεις της κατάστασης του δικτύου (57).

Ένας διαφορετικός τρόπος κατηγοριοποίησης των αλγόριθμων αποδοχής κλήσεων προκύπτει βάσει του όγκου της πληροφορίας που είναι διαθέσιμη κατά τη λήψη της απόφασης αποδοχής/αποκοπής μιας κλήσης. Η πληροφορία αυτή μπορεί να αφορά έναν ή περισσότερους από τους εξής παράγοντες: α) το πλήθος των διαθέσιμων ή κατειλημμένων καναλιών της κυψέλης, β) το σύνολο της χωρητικότητας που χρησιμοποιείται από τους χρήστες που εξυπηρετούνται, γ) τη μέση καθυστέρηση μετάδοσης πακέτου για κάθε εισερχόμενη ροή κίνησης κ.α. (42). Όταν η πληροφορία αυτή είναι διαθέσιμη για το σύνολο του δικτύου ο αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων χαρακτηρίζεται ως καθολικός (global) (58; 59). Οι καθολικοί αλγόριθμοι επιτυγχάνουν υψηλή απόδοση αλλά είναι εξαιρετικά πολύπλοκοι και απαιτούν τη μετάδοση μεγάλου όγκου πληροφορίας μεταξύ των κυψελών του δικτύου. Στην περίπτωση όπου η περιοχή ανταλλαγής πληροφορίας περιορίζεται μόνο μεταξύ γειτονικών κυψελών ο αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων χαρακτηρίζεται ως ημι-τοπικός (semi-local) (60; 61; 62). Οι ημι-τοπικοί αλγόριθμοι χαρακτηρίζονται από υψηλή απόδοση, είναι λιγότερο πολύπλοκοι από τους καθολικούς αλγόριθμους και εξακολουθούν να απαιτούν τη μετάδοση πληροφορίας μεταξύ των κυψελών. Σε αντίθεση με τις δύο προηγούμενες κατηγορίες αλγόριθμων, οι τοπικοί (local) αλγόριθμοι αποδοχής κλήσεων δεν απαιτούν την ανταλλαγή πληροφορίας μεταξύ των κυψελών (52; 44). Πλεονέκτημά τους αποτελεί ότι είναι απλοί και εύκολα υλοποιήσιμοι, ενώ μειονέκτημα αποτελεί η μειωμένη απόδοσή τους σε σχέση με τους καθολικούς και ημι-τοπικούς αλγόριθμους. Αυτό οφείλεται κυρίως στο ότι οι τοπικοί αλγόριθμοι αγνοούν την τρέχουσα εξυπηρετούμενη κίνηση των γειτονικών κυψελών με συνέπεια να μην μπορούν να προβλέψουν την κίνηση από διαπομπή που αναμένεται σε κάθε κυψέλη.

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν διάφοροι αλγόριθμοι αποδοχής κλήσεων οι οποίοι επιτυγχάνουν τη βέλτιστη απόφαση βάσει των κριτηρίων που λαμβάνουν υπόψη τους και ονομάζονται βέλτιστοι (optimal) αλγόριθμοι αποδοχής κλήσεων (63; 64; 65). Ωστόσο, οι αλγόριθμοι αυτοί απαιτούν τεράστια υπολογιστική ισχύ, λόγω της μεγάλης κλίμακας του προβλήματος που επιλύουν και των πολλών παραμέτρων που το επηρεάζουν, και αρκετό χρόνο για τον υπολογισμό του αποτελέσματος. Αν συνδυαστούν τα προηγούμενα με το γεγονός ότι η απόφαση αποδοχής/αποκλεισμού μιας κλήσης πρέπει να λαμβάνεται αμέσως μόλις κατατεθεί το αίτημα εξυπηρέτησης μιας κλήσης, καθίσταται προφανές ότι η εφαρμογή των βέλτιστων αλγόριθμων αποδοχής κλήσεων είναι αδύνατη στην πράξη.

Εναλλακτική λύση των βέλτιστων αλγόριθμων αποτελούν οι ημι-βέλτιστοι (near-optimal/sub-optimal) αλγόριθμοι αποδοχής κλήσεων που είναι λιγότερο πολύπλοκοι σε σχέση με τους βέλτιστους αλγόριθμους και έχουν τη δυνατότητα να καταλήγουν σε απόφαση σε πραγματικό χρόνο. Εντούτοις, η απόφαση στην οποία καταλήγουν οι ημι-βέλτιστοι αλγόριθμοι χαρακτηρίζεται ως σχεδόν βέλτιστη (near optimal solution) και προκύπτει χρησιμοποιώντας διάφορες προσεγγιστικές μεθόδους, όπως οι ευριστικές συναρτήσεις (heuristic functions) που αποσκοπούν στη μείωση της πολυπλοκότητας του προβλήματος (58; 66).

Ιδιαίτερη κατηγορία αλγόριθμων αποδοχής κλήσεων αποτελούν αυτοί που διακρίνουν τις ζεύξεις uplink και downlink με κριτήριο το συνολικό ρυθμό μετάδοσής τους (36; 49; 67; 68). Στα παλαιότερα δίκτυα μια διαφοροποίηση για τις δύο αυτές ζεύξεις δεν είχε νόημα καθώς η κίνηση για τις υποστηριζόμενες υπηρεσίες, κατά κύριο λόγο υπηρεσίες φωνής, ήταν συμμετρική κίνηση. Ωστόσο, οι πολυμεσικές υπηρεσίες που προσφέρονται από τα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών χαρακτηρίζονται από ασύμμετρη κίνηση μεταξύ των ζεύξεων uplink και downlink. Αν χρησιμοποιηθούν αλγόριθμοι αποδοχής κλήσεων που κατανέμουν ίσο πλήθος πόρων και στις δύο ζεύξεις της κλήσης, είναι επόμενο η επίδοση των αλγόριθμων να περιορίζεται από την ζεύξη downlink, καθώς αυτή είναι που έχει κατά κανόνα υψηλότερες απαιτήσεις σε πόρους του δικτύου σε σχέση με τη ζεύξη uplink (69). Στην περίπτωση αυτή, οι πόροι του δικτύου δε χρησιμοποιούνται αποδοτικά, υπάρχει σπάταλη διαχείριση του εύρους ζώνης που έχει ανατεθεί στο ασύρματο δίκτυο επικοινωνιών και η συνολική επίδοση του αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων είναι χαμηλή. Για το λόγο αυτό, έχουν προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία αρκετοί αλγόριθμοι αποδοχής κλήσεων οι οποίοι εξετάζουν ταυτόχρονα και τις δύο ζεύξεις, uplink και downlink, ως προς την ικανοποίηση των κριτηρίων που χρησιμοποιούνται για την αποδοχή μιας κλήσης από το δίκτυο. Όταν το κριτήριο αποδοχής κλήσεων αποτελεί το ότι το σύνολο της εξυπηρετούμενης κίνησης δεν πρέπει να υπερβαίνει τη χωρητικότητα της κυψέλης, ένας αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων που διακρίνει τις δύο ζεύξεις, uplink και downlink, αποδέχεται μια κλήση εφόσον οι διαθέσιμοι πόροι της κυψέλης επαρκούν για την ικανοποίηση των απαιτήσεων και των δυο ζεύξεων της κλήσης.

Η κατηγοριοποίηση των αλγόριθμων μπορεί να βασιστεί και σε άλλα κριτήρια και χαρακτηριστικά (56; 70; 71; 72). Μια συνοπτική περιγραφή των σημαντικότερων κατηγοριών, οι περισσότερες από τις οποίες περιγράφηκαν προηγουμένως, μαζί με τα βασικά χαρακτηριστικά τους παρουσιάζεται στον Πίνακα 2-1.

Κριτήριο Κατηγοριοποίησης	Επιλογές Σχεδίασης	Βασική Διαφοροποίηση	Σχόλια και Παρατηρήσεις
Βαθμός Συγκέντρωσης (Grade of Centralization)	Συγκεντρωτικοί (Centralized)	Οι αλγόριθμοι αποδοχής κλήσεων διακρίνονται με κριτήριο το σημείο του δικτύου όπου λαμβάνεται η απόφαση αποδοχής/αποκοπής μιας κλήσης.	Η εφαρμογή των συγκεντρωτικών αλγόριθμων αποδοχής κλήσεων είναι πολύ δύσκολη στην πράξη. Οι καταναμημένοι αλγόριθμοι αποδοχής κλήσεων είναι λιγότερο αποδοτικοί σε σχέση με τις άλλες δύο κατηγορίες.
	Καταναμημένοι (Distributed)		
	Συνεργατικοί (Collaborative)		
Είδος Πληροφορίας (Action Type)	Χρήση προτύπων περιγραφής κίνησης (proactive)	Οι αλγόριθμοι αποδοχής κλήσεων ταξινομούνται ανάλογα με το αν κάνουν εκτίμηση ή χρησιμοποιούν μετρήσεις των χαρακτηριστικών του δικτύου.	Η υλοποίηση των αλγόριθμων αποδοχής κλήσεων βάσει προτύπων περιγραφής κίνησης είναι πολύ εύκολη. Οι αλγόριθμοι αποδοχής κλήσεων που χρησιμοποιούν μετρήσεις των χαρακτηριστικών του δικτύου απαιτούν τις τιμές αυτές σε πραγματικό χρόνο.
	Χρήση μετρήσεων των χαρακτηριστικών του δικτύου (reactive)		

Έλεγχος Αποδοχής Κλήσεων, Κατανομή Πόρων και Διαχείριση Κινητικότητας σε Ασύρματα Δίκτυα

<p align="center">Βαθμός Διαθεσιμότητας Πληροφορίας (Information Availability Level)</p>	<p align="center">Καθολικός (Global)</p>	<p>Η κατηγοριοποίηση των αλγόριθμων αποδοχής κλήσεων βασίζεται στην έκταση της περιοχής για την οποία είναι διαθέσιμη η πληροφορία της κατάστασης του δικτύου.</p>	<p>Η μετάβαση από τους καθολικούς προς τους τοπικούς αλγόριθμους αποδοχής κλήσεων συνοδεύεται από μείωση της πολυπλοκότητας αλλά και της επίδοσής τους.</p>
	<p align="center">Ημι-τοπικός (Semi-local)</p>		
	<p align="center">Τοπικός (Local)</p>		
<p align="center">Βαθμός Βέλτιστης Απόδοσης (Grade of Optimality)</p>	<p align="center">Βέλτιστοι (Optimal)</p>	<p>Οι αλγόριθμοι αποδοχής κλήσεων διακρίνονται βάσει της τεχνικής υπολογισμού της απόφασης αποδοχής/αποκοπής.</p>	<p>Οι ημι-βέλτιστοι αλγόριθμοι αποδοχής κλήσεων είναι λιγότερο πολύπλοκοι από τους βέλτιστους.</p>
	<p align="center">Ημι-βέλτιστοι (Near-optimal/Sub-optimal)</p>		
<p align="center">Πρότυπο Εισερχόμενης Κίνησης (Traffic Model)</p>	<p align="center">Ρυθμός εισερχόμενης κίνησης (Incoming Rate)</p>	<p>Οι αλγόριθμοι αποδοχής κλήσεων διακρίνονται βάσει του είδους της κατανομής που χρησιμοποιείται για την περιγραφή των εισερχόμενων κλήσεων.</p>	<p>Η ανάλυση διευκολύνεται στην περίπτωση όπου υιοθετηθούν η κατανομή Poisson για την περιγραφή του ρυθμού των εισερχόμενων κλήσεων και η εκθετική κατανομή για την περιγραφή του χρόνου εξυπηρέτησης των κλήσεων.</p>
	<p align="center">Χρόνος εξυπηρέτησης (Service Time)</p>		

Χωρική Κατανομή των Χρηστών (Spatial Distribution of Users)	Ομοιόμορφοι (Uniform)	Η διαφοροποίηση των αλγόριθμων αποδοχής κλήσεων βασίζεται στη θέση, την ταχύτητα και την κατεύθυνση κίνησης του κινητού τερματικού.	Οι ομοιόμορφοι και μη ομοιόμορφοι αλγόριθμοι αποδοχής κλήσεων χρησιμοποιούνται από ομογενή και μη ομογενή ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών.
	Μη ομοιόμορφοι (Non-uniform)		
Όγκος Πληροφορίας (Information Size)	Ανά κυψέλη (Per Cell)	Οι αλγόριθμοι αποδοχής κλήσεων διακρίνονται βάσει του όγκου πληροφορίας που είναι διαθέσιμη κατά τη διαδικασία λήψης της απόφασης αποδοχής/αποκοπής μιας κλήσης.	Οι αλγόριθμοι αποδοχής κλήσεων που βασίζονται στην ανά κυψέλη διαθέσιμη πληροφορία είναι περισσότερο πολύπλοκοι και αποδοτικότεροι των αλγόριθμων αποδοχής κλήσεων που βασίζονται στην ανά κλήση διαθέσιμη πληροφορία.
	Ανά κλήση (Per Call)		
Είδος Ζεύξης (Link under Consideration)	Ζεύξη Uplink	Η διαφοροποίηση των αλγόριθμων αποδοχής κλήσεων βασίζεται στη χρήση διαφορετικών κριτηρίων αποδοχής για τις δύο ζεύξεις, uplink και downlink, μιας κλήσης.	Τα κριτήρια που εφαρμόζονται για την ζεύξη uplink είναι αυστηρότερα έναντι των αντίστοιχων κριτηρίων για τη ζεύξη downlink λόγω των περιορισμών για την κατανάλωση ενέργειας στα κινητά τερματικά.
	Ζεύξη Downlink		

Πίνακας 2-1: Κατηγοριοποίηση των αλγόριθμων αποδοχής κλήσεων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Αλγόριθμοι Αποδοχής Κλήσεων σε Ασύρματα Δίκτυα Επικοινωνιών

3.1. Εισαγωγή

Ο έλεγχος αποδοχής κλήσεων είναι μια από τις σημαντικότερες λειτουργίες που επιτελείται σε ένα σύστημα κινητών επικοινωνιών. Η χρήση αποδοτικών αλγόριθμων αποδοχής κλήσεων είναι ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν κατά το σχεδιασμό του δικτύου. Η εξέλιξη των ήδη υπαρχόντων αλγόριθμων αποδοχής κλήσεων και η δημιουργία νέων αποτελεί μια πρόκληση για τους ερευνητές στον τομέα των κινητών επικοινωνιών. Στην παρούσα διατριβή προτείνεται ένας νέος αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων ο οποίος ονομάζεται πιθανοτικός αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων (Probabilistic Call Admission Control Scheme) και υπερτερεί έναντι όσων έχουν προταθεί μέχρι τώρα στη διεθνή βιβλιογραφία καθώς επιτυγχάνει βελτιωμένη απόδοση και, παράλληλα, εξασφαλίζει το επιθυμητό επίπεδο ποιότητας υπηρεσιών.

Στις πρώτες ενότητες του κεφαλαίου παρουσιάζονται δύο πολύ γνωστοί αλγόριθμοι αποδοχής κλήσεων, οι οποίοι αποτελούν τη βάση του συνόλου σχεδόν των σχετικών αλγόριθμων αποδοχής κλήσεων που έχουν προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία. Για κάθε

αλγόριθμο παρουσιάζεται η μέθοδος εξαγωγής των πιθανοτήτων μη αποδοχής κλήσεων καταλήγοντας σε τελικές σχέσεις για τον ακριβή υπολογισμό τους. Η ανάλυση κάθε αλγόριθμου πραγματοποιείται για τέσσερις περιπτώσεις οι οποίες καλύπτουν το σύνολο των περιπτώσεων που απασχολεί τη διεθνή επιστημονική κοινότητα, καλύπτοντας ακόμα και τη γενικότερη περίπτωση εφαρμογής των αλγόριθμων αυτών. Στη συνέχεια αναλύεται ο προτεινόμενος αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων και αναδεικνύονται τα πλεονεκτήματά του έναντι των άλλων αλγόριθμων. Στην τελευταία ενότητα μελετώνται τρεις περιπτώσεις για τις οποίες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα, αριθμητικά και προσομοίωσης, της επίδοσης του προτεινόμενου αλγόριθμου και της συγκριτικής υπεροχής του έναντι των παλαιότερων.

3.2. Προδιαγραφές Χωρητικότητας και Χαρακτηριστικά

Κίνησης του Δικτύου

Όλοι οι αλγόριθμοι αποδοχής κλήσεων και οι μέθοδοι κατανομής των πόρων ενός δικτύου υιοθετούν συγκεκριμένες υποθέσεις ώστε να είναι εφικτή η παρουσίαση μιας ενιαίας ανάλυσης. Τα περισσότερα μοντέλα που χρησιμοποιούνται στα σύγχρονα κυψελωτά συστήματα ασυρμάτων επικοινωνιών αποτελούν επέκταση αυτών που χρησιμοποιούνται στη θεωρία κίνησης επικοινωνιών (communication traffic theory). Ωστόσο, τα μοντέλα αυτά αφορούν κυρίως σταθερά δίκτυα επικοινωνιών αγνοώντας σημαντικές παραμέτρους, όπως για παράδειγμα η δυνατότητα των δικτύων για υποστήριξη κινητικότητας των χρηστών. Εξάλλου, τα ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών υποστηρίζουν πλέον νέες υπηρεσίες πολυμεσικού περιεχομένου οι οποίες έχουν αυξημένες απαιτήσεις ως προς τα χαρακτηριστικά της απαιτούμενης ποιότητας υπηρεσιών. Επομένως, η τηλεπικοινωνιακή κίνηση των σύγχρονων ασυρμάτων συστημάτων επικοινωνιών δεν προσεγγίζεται ικανοποιητικά από τα υπάρχοντα μοντέλα, με αποτέλεσμα να ανακύπτει η ανάγκη τροποποίησής τους ή ανάπτυξης νέων βάσει διαφορετικών υποθέσεων.

Τα σύγχρονα ασύρματα συστήματα επικοινωνιών αποτελούνται από πολλές διασυνδεδεμένες κυψέλες το πλήθος των οποίων θα δηλώνεται στη συνέχεια με το σύμβολο J . Για την εξυπηρέτηση των χρηστών κάθε κυψέλη διαθέτει συγκεκριμένους πόρους. Στα κλασικά κυψελωτά συστήματα το συνολικό εύρος ζώνης που διαθέτει κάθε κυψέλη j , $j = 1, \dots, J$, διαιρείται σε κανάλια, το πλήθος των οποίων συμβολίζεται με C_j . Αντίθετα με τα κλασικά κυψελωτά συστήματα, στα σύγχρονα συστήματα επικοινωνιών η συνολική

διαθέσιμη χωρητικότητα διαιρείται σε μονάδες χωρητικότητας. Στην περίπτωση όπου ένα σύστημα επικοινωνιών υποστηρίζει μια μόνο κλάση υπηρεσιών το πλήθος των μονάδων χωρητικότητας (M_j) προκύπτει συνήθως από τη διαίρεση της συνολικής διαθέσιμης χωρητικότητας με τη μέγιστη απαίτηση σε ρυθμό μετάδοσης της μοναδικής κλάσης υπηρεσιών. Αντιθέτως, το πλήθος των μονάδων χωρητικότητας υπολογίζεται κατά διαφορετικό τρόπο όταν το σύστημα υποστηρίζει περισσότερες από μια κλάσεις υπηρεσιών, αφού κάθε μια από αυτές έχει διαφορετικές απαιτήσεις ως προς το ρυθμό μετάδοσης σε σχέση με τις υπόλοιπες. Στη συνέχεια του κεφαλαίου θα μελετηθούν αλγόριθμοι αποδοχής κλήσεων που υποστηρίζουν πολλαπλές κλάσεις υπηρεσιών και θα εξεταστεί το πρόβλημα προσδιορισμού των πλήθους των μονάδων χωρητικότητας.

Μια βασική υπόθεση που γίνεται στο σύνολο σχεδόν των αναλύσεων που αναφέρονται στα ασύρματα κυψελωτά συστήματα επικοινωνιών αφορά την κατανομή του ρυθμού άφιξης νέων κλήσεων στο δίκτυο, ο οποίος περιγράφεται στατιστικά μέσω της κατανομής Poisson (Poisson distribution). Αυτή η υπόθεση είναι συνήθης και αποδίδει ικανοποιητικά και την πραγματική κατάσταση όταν το δίκτυο εξετάζεται σε επίπεδο κλήσεων, οπότε η κατανομή Poisson μπορεί να προσεγγίσει με μεγάλη ακρίβεια τα χαρακτηριστικά της κίνησης του δικτύου. Αντιθέτως, όταν το δίκτυο εξετάζεται σε επίπεδο μεταφοράς πακέτων δεδομένων, η κίνηση του δικτύου εμφανίζει εξάρτηση από το μήκος της ουράς της κατανομής (Long Range Dependence, LRD). Η υπόθεση ότι ο ρυθμός αφίξεων ακολουθεί την κατανομή Poisson δεν είναι τόσο προφανής για τις κλήσεις από διαπομπή. Για την ακρίβεια, έχει αποδειχθεί ότι η υπόθεση αυτή ευσταθεί όταν η πιθανότητα μη αποδοχής μιας κλήσης από το δίκτυο είναι μηδενική. Αυτή προφανώς αποτελεί μια ιδανική κατάσταση που είναι σχεδόν αδύνατο να ισχύει στην πράξη. Για το λόγο αυτό, έχει εξετασθεί η ακρίβεια του μοντέλου κίνησης όταν η πιθανότητα μη αποδοχής των κλήσεων είναι διάφορη του μηδενός. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η υπόθεση για ρυθμό εισερχόμενων κλήσεων από διαπομπή σύμφωνα με την κατανομή Poisson μπορεί να προσεγγίσει με μεγάλη ακρίβεια τα πραγματικά χαρακτηριστικά κίνησης του δικτύου. Επιπλέον, στην ανάλυση των Chlebus και Ludwin (73) έχει παρουσιαστεί χωρίς να έχει αποδειχθεί ότι, στην περίπτωση που η πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων είναι διάφορη του μηδενός, η τηλεπικοινωνιακή κίνηση των κλήσεων από διαπομπή είναι μια ομαλή διαδικασία (smooth process), οπότε η διακύμανσή της είναι μικρότερη από τη μέση τιμή. Για να ισχύει αυτό αργότερα αποδείχτηκε ότι πρέπει ο χρόνος δέσμευσης ενός καναλιού να ακολουθεί εκθετική κατανομή. Υπενθυμίζεται ότι στην κατανομή Poisson η

διακύμανση ισούται με τη μέση τιμή. Για τον προσδιορισμό της εισερχόμενης κίνησης προτείνεται στη διεθνή βιβλιογραφία η χρήση και άλλων κατανομών εκτός της Poisson. Ωστόσο, η κατανομή Poisson παρέχει αποτελέσματα με μεγάλη ακρίβεια, διευκολύνει την ανάλυση της κατάστασης του δικτύου και αποτελεί την πλέον διαδεδομένη κατανομή που χρησιμοποιείται για τη στατιστική περιγραφή της τηλεπικοινωνιακής κίνησης. Για τους λόγους αυτούς, οι αλγόριθμοι αποδοχής κλήσεων που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια του κεφαλαίου βασίζονται στην υπόθεση ότι ο ρυθμός αφίξεων νέων κλήσεων αλλά και κλήσεων από διαπομπή στην κυψέλη j είναι διακριτή τυχαία διαδικασία που ακολουθεί την κατανομή Poisson με μέσο ρυθμό αφίξεων λ_{nj} και λ_{hj} , αντίστοιχα. Υποθέτοντας ότι το δίκτυο υποστηρίζει U κλάσεις υπηρεσιών, ο μέσος ρυθμός αφίξεων για την κλάση υπηρεσιών u , $u = 1, \dots, U$, στην κυψέλη j είναι λ_{nuj} και λ_{huj} για τις νέες κλήσεις και τις κλήσεις από διαπομπή, αντίστοιχα.

Κάθε κλήση δεσμεύει τμήμα των πόρων του δικτύου. Οι πόροι ποσοτικοποιούνται είτε σε κανάλια είτε σε μονάδες χωρητικότητας για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα το οποίο ονομάζεται χρόνος δέσμευσης του καναλιού (channel holding time). Με την ολοκλήρωση ή τη διακοπή μιας κλήσης, οι αντίστοιχοι πόροι αποδεσμεύονται και καθίστανται διαθέσιμοι για εξυπηρέτηση νέων κλήσεων. Κάθε εισερχόμενη κλήση έχει μια αρχική απαίτηση ως προς το συνολικό χρόνο διάρκειά της ο οποίος καλείται διάρκεια της κλήσης (call holding time) ή χρόνος εξυπηρέτησης (service time). Σε ένα δίκτυο, ο χρόνος εξυπηρέτησης ποικίλλει ανάλογα με την κλάση υπηρεσιών, καθώς κλήσεις που ανήκουν σε διαφορετικές κλάσεις έχουν διαφορετική διάρκεια. Επιπλέον, σημαντική παράμετρο του δικτύου αποτελεί το χρονικό διάστημα για το οποίο ένας χρήστης παραμένει εντός των ορίων κάλυψης ενός σταθμού βάσης και καλείται χρόνος παραμονής εντός κυψέλης (Cell Residence Time, CRT). Ο CRT εξαρτάται κυρίως από τα χαρακτηριστικά κινητικότητας των χρηστών και από τα χαρακτηριστικά ραδιοκάλυψης του συστήματος, όπως η πυκνότητα των σταθμών βάσης, το γεωγραφικό ανάγλυφο της περιοχής κάλυψης, τεχνικά χαρακτηριστικά πομποδεκτών κ.α.

Στο σύνολο σχεδόν των σχετικών εργασιών της διεθνούς βιβλιογραφίας υποτίθεται ότι ο χρόνος δέσμευσης του καναλιού ακολουθεί την εκθετική κατανομή τόσο για τις νέες όσο και για τις κλήσεις από διαπομπή. Έχει αποδειχθεί ότι για να ισχύει η υπόθεση αυτή πρέπει ο χρόνος παραμονής εντός κυψέλης να περιγράφεται στατιστικά μέσω της εκθετικής κατανομής, ειδάλως ο χρόνος δέσμευσης του καναλιού δεν περιγράφεται ικανοποιητικά από την εκθετική κατανομή. Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν εργασίες που υιοθετούν

διαφορετικές κατανομές για τη στατιστική περιγραφή του χρόνου δέσμευσης καναλιού όπως για παράδειγμα η λογαριθμοκανονική (lognormal distribution) και η γενική κατανομή (general distribution). Ωστόσο, η εκθετική κατανομή προσεγγίζει με ικανοποιητική ακρίβεια τους χρόνους δέσμευσης του καναλιού και παραμονής εντός κυψέλης στα ασύρματα συστήματα επικοινωνιών και καθιστά δυνατή την ανάλυσή τους. Επομένως, στη συνέχεια του κεφαλαίου υιοθετείται η εκθετική κατανομή με μέσο ρυθμό εξυπηρέτησης μ_{ij} και μ_{hj} για νέες κλήσεις και κλήσεις από διαπομπή στην κυψέλη j , αντίστοιχα. Στην περίπτωση όπου το δίκτυο εξυπηρετεί περισσότερες από μια κλάσεις υπηρεσιών, ο μέσος ρυθμός εξυπηρέτησης για νέες κλήσεις και κλήσεις από διαπομπή στην κυψέλη j είναι μ_{nij} και μ_{hij} , αντίστοιχα, για την κλάση υπηρεσιών u , $u = 1, \dots, U$.

Η επίδοση κάθε αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων για το σύνολο του δικτύου εξαρτάται από την επίδοση της κάθε κυψέλης ξεχωριστά. Για το λόγο αυτό, για κάθε αλγόριθμο αποδοχής κλήσεων που εξετάζεται, η ανάλυση περιορίζεται σε μεμονωμένη κυψέλη j και στη συνέχεια επεκτείνεται στο σύνολο των κυψελών του δικτύου. Όλες οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση που ακολουθεί παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-1.

3.3. Πλήρης Διαμοιρασμός Πόρων (Complete Sharing)

Οι αλγόριθμοι πλήρους διαμοιρασμού (Complete Sharing, CS) πόρων αποτελούν την απλούστερη κατηγορία αλγόριθμων αποδοχής κλήσεων. Στους αλγόριθμους CS όλες οι εισερχόμενες κλήσεις έχουν το ίδιο επίπεδο προτεραιότητας και εξυπηρετούνται ανάλογα με τη διαθεσιμότητα πόρων της κυψέλης. Επομένως, μια εισερχόμενη κλήση γίνεται δεκτή εφόσον υπάρχουν οι απαραίτητοι πόροι για να την εξυπηρετήσουν, ανεξάρτητα από το είδος της κλήσης (νέα ή από διαπομπή) ή την κλάση υπηρεσιών στην οποία ανήκει. Μια κλήση δε γίνεται αποδεκτή μόνο όταν όλοι οι πόροι της κυψέλης έχουν δεσμευτεί για άλλες κλήσεις. Στη συνέχεια διακρίνονται δύο παραλλαγές του αλγόριθμου CS. Η πρώτη αφορά δίκτυα που υποστηρίζουν μια κλάση υπηρεσιών, ενώ η δεύτερη αφορά δίκτυα που υποστηρίζουν πολλαπλές κλάσεις υπηρεσιών.

3.3.1. Αλγόριθμος CS Μοναδικής Κλάσης Υπηρεσιών

3.3.1.1. Ανάλυση Μεμονωμένης Κυψέλης

Στον αλγόριθμο CS όταν υποστηρίζεται μια μόνο κλάση υπηρεσιών θεωρείται ότι η κατάσταση μιας κυψέλης j χαρακτηρίζεται κάθε στιγμή από το πλήθος των

εξυπηρετούμενων κλήσεων $n_j = (n_{nj}, n_{hj})$ οι οποίες διακρίνονται σε νέες κλήσεις n_{nj} και κλήσεις από διαπομπή n_{hj} . Επομένως, ο διακριτός χώρος καταστάσεων για την κυψέλη j είναι

$$S_j^{CS} = \{n_j; n_j = (n_{nj}, n_{hj}), 0 \leq n_{nj} + n_{hj} \leq N_j\} \quad (3-1)$$

όπου N_j είναι ο μέγιστος αριθμός κλήσεων που μπορεί να υποστηρίξει η κυψέλη. Αν θεωρηθεί ότι μια εισερχόμενη κλήση απαιτεί c κανάλια για να εξυπηρετηθεί, ο μέγιστος αριθμός εξυπηρετούμενων κλήσεων προκύπτει $N_j = \lfloor C_j/c \rfloor$, όπου $\lfloor x \rfloor$ δηλώνει το μεγαλύτερο ακέραιο που είναι μικρότερος του x . Στην περίπτωση όπου η συνολική διαθέσιμη χωρητικότητα διαιρείται σε μονάδες χωρητικότητας, ο μέγιστος αριθμός εξυπηρετούμενων χρηστών προκύπτει $N_j = \lfloor M_j/m \rfloor$, όπου m είναι το πλήθος των μονάδων χωρητικότητας που απαιτεί μια εισερχόμενη κλήση.

Έστω $X_j(t) = (X_{nj}(t), X_{hj}(t))$ το πλήθος των εξυπηρετούμενων κλήσεων στην κυψέλη j τη χρονική στιγμή t , όπου $X_{nj}(t)$ και $X_{hj}(t)$ το πλήθος των νέων και από διαπομπή εξυπηρετούμενων κλήσεων, αντίστοιχα. Οι $X_j(t)$, $X_{nj}(t)$ και $X_{hj}(t)$ αποτελούν διαδικασίες γεννήσεων-θανάτων (birth death processes). Οι ρυθμοί γεννήσεων των διαδικασιών $X_{nj}(t)$ και $X_{hj}(t)$ είναι ίσοι με τους αντίστοιχους μέσους ρυθμούς αφίξεων των νέων λ_{nj} και από διαπομπή κλήσεων λ_{hj} . Ομοίως, οι ρυθμοί θανάτων των $X_{nj}(t)$ και $X_{hj}(t)$ είναι ίσοι με μ_{nj} και μ_{hj} , αντίστοιχα.

Έστω $\pi(n_j | \tilde{n}_j)$ ο ρυθμός μετάβασης από την κατάσταση n_j στην κατάσταση \tilde{n}_j της κυψέλης j του δικτύου, όπου $n_j, \tilde{n}_j \in S_j^{CS}$. Οι ρυθμοί μετάβασης σε διαδοχικές καταστάσεις του δικτύου είναι

$$\pi((n_{nj}, n_{hj}) | (n_{nj} + 1, n_{hj})) = \lambda_{nj} \quad (3-2\alpha)$$

$$\pi((n_{nj}, n_{hj}) | (n_{nj}, n_{hj} + 1)) = \lambda_{hj} \quad (3-2\beta)$$

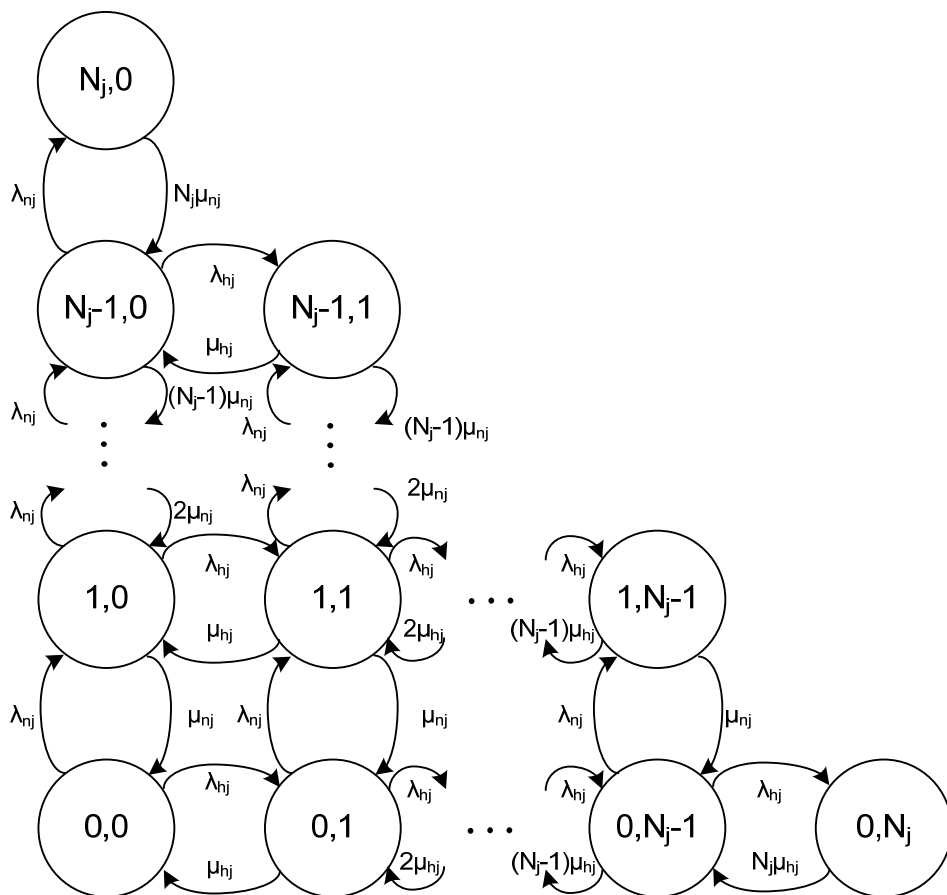
όπου $0 \leq n_{nj} + n_{hj} \leq N_j - 1$ και

$$\pi((n_{nj}, n_{hj}) | (n_{nj} - 1, n_{hj})) = n_{nj} \mu_{nj}, \quad (3-2\gamma)$$

$$\pi \left((n_{nj}, n_{hj}) | (n_{nj}, n_{hj} - 1) \right) = n_{hj} \mu_{hj}, \quad (3-2\delta)$$

όπου $1 \leq n_{nj} + n_{hj} \leq N_j$. Για μη διαδοχικές καταστάσεις ο ρυθμός μετάβασης είναι μηδενικός.

Έστω $\Pr \{X_j(t) = n_j\}$ η πιθανότητα ώστε η κυψέλη j του δικτύου να βρίσκεται στην κατάσταση n_j τη χρονική στιγμή t , δηλαδή ότι n_{nj} νέες και n_{hj} από διαπομπή κλήσεις εξυπηρετούνται από την κυψέλη j . Στην περίπτωση αυτή το σύστημα περιγράφεται από αλυσίδα Markov συνεχούς χρόνου (Continuous Time Markov Chain, CTMC) της οποίας οι πιθανότητες σταθερής κατάστασης της διαδικασίας $X_j(t)$ ορίζονται ως $p_j(n_j) = \lim_{t \rightarrow \infty} \Pr \{X_j(t) = n_j\}$ όπου $p_j(n_j)$ η πιθανότητα η κυψέλη να βρίσκεται στην



Σχήμα 3-1: Αλυσίδα Markov για το αλγόριθμο αποδοχής κλήσεων CS μοναδικής κλάσης υπηρεσιών με διαχωρισμό νέων και από διαπομπή κλήσεων.

J	Συνολικό πλήθος κυψελών του δικτύου.	λ_{huj}	Μέσος ρυθμός αφίξεων κλήσεων από διαπομπή της κλάσης υπηρεσιών u στην κυψέλη j .
C_j	Χωρητικότητα της κυψέλης j αποτιμώμενη σε πλήθος καναλιών.	μ_{huj}	Μέση τιμή της εκθετικής κατανομής του χρόνου δέσμευσης του καναλιού για τις νέες κλήσεις εντός της κυψέλης j της κλάσης υπηρεσιών u .
M_j	Χωρητικότητα της κυψέλης j αποτιμώμενη σε πλήθος μονάδων χωρητικότητας.	μ_{huj}	Μέση τιμή της εκθετικής κατανομής του χρόνου δέσμευσης του καναλιού για κλήσεις από διαπομπή της κλάσης υπηρεσιών u στην κυψέλη j .
λ_{uj}	Μέσος ρυθμός αφίξεων νέων κλήσεων στην κυψέλη j .	λ_{uj}	Συνολικός μέσος ρυθμός άφιξης κλήσεων της κλάσης υπηρεσιών u στην κυψέλη j .
λ_{hj}	Μέσος ρυθμός αφίξεων κλήσεων από διαπομπή στην κυψέλη j .	μ_{uj}	Ο μέσος ρυθμός εξυπηρέτησης κλήσεων κάθε κλάσης υπηρεσιών u στην κυψέλη j .
μ_{hj}	Μέση τιμή της εκθετικής κατανομής του χρόνου δέσμευσης του καναλιού για τις νέες κλήσεις στην κυψέλη j .	N_{uj}	Μέγιστος αριθμός κλήσεων της κλάσης υπηρεσιών u που μπορεί να εξυπηρετήσει η κυψέλη j .
μ_{hj}	Μέση τιμή της εκθετικής κατανομής του χρόνου δέσμευσης του καναλιού για τις κλήσεις από διαπομπή στην κυψέλη j .	c_u	Πλήθος καναλιών που απαιτεί μια κλήση της κλάσης υπηρεσιών u για την εξυπηρέτησή της.
n_j	Το πλήθος των χρηστών που εξυπηρετούνται στην κυψέλη j .	m_u	Πλήθος μονάδων χωρητικότητας που απαιτεί μια κλήση της κλάσης υπηρεσιών u για την εξυπηρέτησή της.

N_j	Ο μέγιστος αριθμός χρηστών που μπορεί να υποστηρίξει η κυψέλη j	$P_{n,j}^{bl}$	Πιθανότητα μη αποδοχής νέων κλήσεων για την κυψέλη j .
c	Πλήθος καναλιών που απαιτεί μια εισερχόμενη κλήση από το δίκτυο.	$P_{h,j}^{bl}$	Πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων από διαπομπή για την κυψέλη j .
m	Πλήθος των μονάδων χωρητικότητας που απαιτεί μια εισερχόμενη κλήση από το δίκτυο	$P_{n,u,j}^{bl}$	Πιθανότητα μη αποδοχής νέων κλήσεων της κλάσης υπηρεσιών u για την κυψέλη j .
U	Πλήθος κλάσεων υπηρεσιών που υποστηρίζει το δίκτυο.	$P_{h,u,j}^{bl}$	Πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων από διαπομπή της κλάσης υπηρεσιών u για την κυψέλη j .
λ_{nij}	Μέσος ρυθμός αφίξεων νέων κλήσεων της κλάσης υπηρεσιών u στην κυψέλη j .		

Πίνακας 3-1: Παράμετροι ανάλυσης και ορισμοί.

κατάσταση n_j . Οι εξισώσεις σταθερής κατάστασης της αλυσίδας Markov που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-1 προκύπτουν από τη γενική εξίσωση ισοροπίας

$$\begin{aligned} & \left[H_{\langle S_j^{CS} \rangle} (n_j + e_n) \lambda_{nj} + H_{\langle S_j^{CS} \rangle} (n_j + e_h) \lambda_{hj} + \right. \\ & \left. H_{\langle S_j^{CS} \rangle} (n_j - e_n) n_{nj} \mu_{nj} + H_{\langle S_j^{CS} \rangle} (n_j - e_h) n_{hj} \mu_{hj} \right] p_j(n_j) = \\ & H_{\langle S_j^{CS} \rangle} (n_j + e_n) (n_{nj} + 1) \mu_{nj} p_j(n_j + e_n) + H_{\langle S_j^{CS} \rangle} (n_j + e_h) (n_{hj} + 1) \mu_{hj} p_j(n_j + e_h) + \\ & H_{\langle S_j^{CS} \rangle} (n_j - e_n) \lambda_{nj} p_j(n_j - e_n) + H_{\langle S_j^{CS} \rangle} (n_j - e_h) \lambda_{hj} p_j(n_j - e_h), \end{aligned} \quad (3-3)$$

όπου $e_n = (1, 0)$, $e_h = (0, 1)$ και

$$H_{\langle S \rangle} (x) = \begin{cases} 1, & \alpha \nu \ x \in S \\ 0, & \alpha \nu \ x \notin S. \end{cases} \quad (3-4)$$

Επιλύοντας το σύστημα εξισώσεων (3-3) προσδιορίζονται οι πιθανότητες σταθερής κατάστασης $p_j(n_j)$ της διαδικασίας Markov μέσω των σχέσεων

$$p_j(n_j) = \frac{\rho_{n_j}^{n_j}}{n_j!} \cdot \frac{\rho_{h_j}^{n_j}}{n_{h_j}!} p_j(0) \quad (3-5)$$

όπου $\rho_{n_j} = \lambda_{n_j} / \mu_{n_j}$ και $\rho_{h_j} = \lambda_{h_j} / \mu_{h_j}$ είναι οι παράγοντες χρησιμοποίησης (utilization) των πόρων του δικτύου για νέες και από διαπομπή κλήσεις, αντίστοιχα, και $p_j(0)$ η πιθανότητα της πρώτης κατάστασης της αλυσίδας Markov, η οποία (λόγω της $\sum_{n_j \in S_j} p_j(n_j) = 1$) προσδιορίζεται μέσω της σχέσης

$$p_j^{-1}(0) = \sum_{n_{nj}=0}^{N_j} \sum_{n_{hj}=0}^{N_j-n_{nj}} \frac{\rho_{n_{nj}}^{n_{nj}}}{n_{nj}!} \cdot \frac{\rho_{n_{hj}}^{n_{hj}}}{n_{hj}!} \quad (3-6)$$

Στον αλγόριθμο CS αποδοχής κλήσεων μια νέα κλήση δε γίνεται αποδεκτή από την κυψέλη όταν όλοι οι πόροι της είναι κατειλημμένοι. Συνεπώς, η πιθανότητα μη αποδοχής νέων κλήσεων $P_{n,j}^{bl}$ από την κυψέλη j προκύπτει ως το άθροισμα των πιθανοτήτων των καταστάσεων του δικτύου για τις οποίες ισχύει $n_{nj} + n_{hj} = N_j$ δηλαδή

$$P_{n,j}^{bl} = \sum_{\substack{n_j \in S_j^{CS} \\ n_{nj} + n_{hj} = N_j}} p_j(n_j) = \sum_{n_{nj}=0}^{N_j} \left[\frac{\rho_{n_{nj}}^{n_{nj}}}{n_{nj}!} \cdot \frac{\rho_{h_j}^{N_j-n_{nj}}}{(N_j-n_{nj})!} \right] p_j(0). \quad (3-7)$$

Επειδή δεν υπάρχει διαχωρισμός των νέων κλήσεων από τις κλήσεις που προέρχονται από διαπομπή, η πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων από διαπομπή $P_{h,j}^{bl}$ για την κυψέλη j είναι ίση με την αντίστοιχη πιθανότητα μη αποδοχής των νέων κλήσεων, δηλαδή

$$P_{h,j}^{bl} = P_{n,j}^{bl} \quad (3-8)$$

Το μέσο πλήθος εξυπηρετούμενων κλήσεων (νέων ή από διαπομπή) της κυψέλης j του δικτύου υπολογίζεται από τη σχέση

$$\bar{N}_k = \sum_{n_{nj}=0}^{N_j} \sum_{n_{hj}=0}^{N_j-n_{nj}} n_{kj} \frac{\rho_{n_{nj}}^{n_{nj}}}{n_{nj}!} \cdot \frac{\rho_{h_j}^{n_{hj}}}{n_{hj}!} p_j(0) \quad (3-9)$$

όπου $k = n$ ή h για τις νέες ή από διαπομπή κλήσεις, αντίστοιχα.

3.3.1.2. Συνολική Ανάλυση του Δικτύου

Στην περίπτωση όπου μας ενδιαφέρει η συνολική επίδοση του δικτύου πρέπει να γενικευθεί η προηγούμενη ανάλυση για το σύνολο των J κυψελών. Σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή, η κατάσταση του δικτύου $n = (n_1, \dots, n_j, \dots, n_J)$ χαρακτηρίζεται από το πλήθος των εξυπηρετούμενων χρηστών σε κάθε κυψέλη του j , $j = 1, \dots, J$. Επομένως, ο διακριτός χώρος καταστάσεων του δικτύου ορίζεται ως

$$S^{CS} = \{n; n = (n_1, \dots, n_j, \dots, n_J), n_j \in S_j^{CS}\}. \quad (3-10)$$

Με βάση το μοντέλο του δικτύου που έχει ήδη περιγραφεί, προκύπτει ότι σε κάθε κατάσταση του δικτύου n υπάρχει συγκεκριμένη κατανομή της διαθέσιμης χωρητικότητας στους χρήστες. Επομένως, για τη ανάλυση της επίδοσης του δικτύου η μελέτη επικεντρώνεται στις πιθανότητες σταθερής κατάστασης. Υποθέτοντας ότι η διαδικασία γεννήσεων-θανάτων $X_j(t)$ κάθε κυψέλης j είναι αντιστρέψιμη διαδικασία, αποδεικνύεται ότι και η διαδικασία $X(t) = (X_1(t), \dots, X_j(t), \dots, X_J(t))$ είναι αντιστρέψιμη. Επομένως, η ανάλυση μπορεί να περιοριστεί εντός του διακριτού χώρου καταστάσεων του δικτύου S^{CS} .

Οι ρυθμοί γεννήσεων και θανάτων της διαδικασίας $X_j(t)$ είναι ίσοι με τους αντίστοιχους μέσους ρυθμούς αφίξεων και εξυπηρέτησης των νέων και από διαπομπή κλήσεων σε κάθε κυψέλη j του δικτύου. Επομένως, οι ρυθμοί μετάβασης $\pi(n|\tilde{n})$ από μια κατάσταση n της κυψέλης j σε μια δυνατή κατάσταση \tilde{n} , $n, \tilde{n} \in S^{CS}$, προκύπτουν από τις σχέσεις

$$\pi(n|n + e_{nj}) = \lambda_{nj} \quad (3-11\alpha)$$

$$\pi(n|n + e_{hj}) = \lambda_{hj} \quad (3-11\beta)$$

$$\pi(n|n - e_{nj}) = n_{nj} \mu_{nj}, \quad (3-11\gamma)$$

$$\pi(n|n - e_{hj}) = n_{hj} \mu_{hj}, \quad (3-11\delta)$$

όπου e_{nj} και e_{hj} δύο μηδενικά διανύσματα J διαστάσεων των οποίων η τιμή της διάστασης j είναι ίση με e_n και e_h , αντίστοιχα. Δεδομένων των ρυθμών μετάβασης μεταξύ γειτονικών καταστάσεων του δικτύου, η γενική εξίσωση ισορροπίας δίνεται από τη σχέση

$$\begin{aligned}
 & \sum_{j=1}^J \left[H_{\langle S^{CS} \rangle} (n+e_{nj}) \lambda_{nj} + H_{\langle S^{CS} \rangle} (n+e_{hj}) \lambda_{hj} + \right. \\
 & \left. H_{\langle S^{CS} \rangle} (n-e_{nj}) n_{nj} \mu_{nj} + H_{\langle S^{CS} \rangle} (n-e_{hj}) n_{hj} \mu_{hj} \right] p(n) = \\
 & \sum_{j=1}^J \left[H_{\langle S^{CS} \rangle} (n+e_{nj}) (n_{nj}+1) \mu_{nj} p(n+e_{nj}) + H_{\langle S^{CS} \rangle} (n+e_{hj}) (n_{hj}+1) \mu_{hj} p(n+e_{hj}) + \right. \\
 & \left. H_{\langle S^{CS} \rangle} (n-e_{nj}) \lambda_{nj} p(n-e_{nj}) + H_{\langle S^{CS} \rangle} (n-e_{hj}) \lambda_{hj} p(n-e_{hj}) \right], \quad (3-12)
 \end{aligned}$$

όπου $n \in S^{CS}$ και $p(n)$ οι πιθανότητες σταθερής κατάστασης της διαδικασίας $X(t)$ του δικτύου. Από την επίλυση του συστήματος των εξισώσεων ισορροπίας προκύπτουν οι πιθανότητες σταθερής κατάστασης μέσω της σχέσης

$$p(n) = G \prod_{j=1}^J \left(\frac{\rho_{nj}^{n_{nj}}}{n_{nj}!} \cdot \frac{\rho_{hj}^{n_{hj}}}{n_{hj}!} \right), \quad n \in S^{CS} \quad (3-13)$$

όπου G είναι ο παράγοντας κανονικοποίησης που (λόγω της $\sum_{n \in S^{CS}} p(n) = 1$) είναι ίσος προς

$$G^{-1} = \sum_{n \in S^{CS}} \prod_{j=1}^J \left(\frac{\rho_{nj}^{n_{nj}}}{n_{nj}!} \cdot \frac{\rho_{hj}^{n_{hj}}}{n_{hj}!} \right). \quad (3-14)$$

Η πιθανότητα μη αποδοχής είτε νέων κλήσεων, $\mathbf{P}_{n,j}^{bl}$, είτε κλήσεων από διαπομπή, $\mathbf{P}_{h,j}^{bl}$, στην κυψέλη j είναι ίση με το άθροισμα των πιθανοτήτων των καταστάσεων του δικτύου για τις οποίες όλοι οι διαθέσιμοι πόροι της κυψέλης j είναι κατειλημμένοι. Συνεπώς,

$$\mathbf{P}_{n,j}^{bl} = \mathbf{P}_{h,j}^{bl} = \sum_{n \in S^{j,CS}} p(n) \quad (3-15)$$

όπου

$$S^{j,CS} = \{n; n \in S^{CS}, n_{nj} + n_{hj} = N_j\}. \quad (3-16)$$

είναι γνήσιο υποσύνολο του S^{CS} , $S^{j,CS} \subset S^{CS}$.

Ομοίως, η συνολική πιθανότητα μη αποδοχής μιας κλήσης, είτε νέας είτε από διαπομπή, από το δίκτυο είναι ίση με το άθροισμα των πιθανοτήτων των καταστάσεων του δικτύου για τις οποίες το σύνολο της διαθέσιμης χωρητικότητας σε τουλάχιστον μια κυψέλη έχει εξαντληθεί. Συνεπώς,

$$P_n^{bl} = P_h^{bl} = \sum_{n \in S^{bl,CS}} p(n) \quad (3-17)$$

όπου

$$S^{bl,CS} = \{n; n \in S^{1,CS} \cup \dots \cup S^{j,CS} \cup \dots \cup S^{J,CS}\}. \quad (3-18)$$

είναι γνήσιο υποσύνολο του S^{CS} , $S^{bl,CS} \subset S^{CS}$. Αν τεθεί $J=1$, η (3-17) ταυτίζεται με την (3-7), που δίδει την πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων μιας κυψέλης.

Το μέσο πλήθος εξυπηρετούμενων νέων και από διαπομπή κλήσεων σε κάθε κυψέλη j του δικτύου υπολογίζεται από τη σχέση

$$\bar{N}_j = \sum_{n \in S^{CS}} (n_{nj} + n_{hj}) G \prod_{j=1}^J \left(\frac{\rho_{nj}^{n_{nj}}}{n_{nj}!} \cdot \frac{\rho_{hj}^{n_{hj}}}{n_{hj}!} \right). \quad (3-19)$$

3.3.2. Αλγόριθμος CS Πολλαπλών Κλάσεων Υπηρεσιών

3.3.2.1. Ανάλυση Μεμονωμένης Κυψέλης

Τα σύγχρονα συστήματα επικοινωνιών υποστηρίζουν πολλαπλές κλάσεις υπηρεσιών που διαθέτουν διαφορετικά χαρακτηριστικά ποιότητας υπηρεσιών. Επομένως, οι αλγόριθμοι αποδοχής κλήσεων πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τους την κλάση υπηρεσιών στην οποία ανήκει κάθε κλήση ώστε να εφαρμόσουν κατάλληλα κριτήρια αποδοχής. Συνεπώς, στην περίπτωση όπου το ασύρματο σύστημα επικοινωνιών υποστηρίζει U διαφορετικές κλάσεις υπηρεσιών, ο προηγούμενος αλγόριθμος CS τροποποιείται με στόχο να διαχειρίζεται κατά διακριτό τρόπο τις εισερχόμενες κλήσεις κάθε κλάσης υπηρεσιών.

Έστω $X_j(t) = (X_{1j}(t), \dots, X_{uj}(t), \dots, X_{Uj}(t))$ το διάνυσμα του πλήθους των κλήσεων των διαφορετικών κλάσεων υπηρεσιών που υποστηρίζει το δίκτυο στην κυψέλη j τη χρονική στιγμή t . Κάθε συνιστώσα του διανύσματος $X_j(t)$ αναλύεται στο πλήθος των νέων $X_{mj}(t)$ και από διαπομπή $X_{hj}(t)$ κλήσεων, $X_{uj}(t) = (X_{mj}(t), X_{hj}(t))$. Πρέπει να αναφερθεί ότι στο διάνυσμα $X_j(t)$ περιέχεται μόνο το πλήθος των κλήσεων από κάθε κλάση υπηρεσιών u στην κυψέλη j τη χρονική στιγμή t και σε κάθε κατάσταση αντιστοιχεί μοναδική κατανομή των πόρων του δικτύου στις εξυπηρετούμενες κλήσεις. Η διαδικασία γεννήσεων-θανάτων $X_{uj}(t)$ αποτελεί αντιστρέψιμη διαδικασία, οπότε και η

διαδικασία $X_j(t)$ είναι αντιστρέψιμη. Επομένως, η διαδικασία $X_j(t)$ ικανοποιεί την ιδιότητα των διακριτών καταστάσεων (truncated state property) και η ανάλυση μπορεί να περιοριστεί εντός του διακριτού χώρου καταστάσεων \mathbf{n}_j του δικτύου για την κυψέλη j , ο οποίος δίδεται από τη σχέση

$$\mathbf{S}_j^{CS} = \left\{ \mathbf{n}_j; \mathbf{n}_j = (n_{1j}, \dots, n_{uj}, \dots, n_{Uj}), n_{uj} = (n_{muj}, n_{huj}), 0 \leq n_{muj} + n_{huj} \leq N_{uj}, \right. \\ \left. \sum_{u=1}^U [(n_{muj} + n_{huj}) c_u] \leq C_j \text{ ή } \sum_{u=1}^U [(n_{muj} + n_{huj}) m_u] \leq M_j, u = 1, \dots, U \right\}, \quad (3-20)$$

όπου το διάνυσμα $\mathbf{n}_j = (n_{1j}, \dots, n_{uj}, \dots, n_{Uj})$ χαρακτηρίζει την κατάσταση της κυψέλης j του δικτύου και οι συντεταγμένες του δηλώνουν το πλήθος των εξυπηρετούμενων κλήσεων κάθε κλάσης υπηρεσιών από την κυψέλη j . Κάθε συνιστώσα του διανύσματος \mathbf{n}_j αναλύεται στις νέες n_{muj} και από διαπομπή n_{huj} κλήσεις της κλάσης υπηρεσιών u στην κυψέλη j , $n_{uj} = (n_{muj}, n_{huj})$. Η παράμετρος N_{uj} αναφέρεται στο μέγιστο αριθμό κλήσεων της κλάσης υπηρεσιών u που μπορεί να εξυπηρετήσει η κυψέλη j και ορίζεται ως $N_{uj} = \lfloor C_j / c_u \rfloor$ ή $N_{uj} = \lfloor M_j / m_u \rfloor$.

Όταν η χωρητικότητα του δικτύου υπολογίζεται σε κανάλια ή μονάδες χωρητικότητας, αντίστοιχα, όπου c_u είναι το πλήθος των καναλιών και m_u το πλήθος των μονάδων χωρητικότητας που απαιτεί μια κλήση της κλάσης υπηρεσιών u για την εξυπηρέτησή της από το δίκτυο. Επισημαίνεται, ότι για κάθε κατάσταση $\mathbf{n}_j \in \mathbf{S}_j^{CS}$ του δικτύου πρέπει να ισχύει $\sum_{u=1}^U n_{uj} c_u \leq C_j$ ή $\sum_{u=1}^U n_{uj} m_u \leq M_j$ αντίστοιχα με την περίπτωση όπου η χωρητικότητα του δικτύου υπολογίζεται σε κανάλια ή μονάδες χωρητικότητας.

Οι ρυθμοί γεννήσεων για τις διαδικασίες $X_{muj}(t)$ και $X_{huj}(t)$ είναι ίσοι με τους μέσους ρυθμούς αφίξεων λ_{muj} και $\lambda_{h,u,j}$, αντίστοιχα. Ομοίως, οι ρυθμοί θανάτων των διαδικασιών $X_{muj}(t)$ και $X_{huj}(t)$ είναι ίσοι με τους αντίστοιχους μέσους ρυθμούς εξυπηρέτησης μ_{muj} και $\mu_{h,u,j}$. Συνεπώς, ο ρυθμός μετάβασης $\pi(\mathbf{n}_j | \tilde{\mathbf{n}}_j)$ από την κατάσταση του δικτύου \mathbf{n}_j σε δυνατή κατάσταση $\tilde{\mathbf{n}}_j$, $\mathbf{n}_j, \tilde{\mathbf{n}}_j \in \mathbf{S}_j^{CS}$, προκύπτει από τις σχέσεις

$$\pi(\mathbf{n}_j | \mathbf{n}_j + e_{nu}) = \lambda_{nuj} \quad (3-21\alpha)$$

$$\pi(\mathbf{n}_j | \mathbf{n}_j + e_{hu}) = \lambda_{huj} \quad (3-21\beta)$$

$$\pi(\mathbf{n}_j | \mathbf{n}_j - e_{nu}) = n_{nuj} \mu_{nuj} \quad (3-21\gamma)$$

$$\pi(\mathbf{n}_j | \mathbf{n}_j - e_{hu}) = n_{huj} \mu_{huj} \quad (3-21\delta)$$

όπου e_{nu} και e_{hu} δύο μηδενικά διανύσματα U διαστάσεων τα οποία στη θέση u έχουν τιμή e_n και e_h , αντίστοιχα.

Υποτίθεται ότι οι κλήσεις κάθε κλάσης υπηρεσιών είναι ανεξάρτητες από τις υπόλοιπες κλήσεις του δικτύου, υπόθεση που βασίζεται στο ότι οι κλήσεις διαφορετικών κλάσεων υπηρεσιών δεν εμφανίζουν κάποια συσχέτιση. Έστω $\Pr\{X_j(t) = \mathbf{n}_j\}$ η πιθανότητα η κυψέλη j του δικτύου να βρίσκεται στην κατάσταση \mathbf{n}_j τη χρονική στιγμή t , $\mathbf{n}_j \in \mathcal{S}_j^{CS}$. Οι πιθανότητες σταθερής κατάστασης $p_j(\mathbf{n}_j)$ της διαδικασίας $X_j(t)$ ορίζονται ως $p_j(\mathbf{n}_j) = \lim_{t \rightarrow \infty} \Pr\{X_j(t) = \mathbf{n}_j\}$. Βάσει των ρυθμών μετάβασης των κλάσεων υπηρεσιών προκύπτει η γενική εξίσωση ισορροπίας για κάθε κατάσταση του δικτύου

$$\begin{aligned} & \sum_{u=1}^U \left[H_{\langle \mathcal{S}_j^{CS} \rangle}(\mathbf{n}_j + e_{nu}) \lambda_{nuj} + H_{\langle \mathcal{S}_j^{CS} \rangle}(\mathbf{n}_j + e_{hu}) \lambda_{huj} + \right. \\ & \left. H_{\langle \mathcal{S}_j^{CS} \rangle}(\mathbf{n}_j - e_{nu}) n_{nuj} \mu_{nuj} + H_{\langle \mathcal{S}_j^{CS} \rangle}(\mathbf{n}_j - e_{hu}) n_{huj} \mu_{huj} \right] p(\mathbf{n}_j) = \\ & \sum_{u=1}^U \left[H_{\langle \mathcal{S}_j^{CS} \rangle}(\mathbf{n}_j + e_{nu}) (n_{nuj} + 1) \mu_{nuj} p(\mathbf{n}_j + e_{nu}) + H_{\langle \mathcal{S}_j^{CS} \rangle}(\mathbf{n}_j - e_{nu}) \lambda_{nuj} p(\mathbf{n}_j - e_{nu}) + \right. \\ & \left. H_{\langle \mathcal{S}_j^{CS} \rangle}(\mathbf{n}_j + e_{hu}) (n_{huj} + 1) \mu_{huj} p(\mathbf{n}_j + e_{hu}) + H_{\langle \mathcal{S}_j^{CS} \rangle}(\mathbf{n}_j - e_{hu}) \lambda_{huj} p(\mathbf{n}_j - e_{hu}) \right], \quad (3-22) \end{aligned}$$

Από την (3-22) προκύπτουν οι πιθανότητες σταθερής κατάστασης

$$p_j(\mathbf{n}_j) = G_j \prod_{u=1}^U \left(\frac{\rho_{nuj}^{n_{nuj}} \cdot \rho_{huj}^{n_{huj}}}{n_{nuj}! \cdot n_{huj}!} \right), \quad (3-23)$$

όπου $\rho_{nuj} = \lambda_{nuj} / \mu_{nuj}$ και $\rho_{huj} = \lambda_{huj} / \mu_{huj}$ είναι οι παράγοντες χρησιμοποίησης των πόρων του δικτύου των νέων και από διαπομπή κλήσεων που ανήκουν στην κλάση υπηρεσιών u και G_j ο παράγοντας κανονικοποίησης που προκύπτει από τη σχέση

$$G_j^{-1} = \sum_{\mathbf{n}_j \in \mathcal{S}_j} \prod_{u=1}^U \left(\frac{\rho_{n_{uj}}^{n_{uj}}}{n_{n_{uj}}!} \cdot \frac{\rho_{h_{uj}}^{n_{h_{uj}}}}{n_{h_{uj}}!} \right). \quad (3-24)$$

Εφόσον στον αλγόριθμο CS μια εισερχόμενη κλήση δε γίνεται δεκτή από την κυψέλη u του δικτύου μόνο όταν όλοι οι πόροι της κυψέλης είναι ήδη κατειλημμένοι, η πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων είναι ίση με την πιθανότητα να μην υπάρχουν διαθέσιμοι πόροι στο δίκτυο. Αυτό ισχύει για όλες τις εισερχόμενες κλήσεις, είτε νέες είτε από διαπομπή, ανεξαρτήτως της κλάσης υπηρεσιών στην οποία ανήκουν· επομένως

$$P_{n,u,j}^{bl} = P_{h,u,j}^{bl} = \sum_{\mathbf{n}_j \in \mathcal{S}_j^{u,CS}} p_j(\mathbf{n}_j), \quad u = 1, \dots, U, \quad (3-25)$$

όπου

$$\mathcal{S}_j^{u,CS} = \left\{ \mathbf{n}_j; \mathbf{n}_j \in \mathcal{S}_j^{CS}, C_j - \sum_{u=1}^U (n_{n_{uj}} + n_{h_{uj}}) c_u < c_u \quad \acute{\eta} \quad M_j - \sum_{u=1}^U (n_{n_{uj}} + n_{h_{uj}}) m_u < m_u, \right. \\ \left. u = 1, \dots, U \right\}, \quad (3-26)$$

$P_{n,u,j}^{bl}$ και $P_{h,u,j}^{bl}$ η πιθανότητα μη αποδοχής νέων κλήσεων και κλήσεων από διαπομπή της κλάσης υπηρεσιών u για την κυψέλη j , αντίστοιχα. Αν τεθεί $U = 1$ η (3-25) ταυτίζεται με την (3-7).

Επίσης, η πιθανότητα μη αποδοχής είτε μιας νέας κλήσης, $P_{n,j}^{BL}$, είτε μιας κλήσης από διαπομπή, $P_{h,j}^{BL}$, οποιασδήποτε κλάσης υπηρεσιών στην κυψέλη j , όσο χαμηλές και αν είναι οι απαιτήσεις της σε πόρους του δικτύου, είναι

$$P_{n,j}^{BL} = P_{h,j}^{BL} = \sum_{\mathbf{n}_j \in \mathcal{S}_j^{u,CS}} p_j(\mathbf{n}_j), \quad u = 1, \dots, U, \quad (3-27)$$

όπου

$$\mathcal{S}_j^{u,CS} = \left\{ \mathbf{n}_j; \mathbf{n}_j \in \mathcal{S}_j^{CS}, C_j - \sum_{u=1}^U (n_{n_{uj}} + n_{h_{uj}}) c_u < \min(c_u) \quad \acute{\eta} \quad \right. \\ \left. M_j - \sum_{u=1}^U (n_{n_{uj}} + n_{h_{uj}}) m_u < \min(m_u), u = 1, \dots, U \right\}. \quad (3-28)$$

3.3.2.2. Συνολική Ανάλυση του Δικτύου

Αν η προηγούμενη ανάλυση γενικευθεί στο σύνολο ενός δικτύου που υποστηρίζει πολλαπλές κλάσεις υπηρεσιών, δηλαδή για J κυψέλες και U κλάσεις υπηρεσιών, η κατάσταση του δικτύου εκφράζεται κάθε χρονική στιγμή από το διάνυσμα $\mathbf{n} = (n_1, \dots, n_j, \dots, n_J)$, δηλαδή από το πλήθος των εξυπηρετούμενων χρηστών κάθε κλάσης υπηρεσιών σε κάθε κυψέλη. Η κατάσταση του δικτύου περιγράφεται από μια διαδικασία γεννήσεων θανάτων $\mathbf{X}(t) = (X_1(t) + \dots + X_j(t) + \dots + X_J(t))$ η οποία εύκολα αποδεικνύεται ότι είναι αντιστρέψιμη. Επομένως, ο διακριτός χώρος των καταστάσεων στον οποίο επικεντρώνεται η ανάλυση για την κατάσταση του δικτύου είναι ο χώρος

$$\mathcal{S}^{CS} = \left\{ \mathbf{n}, \mathbf{n} = (n_1, \dots, n_j, \dots, n_J), n_j \in \mathcal{S}_j^{CS} \right\}. \quad (3-29)$$

Δεδομένων των ρυθμών γεννήσεων και θανάτων των συνιστωσών $X_j(t)$ της διαδικασίας $\mathbf{X}(t)$, οι ρυθμοί μετάβασης $\pi(\mathbf{n} | \tilde{\mathbf{n}})$ από την κατάσταση \mathbf{n} στην κατάσταση $\tilde{\mathbf{n}}$, $\mathbf{n}, \tilde{\mathbf{n}} \in \mathcal{S}_j^{CS}$, προκύπτουν από τις σχέσεις

$$\pi(\mathbf{n} | \mathbf{n} + e_{nuj}) = \lambda_{nuj} \quad (3-30\alpha)$$

$$\pi(\mathbf{n} | \mathbf{n} + e_{huj}) = \lambda_{huj} \quad (3-30\beta)$$

$$\pi(\mathbf{n} | \mathbf{n} - e_{nuj}) = n_{nuj} \mu_{nuj}, \quad (3-30\gamma)$$

$$\pi(\mathbf{n} | \mathbf{n} - e_{huj}) = n_{huj} \mu_{huj}, \quad (3-30\delta)$$

όπου e_{nuj} και e_{huj} δύο μηδενικά διανύσματα J διαστάσεων, τα οποία στη θέση j έχουν τιμή e_{nu} και e_{hu} , αντίστοιχα. Επομένως, η γενική εξίσωση ισορροπίας του δικτύου είναι

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^J \sum_{u=1}^U \left[H_{\langle \mathcal{S}^{CS} \rangle}(\mathbf{n} + e_{nuj}) \lambda_{nuj} + H_{\langle \mathcal{S}^{CS} \rangle}(\mathbf{n} + e_{huj}) \lambda_{huj} + \right. \\ & \left. H_{\langle \mathcal{S}^{CS} \rangle}(\mathbf{n} - e_{nuj}) n_{nuj} \mu_{nuj} + H_{\langle \mathcal{S}^{CS} \rangle}(\mathbf{n} - e_{huj}) n_{huj} \mu_{huj} \right] p(\mathbf{n}) = \\ & \sum_{j=1}^J \sum_{u=1}^U \left[H_{\langle \mathcal{S}^{CS} \rangle}(\mathbf{n} + e_{nuj}) (n_{nuj} + 1) \mu_{nuj} p(\mathbf{n} + e_{nuj}) + H_{\langle \mathcal{S}^{CS} \rangle}(\mathbf{n} - e_{nuj}) \lambda_{nuj} p(\mathbf{n} - e_{nuj}) + \right. \\ & \left. H_{\langle \mathcal{S}^{CS} \rangle}(\mathbf{n} + e_{huj}) (n_{huj} + 1) \mu_{huj} p(\mathbf{n} + e_{huj}) + H_{\langle \mathcal{S}^{CS} \rangle}(\mathbf{n} - e_{huj}) \lambda_{huj} p(\mathbf{n} - e_{huj}) \right]. \quad (3-31) \end{aligned}$$

Από την επίλυση της γενικής εξίσωσης ισορροπίας προκύπτουν οι πιθανότητες σταθερής κατάστασης του δικτύου

$$p(\mathbf{n}) = \mathbf{G} \prod_{j=1}^J \prod_{u=1}^U \left(\frac{\rho_{nuj}^{n_{nuj}}}{n_{nuj}!} \cdot \frac{\rho_{huj}^{n_{huj}}}{n_{huj}!} \right) \quad (3-32)$$

όπου \mathbf{G} ο παράγοντας κανονικοποίησης, ο οποίος με εφαρμογή της σχέσης $\sum_{\mathbf{n} \in \mathcal{S}^{CS}} p(\mathbf{n}) = 1$ προκύπτει

$$\mathbf{G}^{-1} = \sum_{\mathbf{n} \in \mathcal{S}^{CS}} \prod_{j=1}^J \prod_{u=1}^U \left(\frac{\rho_{nuj}^{n_{nuj}}}{n_{nuj}!} \cdot \frac{\rho_{huj}^{n_{huj}}}{n_{huj}!} \right). \quad (3-33)$$

Δεδομένων των πιθανοτήτων σταθερής κατάστασης μπορεί να υπολογιστεί η πιθανότητα μη αποδοχής νέων, $\mathbf{P}_{n,u,j}^{bl}$, και από διαπομπή κλήσεων, $\mathbf{P}_{h,u,j}^{bl}$, της κλάσης υπηρεσιών u στην κυψέλη j λαμβάνοντας υπόψη όλες τις καταστάσεις για τις οποίες οι ελεύθεροι πόροι τη κυψέλης j δεν επαρκούν για την εξυπηρέτηση μιας εισερχόμενης κλήσης της κλάσης υπηρεσιών u . Συνεπώς

$$\mathbf{P}_{n,u,j}^{bl} = \mathbf{P}_{h,u,j}^{bl} = \sum_{\mathbf{n} \in \mathcal{S}^{u,j,CS}} p(\mathbf{n}), \quad (3-34)$$

όπου $u = 1, \dots, U$, $j = 1, \dots, J$ και

$$\mathcal{S}^{u,j,CS} = \left\{ \mathbf{n}; \mathbf{n} \in \mathcal{S}^{CS}, C_j - \sum_{u=1}^U (n_{nuj} + n_{huj}) c_u < c_u \quad \acute{\eta} \quad M_j - \sum_{u=1}^U (n_{nuj} + n_{huj}) m_u < m_u, \right. \\ \left. u = 1, \dots, U, j = 1, \dots, J \right\} \quad (3-35)$$

το σύνολο των καταστάσεων του δικτύου για τις οποίες δε μπορεί να γίνει αποδεκτή μια κλήση της κλάσης υπηρεσιών u από την κυψέλη j λόγω εξάντλησης των διαθέσιμων πόρων.

Ομοίως, η πιθανότητα μη αποδοχής μιας εισερχόμενης, είτε νέας είτε από διαπομπή, κλήσης οποιασδήποτε κλάσης υπηρεσιών στην κυψέλη j είναι

$$\mathbf{P}_{n,j}^{BL} = \mathbf{P}_{h,j}^{BL} = \sum_{\mathbf{n} \in \mathcal{S}^{u,j,CS}} p(\mathbf{n}) \quad (3-36)$$

όπου

$$\mathcal{S}^{u,j,CS} = \left\{ \mathbf{n}; \mathbf{n} \in \mathcal{S}^{CS}, C_j - \sum_{j=1}^J \sum_{u=1}^U (n_{mj} + n_{huj}) c_u < \min(c_u) \text{ ή} \right. \\ \left. M_j - \sum_{j=1}^J \sum_{u=1}^U (n_{mj} + n_{huj}) m_u < \min(m_u), u = 1, \dots, U, j = 1, \dots, J \right\}. \quad (3-37)$$

Αν τεθεί $J = 1$ οι σχέσεις (3-34) και (3-36) ταυτίζονται με τις (3-25) και (3-27), αντίστοιχα, που δίνουν τις αντίστοιχες πιθανότητες μη αποδοχής μιας κυψέλης του δικτύου.

3.4. Αλγόριθμοι Δέσμευσης Καναλιών (Reservation Schemes)

Ένα από τα μειονεκτήματα των αλγορίθμων αποδοχής κλήσεων CS αποτελεί η αδυναμία τους να παρέχουν ένα εγγυημένο επίπεδο ποιότητας υπηρεσιών για τις κλήσεις από διαπομπή. Το μειονέκτημα αυτό γίνεται εμφανέστερο όταν το σύστημα λειτουργεί κοντά στο σημείο κορεσμού του, καθώς οι διαθέσιμοι πόροι του δικτύου κατανέμονται με την ίδια προτεραιότητα τόσο σε νέες κλήσεις όσο και σε κλήσεις από διαπομπή. Για το λόγο αυτό ανέκυψε η ανάγκη νέων αλγορίθμων αποδοχής κλήσεων οι οποίοι θα δίδουν προτεραιότητα στην αποδοχή των κλήσεων από διαπομπή σε σχέση με νέες κλήσεις.

Το 1986 προτάθηκε για πρώτη φορά από τους Hong και Rappaport ο αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων με κανάλια ασφαλείας (Guard Channel Scheme, GC Scheme) όπου ένα τμήμα των διαθέσιμων πόρων του δικτύου δεσμεύεται με σκοπό την αποκλειστική διάθεσή τους για την εξυπηρέτηση των κλήσεων από διαπομπή. Οι υπόλοιποι πόροι διατίθενται για την εξυπηρέτηση και των δύο κατηγοριών εισερχόμενων κλήσεων, είτε νέων είτε από διαπομπή. Για το λόγο αυτό, για την αποδοχή των νέων κλήσεων χρησιμοποιείται ένα κατώφλιο (threshold). Όταν μια εισερχόμενη κλήση ζητεί εξυπηρέτηση από το δίκτυο, ο αλγόριθμος εξετάζει το είδος της κλήσης. Όταν η κλήση είναι νέα, υπολογίζει το πλήθος των κατειλημμένων πόρων της υπό εξέταση κυψέλης και, εφόσον αυτό είναι μικρότερο από την τιμή του κατωφλίου, η κλήση γίνεται αποδεκτή, ειδάλλως απορρίπτεται. Στην περίπτωση όπου η εισερχόμενη κλήση προέρχεται από διαπομπή, γίνεται δεκτή εφόσον υπάρχουν διαθέσιμοι πόροι στην κυψέλη, χωρίς να εξετάζεται άλλο κριτήριο. Συνεπώς, μια κλήση από διαπομπή δε γίνεται δεκτή από κάποια κυψέλη του δικτύου μόνο όταν όλοι οι διαθέσιμοι πόροι της κυψέλης είναι κατειλημμένοι.

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν πολλές παραλλαγές των αλγορίθμων αποδοχής κλήσεων GC. Ο αλγόριθμος που περιγράφηκε προηγουμένως ονομάζεται αλγόριθμος σταθερής δέσμευσης πόρων (rigid division-based CAC scheme) καθώς η βασική αρχή λειτουργίας του είναι η δέσμευση συγκεκριμένου πλήθους καναλιών για την αποκλειστική εξυπηρέτηση

κλήσεων από διαπομπή. Μια άλλη προσέγγιση περιλαμβάνει τη δέσμευση ποσοστού των ελεύθερων πόρων του κοινού συνόλου (common pool) για την εξυπηρέτηση κλήσεων από διαπομπή. Κατ' αυτόν τον τρόπο όσο αυξάνεται η κίνηση σε μια κυψέλη του δικτύου τόσο μειώνεται το ποσοστό των πόρων που δεσμεύονται για κλήσεις από διαπομπή, επιτρέποντας και σε νέες κλήσεις να γίνονται αποδεκτές ακόμα και σε καταστάσεις αυξημένου φορτίου κίνησης. Επιπλέον, διαφοροποιήσεις στις παραλλαγές των αλγόριθμων αποδοχής κλήσεων GC εντοπίζονται και στον τρόπο με τον οποίο προσδιορίζεται η χωρητικότητα μιας κυψέλης, δηλαδή σε πόρους-κανάλια ή σε πλήθος χρηστών, οπότε ονομάζονται σχήματα cut of priority και new call bounding scheme, αντίστοιχα. Σε κάθε παραλλαγή των αλγόριθμων αποδοχής κλήσεων GC, το κριτήριο αποδοχής μιας εισερχόμενης κλήσης διαμορφώνεται ώστε να βασίζεται αντίστοιχα στο πλήθος των κατειλημμένων πόρων-καναλιών ή εξυπηρετούμενων χρηστών.

Οι αλγόριθμοι πολλαπλών κατωφλίων (multiple thresholding schemes) αποτελούν επέκταση των αλγόριθμων αποδοχής κλήσεων GC ώστε να εφαρμόζονται σε συστήματα κινητών επικοινωνιών πολλαπλών κλάσεων υπηρεσιών. Η βασική αρχή λειτουργίας τους περιλαμβάνει τη χρήση πολλαπλών κατωφλίων, ένα για κάθε υποστηριζόμενη κλάση υπηρεσιών. Οι τιμές των κατωφλίων διαφέρουν μεταξύ τους αντίστοιχα προς το επίπεδο προτεραιότητας που αποδίδεται από το δίκτυο σε κάθε κλάση υπηρεσιών. Επομένως, με την αύξηση του επιπέδου προτεραιότητας αυξάνεται και η τιμή κατωφλίου της αντίστοιχης κλάσης υπηρεσίας. Για την αποδοχή μιας νέας κλήσης από μια κυψέλη του δικτύου υπολογίζεται το συνολικό πλήθος των κατειλημμένων πόρων της κυψέλης το οποίο πρέπει να είναι μικρότερο από το κατώφλι της κλάσης υπηρεσιών στην οποία ανήκει η εισερχόμενη κλήση για να γίνει αποδεκτή.

Στην ανάλυση που ακολουθεί αρχικά μελετώνται οι αλγόριθμοι αποδοχής κλήσεων GC για την περίπτωση μιας κυψέλης αλλά και για την περίπτωση πολλαπλών κυψελών, δηλαδή το σύνολο του δικτύου. Στη συνέχεια, η ανάλυση γενικεύεται για την περίπτωση των δικτύων που υποστηρίζουν πολλαπλές κλάσεις υπηρεσιών όπου εφαρμόζονται οι αλγόριθμοι αποδοχής κλήσεων πολλαπλών κατωφλίων. Για κάθε περίπτωση που εξετάζεται παρέχονται οι αναλυτικές σχέσεις για τη πιθανότητα μη αποδοχής νέων κλήσεων και κλήσεων από διαπομπή κάθε υποστηριζόμενης κλάσης υπηρεσιών.

3.4.1. Αλγόριθμος Αποδοχής Κλήσεων με Κανάλια Ασφαλείας (Guard Channel Scheme)

3.4.1.1. Ανάλυση Μεμονωμένης Κυψέλης

Η εφαρμογή του αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων GC σε μεμονωμένη κυψέλη j ενός δικτύου αποτελεί την απλούστερη περίπτωση ενσωμάτωσης κατωφλίου στη λειτουργία αποδοχής κλήσεων καθώς στην ανάλυση χρησιμοποιείται μόνο ένα κατώφλι, T_j , για τον περιορισμό του πλήθους των νέων εισερχόμενων κλήσεων. Οι ρυθμοί γεννήσεων-θανάτων των διαδικασιών $X_{nj}(t)$ και $X_{hj}(t)$ στον αλγόριθμο αποδοχής κλήσεων GC είναι οι ίδιοι με τους αντίστοιχους που χρησιμοποιήθηκαν στην περίπτωση του αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων CS με τη διαφορά ότι ο ρυθμός γεννήσεων $\lambda_{nj}(n_j)$ της διαδικασίας $X_{nj}(t)$ μηδενίζεται όταν $n_{nj} + n_{hj} \geq T_j$, δηλαδή

$$\lambda_{nj}(n_j) = \begin{cases} \lambda_{nj}, & \text{αν } n_{nj} + n_{hj} < T_j \\ 0, & \text{αν } n_{nj} + n_{hj} \geq T_j. \end{cases} \quad (3-38)$$

Επομένως, η κατάσταση της κυψέλης j του δικτύου περιγράφεται από το διακριτό χώρο καταστάσεων

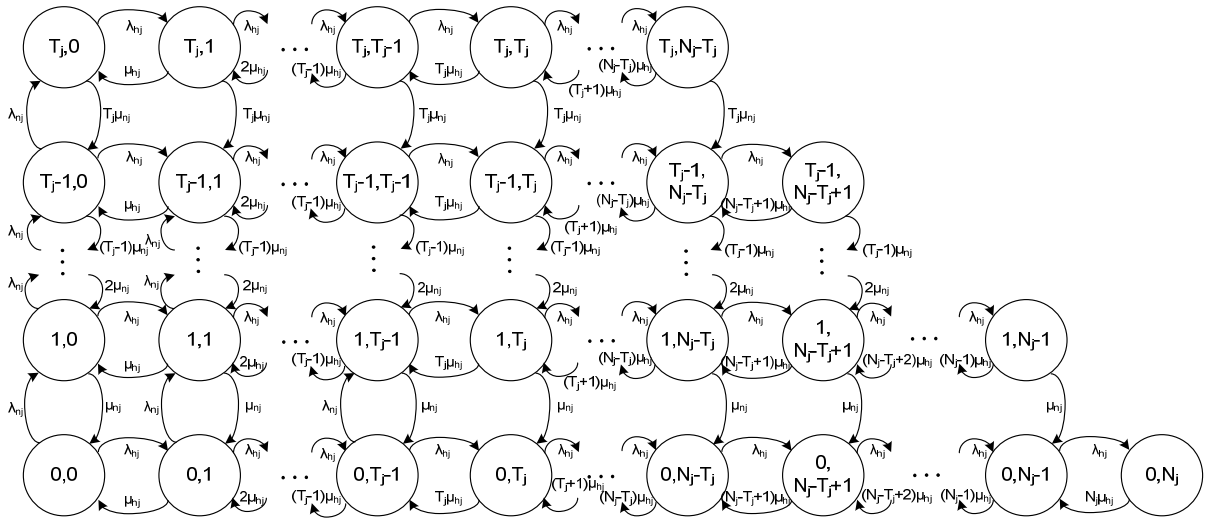
$$S_j^{GC} = \{n_j; n_j = (n_{nj}, n_{hj}), 0 \leq n_{nj} + n_{hj} \leq N_j, n_{nj} < T_j\}. \quad (3-39)$$

Το σύστημα περιγράφεται από δισδιάστατη αλυσίδα Markov συνεχούς χρόνου όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3-2. Η γενική εξίσωση ισορροπίας προκύπτει

$$\begin{aligned} & \left[H_{\langle S_j^{GC} \rangle} (n_j + e_n) \lambda_{nj}(n_j) + H_{\langle S_j^{GC} \rangle} (n_j + e_h) \lambda_{hj} + \right. \\ & \left. H_{\langle S_j^{GC} \rangle} (n_j - e_n) n_{nj} \mu_{nj} + H_{\langle S_j^{GC} \rangle} (n_j - e_h) n_{hj} \mu_{hj} \right] p_j(n_j) = \\ & H_{\langle S_j^{GC} \rangle} (n_j + e_n) (n_{nj} + 1) \mu_{nj} p_j(n_j + e_n) + H_{\langle S_j^{GC} \rangle} (n_j + e_h) (n_{hj} + 1) \mu_{hj} p_j(n_j + e_h) + \\ & H_{\langle S_j^{GC} \rangle} (n_j - e_n) \lambda_{nj}(n_j - e_n) p_j(n_j - e_n) + H_{\langle S_j^{GC} \rangle} (n_j - e_h) \lambda_{hj} p_j(n_j - e_h). \end{aligned} \quad (3-40)$$

Από την επίλυση των εξισώσεων ισορροπίας προκύπτουν οι πιθανότητες σταθερής κατάστασης $p_j(n_j)$

$$p_j(n_j) = \frac{\rho_{nj}^{n_{nj}}(n_j)}{n_{nj}!} \cdot \frac{\rho_{hj}^{n_{hj}}}{n_{hj}!} p_j(0) \quad (3-41)$$



Σχήμα 3-2: Αλυσίδα Markov για το αλγόριθμο αποδοχής κλήσεων GC μοναδικής κλάσης υπηρεσιών με διαχωρισμό των κλήσεων σε νέες και από διατομή.

όπου $\rho_{nj}(n_j) = \lambda_{nj}(n_j) / \mu_{nj}$ ο παράγοντας χρησιμοποίησης των πόρων του δικτύου και

$$p_j^{-1}(0) = \sum_{n_{nj}=0}^{T_j} \left[\frac{\rho_{nj}^{n_{nj}}(n_j)}{n_{nj}!} \cdot \sum_{n_{hj}=0}^{N_j - n_{nj}} \left(\frac{\rho_{hj}^{n_{hj}}}{n_{hj}!} \right) \right]. \quad (3-42)$$

Σύμφωνα με την αρχή λειτουργίας του αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων GC, μια νέα κλήση γίνεται αποδεκτή μόνον εφόσον το σύνολο των εξυπηρετούμενων χρηστών του δικτύου είναι μικρότερο από το κατώφλιο T_j . Επομένως, η πιθανότητα μη αποδοχής των νέων κλήσεων, $P_{n,j}^{bl}$, είναι ίση με το άθροισμα των πιθανοτήτων των καταστάσεων της αλυσίδας Markov για τις οποίες ισχύει $N_j \geq n_{nj} + n_{hj} \geq T_j$, δηλαδή

$$P_{n,j}^{bl} = \sum_{\substack{n_j \in S_j^{GC} \\ n_{nj} + n_{hj} \geq T_j}} p_j(n_j) = \sum_{n_{nj}=0}^{T_j} \sum_{n_{hj}=T_j - n_{nj}}^{N_j - n_{nj}} p_j(n_j). \quad (3-43)$$

Με αντικατάσταση των σχέσεων (3-41) έως (3-43) η πιθανότητα μη αποδοχής νέων κλήσεων σε ανεπτυγμένη μορφή γράφεται ως εξής

$$P_{n,j}^{bl} = \frac{\sum_{n_{nj}=0}^{T_j} \left[\frac{\rho_{nj}^{n_{nj}} (n_j)}{n_{nj}!} \sum_{n_{hj}=T_j-n_{nj}}^{N_j-n_{nj}} \left(\frac{\rho_{hj}^{n_{hj}}}{n_{hj}!} \right) \right]}{\sum_{n_{nj}=0}^{T_j} \left[\frac{\rho_{nj}^{n_{nj}} (n_j)}{n_{nj}!} \cdot \sum_{n_{hj}=0}^{N_j-n_{nj}} \left(\frac{\rho_{hj}^{n_{hj}}}{n_{hj}!} \right) \right]}. \quad (3-44)$$

Οι εισερχόμενες κλήσεις από διαπομπή γίνονται αποδεκτές μέχρις εξάντλησης των πόρων της κυψέλης. Συνεπώς, η πιθανότητα μη αποδοχής των κλήσεων από διαπομπή, $P_{h,j}^{bl}$, είναι ίση με το άθροισμα των πιθανοτήτων των ακραίων καταστάσεων της αλυσίδας Markov. Επισημαίνεται ότι το ίδιο κριτήριο αποδοχής των κλήσεων από διαπομπή χρησιμοποιείται από τον αλγόριθμο αποδοχής κλήσεων CS, οπότε ο τρόπος υπολογισμού της αντίστοιχης πιθανότητας μη αποδοχής για τους δύο αλγόριθμους ταυτίζεται. Επομένως

$$P_{h,j}^{bl} = \sum_{\substack{n_j \in S_j^{GC} \\ n_{hj} + n_{nj} = N_j}} p_j(n_j), \quad (3-45)$$

η οποία με αντικατάσταση των σχέσεων (3-41) και (3-42) λαμβάνει τη μορφή

$$P_{h,j}^{bl} = \frac{\sum_{n_{nj}=0}^{T_j} \left[\frac{\rho_{nj}^{n_{nj}} (n_j)}{n_{nj}!} \frac{\rho_{hj}^{N_j-n_{nj}}}{(N_j-n_{nj})!} \right]}{\sum_{n_{nj}=0}^{T_j} \left[\frac{\rho_{nj}^{n_{nj}} (n_j)}{n_{nj}!} \cdot \sum_{n_{hj}=0}^{N_j-n_{nj}} \left(\frac{\rho_{hj}^{n_{hj}}}{n_{hj}!} \right) \right]}. \quad (3-46)$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι, αν τεθεί $T_j = N_j$, ο ρόλος του κατωφλίου πρακτικά παύει να υφίσταται και το κριτήριο αποδοχής νέων κλήσεων και κλήσεων από διαπομπή είναι το ίδιο αφού κάθε εισερχόμενη κλήση γίνεται αποδεκτή μέχρι να εξαντληθούν οι διαθέσιμοι πόροι της κυψέλης. Στην περίπτωση αυτή, ο αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων GC μετατρέπεται σε αλγόριθμο αποδοχής κλήσεων CS.

3.4.1.2. Συνολική Ανάλυση του Δικτύου

Επεκτείνοντας την ανάλυση του αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων GC σε περισσότερες από μια κυψέλες, για κάθε κυψέλη j ορίζεται ένα κατώφλι T_j , το οποίο περιορίζει τις νέες κλήσεις με τιμή που εξαρτάται από το βαθμό προτεραιότητας που αποδίδεται στις κλήσεις από διαπομπή. Επομένως, όσο χαμηλότερη είναι η τιμή του κατωφλίου αυτού τόσο υψηλότερη η προτεραιότητα που αποδίδεται στις κλήσεις από διαπομπή. Κάθε στιγμή η

κατάσταση του δικτύου χαρακτηρίζεται από το πλήθος των ενεργών χρηστών κάθε κυψέλης και περιγράφεται από το σύνολο των διακριτών καταστάσεων

$$S^{GC} = \left\{ n, n = (n_1, \dots, n_j, \dots, n_J), n_j \in S_j^{GC} \right\}. \quad (3-47)$$

Στην περίπτωση αυτή η αντίστοιχη γενική εξίσωση ισορροπίας γράφεται

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^J \left[H_{\langle S^{GC} \rangle} (n + e_{nj}) \lambda_{nj} (n_j) + H_{\langle S^{GC} \rangle} (n + e_{hj}) \lambda_{hj} + \right. \\ & \left. H_{\langle S^{GC} \rangle} (n - e_{nj}) n_{nj} \mu_{nj} + H_{\langle S^{GC} \rangle} (n - e_{hj}) n_{hj} \mu_{hj} \right] p(n) = \\ & \sum_{j=1}^J \left[H_{\langle S^{GC} \rangle} (n + e_{nj}) (n_{nj} + 1) \mu_{nj} p(n + e_{nj}) + H_{\langle S^{GC} \rangle} (n + e_{hj}) (n_{hj} + 1) \mu_{hj} p(n + e_{hj}) + \right. \\ & \left. H_{\langle S^{GC} \rangle} (n - e_{nj}) \lambda_{nj} (n_j - e_{nj}) p(n - e_{nj}) + H_{\langle S^{GC} \rangle} (n - e_{hj}) \lambda_{hj} p(n - e_{hj}) \right], \quad (3-48) \end{aligned}$$

Από την επίλυση του συστήματος των εξισώσεων ισορροπίας προκύπτουν οι πιθανότητες σταθερής κατάστασης $p(n)$ της διαδικασίας Markov

$$p(n) = G \prod_{j=1}^J \left(\frac{\rho_{nj}^{n_{nj}} (n_j)}{n_{nj}!} \cdot \frac{\rho_{hj}^{n_{hj}}}{n_{hj}!} \right), \quad n \in S^{GC} \quad (3-49)$$

όπου

$$G^{-1} = \sum_{n \in S^{GC}} \prod_{j=1}^J \left(\frac{\rho_{nj}^{n_{nj}} (n_j)}{n_{nj}!} \cdot \frac{\rho_{hj}^{n_{hj}}}{n_{hj}!} \right). \quad (3-50)$$

Λαμβάνοντας υπόψη την αρχή λειτουργίας του αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων GC και το σκοπό της χρήσης των κατωφλίων T_j , η πιθανότητα μη αποδοχής μιας νέας κλήσης από την κυψέλη j , $P_{n,j}^{bl}$, είναι ίση με το άθροισμα των πιθανοτήτων των καταστάσεων του δικτύου για τις οποίες οι εξυπηρετούμενοι χρήστες είναι περισσότεροι ή ίσοι της τιμής κατωφλίου, συνεπώς

$$P_{n,j}^{bl} = \sum_{n \in S_{th}^{j,GC}} p(n) \quad (3-51)$$

όπου

$$S_{th}^{j,GC} = \left\{ n; n \in S^{GC}, n_{nj} + n_{hj} \geq T_j \right\} \quad (3-52)$$

είναι γνήσιο υποσύνολο του S^{GC} , $S_{th}^{j,GC} \subset S^{GC}$. Η πιθανότητα μη αποδοχής των κλήσεων από διαπομπή της κυψέλης j , $P_{h,j}^{bl}$, είναι ίση με το άθροισμα των πιθανοτήτων των καταστάσεων του δικτύου για τις οποίες το σύνολο των πόρων της κυψέλης είναι κατειλημμένοι, οπότε

$$P_{h,j}^{bl} = \sum_{n \in S^{j,GC}} p(n) \quad (3-53)$$

όπου

$$S^{j,GC} = \{n; n \in S^{GC}, n_{nj} + n_{hj} = N_j\}. \quad (3-54)$$

είναι γνήσιο υποσύνολο του $S^{j,GC}$, $S^{j,GC} \subset S^{GC}$.

Αν τεθεί $T_j = N_j$ για κάθε κυψέλη j , δηλαδή αν η τιμή κατωφλίου γίνει ίση με τη μέγιστη χωρητικότητα της κυψέλης, ο αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων GC μετατρέπεται σε αλγόριθμο αποδοχής κλήσεων CS, αφού η τιμή του κατωφλίου δεν περιορίζει την αποδοχή νέων κλήσεων από το δίκτυο. Τότε, τα σύνολα $S^{j,GC}$ και $S_{th}^{j,GC}$ καθίστανται ίσα και οι σχέσεις (3-51), (3-53) ταυτίζονται με τη σχέση (3-15).

3.4.2. Αλγόριθμος Αποδοχής Κλήσεων με Πολλαπλά Κατώφλια (Multiple Thresholding Scheme)

3.4.2.1. Ανάλυση Μεμονωμένης Κυψέλης

Όταν ένα δίκτυο υποστηρίζει πολλαπλές κλάσεις υπηρεσιών πλήθους U , η κατάσταση μιας κυψέλης j του δικτύου κάθε χρονική στιγμή περιγράφεται από το διάνυσμα $\mathbf{n}_j = (n_{1j}, \dots, n_{uj}, \dots, n_{Uj})$. Σε κάθε κλάση υπηρεσιών u αντιστοιχίζεται ένα κατώφλι $T_{u,j}$ το οποίο περιορίζει την αποδοχή νέων κλήσεων στην κυψέλη j . Αν υποτεθεί ότι το επίπεδο προτεραιότητας μιας κλάσης υπηρεσιών αυξάνεται με την αύξηση του δείκτη u , η σχέση διάταξης που πρέπει να ισχύει μεταξύ των κατωφλίων διαδοχικών κλάσεων υπηρεσιών είναι $T_{u,j} \geq T_{u+1,j}$.

Ο χώρος των διακριτών καταστάσεων του δικτύου για την κυψέλη j ορίζεται από το σύνολο

$$\mathcal{S}_j^{GS} = \left\{ \mathbf{n}_j; \mathbf{n}_j = (n_{1j}, \dots, n_{uj}, \dots, n_{Uj}), n_{uj} = (n_{nuj}, n_{huj}), 0 \leq n_{nuj} + n_{huj} \leq N_{uj}, \right. \\ \left. 0 \leq n_{nuj} \leq T_{uj}, u = 1, \dots, U \right\}. \quad (3-55)$$

Οι ρυθμοί γεννήσεων και θανάτων για τις διαδικασίες $X_{nuj}(t)$ και $X_{huj}(t)$ παραμένουν ίδιοι με τις αντίστοιχες τιμές που χρησιμοποιήθηκαν στην περίπτωση του αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων CS. Η μόνη διαφορά εντοπίζεται στο ρυθμό γεννήσεων νέων κλήσεων $\lambda_{nuj}(\mathbf{n}_j)$ της διαδικασίας $X_{nuj}(t)$ ο οποίος επηρεάζεται από τη χρήση του κατωφλίου $T_{u,j}$, δηλαδή

$$\lambda_{nuj}(\mathbf{n}_j) = \begin{cases} \lambda_{nuj}, & \alpha \nu \sum_{u=1}^U (n_{nuj} + n_{huj}) < T_{u,j} \\ 0, & \alpha \nu \sum_{u=1}^U (n_{nuj} + n_{huj}) \geq T_{u,j} \end{cases}. \quad (3-56)$$

Το σύστημα περιγράφεται από πολυδιάστατη αλυσίδα Markov συνεχούς χρόνου της οποίας η γενική εξίσωση ισορροπίας είναι

$$\sum_{u=1}^U \left[H_{\langle \mathcal{S}_j^{GS} \rangle}(\mathbf{n}_j + e_{nu}) \lambda_{nuj}(\mathbf{n}_j) + H_{\langle \mathcal{S}_j^{GS} \rangle}(\mathbf{n}_j + e_{hu}) \lambda_{huj} + \right. \\ \left. H_{\langle \mathcal{S}_j^{GS} \rangle}(\mathbf{n}_j - e_{nu}) n_{nuj} \mu_{nuj} + H_{\langle \mathcal{S}_j^{GS} \rangle}(\mathbf{n}_j - e_{hu}) n_{huj} \mu_{huj} \right] p(\mathbf{n}_j) = \\ \sum_{u=1}^U \left[H_{\langle \mathcal{S}_j^{GS} \rangle}(\mathbf{n}_j + e_{nu}) (n_{nuj} + 1) \mu_{nuj} p(\mathbf{n}_j + e_{nu}) + H_{\langle \mathcal{S}_j^{GS} \rangle}(\mathbf{n}_j + e_{hu}) (n_{huj} + 1) \mu_{huj} p(\mathbf{n}_j + e_{hu}) \right. \\ \left. + H_{\langle \mathcal{S}_j^{GS} \rangle}(\mathbf{n}_j - e_{nu}) \lambda_{nuj}(\mathbf{n}_j - e_{nu}) p(\mathbf{n}_j - e_{nu}) + H_{\langle \mathcal{S}_j^{GS} \rangle}(\mathbf{n}_j - e_{hu}) \lambda_{huj} p(\mathbf{n}_j - e_{hu}) \right]. \quad (3-57)$$

Από την επίλυση του συστήματος των εξισώσεων ισορροπίας προκύπτουν οι πιθανότητες σταθερής κατάστασης

$$p_j(\mathbf{n}_j) = G_j \prod_{u=1}^U \left(\frac{\rho_{nuj}^{n_{nuj}}(\mathbf{n}_j)}{n_{nuj}!} \cdot \frac{\rho_{huj}^{n_{huj}}}{n_{huj}!} \right), \quad (3-58)$$

όπου $\rho_{uj}(\mathbf{n}_j) = \lambda_{uj}(\mathbf{n}_j) / \mu_{uj}$ ο παράγοντας χρησιμοποίησης των πόρων του δικτύου για την κλάση υπηρεσιών u και G_j είναι ο παράγοντας κανονικοποίησης

$$G_j^{-1} = \sum_{\mathbf{n}_j \in \mathcal{S}_j^{GC}} \prod_{u=1}^U \left(\frac{\rho_{n_{uj}}^{n_{uj}}(\mathbf{n}_j)}{n_{n_{uj}}!} \cdot \frac{\rho_{h_{uj}}^{n_{uj}}}{n_{h_{uj}}!} \right). \quad (3-59)$$

Με βάση τις πιθανότητες σταθερής κατάστασης του δικτύου είναι δυνατός ο υπολογισμός των πιθανοτήτων μη αποδοχής νέων κλήσεων, $P_{n,u,j}^{bl}$, και κλήσεων από διαπομπή, $P_{h,u,j}^{bl}$, της κλάσης υπηρεσιών u στην κυψέλη j . Συγκεκριμένα

$$P_{n,u,j}^{bl} = \sum_{\mathbf{n}_j \in \mathcal{S}_j^{bl,u,GC}} p_j(\mathbf{n}_j) \quad (3-60)$$

και

$$P_{h,u,j}^{bl} = \sum_{\mathbf{n}_j \in \mathcal{S}_j^{u,GC}} p_j(\mathbf{n}_j) \quad (3-61)$$

αντίστοιχα, όπου τα σύνολα $\mathcal{S}_j^{bl,u,GC}$ και $\mathcal{S}_j^{u,GC}$ ορίζονται μέσω των σχέσεων

$$\mathcal{S}_j^{bl,u,GC} = \left\{ \mathbf{n}_j; \mathbf{n}_j \in \mathcal{S}_j^{GC}, \sum_{u=1}^U n_{u,j} c_u \geq T_{u,j} c_u \text{ ή } \sum_{u=1}^U n_{u,j} m_u \geq T_{u,j} m_u, u=1, \dots, U \right\} \quad (3-62)$$

και

$$\mathcal{S}_j^{u,GC} = \left\{ \mathbf{n}_j; \mathbf{n}_j \in \mathcal{S}_j^{GC}, C_j - \sum_{u=1}^U n_{u,j} c_u < c_u \text{ ή } M_j - \sum_{u=1}^U n_{u,j} m_u < m_u, u=1, \dots, U \right\}. \quad (3-63)$$

Όταν δύο ή περισσότερες κλάσεις υπηρεσιών έχουν το ίδιο επίπεδο προτεραιότητας, τα αντίστοιχα κατώφλια περιορισμού των νέων κλήσεων και για τις δύο κλάσεις υπηρεσιών έχουν την ίδια τιμή. Εντούτοις, οι αντίστοιχες πιθανότητες μη αποδοχής κλήσεων των δύο κλάσεων υπηρεσιών δεν είναι απαραίτητα ίσες καθώς οι τιμές τους εξαρτώνται και από το πλήθος των καναλιών ή πόρων του δικτύου που δεσμεύουν οι κλήσεις των αντίστοιχων κλάσεων υπηρεσιών. Επομένως, μόνο εφόσον ισχύουν ταυτόχρονα $T_{u,j} = T_{u+1,j}$ και $c_u = c_{u+1}$ για δύο κλάσεις υπηρεσιών u και $u+1$, ισχύει και $P_{n,u,j}^{bl} = P_{n,u+1,j}^{bl}$ και $P_{h,u,j}^{bl} = P_{h,u+1,j}^{bl}$.

3.4.2.2. Συνολική Ανάλυση του Δικτύου

Εξετάζοντας το σύνολο του δικτύου στην περίπτωση πολλαπλών κλάσεων υπηρεσιών πλήθους U , η κατάσταση κάθε χρονική στιγμή περιγράφεται από το διάνυσμα $\mathbf{n} = (\mathbf{n}_1, \dots, \mathbf{n}_j, \dots, \mathbf{n}_J)$ ενώ ο αντίστοιχος χώρος διακριτών καταστάσεων από το σύνολο

$$\mathcal{S}^{GS} = \left\{ \mathbf{n}; \mathbf{n} = (n_1, \dots, n_j, \dots, n_J), n_j \in \mathcal{S}_j^{GS} \right\}. \quad (3-64)$$

Το σύστημα περιγράφεται από πολυδιάστατη αλυσίδα Markov συνεχούς χρόνου, η γενική εξίσωση ισορροπίας της οποίας είναι

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^J \sum_{u=1}^U \left[H_{\langle \mathcal{S}_j^{GS} \rangle}(\mathbf{n}_j + e_{nu}) \lambda_{nuj}(\mathbf{n}_j) + H_{\langle \mathcal{S}_j^{GS} \rangle}(\mathbf{n}_j + e_{hu}) \lambda_{huj} + \right. \\ & \left. H_{\langle \mathcal{S}_j^{GS} \rangle}(\mathbf{n}_j - e_{nu}) n_{nuj} \mu_{nuj} + H_{\langle \mathcal{S}_j^{GS} \rangle}(\mathbf{n}_j - e_{hu}) n_{huj} \mu_{huj} \right] p(\mathbf{n}_j) = \\ & \sum_{j=1}^J \sum_{u=1}^U \left[H_{\langle \mathcal{S}_j^{GS} \rangle}(\mathbf{n}_j + e_{nu}) (n_{nuj} + 1) \mu_{nuj} p(\mathbf{n}_j + e_{nu}) + H_{\langle \mathcal{S}_j^{GS} \rangle}(\mathbf{n}_j + e_{hu}) (n_{huj} + 1) \mu_{huj} p(\mathbf{n}_j + e_{hu}) + \right. \\ & \left. H_{\langle \mathcal{S}_j^{GS} \rangle}(\mathbf{n}_j - e_{nu}) \lambda_{nuj}(\mathbf{n}_j - e_{nu}) p(\mathbf{n}_j - e_{nu}) + H_{\langle \mathcal{S}_j^{GS} \rangle}(\mathbf{n}_j - e_{hu}) \lambda_{huj} p(\mathbf{n}_j - e_{hu}) \right]. \quad (3-65) \end{aligned}$$

Επιλύοντας το σύστημα των εξισώσεων ισορροπίας προκύπτουν οι πιθανότητες σταθερής κατάστασης του δικτύου $p(\mathbf{n})$ υπό τη μορφή

$$p(\mathbf{n}) = \mathbf{G} \prod_{j=1}^J \prod_{u=1}^U \left(\frac{\rho_{nuj}^{n_{nuj}}(\mathbf{n}_j)}{n_{nuj}!} \cdot \frac{\rho_{huj}^{n_{huj}}}{n_{huj}!} \right) \quad (3-66)$$

όπου

$$\mathbf{G}^{-1} = \sum_{\mathbf{n} \in \mathcal{S}} \prod_{j=1}^J \prod_{u=1}^U \left(\frac{\rho_{nuj}^{n_{nuj}}(\mathbf{n}_j)}{n_{nuj}!} \cdot \frac{\rho_{huj}^{n_{huj}}}{n_{huj}!} \right). \quad (3-67)$$

Η πιθανότητα μη αποδοχής νέων κλήσεων, $\mathbf{P}_{n,u,j}^{bl}$, της κλάσης υπηρεσιών u της κυψέλης j προκύπτει ως το άθροισμα των πιθανοτήτων των καταστάσεων του δικτύου για τις οποίες η αντίστοιχη κλήση δε γίνεται δεκτή από το δίκτυο, δηλαδή

$$\mathbf{P}_{n,u,j}^{bl} = \sum_{\mathbf{n} \in \mathcal{S}_{th}^{u,j,GC}} p(\mathbf{n}), \quad (3-69)$$

όπου το σύνολο $\mathcal{S}_{th}^{u,j}$ περιλαμβάνει τις καταστάσεις του δικτύου για τις οποίες μια νέα κλήση της κλάσης υπηρεσιών u δεν μπορεί να γίνει αποδεκτή από την κυψέλη j επειδή οι διαθέσιμοι πόροι της δεν επαρκούν για την εξυπηρέτηση τουλάχιστον $N_{u,j} - T_{u,j}$ χρηστών της ίδιας κλάσης. Συνεπώς

$$\mathcal{S}_{th}^{u,j,GC} = \left\{ \mathbf{n}; \mathbf{n} \in \mathcal{S}^{GC}, \sum_{u=1}^U n_{u,j} c_u \geq T_{u,j} c_u \text{ ή } \sum_{u=1}^U n_{u,j} m_u \geq T_{u,j} m_u, u=1, \dots, U, j=1, \dots, J \right\}. \quad (3-70)$$

Ομοίως, η πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων από διαπομπή, $P_{h,u,j}^{bl}$, της κλάσης υπηρεσιών u της κυψέλης j προκύπτει ως το άθροισμα των καταστάσεων του δικτύου για τις οποίες οι πόροι της κυψέλης έχουν εξαντληθεί, δηλαδή

$$P_{h,u,j}^{bl} = \sum_{n \in S^{u,j,GC}} p(\mathbf{n}), \quad (3-71)$$

όπου

$$S^{u,j,GC} = \left\{ \mathbf{n}; \mathbf{n} \in S^{GC}, C_j - \sum_{u=1}^U n_{u,j} c_u < c_u \quad \text{ή} \quad M_j - \sum_{u=1}^U n_{u,j} m_u < m_u, u = 1, \dots, U, \right. \\ \left. j = 1, \dots, J \right\}. \quad (3-72)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι με κατάλληλες επιλογές των τιμών των κατωφλίων ο αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων GC μπορεί να μετατραπεί σε αλγόριθμο αποδοχής κλήσεων CS. Η τροποποίηση αυτή του αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων GC μπορεί να γίνει είτε σε επίπεδο μιας κυψέλης, θέτοντας $T_{u,j} = N_{u,j}$ για κάθε $u = 1, \dots, U$, είτε σε επίπεδο κλάσης υπηρεσιών, θέτοντας $T_{u,j} = N_{u,j}$ για κάθε $j = 1, \dots, J$. Στην πρώτη περίπτωση, τα κατώφλια αποδοχής κλήσεων σε μια κυψέλη j για όλες τις υποστηριζόμενες κλάσεις υπηρεσιών είναι ίσα με τη μέγιστη χωρητικότητα αυτής, οπότε ο αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων GC μετατρέπεται σε αλγόριθμο αποδοχής κλήσεων CS μόνο εντός της κυψέλης j . Στη δεύτερη περίπτωση, τα κατώφλια αποδοχής κλήσεων της κλάσης υπηρεσιών u για κάθε κυψέλη j είναι ίσα με τη μέγιστη χωρητικότητα αυτής, οπότε η συγκεκριμένη κλάση υπηρεσιών αποκτά το μέγιστο βαθμό προτεραιότητας σε όλο το δίκτυο.

3.4.3. Μειονεκτήματα της Χρήσης Κατωφλίων

Ο αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων GC επιτυγχάνει την εφαρμογή διαφορετικών κριτηρίων για την αποδοχή των κλάσεων υπηρεσιών που υποστηρίζει το δίκτυο μέσω της χρήσης κατάλληλων κατωφλίων εξαλείφοντας τα μειονεκτήματα που παρουσιάζει ο αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων CS. Ωστόσο, υπάρχουν σημαντικά μειονεκτήματα τα οποία εντοπίζονται κυρίως στον τρόπο υπολογισμού των τιμών των κατωφλίων, ο οποίος αποτελεί εξαιρετικά δύσκολη διαδικασία, κρίσιμη για την αποτελεσματική λειτουργία του αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων GC. Αντίστοιχα προς τον τρόπο υπολογισμού που χρησιμοποιούν, οι αλγόριθμοι υπολογισμού των τιμών των κατωφλίων που χρησιμοποιούνται, κατηγοριοποιούνται σε στατικούς και δυναμικούς.

Οι στατικοί αλγόριθμοι υπολογισμού βασίζονται σε πρότυπα κίνησης (traffic patterns) βάσει των οποίων υπολογίζονται οι τιμές των κατωφλίων για κάθε υποστηριζόμενη κλάση υπηρεσιών του δικτύου. Ο υπολογισμός αυτός πραγματοποιείται μόνο μια φορά πριν την εφαρμογή του GC αλγόριθμου. Επομένως, οι τιμές των κατωφλίων παραμένουν σταθερές κατά την εφαρμογή του αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι μεταβολές των παραμέτρων του δικτύου και του πλήθους και του είδους των χρηστών. Σε πραγματικές καταστάσεις λειτουργίας του δικτύου, η εισερχόμενη κίνηση στις διάφορες κυψέλες μεταβάλλεται με το χρόνο με συνέπεια να μην είναι εφικτή η προσέγγισή της μέσω των προτύπων κίνησης. Επομένως, ένα δίκτυο με μεταβλητά χαρακτηριστικά απαιτεί τη χρήση δυναμικών αλγόριθμων υπολογισμού των τιμών των κατωφλίων οι οποίοι κατά κανόνα επιτυγχάνουν καλύτερη απόδοση ως προς τους στατικούς αλγόριθμους.

Οι δυναμικοί αλγόριθμοι βασίζονται είτε στην πρόβλεψη της κινητικότητας των χρηστών του δικτύου, χρησιμοποιώντας τεχνικές πρόβλεψης της κίνησης, της κατεύθυνσης και της θέσης των κινητών τερματικών, είτε στη μέτρηση συγκεκριμένων παραμέτρων του δικτύου, όπως η πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων, οι διαθέσιμοι πόροι των κυψελών κ.α. Σε κάθε περίπτωση, ο υπολογισμός των τιμών των κατωφλίων πραγματοποιείται μέσω της βελτιστοποίησης μιας αντικειμενικής συνάρτησης η οποία εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά αυτά. Ο υπολογισμός μπορεί να πραγματοποιείται κατά τακτά χρονικά διαστήματα, μεταβάλλοντας ανάλογα τα κριτήρια αποδοχής κλήσεων. Η ακρίβεια των μοντέλων πρόβλεψης της κινητικότητας καθώς και των τεχνικών μέτρησης των παραμέτρων του δικτύου επηρεάζουν άμεσα τον τρόπο υπολογισμού των κατωφλίων και, κατ' επέκταση, την αποδοτικότητα του GC αλγόριθμου.

Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν παρουσιαστεί πολλοί δυναμικοί αλγόριθμοι οι οποίοι προτείνουν διαφορετικούς τρόπους υπολογισμού των τιμών των κατωφλίων βασιζόμενοι σε τεχνικές βελτιστοποίησης διάφορων παραμέτρων του δικτύου όπως, για παράδειγμα, η ελαχιστοποίηση της πιθανότητας μη αποδοχής κλήσεων, η μεγιστοποίηση της απολαβής του διαχειριστή του δικτύου, η βέλτιστη χρήση των διαθέσιμων πόρων κ.α. Εντούτοις, οι αλγόριθμοι αυτοί είναι εξαιρετικά πολύπλοκοι, έχουν ανάγκη αυξημένης υπολογιστικής ισχύος λόγω του μεγάλου πλήθους δεδομένων που εξετάζουν και απαιτούν την ανταλλαγή σημαντικού όγκου πληροφορίας μεταξύ των σταθμών βάσης καθιστώντας δύσκολη την εφαρμογή τους στην πράξη.

3.5. Πιθανοτικός Αλγόριθμος Αποδοχής Κλήσεων (Probabilistic CAC Scheme)

Λαμβάνοντας υπόψη τα μειονεκτήματα των αλγόριθμων αποδοχής κλήσεων που αναφέρθηκαν έως τώρα και τις απαιτήσεις των σύγχρονων συστημάτων κινητών επικοινωνιών γίνεται αντιληπτή η ανάγκη για την ανάπτυξη ενός σύγχρονου και αποδοτικού αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων ο οποίος θα:

1. λαμβάνει υπόψη του τις διαφορετικές κλάσεις υπηρεσιών προσφέροντας διάφορα επίπεδα προτεραιότητας στην κάθε μια ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της,
2. δίδει προτεραιότητα στις κλήσεις από διαπομπή έναντι των νέων κλήσεων,
3. εξασφαλίζει το αποδεκτό επίπεδο ποιότητας υπηρεσιών σε κάθε κλήση καθ' όλη τη διάρκειά της,
4. επιτυγχάνει την ομαλή μείωση της ροής εισερχόμενων κλήσεων κάθε κλάσης υπηρεσιών ανάλογα με το επίπεδο προτεραιότητάς της όταν αυξάνεται το πλήθος των κατειλημμένων πόρων μιας κυψέλης, αποφεύγοντας την απότομη μετάβαση από την πλήρη αποδοχή των εισερχόμενων κλήσεων στη μη αποδοχή όπως συμβαίνει με τους αλγόριθμους δέσμευσης καναλιών,
5. επιτυγχάνει χαμηλά επίπεδα μη αποδοχής κλήσεων για όλες τις υποστηριζόμενες κλάσεις υπηρεσιών,
6. λαμβάνει υπόψη του τη διαθέσιμη χωρητικότητα μιας κυψέλης μεταβάλλοντας ανάλογα τα κριτήρια αποδοχής κλήσεων,
7. αποτρέπει τη συμφόρηση του δικτύου,
8. εξασφαλίζει ένα ικανοποιητικό επίπεδο δικαιοσύνης μεταξύ κλήσεων διαφορετικών κλάσεων υπηρεσιών αποτρέποντας τη μονοπώληση των πόρων από τις κλάσεις υψηλής προτεραιότητας
9. επιτυγχάνει αποτελεσματική χρήση των πόρων του δικτύου μειώνοντας τα επίπεδα εσφαλμένης αποδοχής ή απόρριψης κλήσεων.

Για την εξασφάλιση των ανωτέρω χαρακτηριστικών αναπτύχθηκε ένας νέος αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων. Η λειτουργία του βασίζεται στη χρήση πιθανοτήτων για την αποδοχή των κλήσεων χαμηλής προτεραιότητας. Καθώς αυξάνεται το φορτίο κίνησης σε μια κυψέλη, οι τιμές των πιθανοτήτων κλιμακώνονται από τη μονάδα μέχρι το μηδέν και είναι διαφορετικές για κάθε κατάσταση του δικτύου (74; 33).

Η ιδέα της χρήσης πιθανοτήτων για την αποδοχή των εισερχόμενων κλήσεων προτάθηκε για πρώτη φορά από τον Ramjee το 1996 (64; 65). Το μοντέλο που προτάθηκε ήταν μια υβριδική μορφή ενός GC αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων ο οποίος χρησιμοποιεί στατική πιθανότητα για την αποδοχή νέων κλήσεων όταν το φορτίο μιας κυψέλης είναι μεγαλύτερο της τιμής του κατωφλίου. Το μοντέλο αυτό, εξακολουθεί να χρησιμοποιεί κατώφλιο για την αποδοχή των νέων κλήσεων, δε μεταβάλλει το κριτήριο αποδοχής δυναμικά με την αύξηση της εξυπηρετούμενης κίνησης της κυψέλης και περιορίζει την ανάλυση και κατά συνέπεια τον αλγόριθμο αποδοχής κλήσεων σε μια κλάση υπηρεσιών. Επέκταση του μοντέλου αυτού προτάθηκε από τον Fang το 2002 (35), όπου για πρώτη φορά καταργήθηκε η χρήση του κατωφλίου και χρησιμοποιήθηκε πιθανότητα για την αποδοχή νέων κλήσεων σε κάθε κατάσταση του δικτύου. Ωστόσο, η ανάλυση παρέμεινε να είναι περιορισμένη για μια κλάση υπηρεσιών, η πιθανότητα αποδοχής νέων κλήσεων λάμβανε προκαθορισμένες τιμές και δε μεταβαλλόταν δυναμικά ανάλογα με τη διακύμανση της εξυπηρετούμενης κίνησης της κυψέλης. Επιπλέον, εκτός από την πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων δε χρησιμοποιήθηκε άλλο κριτήριο αξιολόγησης της επίδοσης του αλγόριθμου, όπως, για παράδειγμα, η δίκαιη κατανομή πόρων μεταξύ κλήσεων διαφορετικών κλάσεων υπηρεσιών ή η βελτίωση της αποδοτικής χρήσης των πόρων του δικτύου.

Το προτεινόμενο μοντέλο αποδοχής κλήσεων αποσκοπεί στην αντιμετώπιση όλων αυτών των προβλημάτων κάνοντας δυναμική χρήση πιθανοτήτων για την αποδοχή κλήσεων χαμηλής προτεραιότητας (34; 33). Οι τιμές των πιθανοτήτων αποδοχής μεταβάλλονται δυναμικά καθώς μεταβάλλεται το φορτίο του δικτύου και η κλάση υπηρεσιών των εισερχόμενων. Η βασική αρχή του αλγόριθμου έγκειται στη μείωση των τιμών των πιθανοτήτων αποδοχής καθώς αυξάνεται η εξυπηρετούμενη κίνηση του δικτύου, με συνέπεια τη σταδιακή μείωση του ποσοστού αποδοχής των κλήσεων χαμηλής προτεραιότητας όταν περιορίζονται οι διαθέσιμοι πόροι του δικτύου (33). Λόγω της καινοτομίας του ως προς τον τρόπο χρήσης των πιθανοτήτων, ο προτεινόμενος αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων καλείται πιθανοτικός αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων (Probabilistic CAC Scheme) (74). Η σχετική ανάλυση διακρίνει την περίπτωση της μοναδικής κλάσης υπηρεσιών και εκείνη των πολλαπλών κλάσεων υπηρεσιών (75).

Στην πρώτη περίπτωση για την αποδοχή των νέων κλήσεων γίνεται χρήση μιας πιθανότητας για κάθε κατάσταση του δικτύου. Η πιθανότητα αυτή μπορεί να είναι διαφορετική για κάθε κατάσταση του δικτύου εξαρτώμενη από τη διακύμανση της

εξυπηρετούμενης κίνησης της κυψέλης, δηλαδή από το πλήθος των χρηστών που εξυπηρετούνται κάθε στιγμή από αυτή. Η τιμή της πιθανότητας μειώνεται με την αύξηση του πλήθους των εξυπηρετούμενων κλήσεων εξασφαλίζοντας ότι ο αριθμός των νέων κλήσεων που γίνονται δεκτές θα περιορίζεται σταδιακά καθώς εξαντλούνται οι διαθέσιμοι πόροι της κυψέλης με στόχο να διασφαλιστεί η προτεραιότητα εξυπηρέτησης κλήσεων από διαπομπή. Η πιθανότητα αποδοχής νέων κλήσεων που χρησιμοποιούνται σε κάθε δυνατή κατάσταση του δικτύου και η κλιμακούμενη μείωση των τιμών της από τη μονάδα έως την ελάχιστη τιμή (συνήθως μηδέν) εκφράζει ποσοτικά το επίπεδο προτεραιότητας που επιβάλλεται από τον αλγόριθμο αποδοχής μεταξύ νέων κλήσεων και κλήσεων από διαπομπή.

Στη δεύτερη περίπτωση ο πιθανοτικός αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων τροποποιείται κατάλληλα ώστε να υποστηρίζει πολλαπλές κλάσεις υπηρεσιών. Συγκεκριμένα, εξακολουθεί να χρησιμοποιείται μια πιθανότητα για την απόδοση προτεραιότητας στις κλήσεις από διαπομπή έναντι των νέων κλήσεων κάθε κλάσης υπηρεσιών (75). Η τιμή της πιθανότητας αυτής είναι κατά κανόνα διαφορετική για κάθε υποστηριζόμενη κλάση υπηρεσιών. Επιπλέον, χρησιμοποιείται μια δεύτερη πιθανότητα η οποία εγγυάται την παροχή διαφορετικών επιπέδων προτεραιότητας μεταξύ κλήσεων που ανήκουν σε ξεχωριστές κλάσεις υπηρεσιών (75). Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατός ο ανεξάρτητος χειρισμός των κλήσεων κάθε κλάσης υπηρεσιών με εφαρμογή διαφορετικών κριτηρίων αποδοχής στις εισερχόμενες κλήσεις τα οποία, εκτός από το επίπεδο προτεραιότητας, λαμβάνουν υπόψη και τις προδιαγραφές παροχής ποιότητας υπηρεσιών κάθε κλάσης. Επίσης, μέσω της πιθανότητας αυτής υλοποιείται ο σταδιακός περιορισμός των εισερχόμενων κλήσεων χαμηλής προτεραιότητας καθώς αυξάνεται η κίνηση των κυψελών αποφεύγοντας την απότομη μετάβαση από την πλήρη αποδοχή στον πλήρη αποκλεισμό των εισερχόμενων κλήσεων που προκύπτει από τη χρήση κατωφλίων.

Όπως προκύπτει από την ανάλυση που ακολουθεί, ο προτεινόμενος πιθανοτικός αλγόριθμος αποτελεί ένα γενικό αλγόριθμο αποδοχής κλήσεων καθώς με κατάλληλη επιλογή των τιμών των πιθανοτήτων μπορεί να μετατραπεί στους CS ή GC αλγόριθμους αποδοχής κλήσεων, οι οποίοι αποτελούν ειδικές περιπτώσεις του. Επιπλέον, προσφέρει περισσότερες δυνατότητες από όσους αλγόριθμους αποδοχής κλήσεων έχουν παρουσιαστεί στη βιβλιογραφία έως σήμερα. Εκτός από τα ευέλικτα κριτήρια αποδοχής κλήσεων που προσφέρει, παρέχει ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο διαχείρισης των πόρων των κυψελών του δικτύου, καθώς μέσω της κατάλληλης επιλογής των πιθανοτήτων αποδοχής μπορεί να

επιτευχθεί η επιθυμητή κατανομή των πόρων του δικτύου στις εξυπηρετούμενες κλήσεις όλων των κλάσεων υπηρεσιών.

Στην ανάλυση που ακολουθεί, αρχικά εξετάζεται η απλή περίπτωση μιας κλάσης υπηρεσιών και, στη συνέχεια, η ανάλυση γενικεύεται για πολλαπλές κλάσεις υπηρεσιών διαφορετικών προδιαγραφών παροχής ποιότητας υπηρεσιών.

3.5.1. Τμηματικός Αλγόριθμος Αποδοχής Περιορισμού Νέων Κλήσεων (Fractional CAC Scheme)

3.5.1.1. Ανάλυση Μεμονωμένης Κυψέλης

Στην υποενότητα αυτή παρουσιάζεται η ανάλυση του πιθανοτικού αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων για μεμονωμένη κυψέλη j του δικτύου η οποία υποστηρίζει μια μόνο κλάση υπηρεσιών. Κάθε χρονική στιγμή, η κατάσταση n_j της κυψέλης j του δικτύου περιγράφεται από το διακριτό χώρο καταστάσεων S_j^{Pr} ο οποίος είναι ίσος με το αντίστοιχο χώρο καταστάσεων S_j^{CS} του αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων CS που ορίζεται στην (3-1). Οι εισερχόμενες κλήσεις διακρίνονται σε νέες και από διαπομπή. Εξαιτίας της υψηλής προτεραιότητας των κλήσεων από διαπομπή ο πιθανοτικός αλγόριθμος επιτρέπει την αποδοχή τους μέχρι να εξαντληθούν όλοι οι διαθέσιμοι πόροι της κυψέλης. Από την άλλη πλευρά, οι νέες κλήσεις γίνονται αποδεκτές βάσει μιας πιθανότητας η οποία είναι διαφορετική για κάθε κατάσταση του δικτύου και εξαρτάται από την εξυπηρετούμενη κίνηση της κυψέλης j και τις απαιτήσεις της κλάσης υπηρεσιών για εγγυημένο επίπεδο ποιότητας παροχής υπηρεσιών. Έστω $a_{\ell,j}$, $0 \leq a_{\ell,j} \leq 1$, η πιθανότητα αποδοχής μιας νέας κλήσης όταν στην κυψέλη j είναι κατειλημμένοι ℓ πόροι, οι οποίοι μπορεί να εκφράζονται είτε σε πλήθος καναλιών είτε σε μονάδες χωρητικότητας. Για να εξασφαλιστεί η σταδιακή μείωση της αποδοχής νέων κλήσεων καθώς αυξάνεται το εξυπηρετούμενο φορτίο της κυψέλης η αντίστοιχη πιθανότητα αποδοχής πρέπει να μειώνεται, επομένως, $a_{\ell,j} \geq a_{\ell+1,j}$. Ο ρυθμός γεννήσεων νέων κλήσεων της διαδικασίας $X_j(t)$ εξαρτάται από την πιθανότητα $a_{\ell,j}$

$$\lambda_{nj}(n_j) = a_{(n_{nj}+n_{hj})k,j} \lambda_{nj}, \quad (3-73)$$

όπου $k = c$ ή m όταν οι πόροι της κυψέλης εκφράζονται σε πλήθος καναλιών ή μονάδες χωρητικότητας, αντίστοιχα. Πρέπει να σημειωθεί ότι όταν το σύνολο των πόρων μιας κυψέλης είναι δεσμευμένοι καμία εισερχόμενη κλήση δεν μπορεί να γίνει αποδεκτή, οπότε $a_{(N_j)k,j} = 0$. Ο ρυθμός γεννήσεων κλήσεων από διαπομπή καθώς και οι ρυθμοί θανάτων νέων κλήσεων και κλήσεων από διαπομπή δε μεταβάλλονται σε σχέση με τις προηγούμενες αναλύσεις. Επομένως, οι ρυθμοί μετάβασης $\pi(n_j | \tilde{n}_j)$ από την κατάσταση n_j στην κατάσταση \tilde{n}_j της κυψέλης j του δικτύου, όπου $n_j, \tilde{n}_j \in S_j^{\text{Pr}}$, είναι

$$\pi((n_{nj}, n_{hj}) | (n_{nj} + 1, n_{hj})) = a_{(n_{nj}+n_{hj})k,j} \lambda_{nj} \quad (3-74\alpha)$$

$$\pi((n_{nj}, n_{hj}) | (n_{nj}, n_{hj} + 1)) = \lambda_{hj} \quad (3-74\beta)$$

όπου $0 \leq n_{nj} + n_{hj} \leq N_j - 1$ και

$$\pi((n_{nj}, n_{hj}) | (n_{nj} - 1, n_{hj})) = n_{nj} \mu_{nj}, \quad (3-74\gamma)$$

$$\pi((n_{nj}, n_{hj}) | (n_{nj}, n_{hj} - 1)) = n_{hj} \mu_{hj}, \quad (3-74\delta)$$

όπου $1 \leq n_{nj} + n_{hj} \leq N_j$. Ο ρυθμός μετάβασης σε μη γειτονικές καταστάσεις είναι μηδενικός. Δεδομένων των ρυθμών μετάβασης μεταξύ γειτονικών καταστάσεων το σύστημα περιγράφεται από μια δισδιάστατη αλυσίδα Markov όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3-3, η γενική εξίσωση ισορροπίας της οποίας δίνεται από τη σχέση

$$\begin{aligned} & \left[H_{\langle S_j^{\text{Pr}} \rangle} (n_j + e_n) a_{(n_{nj}+n_{hj})k,j} \lambda_{nj} + H_{\langle S_j^{\text{Pr}} \rangle} (n_j + e_h) \lambda_{hj} + \right. \\ & \left. H_{\langle S_j^{\text{Pr}} \rangle} (n_j - e_n) n_{nj} \mu_{nj} + H_{\langle S_j^{\text{Pr}} \rangle} (n_j - e_h) n_{hj} \mu_{hj} \right] p_j(n_j) = \\ & H_{\langle S_j^{\text{Pr}} \rangle} (n_j + e_n) (n_{nj} + 1) \mu_{nj} p_j(n_j + e_n) + H_{\langle S_j^{\text{Pr}} \rangle} (n_j + e_h) (n_{hj} + 1) \mu_{hj} p_j(n_j + e_h) + \\ & H_{\langle S_j^{\text{Pr}} \rangle} (n_j - e_n) a_{(n_{nj}+n_{hj}-1)k,j} \lambda_{nj} p_j(n_j - e_n) + H_{\langle S_j^{\text{Pr}} \rangle} (n_j - e_h) \lambda_{hj} p_j(n_j - e_h). \end{aligned} \quad (3-75)$$

Από την επίλυση του συστήματος εξισώσεων ισορροπίας προκύπτουν οι πιθανότητες σταθερής κατάστασης του δικτύου

$$p_j(n_j) = \frac{\prod_{i=0}^{n_j-1} a_{(i+n_j)k,j} \rho_{n_j}^{n_j}}{n_{n_j}!} \cdot \frac{\rho_{h_j}^{n_j}}{n_{h_j}!} p_j(0) \quad (3-76)$$

όπου $p_j(0)$ η πιθανότητα να μην εξυπηρετείται κανένας χρήστης στο δίκτυο και υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση

$$p_j^{-1}(0) = \sum_{n_{n_j}=0}^{N_j} \sum_{n_{h_j}=0}^{N_j-n_{n_j}} \left[\frac{\prod_{i=0}^{n_{n_j}-1} a_{(i+n_{n_j})k,j} \rho_{n_{n_j}}^{n_{n_j}}}{n_{n_j}!} \cdot \frac{\rho_{h_j}^{n_{n_j}}}{n_{h_j}!} \right]. \quad (3-77)$$

Σύμφωνα με τον τρόπο λειτουργίας του πιθανοτικού αλγόριθμου, σε κάθε κατάσταση του δικτύου υπάρχει η πιθανότητα μια νέα κλήση να μη γίνει δεκτή. Αυτό εξαρτάται από την τιμή της παραμέτρου $a_{\ell,j}$. Επομένως, η πιθανότητα μη αποδοχής νέων κλήσεων προκύπτει από το άθροισμα των επιμέρους πιθανοτήτων μη αποδοχής νέων κλήσεων σε όλες τις καταστάσεις του δικτύου, δηλαδή

$$P_{n,j}^{bl} = \sum_{n_{n_j}=0}^{N_j} \sum_{n_{h_j}=0}^{N_j-n_{n_j}} \left[\left(1 - a_{(n_{n_j}+n_{h_j})k,j}\right) p_j(n_j) \right]. \quad (3-78)$$

Λόγω της αυξημένης προτεραιότητας των κλήσεων από διαπομπή, ο πιθανοτικός αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων δεν αποδέχεται μια κλήση από διαπομπή μόνο όταν έχουν δεσμευτεί όλοι οι διαθέσιμοι πόροι της κυψέλης. Η πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων από διαπομπή στην περίπτωση αυτή είναι ίση με την πιθανότητα της κατάστασης του δικτύου για την οποία η κυψέλη εξυπηρετεί το μέγιστο πλήθος χρηστών` συνεπώς

$$P_{h,j}^{bl} = \sum_{\substack{n_j \in S_j^{Pr} \\ n_{n_j}+n_{h_j}=N_j}} p_j(n_j) = \sum_{n_{n_j}=0}^{N_j} \left[\frac{\prod_{i=0}^{n_{n_j}-1} a_{(i+N_j-n_{n_j})k,j} \rho_{n_{n_j}}^{n_{n_j}}}{n_{n_j}!} \cdot \frac{\rho_{h_j}^{N_j-n_{n_j}}}{(N_j-n_{n_j})!} \right] p_j(0). \quad (3-79)$$

Αν τεθεί $a_{k,j} = \dots = a_{(T_j-1)k,j} = 1$ και $a_{T_j k,j} = \dots = a_{N_j k,j} = 0$, καμία νέα εισερχόμενη κλήση δε γίνεται αποδεκτή όταν το εξυπηρετούμενο φορτίο του δικτύου είναι ίσο ή υπερβαίνει την τιμή του κατωφλίου T_j . Αντίθετα, όταν το πλήθος των χρηστών που εξυπηρετεί μια κυψέλη είναι μικρότερο του T_j , όλες οι νέες κλήσεις γίνονται αποδεκτές. Στην περίπτωση αυτή ο πιθανοτικός αλγόριθμος λειτουργεί όπως ο αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων GC με

κατώφλιο την παράμετρο T_j . Εξάλλου, αν τεθεί $a_{k,j} = \dots = a_{N_j k, j} = 1$, όλες οι νέες κλήσεις γίνονται αποδεκτές μέχρι να εξαντληθούν οι διαθέσιμοι πόροι της κυψέλης. Στην περίπτωση αυτή ο πιθανοτικός αλγόριθμος λειτουργεί όπως ο CS αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων. Από τις δύο περιπτώσεις που παρουσιάστηκαν γίνεται σαφές ότι οι αλγόριθμοι GC και CS αποτελούν ειδικές περιπτώσεις του πιθανοτικού αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων, γεγονός που καταδεικνύει ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων περιλαμβάνει ως υποπεριπτώσεις όσους έχουν παρουσιαστεί στη βιβλιογραφία μέχρι σήμερα.

3.5.1.2. Συνολική Ανάλυση του Δικτύου

Για να ληφθεί υπόψη όλο το δίκτυο, η ανάλυση πρέπει να επεκταθεί στο σύνολο των κυψελών του. Επομένως, κάθε στιγμή η κατάσταση του δικτύου περιγράφεται από το διάνυσμα $n = (n_1, \dots, n_j, \dots, n_J)$, $n \in S^{Pr}$, όπου το σύνολο S^{Pr} είναι ίσο με το αντίστοιχο σύνολο S^{CS} των διακριτών καταστάσεων του δικτύου ορίζεται στην (3-10). Λαμβάνοντας υπόψη την πιθανότητα $a_{\ell,j}$, η γενική εξίσωση ισοροπίας προκύπτει

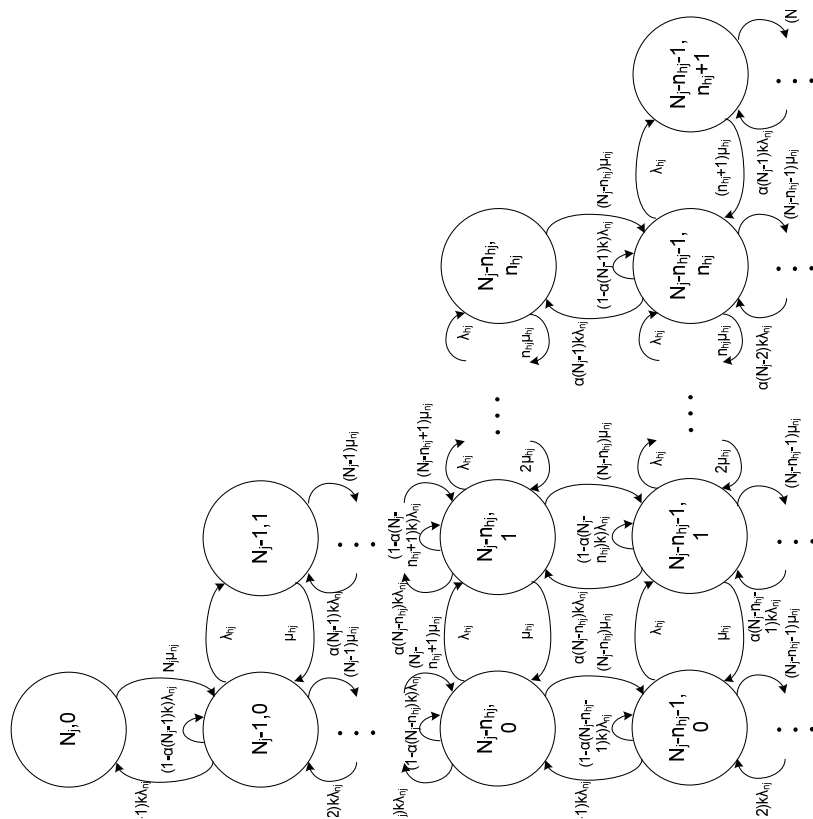
$$\sum_{j=1}^J \left[H_{\langle S^{Pr} \rangle} (n + e_{nj}) a_{(n_j+n_{hj})k,j} \lambda_{nj} + H_{\langle S^{Pr} \rangle} (n + e_{hj}) \lambda_{hj} + H_{\langle S^{Pr} \rangle} (n - e_{nj}) n_{nj} \mu_{nj} + H_{\langle S^{Pr} \rangle} (n - e_{hj}) n_{hj} \mu_{hj} \right] p(n) =$$

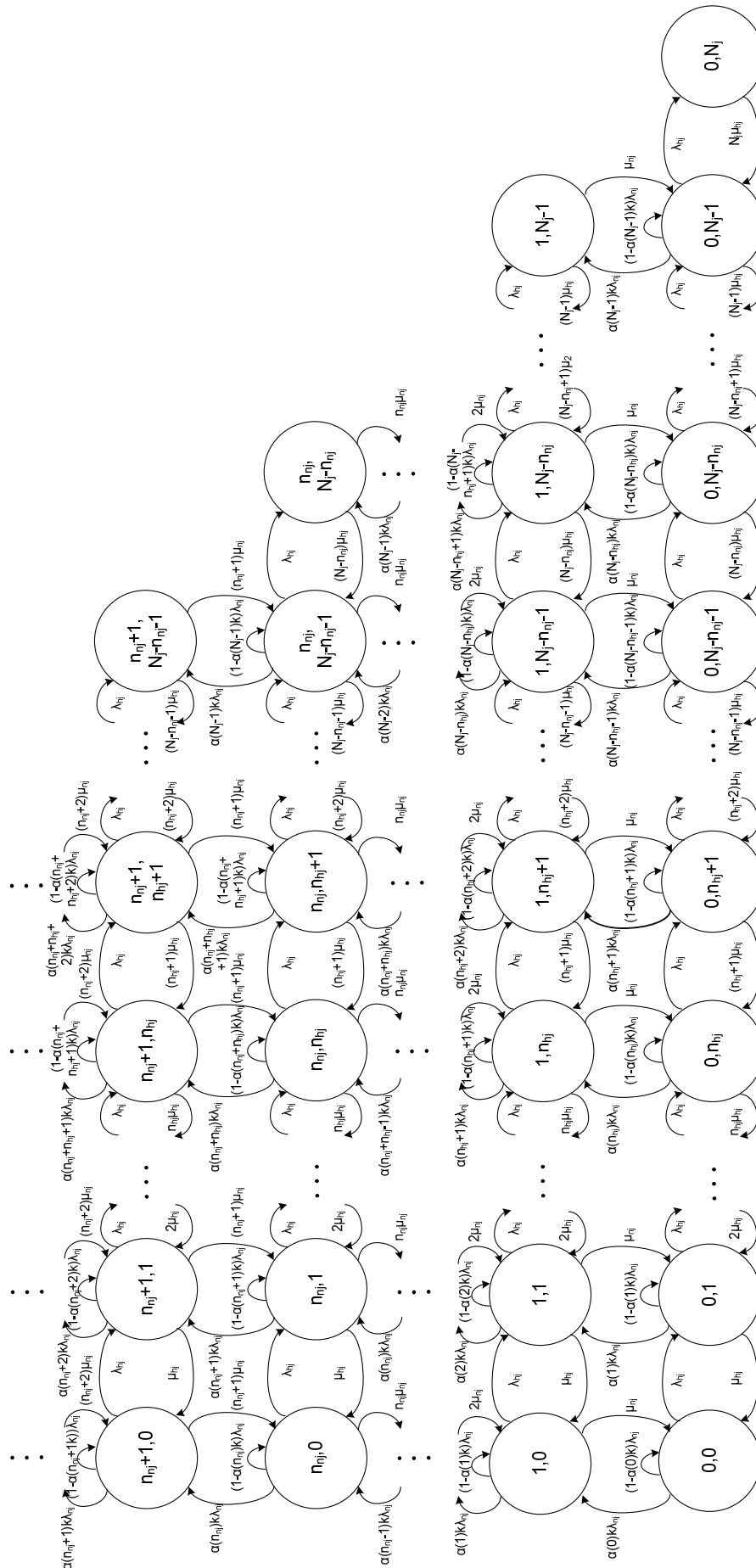
$$\sum_{j=1}^J \left[H_{\langle S^{Pr} \rangle} (n + e_{nj}) (n_{nj} + 1) \mu_{nj} p(n + e_{nj}) + H_{\langle S^{Pr} \rangle} (n + e_{hj}) (n_{hj} + 1) \mu_{hj} p(n + e_{hj}) + H_{\langle S^{Pr} \rangle} (n - e_{nj}) a_{(n_j+n_{hj}-1)k,j} \lambda_{nj} p(n - e_{nj}) + H_{\langle S^{Pr} \rangle} (n - e_{hj}) \lambda_{hj} p(n - e_{hj}) \right]. \quad (3-80)$$

Οι πιθανότητες σταθερής κατάστασης στην περίπτωση όπου εξετάζεται το σύνολο του δικτύου είναι

$$p_j(n_j) = G \prod_{j=1}^J \left[\frac{\prod_{i=0}^{n_j-1} a_{(i+n_{hj})k,j} \rho_{nj}^{n_j}}{n_{nj}!} \cdot \frac{\rho_{hj}^{n_{hj}}}{n_{hj}!} \right], \quad (3-81)$$

όπου





Σχήμα 3-3: Αλυσίδα Markov για το πιθανοτικό αλγόριθμο αποδοχής κλήσεων μοναδικής κλάσης υπηρεσιών με διαχωρισμό νέων κλήσεων και κλήσεων από διαπομπή.

$$G^{-1} = \sum_{n \in S^{Pr}} \prod_{j=1}^J \left[\frac{\prod_{i=0}^{n_{nj}-1} a_{(i+n_{nj})k,j} \rho_{nj}^{n_{nj}}}{n_{nj}!} \cdot \frac{\rho_{hj}^{n_{hj}}}{n_{hj}!} \right]. \quad (3-82)$$

Η πιθανότητα μη αποδοχής νέων κλήσεων σε μια κυψέλη j προκύπτει από το άθροισμα των πιθανοτήτων μη αποδοχής σε κάθε κατάσταση της κυψέλης του δικτύου

$$P_{n,j}^{bl} = \sum_{n \in S^{Pr}} \left(1 - a_{(n_{nj}+n_{hj})k,j} \right) p(n). \quad (3-83)$$

Αντίστοιχα, η πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων από διαπομπή σε μια κυψέλη j είναι ίση με το άθροισμα των πιθανοτήτων των καταστάσεων του δικτύου για τις οποίες το σύνολο των εξυπηρετούμενων χρηστών του δεσμεύει το σύνολο των πόρων, όπως ακριβώς συμβαίνει και στην περίπτωση των αλγόριθμων αποδοχής κλήσεων CS και GC, επομένως

$$P_{h,j}^{bl} = \sum_{n \in S^{j,Pr}} p(n) \quad (3-84)$$

όπου

$$S^{j,Pr} = \{n; n \in S^{Pr}, n_{nj} + n_{hj} = N_j\}. \quad (3-85)$$

γνήσιο υποσύνολο του S^{Pr} , $S^{j,Pr} \subset S^{Pr}$.

Όπως και στην περίπτωση της προηγούμενης ανάλυσης για την περίπτωση μιας κυψέλης, ο πιθανοτικός αλγόριθμος μπορεί να μετασχηματιστεί σε οποιονδήποτε από τους αλγόριθμους αποδοχής κλήσεων CS και GC καθώς και σε οποιαδήποτε παραλλαγή τους μέσω της κατάλληλης επιλογής των πιθανοτήτων αποδοχής νέων κλήσεων. Το ίδιο συμπέρασμα ισχύει και στην περίπτωση της εφαρμογής του πιθανοτικού αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων στο σύνολο του δικτύου. Επιπλέον, μέσω της επιλογής διαφορετικών τιμών για την πιθανότητα αποδοχής νέων κλήσεων σε κάθε κυψέλη του δικτύου παρέχεται η δυνατότητα της εφαρμογής διαφορετικών κριτηρίων αποδοχής κλήσεων. Με τον τρόπο αυτό διευκολύνεται ο ανεξάρτητος χειρισμός των κριτηρίων αποδοχής κλήσεων σε κάθε κυψέλη του δικτύου μέσω ενός ενιαίου αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων.

3.5.2. Πιθανοτικός Αλγόριθμος Αποδοχής Κλήσεων Πολλαπλών Κλάσεων Υπηρεσιών (Thinning CAC Scheme)

3.5.2.1. Ανάλυση Μεμονωμένη Κυψέλης

Η χρήση του πιθανοτικού αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων επιτρέπει την αποδοχή των χαμηλής προτεραιότητας κλήσεων με ορισμένη πιθανότητα, ακόμα και στην περίπτωση όπου το συνολικό εξυπηρετούμενο φορτίο της κυψέλης που καλείται να εξυπηρετήσει την εισερχόμενη κλήση πλησιάζει τη μέγιστη χωρητικότητά της. Επομένως, το διάλυμα της κατάστασης $\mathbf{n}_j = (n_{1j}, \dots, n_{uj}, \dots, n_{Uj})$ της κυψέλης j του δικτύου θα ορίζεται από το σύνολο \mathcal{S}_j^{Pr} το οποίο είναι ίσο με το σύνολο \mathcal{S}_j^{CS} που ορίστηκε στην (3-20) για την περίπτωση του αλγόριθμου πλήρους διαμοιρασμού πόρων. Για κάθε κατάσταση $\mathbf{n}_j \in \mathcal{S}_j^{Pr}$ του δικτύου ορίζεται η συνάρτηση

$$g(\mathbf{n}_j) = \sum_{u=1}^U (n_{mj} + n_{uj}) c_u \quad (3-86\alpha)$$

ή

$$g(\mathbf{n}_j) = \sum_{u=1}^U (n_{mj} + n_{uj}) m_u \quad (3-86\beta)$$

η οποία προσδιορίζει το πλήθος των δεσμευμένων πόρων της κυψέλης j εκφρασμένων είτε σε πλήθος καναλιών είτε σε μονάδες χωρητικότητας, αντίστοιχα.

Ο πιθανοτικός αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων έχει τη δυνατότητα να υποστηρίξει διαφορετικά επίπεδα ποιότητας υπηρεσιών, είτε μεταξύ νέων κλήσεων και κλήσεων από διαπομπή, όπως εξετάστηκε προηγουμένως, είτε μεταξύ κλήσεων διαφορετικών κλάσεων υπηρεσιών.

Στην πρώτη περίπτωση, για κάθε κλάση υπηρεσιών u ορίζεται η πιθανότητα $a_{g(\mathbf{n}_j),uj}$ σύμφωνα με την οποία γίνονται αποδεκτές οι νέες εισερχόμενες κλήσεις της κλάσης υπηρεσιών u στην κυψέλη j . Η πιθανότητα αυτή εξαρτάται άμεσα από την κατάσταση \mathbf{n}_j , συγκεκριμένα από τους συνολικούς κατειλημμένους πόρους $g(\mathbf{n}_j)$ της κυψέλης j για την τρέχουσα κατάσταση του δικτύου. Η αρχή λειτουργίας του πιθανοτικού αλγόριθμου υπαγορεύει ότι η αποδοχή των χαμηλής προτεραιότητας κλήσεων θα μειώνεται καθώς

αυξάνεται το φορτίο που εξυπηρετεί μια κυψέλη. Συνεπώς, για δύο καταστάσεις \mathbf{n}_j και $\tilde{\mathbf{n}}_j$ μιας κυψέλης, $\mathbf{n}_j, \tilde{\mathbf{n}}_j \in \mathcal{S}_j^{Pr}$, εφόσον $g(\mathbf{n}_j) \leq g(\tilde{\mathbf{n}}_j)$, ισχύει και $a_{g(\mathbf{n}_j),uj} \leq a_{g(\tilde{\mathbf{n}}_j),uj}$, και αντιστρόφως. Η αποδοχή των κλήσεων από διαπομπή της κλάσης υπηρεσιών u δεν επηρεάζεται από την πιθανότητα $a_{g(\mathbf{n}_j),uj}$. επομένως, η λειτουργία της πιθανότητας αυτής είναι αντίστοιχη με τη λειτουργία της πιθανότητας $a_{\ell,j}$ στην περίπτωση της μιας κλάσης υπηρεσιών που αναλύθηκε προηγουμένως.

Στη δεύτερη περίπτωση, για την παροχή διαφορετικών επιπέδων ποιότητας υπηρεσιών μεταξύ των υποστηριζόμενων κλάσεων υπηρεσιών u χρησιμοποιείται η πιθανότητα $b_{g(\mathbf{n}_j),uj}$, η οποία εξαρτάται και αυτή από τους συνολικούς κατειλημμένους πόρους $g(\mathbf{n}_j)$ της κυψέλης j για την τρέχουσα κατάσταση \mathbf{n}_j του δικτύου. Επομένως, η αποδοχή μιας εισερχόμενης κλήσης, είτε νέας είτε από διαπομπή, της κλάσης υπηρεσιών u στην κυψέλη j γίνεται με πιθανότητα $b_{g(\mathbf{n}_j),uj}$. Η πιθανότητα αυτή μειώνεται με την αύξηση των κατειλημμένων πόρων της κυψέλης του δικτύου· επομένως, εφόσον ισχύει $g(\mathbf{n}_j) \leq g(\tilde{\mathbf{n}}_j)$, $\mathbf{n}_j, \tilde{\mathbf{n}}_j \in \mathcal{S}_j^{Pr}$, ισχύει και $b_{g(\mathbf{n}_j),uj} \leq b_{g(\tilde{\mathbf{n}}_j),uj}$, και αντιστρόφως. Στις καταστάσεις της κυψέλης j για τις οποίες το σύνολο των χρηστών που εξυπηρετούνται είναι μέγιστο, η τιμή της πιθανότητας $b_{g(\mathbf{n}_j),uj}$ λαμβάνει μηδενική τιμή καθώς καμία εισερχόμενη κλήση δεν μπορεί να εξυπηρετηθεί από την κυψέλη. Με τη χρήση της παραμέτρου $b_{g(\mathbf{n}_j),uj}$ επιτρέπεται η παροχή διαφορετικών επιπέδων προτεραιότητας και η εφαρμογή διαφορετικών κριτηρίων κατά την αποδοχή των εισερχόμενων κλήσεων διαφορετικών κλάσεων υπηρεσιών. Επιπλέον, διευκολύνεται ο ανεξάρτητος χειρισμός των εισερχόμενων κλήσεων κάθε κλάσης υπηρεσιών και η σταδιακή μείωση της αποδοχής των εισερχόμενων κλήσεων που ανήκουν σε κλάσεις υπηρεσιών χαμηλής προτεραιότητας.

Ο ρυθμός γεννήσεων νέων κλήσεων της διαδικασίας $X_{nuj}(t)$ επηρεάζεται και από τις δύο πιθανότητες που χρησιμοποιούνται σύμφωνα με τη σχέση

$$\lambda_{n_{uj}}(\mathbf{n}_j) = b_{g(\mathbf{n}_j),uj} a_{g(\mathbf{n}_j),uj} \lambda_{n_{uj}}. \quad (3-87)$$

Αντίστοιχα, ο ρυθμός γεννήσεων κλήσεων από διαπομπή της διαδικασίας $X_{h_{uj}}(t)$ επηρεάζεται μόνο από την πιθανότητα $b_{g(\mathbf{n}_j),uj}$ η οποία εφαρμόζεται σε όλες τις εισερχόμενες κλήσεις της κλάσης υπηρεσιών u , οπότε

$$\lambda_{h_{uj}}(\mathbf{n}_j) = b_{g(\mathbf{n}_j),uj} \lambda_{h_{uj}}. \quad (3-88)$$

Οι ρυθμοί θανάτων των διαδικασιών $X_{n_{uj}}(t)$ και $X_{h_{uj}}(t)$ παραμένουν ίδιοι με τις αντίστοιχες τιμές που χρησιμοποιήθηκαν στην περίπτωση των προηγούμενων αλγόριθμων αποδοχής κλήσεων που μελετήθηκαν και είναι $\mu_{n_{uj}}$ και $\mu_{h_{uj}}$, αντίστοιχα.

Η κατάσταση της κυψέλης του δικτύου περιγράφεται από πολυδιάστατη αλυσίδα Markov συνεχούς χρόνου για την οποία οι ρυθμοί μετάβασης $\pi(\mathbf{n}_j | \tilde{\mathbf{n}}_j)$ από την κατάσταση \mathbf{n}_j στην κατάσταση $\tilde{\mathbf{n}}_j$ της κυψέλης j του δικτύου, $\mathbf{n}_j, \tilde{\mathbf{n}}_j \in \mathcal{S}_j^{\text{Pr}}$, είναι

$$\pi(\mathbf{n}_j | \mathbf{n}_j + e_{nu}) = b_{g(\mathbf{n}_j),uj} a_{g(\mathbf{n}_j),uj} \lambda_{n_{uj}} \quad (3-89\alpha)$$

$$\pi(\mathbf{n}_j | \mathbf{n}_j + e_{hu}) = b_{g(\mathbf{n}_j),uj} \lambda_{h_{uj}} \quad (3-89\beta)$$

$$\pi(\mathbf{n}_j | \mathbf{n}_j - e_{nu}) = n_{n_{uj}} \mu_{n_{uj}} \quad (3-89\gamma)$$

$$\pi(\mathbf{n}_j | \mathbf{n}_j - e_{hu}) = n_{h_{uj}} \mu_{h_{uj}}. \quad (3-89\delta)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τους ρυθμούς μετάβασης των κλάσεων υπηρεσιών προκύπτει η γενική εξίσωση ισορροπίας για κάθε κατάσταση του δικτύου

$$\begin{aligned} & \sum_{u=1}^U \left[H_{\langle \mathcal{S}_j^{\text{Pr}} \rangle}(\mathbf{n}_j + e_{nu}) b_{g(\mathbf{n}_j),uj} a_{g(\mathbf{n}_j),uj} \lambda_{n_{uj}} + H_{\langle \mathcal{S}_j^{\text{Pr}} \rangle}(\mathbf{n}_j + e_{hu}) b_{g(\mathbf{n}_j),uj} \lambda_{h_{uj}} + \right. \\ & \quad \left. H_{\langle \mathcal{S}_j^{\text{Pr}} \rangle}(\mathbf{n}_j - e_{nu}) n_{n_{uj}} \mu_{n_{uj}} + H_{\langle \mathcal{S}_j^{\text{Pr}} \rangle}(\mathbf{n}_j - e_{hu}) n_{h_{uj}} \mu_{h_{uj}} \right] p(\mathbf{n}_j) = \\ & \sum_{u=1}^U \left[H_{\langle \mathcal{S}_j^{\text{Pr}} \rangle}(\mathbf{n}_j + e_{nu}) (n_{n_{uj}} + 1) \mu_{n_{uj}} p(\mathbf{n}_j + e_{nu}) + H_{\langle \mathcal{S}_j^{\text{Pr}} \rangle}(\mathbf{n}_j + e_{hu}) (n_{h_{uj}} + 1) \mu_{h_{uj}} p(\mathbf{n}_j + e_{hu}) + \right. \\ & \quad \left. H_{\langle \mathcal{S}_j^{\text{Pr}} \rangle}(\mathbf{n}_j - e_{nu}) b_{g(\mathbf{n}_j - e_{nu}),uj} a_{g(\mathbf{n}_j - e_{nu}),uj} \lambda_{n_{uj}} p(\mathbf{n}_j - e_{nu}) + H_{\langle \mathcal{S}_j^{\text{Pr}} \rangle}(\mathbf{n}_j - e_{hu}) b_{g(\mathbf{n}_j - e_{hu}),uj} \lambda_{h_{uj}} p(\mathbf{n}_j - e_{hu}) \right]. \end{aligned} \quad (3-90)$$

Από την επίλυση των εξισώσεων ισορροπίας προκύπτουν οι πιθανότητες σταθερής κατάστασης

$$p_j(\mathbf{n}_j) = G_j \prod_{u=1}^U \left(\prod_{i=0}^{n_{nj}+n_{huj}-1} b_{(g(\mathbf{n}_j^u(n_{uj}))+i),uj} \cdot \frac{\prod_{i=0}^{n_{nj}-1} a_{(g(\mathbf{n}_j^u(n_{uj}))+i),uj} \rho_{n_{uj}}^{n_{n_{uj}}} \cdot \frac{\rho_{n_{huj}}^{n_{h_{uj}}}}{n_{h_{uj}}!}}{n_{n_{uj}}!} \right), \quad (3-91)$$

όπου $\mathbf{n}_j^u(n_{uj}) = (n_{1j}, \dots, n_{(u-1)j}, n_{(u+1)j}, \dots, n_{Uj})$ και

$$G_j^{-1} = \sum_{\mathbf{n}_j \in \mathcal{S}_j^{Pr}} \prod_{u=1}^U \left(\prod_{i=0}^{n_{nj}+n_{huj}-1} b_{(g(\mathbf{n}_j^u(n_{uj}))+i),uj} \cdot \frac{\prod_{i=0}^{n_{nj}-1} a_{(g(\mathbf{n}_j^u(n_{uj}))+i),uj} \rho_{n_{uj}}^{n_{n_{uj}}} \cdot \frac{\rho_{n_{huj}}^{n_{h_{uj}}}}{n_{h_{uj}}!}}{n_{n_{uj}}!} \right). \quad (3-92)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τη λειτουργία του πιθανοτικού αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων και τη χρήση διπλών πιθανοτήτων για την αποδοχή των νέων κλήσεων, γίνεται αντιληπτό ότι μια νέα κλήση της κλάσης υπηρεσιών u μπορεί να γίνει αποδεκτή από την κυψέλη j του δικτύου όταν αυτή βρίσκεται στην κατάσταση \mathbf{n}_j με πιθανότητα $b_{g(\mathbf{n}_j),uj} a_{g(\mathbf{n}_j),uj}$. Επομένως, η πιθανότητα μη αποδοχής νέων εισερχόμενων κλήσεων προκύπτει

$$P_{n,u,j}^{bl} = \sum_{\mathbf{n}_j \in \mathcal{S}_j^{Pr}} \left(1 - b_{g(\mathbf{n}_j),uj} a_{g(\mathbf{n}_j),uj} \right) p_j(\mathbf{n}_j), \quad u = 1, \dots, U. \quad (3-93)$$

Αντίστοιχα, η αποδοχή των κλήσεων από διαπομπή της κλάσης υπηρεσιών u για κάθε κατάσταση \mathbf{n}_j της κυψέλης j επηρεάζεται μόνο από την πιθανότητα $b_{g(\mathbf{n}_j),uj}$. Συνεπώς, η πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων από διαπομπή της κλάσης υπηρεσιών u προκύπτει

$$P_{h,u,j}^{bl} = \sum_{\mathbf{n}_j \in \mathcal{S}_j^{Pr}} \left(1 - b_{g(\mathbf{n}_j),uj} \right) p_j(\mathbf{n}_j), \quad u = 1, \dots, U. \quad (3-94)$$

Αν τεθεί $b_{g(\mathbf{n}_j),uj} = 1$ για κάθε κατάσταση $\mathbf{n}_j \in \mathcal{S}_j^{Pr}$ εκτός των ακραίων καταστάσεων του δικτύου, ο πιθανοτικός αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων απονέμει το μέγιστο επίπεδο προτεραιότητας στις κλήσεις της κλάσης υπηρεσιών u . Στην περίπτωση αυτή οι πιθανότητες μη αποδοχής κλήσεων της κλάσης υπηρεσιών u είναι οι χαμηλότερες δυνατές που μπορεί να επιτύχει ο αλγόριθμος. Ωστόσο, οι πιθανότητες μη αποδοχής κλήσεων μιας κλάσης υπηρεσιών u δεν επηρεάζονται μόνο από την πιθανότητα $b_{g(\mathbf{n}_j),uj}$ που εφαρμόζεται

σε αυτές, καθώς αυτή επηρεάζει την άμεση προτεραιότητα των κλήσεων της αντίστοιχης κλάσης υπηρεσιών. Πολύ σημαντική για τον καθορισμό του επιπέδου προτεραιότητας για τις κλήσεις της κλάσης υπηρεσιών u και επομένως των πιθανοτήτων μη αποδοχής κλήσεων είναι η σχετική διαφορά μεταξύ των πιθανοτήτων $b_{g(n_j),uj}$ και $b_{g(n_j),vj}$ για κάθε $v = 1, \dots, U$, $v \neq u$. Η διαφορά αυτή επηρεάζει έμμεσα την προτεραιότητα των κλήσεων της κλάσης υπηρεσιών u , καθώς όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά μεταξύ των $b_{g(n_j),uj}$ και $b_{g(n_j),vj}$ τόσο αυξάνεται το επίπεδο προτεραιότητας των κλήσεων της κλάσης υπηρεσιών u .

3.5.2.2. Συνολική Ανάλυση του Δικτύου

Ο πιθανοτικός αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων μπορεί να εφαρμοστεί στο σύνολο του δικτύου, δηλαδή για J το πλήθος κυψέλες. Στην περίπτωση αυτή η κατάσταση του δικτύου περιγράφεται κάθε στιγμή από το διάνυσμα $\mathbf{n} = (n_1, \dots, n_j, \dots, n_J)$ και ο αντίστοιχος χώρος διακριτών καταστάσεων από το σύνολο \mathcal{S}^{Pr} , το οποίο είναι ίσο με το σύνολο \mathcal{S}^{CS} της (3-29).

Μέσω της περιγραφής των καταστάσεων του δικτύου από μια πολυδιάστατη αλυσίδα Markov συνεχούς χρόνου προκύπτει η γενική εξίσωση ισορροπίας

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^J \sum_{u=1}^U \left[H_{\langle \mathcal{S}^{Pr} \rangle}(\mathbf{n}_j + e_{nu}) b_{g(n_j),uj} a_{g(n_j),uj} \lambda_{nuj} + H_{\langle \mathcal{S}^{Pr} \rangle}(\mathbf{n}_j + e_{hu}) b_{g(n_j),uj} \lambda_{huj} + \right. \\ & \quad \left. H_{\langle \mathcal{S}^{Pr} \rangle}(\mathbf{n}_j - e_{nu}) n_{nuj} \mu_{nuj} + H_{\langle \mathcal{S}^{Pr} \rangle}(\mathbf{n}_j - e_{hu}) n_{huj} \mu_{huj} \right] p(\mathbf{n}_j) = \\ & \sum_{j=1}^J \sum_{u=1}^U \left[H_{\langle \mathcal{S}^{Pr} \rangle}(\mathbf{n}_j + e_{nu}) (n_{nuj} + 1) \mu_{nuj} p(\mathbf{n}_j + e_{nu}) + H_{\langle \mathcal{S}^{Pr} \rangle}(\mathbf{n}_j + e_{hu}) (n_{huj} + 1) \mu_{huj} p(\mathbf{n}_j + e_{hu}) + \right. \\ & \quad \left. H_{\langle \mathcal{S}^{Pr} \rangle}(\mathbf{n}_j - e_{nu}) b_{g(n_j - e_{nu}),uj} a_{g(n_j - e_{nu}),uj} \lambda_{nuj} p(\mathbf{n}_j - e_{nu}) + H_{\langle \mathcal{S}^{Pr} \rangle}(\mathbf{n}_j - e_{hu}) b_{g(n_j - e_{hu}),uj} \lambda_{huj} p(\mathbf{n}_j - e_{hu}) \right]. \end{aligned} \quad (3-95)$$

Από την επίλυση του συστήματος των εξισώσεων ισορροπίας προκύπτουν οι πιθανότητες σταθερής κατάστασης του δικτύου

$$p(\mathbf{n}) = G_j \prod_{j=1}^J \prod_{u=1}^U \left(\prod_{i=0}^{n_{nj} + n_{huj} - 1} b_{(g(n_j^{(n_{nj}))) + i),uj} \cdot \frac{\prod_{i=0}^{n_{nj} - 1} a_{(g(n_j^{(n_{nj}))) + i),uj} \rho_{nuj}^{n_{nuj}}}{n_{nuj}!} \cdot \frac{\rho_{huj}^{n_{huj}}}{n_{huj}!} \right), \quad (3-96)$$

όπου

$$G_j^{-1} = \sum_{\mathbf{n} \in \mathcal{S}^{Pr}} \prod_{j=1}^J \prod_{u=1}^U \left(\prod_{i=0}^{n_{nj} + n_{huj} - 1} b_{(g(\mathbf{n}_j^{(n_{uj}))) + i), uj} \cdot \frac{\prod_{i=0}^{n_{nj} - 1} a_{(g(\mathbf{n}_j^{(n_{uj}))) + i), uj} \rho_{n_{nj}}^{n_{nj}}}{n_{n_{nj}}!} \cdot \frac{\rho_{h_{uj}}^{n_{h_{uj}}}}{n_{h_{uj}}!} \right). \quad (3-97)$$

Για κάθε κλάση υπηρεσιών u της κυψέλης j η πιθανότητα μη αποδοχής νέων εισερχόμενων κλήσεων, $\mathbf{P}_{n,u,j}^{bl}$, εξαρτάται από τις τιμές των πιθανοτήτων $a_{g(\mathbf{n}_j),uj}$ και $b_{g(\mathbf{n}_j),uj}$ για την αντίστοιχη συνιστώσα \mathbf{n}_j της κατάστασης \mathbf{n} του δικτύου, συνεπώς

$$\mathbf{P}_{n,u,j}^{bl} = \sum_{\mathbf{n} \in \mathcal{S}^{Pr}} \left(1 - b_{g(\mathbf{n}_j),uj} a_{g(\mathbf{n}_j),uj} \right) p(\mathbf{n}). \quad (3-98)$$

Η αντίστοιχη πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων από διαπομπή $\mathbf{P}_{h,u,j}^{bl}$ επηρεάζεται μόνο από την πιθανότητα αποδοχής των κλήσεων της κλάσης υπηρεσιών $b_{g(\mathbf{n}_j),uj}$, συνεπώς

$$\mathbf{P}_{h,u,j}^{bl} = \sum_{\mathbf{n} \in \mathcal{S}^{Pr}} \left(1 - b_{g(\mathbf{n}_j),uj} \right) p(\mathbf{n}). \quad (3-99)$$

Από τις περιπτώσεις εφαρμογής του προτεινόμενου πιθανοτικού αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων που ήδη παρουσιάστηκαν γίνεται σαφές ότι αυτός είναι γενικότερος από τους αλγόριθμους αποδοχής κλήσεων που έχουν παρουσιαστεί στη βιβλιογραφία μέχρι σήμερα καθώς με κατάλληλες επιλογές των τιμών των παραμέτρων του $a_{g(\mathbf{n}_j),uj}$ και $b_{g(\mathbf{n}_j),uj}$ μπορεί να μετατραπεί σε οποιονδήποτε γνωστό αλγόριθμο. Επίσης, παρέχει την ευελιξία στο διαχειριστή του δικτύου να παρέχει το επιθυμητό επίπεδο ποιότητας υπηρεσιών στους χρήστες μέσω της κατάλληλης επιλογής των τιμών των πιθανοτικών παραμέτρων. Επιπλέον, ο προτεινόμενος πιθανοτικός αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων επιτυγχάνει βελτιωμένη απόδοση σε σχέση με τους αλγόριθμους αποδοχής κλήσεων που έχουν προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία γεγονός που αποδεικνύεται από τους αριθμητικούς υπολογισμούς και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, η παρουσίαση των οποίων ακολουθεί στην επόμενη ενότητα.

3.6. Αριθμητικά Αποτελέσματα της Πιθανότητας μη Αποδοχής Εισερχόμενων Κλήσεων

Για να γίνει αντιληπτή η επίδοση του προτεινόμενου πιθανοτικού αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων, παρουσιάζεται στη συνέχεια μια σειρά αποτελεσμάτων. Το κριτήριο ως προς το οποίο εξετάζεται η επίδοση είναι η πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων που επιτυγχάνεται σε κάθε περίπτωση. Συγκεκριμένα, η αξιολόγηση της επίδοσης χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες αποσκοπώντας στην εξέταση της επίδοσης του προτεινόμενου αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων υπό διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας του δικτύου.

Στην πρώτη περίπτωση, ο πιθανοτικός αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων συγκρίνεται με τον αλγόριθμο δέσμευσης καναλιών υπό μεταβλητό εισερχόμενο φορτίο. Στόχος της σύγκρισης αυτής είναι να αναδειχθεί η βελτιωμένη επίδοση του πιθανοτικού αλγόριθμου έναντι των παλαιότερων αλγόριθμων αποδοχής κλήσεων, ένας από τους οποίους είναι ο αλγόριθμος δέσμευσης καναλιών.

Στη δεύτερη περίπτωση, εξετάζεται η επίδραση της τιμής της παραμέτρου $a_{\ell,j}$ στην επίδοση του πιθανοτικού αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων όταν το δίκτυο υποστηρίζει δύο κλάσεις υπηρεσιών. Διαφορετικές τιμές της πιθανότητας αυτής αντιστοιχούν σε διαφορετικά επίπεδα προτεραιότητας μεταξύ των κλήσεων των δυο κλάσεων υπηρεσιών, όπως επιβεβαιώνεται από τις πιθανότητες μη αποδοχής κλήσεων που επιτυγχάνονται στις δύο περιπτώσεις.

Στην τρίτη περίπτωση, μελετάται η συνδυασμένη χρήση των δύο παραμέτρων $a_{g(n_j),uj}$ και $b_{g(n_j),uj}$ του πιθανοτικού αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων όταν το δίκτυο υποστηρίζει δύο κλάσεις υπηρεσιών. Οι νέες και από διαπομπή εισερχόμενες κλήσεις της ίδιας κλάσης υπηρεσιών αντιμετωπίζονται με διαφορετική προτεραιότητα ανάλογα με την τιμή της πιθανότητας $a_{g(n_j),uj}$ που χρησιμοποιείται. Επιπλέον, μέσω της πιθανότητας $b_{g(n_j),uj}$ στις κλήσεις κάθε κλάσης υπηρεσιών συνολικά αποδίδεται διαφορετική προτεραιότητα. Η συνδυασμένη χρήση των δύο πιθανοτήτων επιβολής προτεραιότητας μεταξύ των εισερχόμενων κλήσεων παρέχει τη δυνατότητα ανεξάρτητου χειρισμού κάθε ροής εισερχόμενων κλήσεων από τον πιθανοτικό αλγόριθμο αποδοχής κλήσεων. Αυτό πραγματοποιείται μέσω της επιβολής διαφορετικών κριτηρίων αποδοχής κλήσεων για κάθε

είδος εισερχόμενης κλήσης λαμβάνοντας ταυτόχρονα υπόψη και την κατάσταση κάθε κυψέλης του δικτύου.

3.6.1. Επίδοση του Πιθανοτικού Αλγόριθμου Αποδοχής Κλήσεων για Δύο Κλάσεις Υπηρεσιών

Οι εισερχόμενες κλήσεις μπορούν να ομαδοποιηθούν σε δύο ευρύτερες κατηγορίες αντίστοιχα προς το απαιτούμενο επίπεδο ποιότητας υπηρεσιών. Με κριτήριο την απαίτησή τους προς την καθυστέρηση μετάδοσης οι κλήσεις κατηγοριοποιούνται σε

- 1) κλήσεις RT, δηλαδή κλήσεις πραγματικού χρόνου για τις οποίες η ελάχιστη δυνατή καθυστέρηση μετάδοσης των δεδομένων αποτελεί προϋπόθεση για τη διασφάλιση ενός εγγυημένου επιπέδου παροχής υπηρεσιών και τη διατήρηση της συνέχειας στην παροχή της υπηρεσίας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα RT κλήσεων αποτελούν οι κλήσεις φωνητικών υπηρεσιών (voice services), μετάδοσης βίντεο κατά απαίτηση (video on demand), τηλεδιάσκεψης (videoconference) και δικτυακών παιχνιδιών πραγματικού χρόνου (online gaming).
- 2) κλήσεις NRT, δηλαδή κλήσεις μη πραγματικού χρόνου των οποίων οι προδιαγραφές ως προς την καθυστέρηση μετάδοσης είναι λιγότερο αυστηρές. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι κλήσεις των υπηρεσιών μεταφοράς αρχείων (file transfer), ανάγνωσης ηλεκτρονικού ταχυδρομείου (e-mail services), περιήγησης ιστού, σύντομων μηνυμάτων, μηνυμάτων πολυμεσικού περιεχομένου (Multimedia Message Service, MMS) κ.α. Κοινό χαρακτηριστικό των υπηρεσιών αυτών είναι ότι δεν απαιτούν εξυπηρέτηση σε πραγματικό χρόνο.

Επομένως, η μετάδοση δεδομένων σε NRT κλήσεις επιδέχεται μεγαλύτερη καθυστέρηση σε σχέση με τις RT κλήσεις γεγονός που αποτυπώνεται και στις διαφορετικές προδιαγραφές του επιπέδου παροχής υπηρεσιών που απαιτούν οι κλήσεις των δύο αυτών κλάσεων υπηρεσιών. Οι NRT κλήσεις χαρακτηρίζονται από χαμηλότερη προτεραιότητα σε σχέση με τις RT κλήσεις.

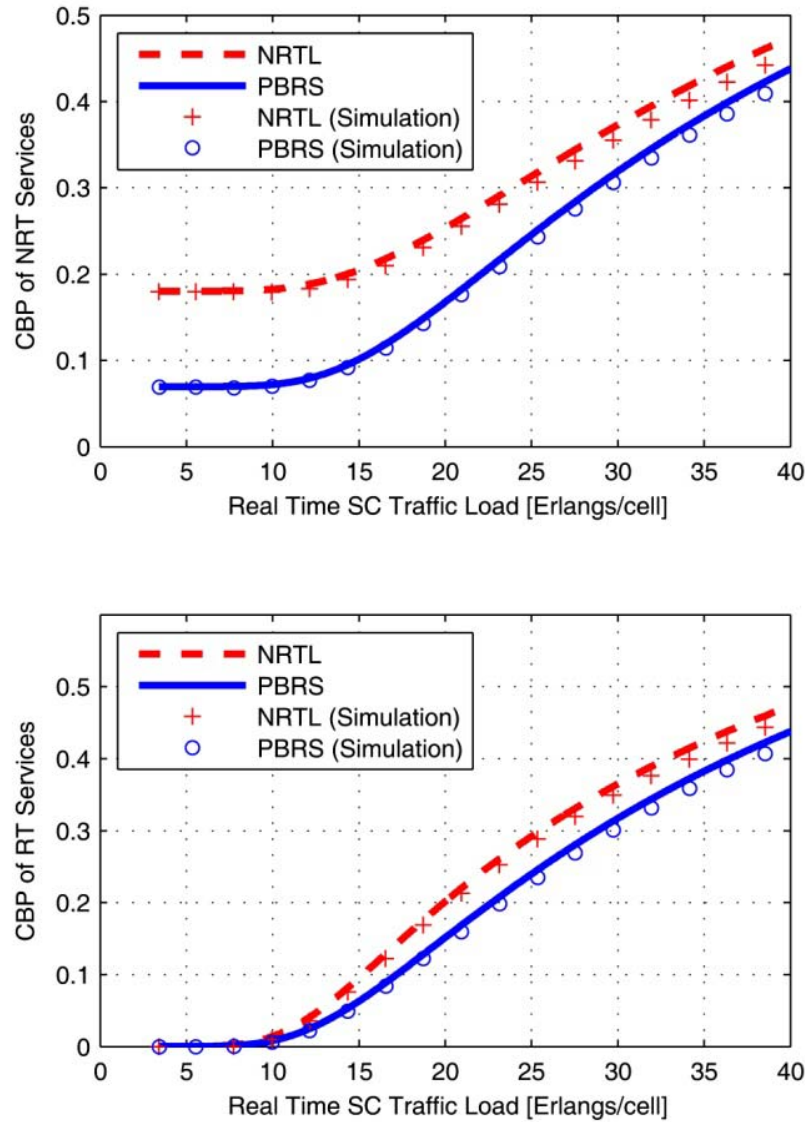
Ο αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων που εφαρμόζεται σε ένα ασύρματο κυψελωτό σύστημα κινητών επικοινωνιών λαμβάνει υπόψη του τις διαφορετικές απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσιών και την προτεραιότητα των κλάσεων υπηρεσιών που υποστηρίζονται, με αποτέλεσμα την επιβολή διαφορετικών κριτηρίων για την αποδοχή κλήσεων που ανήκουν

σε διαφορετικές κλάσεις υπηρεσιών. Ο αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων με δέσμευση καναλιών υλοποιεί αυτή τη διαφορετική πολιτική αποδοχής κλήσεων με χρήση του κατωφλίου T_j το οποίο επηρεάζει την αποδοχή των κλήσεων χαμηλής προτεραιότητας, δηλαδή των NRT κλήσεων. Η συγκεκριμένη υλοποίηση του γενικότερου αλγόριθμου καλείται αλγόριθμος περιορισμού κλήσεων μη πραγματικού χρόνου (Non Real Time Limitation Scheme, NRTL Scheme).

Σύμφωνα με τον πιθανοτικό αλγόριθμο αποδοχής κλήσεων η εφαρμογή διαφορετικών κριτηρίων αποδοχής κλήσεων υλοποιείται μέσω των παραμέτρων $a_{g(n_j),uj}$ και $b_{g(n_j),uj}$. Επειδή στην περίπτωση που εξετάζεται θεωρούνται δύο είδη ροών εισερχόμενων κλήσεων, RT και NRT, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η παράμετρος $a_{\ell,j}$ για την αποδοχή των NRT κλήσεων αντί των νέων εισερχόμενων κλήσεων όπως ήδη περιγράφηκε σε αντίστοιχο εδάφιο του παρόντος κεφαλαίου. Με τον τρόπο αυτό μπορούν να αξιοποιηθούν οι αντίστοιχες σχέσεις της ανάλυσης που παρουσιάστηκε προηγουμένως για τον υπολογισμό των πιθανοτήτων μη αποδοχής κλήσεων και για τους δύο αλγόριθμους. Η υλοποίηση του πιθανοτικού αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων που περιγράφεται στην ενότητα αυτή καλείται δέσμευση καναλιών βάσει πιθανοτήτων (Probabilistic Channel Reservation Scheme,

Παράμετρος	Μεταβλητό RT Φορτίο	Μεταβλητό NRT Φορτίο
$\lambda_{NRT,j}$	1/20	1/30
$\lambda_{RT,j}$	1/30	1/30
N_j	30	30
T_j	15	15
$\mu_{NRT,j}$	1/300	1/200 μέχρι 1/600
$\mu_{RT,j}$	1/100 μέχρι 1/1200	1/450
$a_{\ell,j}$	0,75 για $\ell = 0, \dots, T_j - 1$	0,8 για $\ell = 0, \dots, T_j - 1$
	0,25 για $\ell = T_j, \dots, N_j - 1$	0,2 για $\ell = T_j, \dots, N_j - 1$

Πίνακας 3-2: Τιμές των παραμέτρων του δικτύου για δύο κλάσεις υπηρεσιών με δεδομένη πιθανότητα αποδοχής NRT κλήσεων.



Σχήμα 3-4: Διαγράμματα πιθανότητας μη αποδοχής RT και NRT κλήσεων για μεταβλητό RT φορτίο εισόδου.

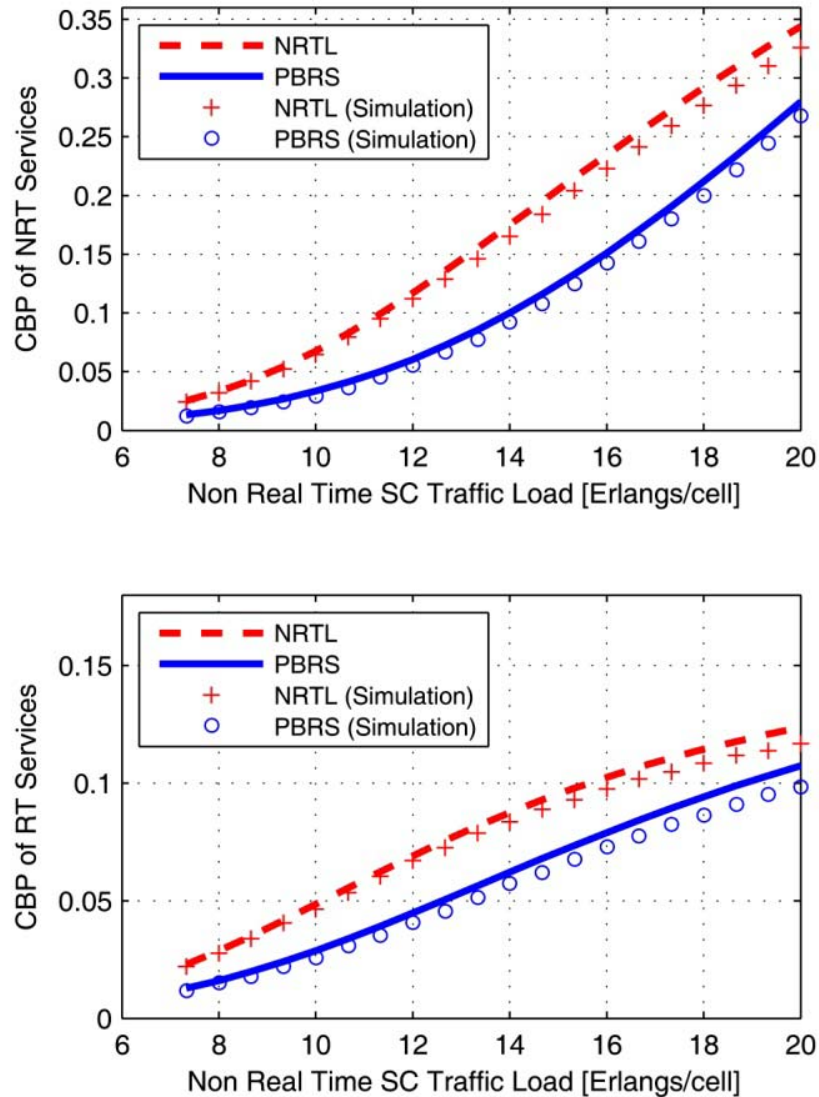
PBRS). Στον PBRS αλγόριθμο αποδοχής κλήσεων η τιμή του κατωφλίου T_j σηματοδοτεί την αλλαγή της πιθανότητας για την αποδοχή των NRT κλήσεων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ελαστικότερη χρήση του κατωφλίου ως κριτηρίου για την αποδοχή NRT κλήσεων καθώς επιτρέπεται η αποδοχή τους με πιθανότητα $a_{e,j}$ και για καταστάσεις του δικτύου πάνω από την τιμή T_j .

Η αξιολόγηση της επίδοσης των δύο αλγόριθμων αποδοχής κλήσεων που παρουσιάζεται πραγματοποιείται πρώτα υπό μεταβλητό RT φορτίο εισόδου και μετά υπό

μεταβλητό NRT φορτίο εισόδου. Σε κάθε περίπτωση υπολογίζονται οι πιθανότητες μη αποδοχής των RT και NRT κλήσεων. Οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-2. Στα διαγράμματα των Σχημάτων 3-4 και 3-5 παρουσιάζονται με συνεχόμενες και διακεκομμένες γραμμές οι πιθανότητες μη αποδοχής κλήσεων που προκύπτουν από την εφαρμογή των αναλυτικών σχέσεων για τους αλγόριθμους PBRS και NRTL, αντίστοιχα. Για την αξιολόγηση και επαλήθευση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν με εφαρμογή των αναλυτικών σχέσεων κρίθηκε απαραίτητη η παρουσίαση αποτελεσμάτων που προκύπτουν από προσομοίωση του δικτύου. Για το λόγο αυτό, αναπτύχθηκε ένα πρόγραμμα προσομοίωσης διακριτών καταστάσεων (discrete event simulator) σε γλώσσα προγραμματισμού C++. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης απεικονίζονται μέσω των συμβόλων «+» και «ο» για τους αλγόριθμους PBRS και NRTL, αντίστοιχα.

Παρατηρώντας τα διαγράμματα του Σχήματος 3-4 προκύπτει ότι ο PBRS αλγόριθμος επιτυγχάνει χαμηλότερη πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων και για τις δύο κατηγορίες κλήσεων, RT και NRT, όταν μεταβάλλεται η εισερχόμενη RT κίνηση. Επιπλέον, παρατηρείται ότι η πιθανότητα μη αποδοχής RT κλήσεων που επιτυγχάνεται υπό συγκεκριμένο RT φορτίο εισόδου είναι χαμηλότερη από την αντίστοιχη πιθανότητα μη αποδοχής NRT κλήσεων και για τους δύο αλγόριθμους που χρησιμοποιούνται. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται υψηλότερο επίπεδο προτεραιότητας και ελαστικότερη αποδοχή των κλήσεων RT έναντι των κλήσεων NRT. Τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώνουν την επίτευξη της βασικής επιδίωξης των αλγόριθμων αποδοχής κλήσεων που είναι η παροχή ενός υψηλότερου εγγυημένου επιπέδου παροχής υπηρεσιών στις κλήσεις RT έναντι των κλήσεων NRT. Με την αύξηση του RT φορτίου εισόδου αυξάνονται και οι αντίστοιχες πιθανότητες μη αποδοχής κλήσεων. Για πολύ υψηλές τιμές RT φορτίου εισόδου οι τιμές των πιθανοτήτων μη αποδοχής κλήσεων αυξάνονται σε μεγάλο βαθμό γεγονός που οφείλεται στο ότι η κυψέλη του δικτύου λειτουργεί κοντά στην κατάσταση κορεσμού της. Ακόμα και σε αυτή την κατάσταση όπου η λειτουργία του αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων είναι κρίσιμη για τη διατήρηση της λειτουργικότητας του δικτύου, ο PBRS αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων επιτυγχάνει βελτιωμένα αποτελέσματα σχέση με τον αλγόριθμο NRTL.

Παρόμοια συμπεράσματα εξάγονται από την παρατήρηση των διαγραμμάτων του Σχήματος 3-5 καθώς ο αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων PBRS επιτυγχάνει χαμηλότερη



Σχήμα 3-5: Διαγράμματα πιθανότητας μη αποδοχής RT και NRT κλήσεων για μεταβλητό NRT φορτίο εισόδου.

πιθανότητα μη αποδοχής τόσο για τις νέες όσο και από διαπομπή κλήσεις σε σχέση με τον αλγόριθμο NRTL. Η βελτιωμένη απόδοση του αλγόριθμου PBRS και στις δυο περιπτώσεις που εξετάζονται, όπου μεταβάλλεται το RT ή το NRT φορτίο εισόδου, σχετίζεται με τη χρήση των πιθανοτήτων αποδοχής για την αποδοχή των NRT εισερχόμενων κλήσεων. Με τον τρόπο αυτό επιτρέπεται η αποδοχή NRT κλήσεων με πιθανότητα $a_{i,j}$ στις καταστάσεις του δικτύου οι οποίες βρίσκονται άνω της τιμής του κατωφλίου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αποδοτικότερη χρήση των πόρων του δικτύου καθώς αυτοί διατίθενται για την εξυπηρέτηση των χρηστών αντί να δεσμεύονται για την εξυπηρέτηση ενδεχόμενων

εισερχόμενων RT κλήσεων. Επομένως, λόγω της δομής και της λειτουργίας του αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων PBRS είναι αναμενόμενη η χαμηλότερη πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων που επιτυγχάνει έναντι του NRTL, ο οποίος εφαρμόζει μια αυστηρή πολιτική κατωφλίου για την αποδοχή των NRT κλήσεων.

3.6.2. Επίδραση της Πιθανότητας Αποδοχής Εισερχόμενων Κλήσεων Χαμηλής Προτεραιότητας

Όπως προκύπτει από την προηγούμενη ανάλυση, ο αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων PBRS βασίζει τη λειτουργία του στις τιμές των πιθανοτικών παραμέτρων. Επομένως, η επίδοσή του που εκφράζεται μέσω της πιθανότητας μη αποδοχής κλήσεων που επιτυγχάνει εξαρτάται άμεσα από τις τιμές των παραμέτρων αυτών. Στην παρούσα ενότητα μελετάται η επίδραση των διαφορετικών τιμών της παραμέτρου $a_{\ell,j}$ στην επίδοση του αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων PBRS και συγκεκριμένα στην πιθανότητα μη αποδοχής που επιτυγχάνει.

Για να διευκολυνθεί η παράσταση των αποτελεσμάτων, η παράμετρος $a_{\ell,j}$ διακρίνεται στην τιμή που λαμβάνει για τις καταστάσεις του δικτύου των οποίων το συνολικό εξυπηρετούμενο φορτίο είναι χαμηλότερο και υψηλότερο ή ίσο από την τιμή του κατωφλίου T_j ως εξής

$$a_{\ell,j} = \begin{cases} f^d, & \text{για } \ell < T_j \\ f^a, & \text{για } \ell \geq T_j. \end{cases} \quad (3-100)$$

Η επίδοση του αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων εξετάζεται χρησιμοποιώντας τρία ζεύγη τιμών της παραμέτρου $a_{\ell,j}$ για μεταβλητό RT ή NRT φορτίο εισόδου. Οι τιμές των παραμέτρων του δικτύου που χρησιμοποιούνται παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-3.

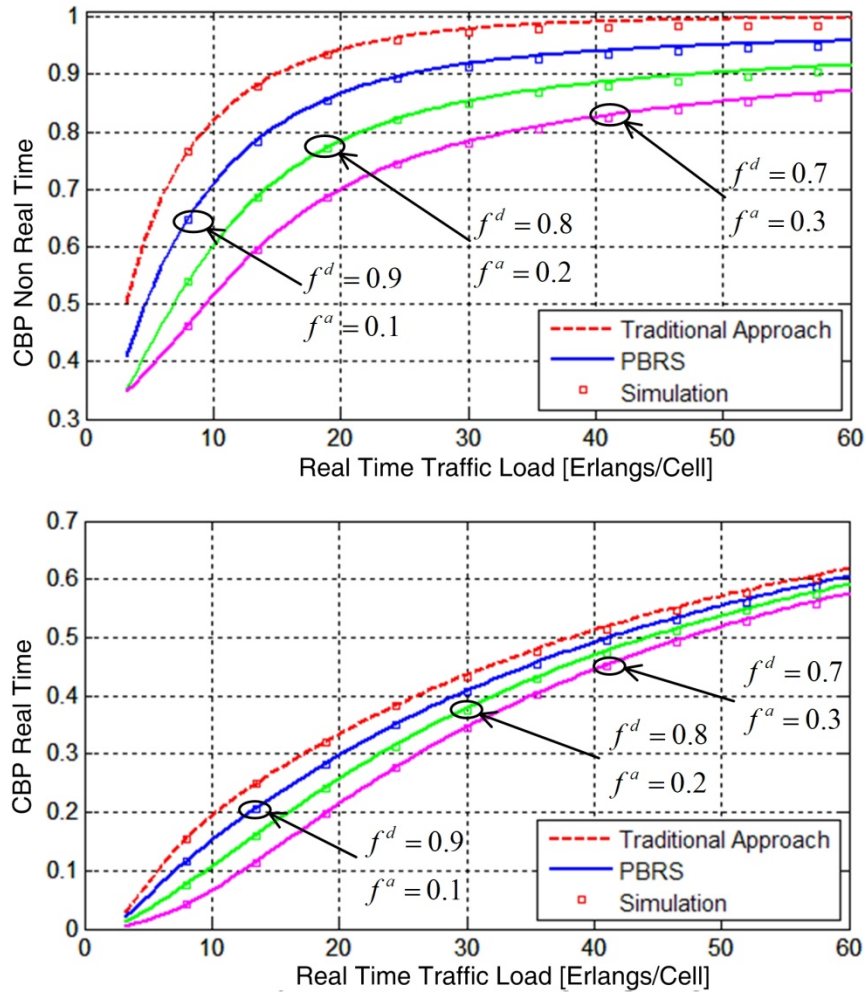
Στο Σχήμα 3-6 έχει σχεδιαστεί η πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων NRT και RT υπό μεταβλητό RT φορτίο εισόδου. Με διακεκομμένη γραμμή απεικονίζονται τα αποτελέσματα εφαρμογής του αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων NRTL και με τα σύμβολα «□» απεικονίζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τις ίδιες τιμές των παραμέτρων του δικτύου. Πρέπει να αναφερθεί ότι το πρόγραμμα προσομοίωσης είναι το ίδιο που χρησιμοποιήθηκε στην προηγούμενη ενότητα. Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα του Σχήματος 3-6 ο αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων PBRS επιτυγχάνει χαμηλότερη πιθανότητα

Παράμετρος	Μεταβλητό RT Φορτίο	Μεταβλητό NRT Φορτίο
$\lambda_{NRT,j}$	1/40	1/20
$\lambda_{RT,j}$	1/30	1/30
N_j	35	35
T_j	30	30
$\mu_{NRT,j}$	1/600	1/240 μέχρι 1/2400
$\mu_{RT,j}$	1/200 μέχρι 1/1200	1/350
Πρώτη Σειρά Αποτελεσμάτων	$f^d = 0,9$ και $f^a = 0,1$	
Δεύτερη Σειρά Αποτελεσμάτων	$f^d = 0,8$ και $f^a = 0,2$	
Τρίτη Σειρά Αποτελεσμάτων	$f^d = 0,7$ και $f^a = 0,3$	

Πίνακας 3-3: Τιμές παραμέτρων του δικτύου για δυο κλάσεις υπηρεσιών με μεταβλητή πιθανότητα αποδοχής NRT κλήσεων.

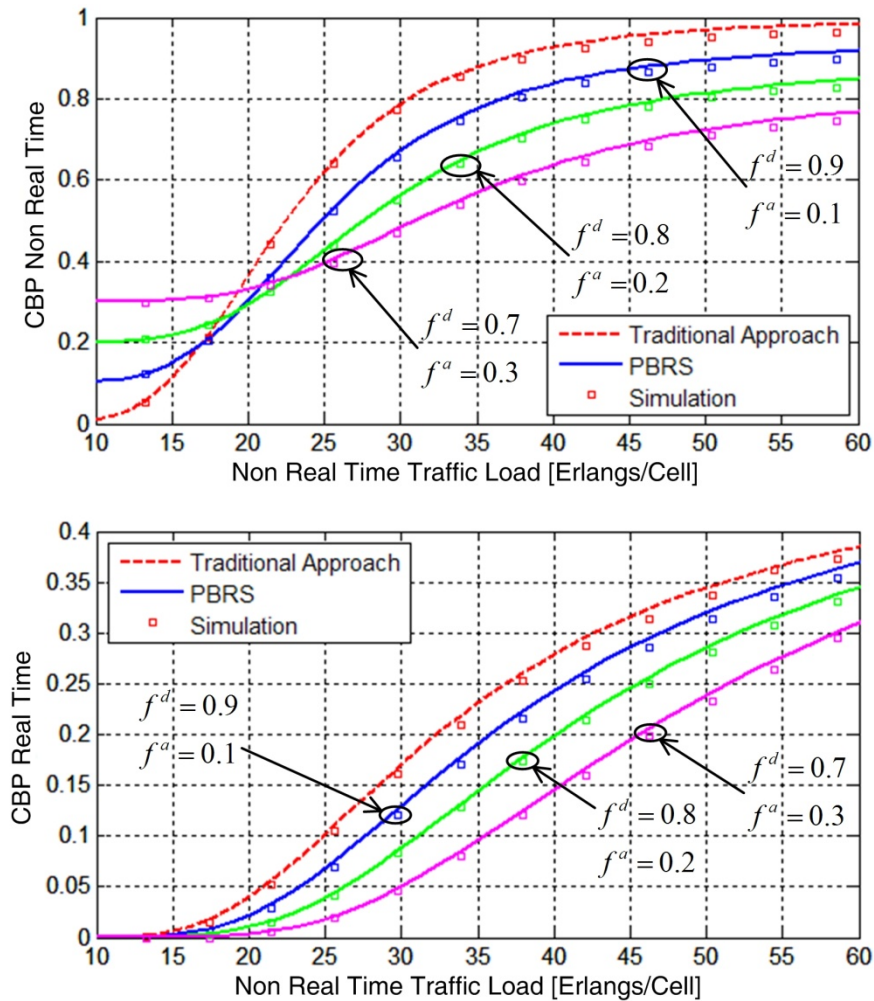
μη αποδοχής τόσο για κλήσεις RT όσο και για κλήσεις NRT καθώς αυξάνεται η τιμή της πιθανότητας f^a και αντίστοιχα μειώνεται η f^d . Η βελτιωμένη συμπεριφορά του αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων PBRS οφείλεται στην καλύτερη διαχείριση των διαθέσιμων πόρων που επιτυγχάνει ο αλγόριθμος επειδή στον ίδιο χρόνο αποδέχεται περισσότερους χρήστες σε σχέση με τον αλγόριθμο αποδοχής κλήσεων NRTL. Η βελτιωμένη αυτή συμπεριφορά δεν επηρεάζει σημαντικά τη διαφορά προτεραιότητας μεταξύ των κλήσεων RT και των κλήσεων NRT καθώς η πιθανότητα μη αποδοχής των κλήσεων RT εξακολουθεί να είναι σημαντικά χαμηλότερη από την αντίστοιχη πιθανότητα μη αποδοχής των κλήσεων NRT για κάθε τιμή RT φορτίου εισόδου που εξετάζεται.

Ανάλογα συμπεράσματα προκύπτουν από την παρατήρηση των αποτελεσμάτων για την πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων RT και NRT που προκύπτουν υπό μεταβλητό NRT φορτίο εισόδου (Σχήμα 3-7). Η μοναδική περίπτωση όπου ο αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων PBRS επιτυγχάνει υψηλότερη πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων από αυτήν που επιτυγχάνει ο αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων NRTL εμφανίζεται στο πρώτο διάγραμμα του



Σχήμα 3-6: Πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων NRT και RT υπό μεταβλητό RT φορτίο εισόδου.

Σχήματος 3-7. Στην περίπτωση αυτή η συνολική εξυπηρετούμενη κίνηση της κυψέλης είναι χαμηλή, με αποτέλεσμα η πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων NRT να επηρεάζεται άμεσα από την παράμετρο $a_{\ell,j}$, συγκεκριμένα από την πιθανότητα f^d του αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων PBRS. Επομένως, η πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων NRT για πολύ χαμηλά εξυπηρετούμενα φορτία της κυψέλης συγκλίνει προς την πιθανότητα $1 - f^d$ για κάθε εξεταζόμενη περίπτωση. Αντίθετα, κατά την εφαρμογή του αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων NRTL κάθε εισερχόμενη κλήση NRT ή RT γίνεται αποδεκτή από την κυψέλη εφόσον η εξυπηρετούμενη κίνησή της είναι μικρότερη της τιμής του κατωφλίου T_j , συνεπώς, για πολύ χαμηλό φορτίο εισόδου οι αντίστοιχες πιθανότητες μη αποδοχής κλήσεων τείνουν προς το μηδέν. Εντούτοις, η επίδοση του αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων PBRS έναντι του



Σχήμα 3-7: Διαγράμματα πιθανότητας μη αποδοχής NRT και RT κλήσεων για μεταβλητό εισερχόμενο NRT φορτίο.

NRTL είναι εξαιρετικά καλύτερη υπό μέσο και υψηλό ρυθμό εισερχόμενου NRT ή RT φορτίο εισόδου, όπου η λειτουργία του αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων είναι κρίσιμη για την προστασία του δικτύου από καταστάσεις συμφόρησης παράλληλα με την εξασφάλιση του εγγυημένου επιπέδου ποιότητας υπηρεσιών.

3.6.3. Συνδυασμένη Χρήση Δύο Πιθανοτήτων Αποδοχής Εισερχόμενων Κλήσεων

Τα αποτελέσματα του αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων PBRS που παρουσιάστηκαν μέχρι το σημείο αυτό έχουν εξαχθεί χρησιμοποιώντας μια μόνο πιθανοτικής παραμέτρου για την παροχή διαφορετικού επιπέδου παροχής υπηρεσιών σε δύο διαφορετικές κλάσεις

υπηρεσιών. Ωστόσο, η δομή του αλγόριθμου επιτρέπει την περαιτέρω ανάλυση των εισερχόμενων κλήσεων κάθε κλάσης υπηρεσιών σε νέες και από διαπομπή κλήσεις αποδίδοντας διαφορετικό επίπεδο προτεραιότητας σε αυτές. Σε αυτή την περίπτωση, είναι απαραίτητη η χρήση και των δύο πιθανοτικών παραμέτρων του αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων PBRS.

Για τη μελέτη του προτεινόμενου αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων υπό τη συνδυασμένη χρήση των δύο πιθανοτικών παραμέτρων παρουσιάζεται μια σειρά αποτελεσμάτων τα οποία βασίζονται στην ανάλυση που παρουσιάστηκε σε προηγούμενη ενότητα. Οι τιμές των παραμέτρων του δικτύου που χρησιμοποιούνται παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-4. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται αναφέρονται σε δύο κλάσεις υπηρεσιών, $u = \{1, 2\}$, με τη δεύτερη κλάση υπηρεσιών να έχει υψηλότερο επίπεδο προτεραιότητας έναντι της πρώτης. Στον αλγόριθμο δέσμευσης καναλιών, η παράμετρος $C_{u,j}$ δηλώνει το μέγιστο επιτρεπόμενο πλήθος πόρων ή καναλιών που επιτρέπεται να είναι κατειλημμένοι για να γίνει αποδεκτή μια νέα κλήση ή κλήση από διαπομπή της κλάσης υπηρεσιών u . Στον αλγόριθμο αποδοχής κλήσεων PBRS η παράμετρος $C_{u,j}$ έχει διαφορετική λειτουργία καθώς δηλώνει το σημείο αλλαγής της τιμής της πιθανοτικής παραμέτρου $b_{g(n_j),uj}$. Το αντίστοιχο σημείο αλλαγής της τιμής της παραμέτρου $a_{\ell,j}$ δηλώνεται από το κατώφλι $T_{u,j}$. Για λόγους διευκόλυνσης της παρουσίασης των αποτελεσμάτων οι παράμετροι $a_{\ell,j}$ και $b_{g(n_j),uj}$ θα συμβολίζονται ως a_u και b_u αντίστοιχα.

Στο διάγραμμα του Σχήματος 3-8 παρουσιάζονται οι πιθανότητες μη αποδοχής των νέων κλήσεων και των κλήσεων από διαπομπή των δύο κλάσεων υπηρεσιών όταν μεταβάλλεται το εισερχόμενο φορτίο των νέων κλήσεων της πρώτης κλάσης υπηρεσιών ($u=1$). Στο διάγραμμα απεικονίζονται δύο σειρές αποτελεσμάτων οι οποίες έχουν προκύψει για διαφορετικές τιμές της πιθανοτικής παραμέτρου a_u , ενώ οι τιμές της παραμέτρου b_u έχουν διατηρηθεί σταθερές. Οι τιμές των παραμέτρων a_u και b_u παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-5. Εκτός από τα αριθμητικά αποτελέσματα που προκύπτουν από τη χρήση αναλυτικών σχέσεων για την πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων που παρουσιάστηκαν προηγουμένως στο κεφάλαιο αυτό, παρατίθενται και τα αποτελέσματα

Παράμετρος Δικτύου	Τιμή Παραμέτρου
λ_{n1j}	1/20
λ_{n2j}	1/50
λ_{h1j}	1/25
λ_{h2j}	1/55
μ_{n1j}	1/100 μέχρι 1/1200
μ_{n2j}	1/100
μ_{h1j}	1/250
μ_{h2j}	1/150
c_1	1
c_2	2
N_j	30
$T_{1,j}$	23
$T_{2,j}$	26
$C_{1,j}$	25
$C_{2,j}$	30

Πίνακας 3-4: Τιμές παραμέτρων της κυψέλης του δικτύου κινητών επικοινωνιών για δυο κλάσεις υπηρεσιών.

που προκύπτουν από την προσομοίωση του δικτύου με τη βοήθεια του προγράμματος προσομοίωσης διακριτών καταστάσεων που αναπτύχθηκε σε C++. Η προσομοίωση του συστήματος έγινε για δύο ρυθμούς εξυπηρέτησης κλήσεων οι οποίες ακολουθούν την εκθετική ή λογαριθμοκανονική κατανομή και για την αναπαράστασή τους στα διαγράμματα χρησιμοποιούνται τα σύμβολα «□» και «+», αντίστοιχα.

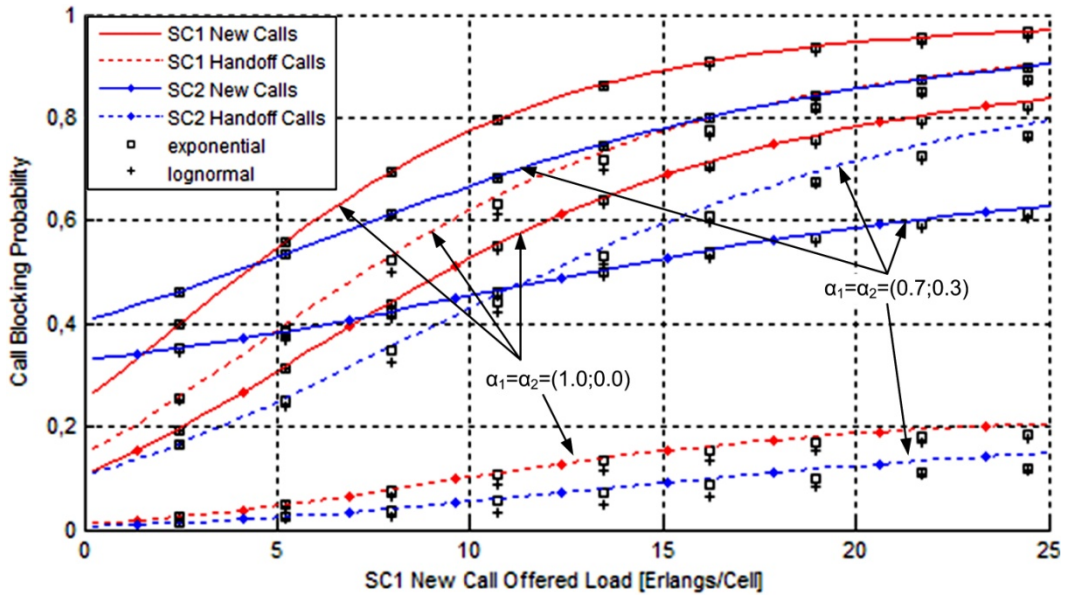
Παρατηρώντας το διαγράμμα του Σχήματος 3-8 προκύπτει ότι η αύξηση της αποδοχής νέων κλήσεων πάνω από το κατώφλι για κάθε κλάση υπηρεσιών βελτιώνει την επίδοση του αλγόριθμου με κριτήριο την πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων που επιτυγχάνεται. Επιπλέον, διατηρείται το επίπεδο προτεραιότητας μεταξύ των κλήσεων διαφορετικών κλάσεων υπηρεσιών καθώς η πιθανότητα μη αποδοχής της δεύτερης κλάσης

υπηρεσιών ($u = 2$) είναι χαμηλότερη από την αντίστοιχη πιθανότητα μη αποδοχής της πρώτης κλάσης υπηρεσιών ($u = 1$). Ακόμα, η πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων από διαπομπή παραμένει χαμηλότερη από την αντίστοιχη πιθανότητα μη αποδοχής νέων κλήσεων και για τις δύο κλάσεις υπηρεσιών.

Για τη μελέτη της επίπτωσης της συνδυασμένης χρήσης των δύο πιθανοτικών παραμέτρων, στο διάγραμμα του Σχήματος 3-9 παρουσιάζονται δύο σειρές αποτελεσμάτων στις οποίες μεταβάλλονται οι τιμές και των δύο παραμέτρων. Για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων έχουν χρησιμοποιηθεί οι παράμετροι του δικτύου που αναφέρονται στον Πίνακα 3-4. Οι αντίστοιχες τιμές των πιθανοτικών παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-6. Από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο Σχήμα 3-9 φαίνεται η σημαντική βελτίωση που μπορεί να επιτευχθεί από την αύξηση της τιμής των πιθανοτικών παραμέτρων για τις καταστάσεις του δικτύου όπου η συνολική εξυπηρετούμενη κίνηση υπερβαίνει την τιμή του κατώφλιου. Παράλληλα, διατηρούνται τα επίπεδα προτεραιότητας και εντός της ίδιας κλάσης υπηρεσιών, καθώς η πιθανότητα μη

	Πιθανοτική Παράμετρος	Τιμή Παραμέτρου	
		Κάτω από το Κατώφλι	Πάνω από το Κατώφλι
Πρώτη Σειρά Αποτελεσμάτων	a_1	1	0
	a_2	1	0
	b_1	1	0
	b_2	1	0
Δεύτερη Σειρά Αποτελεσμάτων	a_1	0,7	0,3
	a_2	0,7	0,3
	b_1	1	0
	b_2	1	0

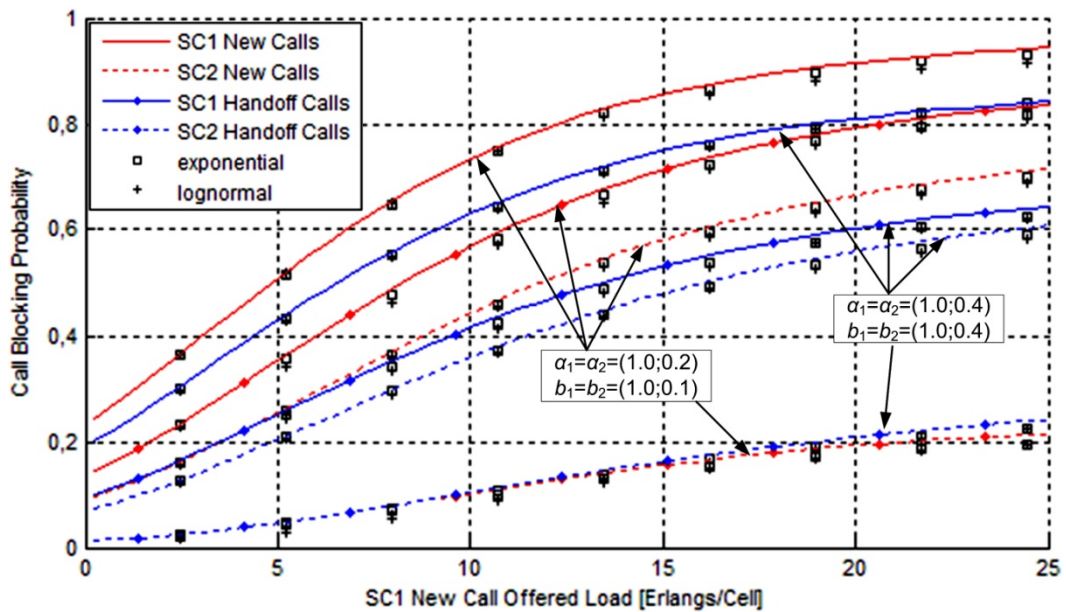
Πίνακας 3-5: Οι τιμές των πιθανοτικών παραμέτρων a_u και b_u σε σχέση με τα σημεία αλλαγής της τιμής τους που χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων του διαγράμματος του Σχήματος 3-8.



Σχήμα 3-8: Πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων των δύο κλάσεων υπηρεσιών ως συνάρτηση του φορτίου εισόδου της πρώτης κλάσης υπηρεσιών όταν μεταβάλλεται η πιθανοτική παράμετρος a_u . Η πρώτη κλάση υπηρεσιών συμβολίζεται με SC1 (Service Class 1) και η δεύτερη με SC2 (Service Class 2).

	Πιθανοτική Παράμετρος	Τιμή Παραμέτρου	
		Κάτω από το Κατώφλι	Πάνω από το Κατώφλι
Πρώτη Σειρά Αποτελεσμάτων	a_1	1	0,2
	a_2	1	0,2
	b_1	1	0,1
	b_2	1	0,1
Δεύτερη Σειρά Αποτελεσμάτων	a_1	1	0,4
	a_2	1	0,4
	b_1	1	0,4
	b_2	1	0,4

Πίνακας 3-6: Οι τιμές των πιθανοτικών παραμέτρων a_u και b_u σε σχέση με τα σημεία αλλαγής της τιμής τους που χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων του διαγράμματος του Σχήματος 3-9.



Σχήμα 3-9: Πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων των δύο κλάσεων υπηρεσιών ως συνάρτηση του εισερχόμενου φορτίου εισόδου της πρώτης κλάσης υπηρεσιών όταν μεταβάλλονται και οι δύο πιθανοτικοί παράμετροι. Η πρώτη κλάση υπηρεσιών συμβολίζεται με SC1 (Service Class 1) και η δεύτερη με SC2 (Service Class 2).

αποδοχής κλήσεων από διαπομπή είναι μικρότερη της αντίστοιχης πιθανότητας μη αποδοχής νέων κλήσεων, αλλά και μεταξύ διαφορετικών κλάσεων υπηρεσιών, αφού οι πιθανότητες μη αποδοχής κλήσεων της δεύτερης κλάσης υπηρεσιών ($u = 2$) είναι χαμηλότερες από των αντίστοιχων της πρώτης κλάσης υπηρεσιών ($u = 1$). Επομένως, η συνδυασμένη χρήση και των δύο πιθανοτικών παραμέτρων βελτιώνει την επίδοση του προτεινόμενου πιθανοτικού αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων και διευκολύνει την ευελιξία του διαχειριστή του δικτύου για παροχή διαφορετικών επιπέδων ποιότητας υπηρεσιών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Δίκαιη Κατανομή Πόρων Μέσω του Πιθανοτικού Αλγόριθμου Ελέγχου Αποδοχής Κλήσεων

4.1. Εισαγωγή

Η υποστήριξη διαφορετικών κλάσεων υπηρεσιών από ένα ασύρματο δίκτυο κινητών επικοινωνιών προϋποθέτει την εφαρμογή διαφορετικών κριτηρίων για την αποδοχή των εισερχόμενων κλήσεων. Τα κριτήρια αυτά εξαρτώνται από την κλάση υπηρεσιών και κατ' επέκταση το επιθυμητό επίπεδο ποιότητας υπηρεσιών. Αυτό συνεπάγεται τον ορισμό αντίστοιχων επιπέδων προτεραιότητας για τις εισερχόμενες κλήσεις. Αν και απαραίτητα, τα διαφορετικά επίπεδα προτεραιότητας έχουν ως άμεση συνέπεια τη μη δίκαιη κατανομή των διαθέσιμων πόρων του δικτύου μεταξύ κλήσεων διαφορετικών κλάσεων υπηρεσιών και τη μειωμένη επίδοση των αλγόριθμων αποδοχής κλήσεων με βάση το κριτήριο της δικαιοσύνης. Επιπλέον, η έλλειψη δικαιοσύνης έχει επίπτωση στην πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων κάθε υποστηριζόμενης κλάσης υπηρεσιών, με αποτέλεσμα οι κλήσεις των κλάσεων υπηρεσιών χαμηλής προτεραιότητας να εμφανίζουν υψηλότερη πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων σε σχέση με τις κλάσεις υπηρεσιών υψηλής προτεραιότητας. Το

φαινόμενο αυτό καθίσταται εντονότερο όταν το δίκτυο λειτουργεί κοντά στην κατάσταση κορεσμού, όπου οι πιθανότητες μη αποδοχής των κλήσεων που ανήκουν σε κλάσεις υπηρεσιών χαμηλής προτεραιότητας είναι εξαιρετικά υψηλές. Στην περίπτωση όπου χρησιμοποιούνται κατώφλια για την αποδοχή των κλήσεων χαμηλού επιπέδου προτεραιότητας, ο αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων επιτυγχάνει χαμηλό βαθμό αξιοποίησης των διαθέσιμων πόρων του δικτύου.

Η έλλειψη δικαιοσύνης κατά τη διαδικασία αποδοχής κλήσεων είναι αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης της επίδοσης των αλγόριθμων αποδοχής κλήσεων όταν ως μοναδικά κριτήρια αποδοχής λαμβάνονται η πιθανότητα μη αποδοχής και η προτεραιότητα των διαφορετικών κλάσεων υπηρεσιών που υποστηρίζονται από το δίκτυο. Οι περισσότεροι αλγόριθμοι αποδοχής κλήσεων που προτείνονται στη διεθνή βιβλιογραφία αξιολογούνται σχεδόν αποκλειστικά με βάση την πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων που επιτυγχάνουν, ενώ, συνήθως, το κριτήριο της δικαιοσύνης δε λαμβάνεται υπόψη. Επομένως, κρίνεται απαραίτητη η αξιολόγηση των αλγόριθμων με πρόσθετα κριτήρια, όπως η δικαιοσύνη μεταξύ κλήσεων διαφορετικών κλάσεων υπηρεσιών κατά τη διαδικασία αποδοχής κλήσεων, η αποδοτική λειτουργία ως προς τις διαφορετικές προτεραιότητες που αποδίδονται στις διαφορετικές κλάσεις υπηρεσιών και η αποδοτική χρησιμοποίηση των διαθέσιμων πόρων του δικτύου. Επομένως, σημαντικό ενδιαφέρον παρουσιάζει η σχεδίαση ενός αλγόριθμου ο οποίος, πέραν των κριτηρίων που χρησιμοποιούνται μέχρι τώρα όπως η διαθέσιμη χωρητικότητα του δικτύου, οι προτεραιότητες των κλάσεων υπηρεσιών, για την αποδοχή εισερχόμενων κλήσεων, θα λαμβάνει υπόψη του το κριτήριο της δικαιοσύνης. Για την επίτευξη του στόχου αυτού, στην παρούσα διατριβή προτείνεται η τροποποίηση του πιθανοτικού αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων ώστε για την αποδοχή των εισερχόμενων κλήσεων να λαμβάνεται υπόψη και το κριτήριο της δικαιοσύνης. Για το λόγο αυτό, προτείνεται ο δυναμικός προσδιορισμός των πιθανοτικών παραμέτρων για κάθε κατάσταση του δικτύου ώστε να λαμβάνεται υπόψη το κριτήριο της δικαιοσύνης. Αυτό επιτυγχάνεται με ποσοτικοποίηση του οφέλους των χρηστών (users utility) μέσω κατάλληλου μοντέλου. Εκτός από τα πλεονεκτήματα που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, η ενσωμάτωση του κριτηρίου της δικαιοσύνης κατά τη διαδικασία αποδοχής μιας εισερχόμενης κλήσης επιτυγχάνει:

- τη δυναμική συμπεριφορά του πιθανοτικού αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων καθώς μεταβάλλεται το κριτήριο αποδοχής κλήσεων σε κάθε κατάσταση του δικτύου και

- την παροχή εγγυημένου επιπέδου δικαιοσύνης μεταξύ κλήσεων διαφορετικών κλάσεων υπηρεσιών.

Στο παρόν κεφάλαιο ορίζεται η έννοια της δικαιοσύνης και συζητούνται τα βασικά χαρακτηριστικά της. Στη συνέχεια, αναφέρονται οι δείκτες που ποσοτικοποιούν τη δικαιοσύνη στην κατανομή των πόρων του δικτύου, ορίζονται νέοι δείκτες οι οποίοι ανταποκρίνονται καλύτερα στις απαιτήσεις των αλγόριθμων αποδοχής κλήσεων και πραγματοποιείται η αξιολόγηση των αλγόριθμων αποδοχής κλήσεων με κριτήριο τη δικαιοσύνη που επιτυγχάνουν. Τέλος, με βάση τον πιθανοτικό αλγόριθμο αποδοχής κλήσεων περιγράφεται ο προτεινόμενος δυναμικός αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων για επίτευξη δικαιοσύνης.

4.2. Δίκαιη Κατανομή των Πόρων

Στα ασύρματα δίκτυα κινητών επικοινωνιών που υποστηρίζουν πολλαπλές κλάσεις υπηρεσιών, η δίκαιη κατανομή των πόρων μεταξύ κλήσεων διαφορετικών κλάσεων αποτελεί σημαντικό κριτήριο αξιολόγησης των αλγόριθμων αποδοχής κλήσεων (76). Οι περισσότερες σχετικές εργασίες είτε εξετάζουν ποιοτικά το κριτήριο της δικαιοσύνης είτε είναι πολύ εξειδικευμένες για συγκεκριμένη υπηρεσία. Πάντως, ελάχιστες είναι οι εργασίες στη διεθνή βιβλιογραφία που ποσοτικοποιούν το κριτήριο της δικαιοσύνης (77; 78).

Ένας τρόπος ορισμού της δικαιοσύνης σε σχέση με σχήματα ελέγχου ροής (flow control schemes) βασίζεται στην παροχή του ίδιου ρυθμού μετάδοσης σε κάθε ροή δεδομένων η οποία αντιμετωπίζει ίδιο επίπεδο στενότητας πόρων (bottleneck resource) (79; 80). Για να επιτευχθεί στην πράξη η απονομή δικαιοσύνης εφαρμόζονται μέθοδοι που υπαγορεύουν τη βελτιστοποίηση μιας αντικειμενικής συνάρτησης η οποία προβλέπει ποινή όταν η κατανομή πόρων δεν είναι δίκαιη (81; 82). Σύμφωνα με έναν άλλο τρόπο ορισμού της δικαιοσύνης, η κατάσταση λειτουργίας κατά την οποία απονέμεται μηδενικός ρυθμός μετάδοσης έστω και σε ένα χρήστη χαρακτηρίζεται ως άδικη, ειδάλως είναι δίκαιη (83). Επομένως, οι αλγόριθμοι διαχείρισης ραδιοπόρων μπορούν κατηγοριοποιηθούν σε δύο κατηγορίες ανάλογα με το αν ικανοποιούν ή όχι το κριτήριο της δικαιοσύνης.

Από τις πρώτες μεθόδους μέτρησης της δικαιοσύνης ήταν αυτή που εφαρμόστηκε στους αλγόριθμους διαχείρισης της ισχύος των εξυπηρετούμενων χρηστών. Το μέτρο δικαιοσύνης στους αλγόριθμους αυτούς υπολογίζεται μέσω της σχέσης

$$F = \min_{i,j} \left(\frac{p_i}{p_j} \right) \quad (4-1)$$

όπου p_i και p_j είναι η ισχύς του σήματος είτε στη λήψη είτε στην εκπομπή του χρήστη i και j , αντίστοιχα, και $\min_{i,j}(\cdot)$ είναι η συνάρτηση που επιστρέφει τη μικρότερη τιμή για οποιοδήποτε συνδυασμό των i και j (84). Αντίστοιχα προς τον αλγόριθμο διαχείρισης ραδιοπόρων που εξετάζεται και την παράμετρο επίδοσης του δικτύου που υπολογίζεται, εκτός από την ισχύ του σήματος, για τον υπολογισμό του επιπέδου δικαιοσύνης χρησιμοποιείται η ρυθμοαπόδοση (throughput) ή η καθυστέρηση κυκλικής διαδρομής (round trip delay). Ένας αλγόριθμος διαχείρισης ραδιοπόρων είναι απόλυτα δίκαιος όταν $F=1$. Από μια διαφορετική σκοπιά υποστηρίζεται ότι η μέτρηση της δικαιοσύνης πρέπει να βασίζεται στη διακύμανση του μεγέθους (ισχύς, ρυθμοαπόδοση, καθυστέρηση) που μπορεί να μετρηθεί (85). Για το λόγο αυτό προτάθηκε η χρήση του τετραγώνου του συντελεστή μεταβλητότητας (Coefficient of Variation, CoV) της καθυστέρησης (86) και, αργότερα, μια συνάρτηση της διακύμανσης της καθυστέρησης με βάρη (87).

Από τα προηγούμενα και με βάση τον τρόπο που η δικαιοσύνη αντιμετωπίζεται στη διεθνή βιβλιογραφία, γίνεται φανερό η ανάγκη δίκαιης αντιμετώπισης των χρηστών ή των ροών δεδομένων ως προς κάποιο σημαντικό μέγεθος, χωρίς να υπάρχει συμφωνία ποιο πρέπει να είναι το μέγεθος αυτό. Στα ασύρματα δίκτυα κινητών επικοινωνιών το μέγεθος αυτό μπορεί να είναι οι πόροι του δικτύου, η καθυστέρηση κυκλικής διαδρομής, η ρυθμοαπόδοση, ο σηματοθορυβικός λόγος λήψης στο κινητό τερματικό κ.α. Στα δίκτυα υπολογιστών τα αντίστοιχα μεγέθη είναι η καθυστέρηση και η ρυθμοαπόδοση με αντίστοιχο ορισμό της δικαιοσύνης.

4.3. Δείκτες Δικαιοσύνης

Οι δείκτες δικαιοσύνης αποτελούν ποσοτικά μέτρα αξιολόγησης του επιπέδου δικαιοσύνης που επιτυγχάνουν οι αλγόριθμοι διαχείρισης ραδιοπόρων. Οι τιμές τους εξαρτώνται από το μέγεθος του δικτύου που επιλέγεται κάθε φορά ως κριτήριο. Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν προταθεί διάφοροι δείκτες δικαιοσύνης, είτε εξαρτώμενοι από το είδος του δικτύου ή της υπηρεσίας που προσφέρεται είτε γενικοί.

Έστω ότι από το δίκτυο εξυπηρετούνται n το πλήθος χρήστες και ότι στο χρήστη i αποδίδονται x_i πόροι του δικτύου, $i = 1, \dots, n$. Ορισμένοι βασικοί δείκτες δικαιοσύνης που αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία είναι οι ακόλουθοι:

- Η διακύμανση σ^2

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2, \quad (4-2)$$

όπου μ ο μέσος όρος των τιμών της παραμέτρου x_i , δηλαδή

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (4-3)$$

- Ο συντελεστής μεταβλητότητας, που ορίζεται από το λόγο της διακύμανσης προς το μέσο όρο, συνεπώς

$$\text{CoV} = \frac{\sigma}{\mu} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i}. \quad (4-4)$$

- Ο λόγος ελάχιστης προς μέγιστη τιμή (min-max ratio) των πόρων x_i

$$\text{min-max ratio} = \min_{i,j} \left(\frac{x_i}{x_j} \right). \quad (4-5)$$

Στη συνέχεια, αφού αναφερθούν οι γενικές ιδιότητες που πρέπει να ικανοποιεί ένας δείκτης δικαιοσύνης, παρουσιάζεται ο δείκτης δικαιοσύνης του Jain (Jain's Fairness Index, JFI) και προτείνονται νέοι δείκτες, που κρίνονται καταλληλότεροι για την αξιολόγηση των αλγόριθμων αποδοχής κλήσεων.

4.3.1. Ιδιότητες των Δεικτών Δικαιοσύνης

Οι επιθυμητές ιδιότητες που πρέπει να έχει ένας δείκτης δικαιοσύνης είναι οι ακόλουθες (88):

- Ανεξαρτησία από το μέγεθος του δείγματος: Ο δείκτης πρέπει να διαθέτει τη δυνατότητα εφαρμογής σε οποιοδήποτε πλήθος χρηστών, πεπερασμένο (finite) ή άπειρο (infinite). Η ιδιότητα αυτή ικανοποιείται από τους τρεις δείκτες που αναφέρθηκαν προηγουμένως.

- Ανεξαρτησία από συγκεκριμένη κλίμακα (scale) και μονάδα μέτρησης (metric): Ο δείκτης πρέπει να είναι ανεξάρτητος από την κλίμακα και τη μονάδα μέτρησης που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της παραμέτρου μέσω της οποίας ορίζεται ο δείκτης. Από τους δείκτες που αναφέρθηκαν προηγουμένως, ο δείκτης που ορίζεται απευθείας μέσω της διακύμανσης δεν ικανοποιεί το κριτήριο αυτό, ενώ το ικανοποιούν οι υπόλοιποι δύο (ο συντελεστής μεταβλητότητας και ο λόγος ελάχιστης προς μέγιστης τιμής).
- Περιορισμένο εύρος τιμών (boundedness): Οι τιμές του δείκτης δικαιοσύνης πρέπει να είναι κανονικοποιημένες, δηλαδή να περιορίζονται μεταξύ του 0 και 1. Ο δείκτης λαμβάνει τις τιμές 1 και 0 όταν η επίδοση του αλγόριθμου διαχείρισης ραδιοπόρων επιτυγχάνει πλήρη δικαιοσύνη ή πλήρη αδικία, αντίστοιχα. Με αυτόν τον τρόπο υπάρχει η δυνατότητα έκφρασης του επιπέδου δικαιοσύνης σε ποσοστό. Επιπλέον, διευκολύνεται η έκφραση του δείκτη διάκρισης (Discrimination Index, DI) ως συμπληρωματικού του δείκτη δικαιοσύνης, δηλαδή

$$\text{Δείκτης Διάκρισης} = 1 - \text{Δείκτης Δικαιοσύνης}. \quad (4-6)$$

Εξετάζοντας τους προηγούμενους δείκτες ως προς αυτήν την ιδιότητα προκύπτει ότι μόνο ο λόγος ελάχιστης προς μέγιστη τιμή την ικανοποιεί.

- Συνέχεια (continuity): Ο δείκτης πρέπει να μπορεί να λάβει οποιαδήποτε τιμή εντός του διαστήματος $[0,1]$. Οποιαδήποτε μεταβολή στην παράμετρο βάσει της οποίας υπολογίζεται ο δείκτης δικαιοσύνης, όσο μικρή και αν είναι, πρέπει να αντιστοιχεί σε αντίστοιχη μεταβολή της τιμής του δείκτη. Ο λόγος ελάχιστης προς μέγιστη τιμή δεν ικανοποιεί την ιδιότητα αυτή επειδή αγνοεί τις ενδιάμεσες τιμές της παραμέτρου x_i .

Οι δείκτες δικαιοσύνης που παρουσιάστηκαν έως τώρα δεν ικανοποιούν το σύνολο των επιθυμητών ιδιοτήτων. Επομένως, είναι αναγκαίο να οριστούν νέοι δείκτες, που θα ικανοποιούν τις ανωτέρω ιδιότητες.

4.3.2. Ο Δείκτης Δικαιοσύνης του Jain

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο δείκτης δικαιοσύνης του Jain, διεθνώς γνωστός ως Jain's Fairness Index (JFI)³ που χρησιμοποιείται ευρύτατα στη διεθνή βιβλιογραφία για την

³ Η ονομασία που επικράτησε από το όνομα του Rajandra Jain ο οποίος τον όρισε.

αξιολόγηση του επιπέδου δικαιοσύνης αλγόριθμων διαχείρισης πόρων του δικτύου και ικανοποιεί όλες τις ιδιότητες που παρουσιάστηκαν προηγουμένως (88). Ορίζεται μέσω της σχέσης

$$JFI = \frac{\left| \sum_{i=1}^n x_i \right|^2}{n \sum_{i=1}^n x_i^2}, \quad x_i \geq 0. \quad (4-7)$$

Όπως φαίνεται από τον ορισμό, ο JFI εκφράζει το βαθμό ισοκατανομής των πόρων ενός δικτύου στους χρήστες. Εφόσον όλοι οι χρήστες λάβουν το ίδιο πλήθος πόρων, ο JFI ισούται με τη μονάδα και ο αλγόριθμος διαχείρισης ραδιοπόρων που το επιτυγχάνει χαρακτηρίζεται απολύτως δίκαιος. Όταν η κατανομή πόρων μεταξύ των χρηστών καθίσταται άδικη, επειδή, ενδεχομένως, ο αλγόριθμος ευνοεί συγκεκριμένη κατηγορία χρηστών, η τιμή του JFI μειώνεται πλησιάζοντας το 0.

Ο αντίστοιχος δείκτης διάκρισης DI ορίζεται από τη σχέση

$$DI = 1 - JFI = 1 - \frac{\left| \sum_{i=1}^n x_i \right|^2}{n \sum_{i=1}^n x_i^2}, \quad x_i \geq 0. \quad (4-8)$$

Εξ ορισμού, ο δείκτης JFI είναι συνάρτηση των ροπών πρώτης $E[X]$ και δεύτερης τάξης $E[X^2]$, αφού η (4-7) μπορεί να γραφεί και υπό τη μορφή

$$JFI = \frac{\left| \sum_{i=1}^n x_i \right|^2}{n \sum_{i=1}^n x_i^2} = \frac{\left| \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \right|^2}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2} = \frac{E^2[X]}{E[X^2]}, \quad x_i \geq 0. \quad (4-9)$$

Κατά τα γνωστά, οι ροπές πρώτης και δεύτερης τάξης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να περιγραφούν οι δείκτες δικαιοσύνης της διακύμανσης (85)

$$\sigma^2 = E[X^2] - E^2[X] \quad (4-10)$$

και του συντελεστή μεταβλητότητας (87)

$$CoV = \frac{\sqrt{E[X^2] - E^2[X]}}{E[X]}. \quad (4-11)$$

Κατ' αυτό τον τρόπο αυτό διευκολύνεται η σύγκριση μεταξύ διαφορετικών δεικτών δικαιοσύνης και η ερμηνεία τους. Επιπλέον, ο JFI μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει του συντελεστή μεταβλητότητας ως εξής

$$JFI = \frac{1}{1 + CoV^2} \cdot (4-12)$$

Σύμφωνα με την (4-12), αν και ο JFI είναι ένας απλός μετασχηματισμός του συντελεστή μεταβλητότητας, ο μετασχηματισμός αυτός είναι σημαντικός, καθώς ο JFI ικανοποιεί τις τέσσερις επιθυμητές ιδιότητες που ορίστηκαν προηγουμένως. Εξετάζοντας τον JFI ως προς τις ιδιότητες ισχύουν τα εξής:

- Ο JFI μπορεί εύκολα να χρησιμοποιηθεί για οποιοδήποτε πλήθος χρηστών αφού για την εκτίμησή του χρειάζεται να υπολογιστούν οι ροπές πρώτης και δεύτερης τάξης.
- Ο JFI είναι αδιάστατος και ανεξάρτητος από την κλίμακα μέτρησης που χρησιμοποιείται για το μέγεθος x_i .
- Η σχέση μεταξύ του συντελεστή μεταβλητότητας και του JFI είναι ένα προς ένα. Επομένως, ο αλγόριθμος κατανομής πόρων είναι απόλυτα δίκαιος όταν $CoV=0$ που, μέσω της σχέσης (4-12), αντιστοιχεί σε $JFI=1$. Όταν μειώνεται το επίπεδο δικαιοσύνης, δηλαδή όταν αυξάνει ο συντελεστής μεταβλητότητας, ο JFI μειώνεται, ικανοποιώντας την απαίτηση η τιμή του δείκτη δικαιοσύνης να ελαττώνεται όταν αυξάνει η άνιση αντιμετώπιση διαφορετικών χρηστών από το δίκτυο. Η ελάχιστη τιμή που λαμβάνει ο JFI είναι η μηδενική, που αντιστοιχεί σε κατάσταση πλήρους αδικίας.
- Ο συντελεστής μεταβλητότητας είναι συνεχής ως προς τις τιμές του δείγματος της τυχαίας μεταβλητής X , οπότε και ο JFI είναι συνεχής. Επομένως, οι τιμές που μπορεί να λάβει ο JFI βρίσκονται εντός του κλειστού διαστήματος $[0, 1]$.

Εκτός από τους JFI και CoV υπάρχουν και άλλοι γνωστοί λόγοι που βασίζονται στις ροπές και ονομάζονται συντελεστές (coefficients), όπως

$$\text{Coefficient of Skewness} = \text{Skew}[X] = \frac{E[(X - \mu)^3]}{E^{3/2}[(X - \mu)^2]}, (4-13)$$

και

$$\text{Coefficient of Kurtosis} = \text{Kurt}[X] = \frac{E[(X - \mu)^4]}{E^2[(X - \mu)^2]}. (4-14)$$

Κοινό χαρακτηριστικό των συντελεστών CoV , $Skew[X]$ και $Kurt[X]$ είναι η δυνατότητά τους να χρησιμοποιηθούν σε κατανομές που μπορούν να λάβουν αρνητικές τιμές, όπως η κανονική κατανομή, ενώ η χρήση του JFI έχει νόημα μόνο σε κατανομές οι οποίες δεν λαμβάνουν αρνητικές τιμές όπως η ομοιόμορφη, η εκθετική και η λογαριθμική κατανομή. Στον Πίνακα 4-1 έχει οριστεί ο JFI για τις συνήθεις κατανομές.

4.3.1. Προτεινόμενοι Δείκτες Δικαιοσύνης

Η διαφορά μεταξύ των πιθανοτήτων μη αποδοχής κλήσεων διαφορετικών κλάσεων υπηρεσιών είναι επιθυμητή και αποδεκτή έως ένα βαθμό ώστε να αποτυπώνονται στην πράξη τα διαφορετικά επίπεδα προτεραιότητας. Εντούτοις, είναι πιθανό μια κλάση

Ονομασία Κατανομής	Κατανομή Πυκνότητας Πιθανότητας	Ροπή Πρώτης Τάξης $E[X]$	Ροπή Δεύτερης Τάξης $E[X^2]$	Δείκτης Δικαιοσύνης του Jain JFI
Σταθερή (Constant)	$p(x) = 1$ αν και μόνο αν $x = \alpha$	α	α^2	1
Εκθετική (Exponential)	$p(x) = \lambda e^{-\lambda x}$, όπου $\lambda > 0$ και $x \geq 0$	$\frac{1}{\lambda}$	$\frac{2}{\lambda^2}$	0.5
Erlang	$p(x) = \frac{\lambda^c x^{c-1} e^{-\lambda x}}{(c-1)!}$, όπου $\lambda, x \geq 0$ και $c \in \mathbb{N}$	$\frac{c}{\lambda}$	$\frac{c(c+1)}{\lambda^2}$	$\frac{c}{c+1}$
Ομοιόμορφη (Uniform)	$p(x) = \frac{1}{b-a}$ αν και μόνο αν $a \leq x \leq b$, $p(x) = 0$ για $x < a$ ή $b < x$	$\frac{a+b}{2}$	$\frac{a^2 + ab + b^2}{3}$	$\frac{3(a+b)^2}{4(a^2 + ab + b^2)}$
Λογαριθμική (Lognormal)	$p(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{\ln^2(x/m)}{2\sigma^2}\right\}$	$e^{\mu+\sigma^2/2}$	$e^{2\mu+2\sigma^2}$	$e^{-\sigma^2}$

Πίνακας 4-1: Δείκτης δικαιοσύνης του Jain (JFI) για διάφορες γνωστές κατανομές.

υπηρεσιών να αντιμετωπίζεται από τον αλγόριθμο αποδοχής κλήσεων αντίστοιχα με το επίπεδο προτεραιότητας που της αναλογεί. Οι διαφορές στον τρόπο αντιμετώπισης των κλάσεων υπηρεσιών δεν είναι εμφανείς όταν το εξυπηρετούμενο φορτίο κάθε κυψέλης είναι χαμηλό. Ωστόσο, όταν το δίκτυο λειτουργεί σε καταστάσεις που βρίσκονται κοντά στην κατάσταση κορεσμού, οι υψηλής προτεραιότητας κλάσεις υπηρεσιών ενδέχεται να μονοπωλούν τους πόρους του δικτύου. Αποτέλεσμα αυτού είναι η αυξημένη πιθανότητα μη αποδοχής των κλήσεων χαμηλής προτεραιότητας, η οποία σε πολλές περιπτώσεις προσεγγίζει τη μονάδα. Στην περίπτωση αυτή οι προδιαγραφές για τη δικαιοσύνη υπαγορεύουν ότι οι πιθανότητες μη αποδοχής κλήσεων διαφορετικών κλάσεων υπηρεσιών δεν πρέπει να διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους, ώστε να αποφεύγεται ο πλήρης αποκλεισμός των εισερχόμενων κλήσεων που ανήκουν σε κλάσεις χαμηλής προτεραιότητας.

Ο δείκτης JFI που παρουσιάστηκε προηγουμένως χρησιμοποιείται κυρίως για τον υπολογισμό του επιπέδου δικαιοσύνης σε αλγόριθμους κατανομής πόρων αγνοώντας τη διαδικασία αποδοχής κλήσεων. Είναι χαρακτηριστικό ότι ο JFI εξετάζει τον τρόπο με τον οποίο είναι κατανομημένοι οι πόροι του δικτύου στους χρήστες χωρίς να εξετάζει τις πιθανότητες μη αποδοχής κλήσεων, οι οποίες αποτελούν βασικό κριτήριο επίδοσης των αλγόριθμων αποδοχής κλήσεων. Συνεπώς, ανακύπτει η ανάγκη ορισμού νέων δεικτών που θα είναι καταλληλότεροι για τη μέτρηση του επιπέδου δικαιοσύνης των αλγόριθμων αποδοχής κλήσεων.

Για τη μέτρηση του επιπέδου δικαιοσύνης με κριτήριο την πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων που επιτυγχάνει ένας αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων ορίζεται ο ακόλουθος δείκτης δικαιοσύνης

$$F = \frac{1}{\bar{P}_{e_j}} \sum_{u=1}^U (P_{b_{u,j}} - \bar{P}_{e_j})^2, \quad (4-15)$$

όπου $P_{b_{u,j}}$ η πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων που αφορά την κλάση υπηρεσιών u στην κυψέλη j και

$$\bar{P}_{e_j} = \frac{1}{U} \sum_{u=1}^U P_{b_{u,j}}. \quad (4-16)$$

η μέση πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων της ίδιας κυψέλης για όλες τις υποστηριζόμενες κλάσεις υπηρεσιών. Η διαφορά των πιθανοτήτων μη αποδοχής κλήσεων όπου βασίζεται ο

δείκτης F αντανακλά το βαθμό άνισης αντιμετώπισης των εισερχόμενων κλήσεων διαφορετικών κλάσεων υπηρεσιών από τον αλγόριθμο αποδοχής κλήσεων. Όπως προκύπτει από τις (4-15) και (4-16), ο δείκτης F ορίζεται μέσω της ροπής πρώτης τάξης και της κεντρικής ροπής δεύτερης τάξης. Επιπλέον, ο δείκτης F μπορεί να πάρει οποιαδήποτε θετική τιμή. Ένας αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων χαρακτηρίζεται ως απόλυτα δίκαιος όταν $F=0$. Αντιθέτως, η αύξηση του επιπέδου άνισης μεταχείρισης των εισερχόμενων κλήσεων αντιστοιχίζεται σε αυξημένες τιμές του δείκτη F . Επομένως, υπάρχει αντίστροφη σχέση μεταξύ του δείκτη F και του επιπέδου δικαιοσύνης.

Εκτός από τη μελέτη του επιπέδου δικαιοσύνης με βάση τη πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων, το ίδιο πρόβλημα μπορεί να μελετηθεί μέσω της κατανομής πόρων σε χρήστες διαφορετικών κλάσεων υπηρεσιών, οι οποίες αποτελούν τις ροές εισερχόμενης κίνησης για το δίκτυο. Για το λόγο αυτό ορίζεται ένας νέος δείκτης δικαιοσύνης, ο μέσος δείκτης δικαιοσύνης (Average Fairness Index, AFI), ο οποίος λαμβάνει υπόψη του το μέσο ρυθμό εισερχόμενης κίνησης και τις αντίστοιχες πιθανότητες μη αποδοχής κλήσεων μέσω των οποίων αποτιμώνται οι αλγόριθμοι αποδοχής κλήσεων καθώς και την επιθυμία του διαχειριστή του δικτύου για συγκεκριμένη κατανομή πόρων μεταξύ των υποστηριζόμενων ροών εισερχόμενης κίνησης. Τα μεγέθη αυτά δε μπορεί να ενσωματώσει ο JFI, οπότε καθίσταται αναγκαία η εισαγωγή του AFI.

Κάθε κλάση υπηρεσιών u χαρακτηρίζεται από το λόγο δικαιοσύνης FQ_u (Fairness Quotient, FQ) ο οποίος ορίζεται ως το πηλίκο των κλήσεων της κλάσης υπηρεσιών u που γίνονται αποδεκτές προς το σύνολο των κλήσεων που γίνονται αποδεκτές σε επίπεδο κυψέλης του δικτύου. Συνεπώς

$$FQ_u = \frac{\lambda_u (1 - p_{b_u})}{\sum_{k=1}^U \lambda_k (1 - p_{b_k})} \quad (4-17)$$

όπου p_{b_u} η πιθανότητα μη αποδοχής που αφορά τις κλήσεις που ανήκουν στην κλάση υπηρεσιών u . Ο ιδανικός λόγος δικαιοσύνης IFQ_u (Ideal Fairness Quotient, IFQ) της κλάσης υπηρεσιών u ορίζεται ως η κανονικοποιημένη αναλογία πόρων f_u σε επίπεδο κυψέλης του δικτύου που επιθυμεί ο διαχειριστής του δικτύου να χρησιμοποιεί η κλάση υπηρεσιών u και ορίζεται από τη σχέση

$$IFQ_u = \frac{f_u}{\sum_{k=1}^U f_k}. \quad (4-18)$$

Ο λόγος της παραμέτρου FQ_u από την επιθυμητή τιμή της IFQ_u συμβολίζεται ως FI_u και προκύπτει ως εξής

$$FI_u = \frac{FQ_u}{IFQ_u}. \quad (4-19)$$

Όταν $FI_u = 1$, ο λόγος δικαιοσύνης ταυτίζεται με την ιδανική τιμή και η αντίστοιχη κατάσταση του δικτύου βρίσκεται σε πλήρη συμφωνία με τις προδιαγραφές του διαχειριστή για την επιθυμητή κατανομή πόρων. Με βάση την παράμετρο FI_u , ορίζεται ο δείκτης

$$AFI = \sum_{u=1}^U |1 - FI_u|. \quad (4-20)$$

Όταν $AFI = 0$, η κατανομή πόρων που επιτυγχάνει ο αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων ταυτίζεται με την επιθυμητή κατανομή από το διαχειριστή, οπότε επιτυγχάνεται πλήρης δικαιοσύνη. Αντιθέτως, αύξηση της τιμής του δείκτη AFI αντιστοιχεί σε λιγότερο δίκαιη λειτουργία του αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων.

4.4. Αξιολόγηση Επίδοσης του Πιθανοτικού Αλγόριθμου

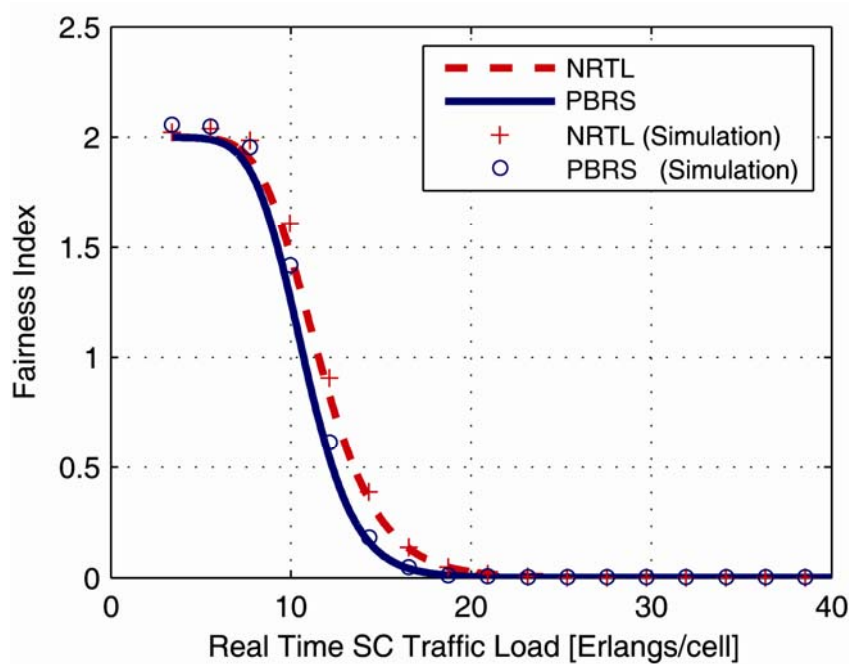
Αποδοχής Κλήσεων Βάσει Δεικτών Δικαιοσύνης

Με βάση τους δύο δείκτες δικαιοσύνης που ορίστηκαν προηγουμένως η επίδοση του πιθανοτικού αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων θα εξεταστεί ως προς το επίπεδο δικαιοσύνης το οποίο επιτυγχάνει. Επιπλέον, η επίδοσή του θα συγκριθεί με αυτή άλλων αλγόριθμων αποδοχής κλήσεων, όπως π.χ. ο αλγόριθμος δέσμευσης καναλιών NRTL. Οι παράμετροι του δικτύου που χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-2.

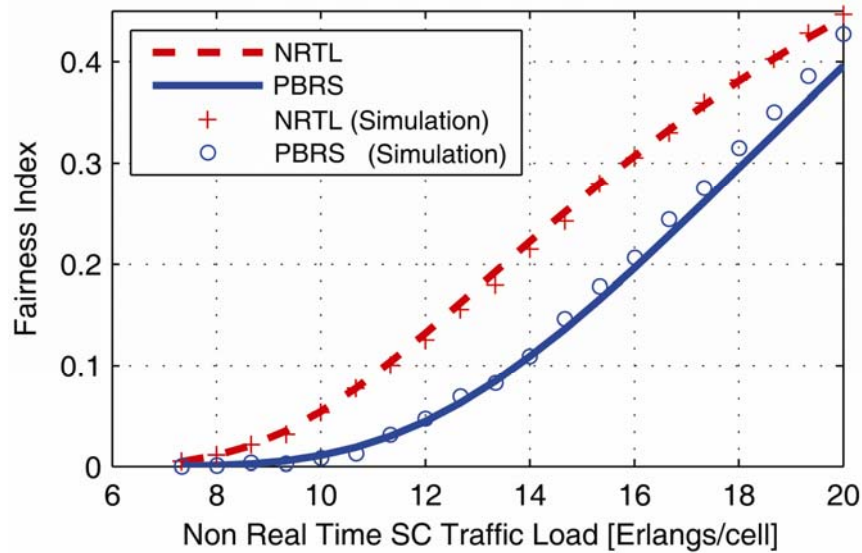
Στα Σχήματα 4-1 και 4-2, όπου σχεδιάζεται ο δείκτης δικαιοσύνης F ως συνάρτηση του RT και NRT φορτίου εισόδου, εξετάζεται η επίδοση των αλγόριθμων PBRS και NRTL. Από την παρατήρηση των αντίστοιχων καμπυλών φαίνεται ότι οι τιμές του δείκτη δικαιοσύνης F που προκύπτουν με εφαρμογή του αλγόριθμου PBRS είναι χαμηλότερες από τις αντίστοιχες τιμές του αλγόριθμου NRTL για κάθε τιμή RT και NRT φορτίου εισόδου.

Παράμετρος	RT Φορτίο Εισόδου	NRT Φορτίο Εισόδου
$\lambda_{NRT,j}$	1/20	1/30
$\lambda_{RT,j}$	1/30	1/30
N_j	30	30
T_j	15	15
$\mu_{NRT,j}$	1/300	1/200 μέχρι 1/600
$\mu_{RT,j}$	1/100 μέχρι 1/1200	1/450
$a_{\ell,j}$	0,75 για $\ell = 0, \dots, T_j - 1$ 0,25 για $\ell = T_j, \dots, N_j - 1$	0,8 για $\ell = 0, \dots, T_j - 1$ 0,2 για $\ell = T_j, \dots, N_j - 1$

Πίνακας 4-2: Τιμές παραμέτρων του δικτύου για δύο κλάσεις υπηρεσιών με δεδομένη πιθανότητα αποδοχής NRT κλήσεων.



Σχήμα 4-1: Διάγραμμα του δείκτη δικαιοσύνης F συναρτήσει του RT φορτίου εισόδου για τους αλγόριθμους PBRS και NRTL.

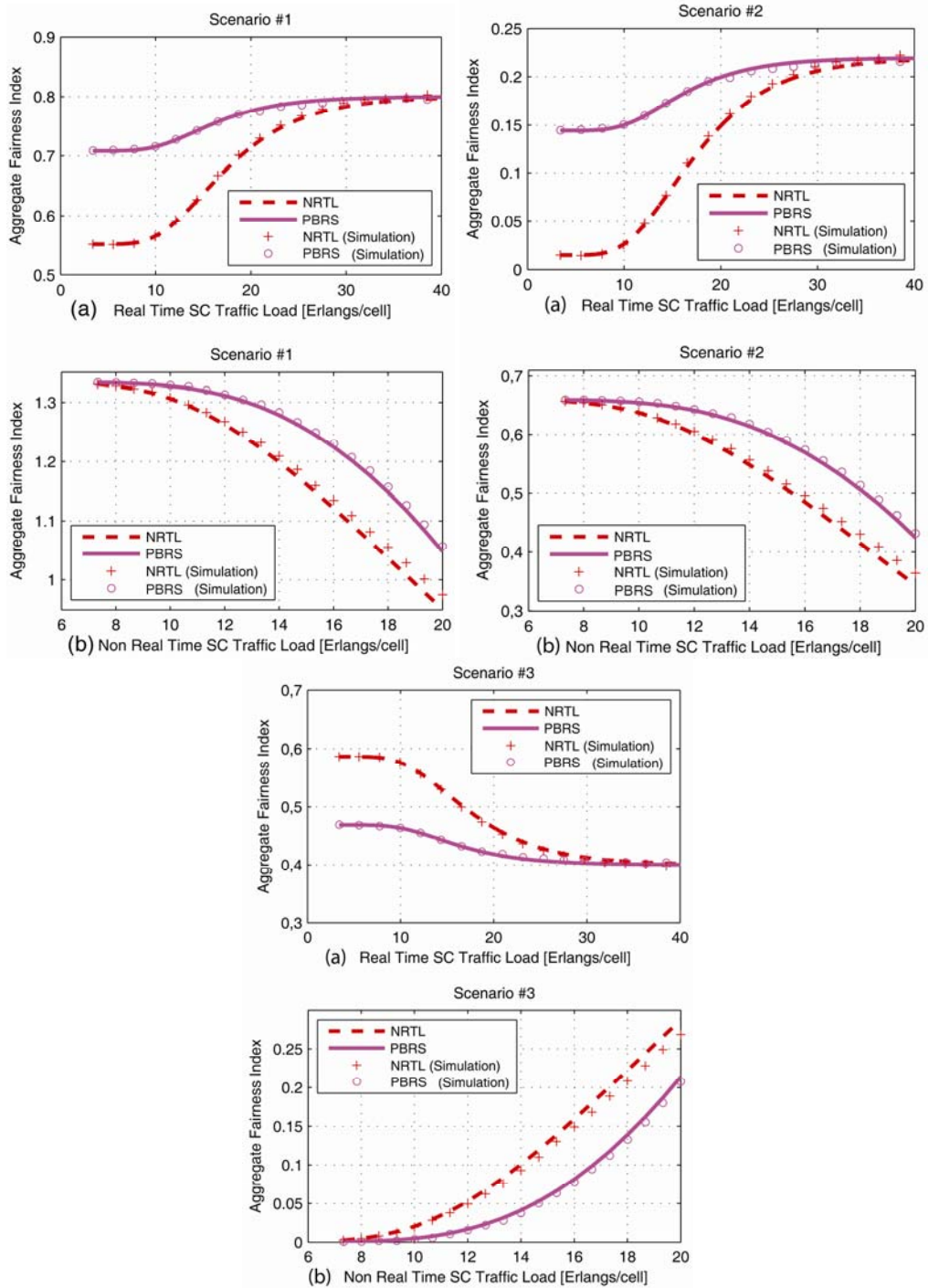


Σχήμα 4-2: Διάγραμμα του δείκτη δικαιοσύνης F συναρτήσει του NRT φορτίου εισόδου για τους αλγόριθμους PBRS και NRTL.

Αυτό οφείλεται στη μικρότερη απόκλιση που εμφανίζουν οι πιθανότητες μη αποδοχής RT και NRT κλήσεων τις οποίες επιτυγχάνει ο αλγόριθμος PBRS σε σχέση με τον αλγόριθμο NRTL. Επομένως, ο αλγόριθμος PBRS υπερέχει σε σχέση με τον αλγόριθμο NRTL ως προς το συγκεκριμένο κριτήριο δικαιοσύνης. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι η τιμή του δείκτη F και για τους δύο αλγόριθμους είναι ίση με το μηδέν για μεσαίο και υψηλό RT φορτίο εισόδου. Στην κατάσταση αυτή επιτυγχάνεται πλήρης δικαιοσύνη κατά τη διαδικασία αποδοχής κλήσεων, γεγονός που αντιστοιχεί σε εξίσωση των πιθανοτήτων μη αποδοχής κλήσεων των RT και NRT εισερχόμενων ροών κίνησης.

Στη συνέχεια, αξιολογείται η επίδοση των δύο αλγόριθμων, PBRS και NRTL, ως προς την επίδοσή τους με βάση το δείκτη δικαιοσύνης AFI . Για το λόγο αυτό ορίζονται τρία σενάρια επιθυμητής κατανομής πόρων μεταξύ των δύο τύπων εισερχόμενων ροών κίνησης. Τα τρία σενάρια και οι αντίστοιχες ποσοστιαίες τιμές αναλογίας του εισερχόμενου φορτίου για κάθε ροή κίνησης παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-3. Τα δύο πρώτα σενάρια, μονοπωλιακή κατανομή και κατανομή μέτριας προτεραιότητας, αποδίδουν μεγαλύτερη αναλογία πόρων υπέρ των κλήσεων RT. Το τρίτο σενάριο, δίκαιη κατανομή, περιγράφει την πλήρη δικαιοσύνη στην κατανομή των πόρων μεταξύ των RT και NRT κλήσεων.

Από τα διαγράμματα του Σχήματος 4-3 φαίνεται ότι στα δύο πρώτα σενάρια ο αλγόριθμος NRTL επιτυγχάνει χαμηλότερες τιμές του δείκτη δικαιοσύνης AFI υπό



Σχήμα 4-3: Επίδοση των αλγόριθμων PBRS και NRTL ως προς το δείκτη δικαιοσύνης *AFI* για τα τρία σενάρια υπό μεταβλητό φορτίο εισόδου (a) RT και (b) NRT κλήσεων.

μεταβλητό φορτίο εισόδου RT και NRT κλήσεων συγκριτικά με τον αλγόριθμο PBRS. Εντούτοις, στην περίπτωση του μεταβλητού NRT φορτίου εισόδου οι τιμές του δείκτη *AFI* του αλγόριθμου PBRS αλγόριθμο συγκλίνουν στις αντίστοιχες του NRTL, ενώ για μεταβλητό RT φορτίο εισόδου οι αποκλίσεις στην επίδοση των δύο αλγόριθμων είναι πολύ

μικρές. Χαμηλότερες τιμές του δείκτη *AFI* είναι επιθυμητές επειδή αντιστοιχούν σε λειτουργία του δικτύου όπου ο αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων λειτουργεί πλησιέστερα προς τις προδιαγραφές του διαχειριστή του δικτύου. Η αύξηση του RT φορτίου εισόδου οδηγεί σε μεγαλύτερες τιμές του *AFI* γεγονός που οφείλεται στην αύξηση της πιθανότητας μη αποδοχής που αφορά RT κλήσεις και της απόκλισης από τις προδιαγραφές του διαχειριστή. Ωστόσο, η αύξηση του NRT φορτίου εισόδου αντιστοιχεί σε μεγαλύτερες τιμές της πιθανότητας μη αποδοχής που αφορά NRT κλήσεις χαρακτηριστικό επιθυμητό μέχρι ενός ορίου στα δύο πρώτα σενάρια. Επομένως, η τιμή του *AFI* μειώνεται όταν αυξάνεται το NRT φορτίο εισόδου.

Αριθμός Σεναρίου	Σενάριο	Αναλογία Ροών Φορτίου Εισόδου	
		RT Φορτίο Εισόδου	NRT Φορτίο Εισόδου
#1	Μονοπωλιακή Κατανομή	75%	25%
#2	Κατανομή Μέτριας Προτεραιότητας	65%	35%
#3	Δίκαιη Κατανομή	50%	50%

Πίνακας 4-3: Ποσοστιαία αναλογία του φορτίου εισόδου για κάθε ροή εισερχόμενης κίνησης των τριών σεναρίων.

Σε αντίθεση με τα αποτελέσματα της σύγκρισης των αλγόριθμων στα δύο πρώτα σενάρια, στην περίπτωση του τρίτου σεναρίου ο αλγόριθμος PBRS υπερέρχει έναντι του αλγόριθμου NRTL ως προς το δείκτη δικαιοσύνης *AFI* υπό μεταβλητό φορτίο εισόδου RT και NRT κλήσεων (Σχήμα 4-3). Η επίδοση του αλγόριθμου PBRS ως προς το δείκτη *AFI* καταδεικνύει την καλύτερη προσαρμογή του στην περίπτωση του σεναρίου της δίκαιης κατανομής πόρων και, συνεπώς, στη δικαιότερη αντιμετώπιση των διαφορετικών ροών εισερχόμενης κίνησης από το δίκτυο.

4.5. Βελτιστοποίηση του Πιθανοτικού Αλγόριθμου Αποδοχής Κλήσεων προς την Επίτευξη Πλήρους Δικαιοσύνης

Στα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν μέχρι τώρα για τον πιθανοτικό αλγόριθμο αποδοχής κλήσεων χρησιμοποιήθηκαν για ευκολία σταθερές τιμές για τις πιθανοτικές

παραμέτρους. Όμως οι τιμές των πιθανοτικών παραμέτρων είναι δυνατό να μεταβάλλονται προσαρμοζόμενες στο τρέχον φορτίο κυψέλης του δικτύου. Στο πλαίσιο αυτό, ορίζεται ένα δυναμικό μοντέλο βελτιστοποίησης του πιθανοτικού αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων που βασίζεται στο όφελος των χρηστών και αποσκοπεί στην εξασφάλιση δικαιοσύνης κατά τη διαδικασία αποδοχής κλήσεων. Το όφελος των χρηστών υπολογίζεται μέσω κατάλληλων συναρτήσεων που ποσοτικοποιούν την ικανοποίηση των χρηστών από το επίπεδο της ποιότητας παροχής υπηρεσιών που λαμβάνουν. Η βασική ιδέα περιλαμβάνει τον υπολογισμό της βέλτιστης τιμής των παραμέτρων του πιθανοτικού αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων για τις οποίες επιτυγχάνεται εξίσωση του οφέλους των διαφορετικών κλάσεων υπηρεσιών υπό δεδομένο ρυθμό φορτίου εισόδου και αποδεκτό επίπεδο ποιότητας υπηρεσιών (89).

Αποσκοπώντας στη διατύπωση ενός ρεαλιστικού μοντέλου στη συμπεριφορά των χρηστών ενσωματώνεται η έννοια της αποστροφής κινδύνου (risk aversion), η οποία λαμβάνεται υπόψη κατά τον υπολογισμό του οφέλους των χρηστών αντικατοπτρίζοντας την αβεβαιότητα κατά τη διαδικασία αποδοχής κλήσεων. Όπως θα φανεί στη συνέχεια, το προτεινόμενο δυναμικό μοντέλο επιτυγχάνει εξαιρετικά αποτελέσματα ως προς την επίτευξη δικαιοσύνης μεταξύ διαφορετικών ροών φορτίου εισόδου. Η ανάλυση που ακολουθεί αφορά μια κλάση υπηρεσιών οι κλήσεις της οποίας διακρίνονται σε νέες και από διαπομπή. Ωστόσο, το μοντέλο μπορεί εύκολα να επεκταθεί σε δύο ή περισσότερες κλάσεις υπηρεσιών.

4.5.1. Περιγραφή του Μοντέλου Δικτύου και του Ελέγχου Αποδοχής

Κλήσεων

Στη συνέχεια αναφέρονται οι βασικές υποθέσεις που αφορούν το υπό μελέτη δίκτυο και παρουσιάζεται συνοπτικά ο πιθανοτικός αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων για την εξαγωγή των πιθανοτήτων μη αποδοχής κλήσεων, οι οποίες, στη συνέχεια, θα χρησιμεύσουν για τον υπολογισμό της βέλτιστης τιμής της πιθανοτικής παραμέτρου. Για την ανάλυση που ακολουθεί υποτίθεται ένα ασύρματο ομογενές κυψελωτό δίκτυο, γεγονός που επιτρέπει τη μεμονωμένη εξέταση μιας κυψέλης του δικτύου. Έστω ότι υποστηρίζεται μια κλάση υπηρεσιών, οι κλήσεις της οποίας διαχωρίζονται σε νέες και από διαπομπή. Η κατανομή του ρυθμού αφίξεων για τις νέες και από διαπομπή κλήσεις ακολουθεί την κατανομή Poisson με μέση τιμή λ_n και λ_h , αντίστοιχα. Επομένως, ο συνολικός αριθμός

αφίξεων στην κυψέλη είναι $\lambda = \lambda_n + \lambda_n$. Ωστόσο, ο ρυθμός αφίξεων των κλήσεων από διαπομπή εξαρτάται από το συνολικό ρυθμό αφίξεων, συνεπώς η παράμετρος λ_n μπορεί να εκφραστεί ως $\lambda_n = a \cdot \lambda$, όπου $0 \leq a \leq 1$ (65). Συνεπώς, ο μέσος ρυθμός αφίξεων νέων κλήσεων μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει του συνολικού μέσου ρυθμού αφίξεων ως $\lambda_n = (1 - \alpha) \cdot \lambda$. Επιπλέον, υποτίθεται ότι ο χρόνος δέσμευσης καναλιού για όλες τις εισερχόμενες κλήσεις ακολουθεί την εκθετική κατανομή, με μέσο ρυθμό εξυπηρέτησης μ .

Ως κατάσταση της κυψέλης του δικτύου μια δεδομένη χρονική στιγμή t ορίζεται το πλήθος των κατειλημμένων καναλιών της από όλες τις εξυπηρετούμενες κλήσεις. Το πλήθος αυτό μπορεί να περιγραφεί ως τυχαία διαδικασία $X(t)$ η οποία περιγράφεται μέσω αλυσίδας Markov συνεχούς χρόνου. Το σύνολο των επιτρεπτών καταστάσεων της κυψέλης του δικτύου είναι

$$S = \{n; 0 \leq n \leq C\}, \quad (4-21)$$

όπου C η χωρητικότητα της κυψέλης υπολογιζόμενη σε πλήθος καναλιών. Έστω T το κατώφλιο πάνω από το οποίο αλλάζει το κριτήριο αποδοχής κλήσεων. Συγκεκριμένα, στην ανάλυση που ακολουθεί θεωρείται ότι, όταν το εξυπηρετούμενο φορτίο της κυψέλης είναι χαμηλότερο από το κατώφλιο, όλες οι εισερχόμενες κλήσεις γίνονται αποδεκτές ανεξάρτητα από το αν είναι νέες ή προέρχονται από διαπομπή, αφού υπάρχει αρκετή διαθέσιμη χωρητικότητα στην κυψέλη για να εξασφαλίζει αποδεκτό επίπεδο ποιότητας υπηρεσιών. Σε διαφορετική περίπτωση, δηλαδή όταν υπάρχουν λιγότερα από $C - T$ διαθέσιμα κανάλια στην κυψέλη, οι νέες κλήσεις γίνονται αποδεκτές βάσει της πιθανότητας β_n του προτεινόμενου πιθανοτικού αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων ενώ οι κλήσεις από διαπομπή γίνονται αποδεκτές μέχρι να εξαντληθούν όλα τα διαθέσιμα κανάλια της κυψέλης (74). Ο δείκτης n της πιθανότητας β_n δηλώνει την εξάρτηση της από την αντίστοιχη κατάσταση της κυψέλης (75).

Ο ρυθμός γεννήσεων της τυχαίας διαδικασίας $X(t)$ είναι

$$\lambda(n) = \gamma_n \lambda, \quad (4-22)$$

όπου $\gamma_n = a + (1 - a)\beta_n$ για $0 \leq n \leq C - 1$ και $0 \leq \beta_n \leq 1$. Όταν υπάρχουν τουλάχιστον $C - T$ διαθέσιμα κανάλια στην κυψέλη, η αποδοχή νέων κλήσεων δεν επηρεάζεται από την πιθανότητα β_n καθώς $\beta_n = 1$ για $0 \leq n \leq T - 1$. Σε αντίθετη περίπτωση, όταν το φορτίο

της κυψέλης είναι μεγαλύτερο ή ίσο της τιμής του κατωφλίου, νέες κλήσεις γίνονται αποδεκτές με βάση την πιθανότητα β , $\beta_n = \beta$ για $T \leq n \leq C-1$ (65). Η ακριβής τιμή της πιθανότητας β υπολογίζεται στη συνέχεια από το δυναμικό αλγόριθμο υπολογισμού της βέλτιστης τιμής (89). Λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές της παραμέτρου β_n για τις διάφορες καταστάσεις της κυψέλης του δικτύου, η παράμετρος γ_n προκύπτει

$$\gamma_n = \begin{cases} 1 & \text{για } 0 \leq n \leq T-1 \\ \gamma = a + (1-a)\beta & \text{για } T \leq n \leq C-1. \end{cases} \quad (4-23)$$

Επομένως, η (4-22) μπορεί να ξαναγραφεί υπό τη μορφή

$$\lambda(n) = \begin{cases} \lambda & \text{για } 0 \leq n \leq T-1 \\ \gamma\lambda & \text{για } T \leq n \leq C-1. \end{cases} \quad (4-24)$$

Επιπλέον, ο ρυθμός θανάτων της τυχαίας διαδικασίας $X(t)$ στην κατάσταση n είναι $n\mu$ για $1 \leq n \leq C$.

Βάσει των ρυθμών γεννήσεων και θανάτων προκύπτουν οι εξισώσεις σταθερής κατάστασης της αλυσίδας Markov οι οποίες περιγράφονται από την ακόλουθη γενική εξίσωση ισοροπίας

$$\lambda + (1-\gamma)h(n-T)\lambda = n\mu, \quad (4-25)$$

όπου $1 \leq n \leq C$ και $h(x)$ είναι η μοναδιαία βηματική συνάρτηση. Από την επίλυση του συστήματος εξισώσεων (4-25) προσδιορίζονται οι πιθανότητες σταθερής κατάστασης Markov

$$P_n = \begin{cases} (\rho^n/n!)P_0 & \text{για } 0 \leq n \leq T-1 \\ (\rho^n\gamma^{n-T}/n!)P_0 & \text{για } T \leq n \leq C \end{cases}, \quad (4-26)$$

όπου $\rho = \lambda/\mu$ η ένταση της κίνησης και P_0 ο παράγοντας κανονικοποίησης ο οποίος προκύπτει από τη σχέση

$$P_0^{-1} = \sum_{j=0}^{T-1} \frac{\rho^j}{j!} + \sum_{j=T}^C \frac{\rho^j \gamma^{j-T}}{j!}. \quad (4-27)$$

Σύμφωνα με το πιθανοτικό αλγόριθμο αποδοχής κλήσεων μια νέα κλήση μπορεί να απορριφθεί με πιθανότητα $(1-\beta)$ που ισοδυναμεί με $(1-\gamma)/(1-a)$. Επομένως, η πιθανότητα μη αποδοχής νέων κλήσεων είναι

$$P_N(\beta) = \sum_{j=T}^C ((1-\gamma)/(1-a)) P_j. \quad (4-28)$$

Δεδομένου ότι οι κλήσεις από διαπομπή απορρίπτονται μόνο όταν όλα τα κανάλια του δικτύου είναι κατειλημμένα, η αντίστοιχη πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων είναι

$$P_H(\beta) = (\rho^C \gamma^{C-T} / C!) P_0. \quad (4-29)$$

4.5.2. Όφελος των Χρηστών (Users Utility)

Το όφελος των χρηστών ενός δικτύου σχετίζεται άμεσα με το επίπεδο ποιότητας παροχής υπηρεσιών που λαμβάνουν. Όσο υψηλότερα επίπεδα ποιότητας παροχής υπηρεσιών παρέχει το δίκτυο τόσο περισσότερο ικανοποιημένοι είναι οι εξυπηρετούμενοι χρήστες, γεγονός που αντιστοιχεί σε υψηλότερες τιμές της συνάρτησης οφέλους των χρηστών (41). Κάθε συνάρτηση οφέλους χρηστών εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους του δικτύου. Επειδή η πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων αποτελεί το βασικό μέτρο προσδιορισμού του επιπέδου ποιότητας παροχής υπηρεσιών των αλγόριθμων αποδοχής κλήσεων, στην ανάλυση που ακολουθεί το όφελος των χρηστών ορίζεται μέσω των πιθανοτήτων μη αποδοχής κλήσεων όλων των ροών εισερχόμενης κίνησης που υποστηρίζει το δίκτυο (89). Υπό δεδομένο συνολικό μέσο ρυθμό εισερχόμενου φορτίου λ και ρυθμό εξυπηρέτησης μ , οι πιθανότητες μη αποδοχής κλήσεων εξαρτώνται αποκλειστικά από την τιμή της πιθανοτικής παραμέτρου β . Συνεπώς, το όφελος των χρηστών είναι και αυτό συνάρτηση της πιθανότητας β . Δεδομένου ότι οι νέες και από διαπομπή ροές εισερχόμενων κλήσεων είναι ανταγωνιστικές ως προς τη χρήση των πόρων της κυψέλης, η μεταβολή της τιμής της παραμέτρου β επιφέρει αντίστροφα αποτελέσματα στις αντίστοιχες πιθανότητες μη αποδοχής νέων και από διαπομπή κλήσεων. Το ίδιο αποτέλεσμα ισχύει για το όφελος των χρηστών και το μέσο πλήθος χρηστών όπως ορίζεται στη συνέχεια της ενότητας.

Υπόθεση 1: Οι πιθανότητες μη αποδοχής νέων, $P_N(\beta)$, και από διαπομπή, $P_H(\beta)$, κλήσεων υπό δεδομένο συνολικό μέσο ρυθμό φορτίου εισόδου λ και ρυθμό εξυπηρέτησης μ είναι συνεχείς και διαφορίσιμες συναρτήσεις ως προς τη μεταβλητή β . Επιπλέον, οι συναρτήσεις $P_N(\beta)$ και $P_H(\beta)$ λαμβάνουν μη αρνητικές τιμές μικρότερες της μονάδας επειδή εκφράζουν τιμές πιθανοτήτων. Οι ιδιότητες της συνάρτησης $P_N(\beta)$ είναι οι ακόλουθες:

$$\partial P_N(\beta)/\partial\beta \leq 0, \quad (4-30\alpha)$$

$$\lim_{\beta \rightarrow 0} P_N(\beta) = P_N^{\max}, \quad (4-30\beta)$$

$$\lim_{\beta \rightarrow 1} P_N(\beta) = P_N^{\min}, \quad (4-30\gamma)$$

όπου P_N^{\max} και P_N^{\min} είναι η μέγιστη και ελάχιστη τιμή, αντίστοιχα, της πιθανότητας μη αποδοχής νέων κλήσεων. Οι αντίστοιχες ιδιότητες της συνάρτησης $P_H(\beta)$ είναι:

$$\partial P_H(\beta)/\partial\beta \geq 0, \quad (4-31\alpha)$$

$$\lim_{\beta \rightarrow 0} P_H(\beta) = P_H^{\min}, \quad (4-31\beta)$$

$$\lim_{\beta \rightarrow 1} P_H(\beta) = P_H^{\max}, \quad (4-31\gamma)$$

όπου P_H^{\max} και P_H^{\min} είναι η μέγιστη και ελάχιστη τιμή, αντίστοιχα, της πιθανότητας μη αποδοχής κλήσεων από διαπομπή.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το όφελος των χρηστών ποσοτικοποιεί την ικανοποίησή τους από το επίπεδο ποιότητας παροχής υπηρεσιών που λαμβάνουν, το οποίο στους αλγόριθμους αποδοχής κλήσεων συνδέεται με την πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων. Επομένως, το όφελος των χρηστών αυξάνεται όταν μειώνεται η πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων που τους αφορά και αντιστρόφως.

Υπόθεση 2: Η συνάρτηση οφέλους των χρηστών νέων κλήσεων $U_N(\beta)$ είναι συνεχής και διαφορίσιμη συνάρτηση της αντίστοιχης πιθανότητας μη αποδοχής νέων κλήσεων $P_N(\beta)$, δηλαδή $U_N(\beta) = f[P_N(\beta)]$. Η συνάρτηση $f[P_N(\beta)]$ είναι ορισμένη στο κλειστό διάστημα $[P_N^{\min}, P_N^{\max}]$ και έχει τις ακόλουθες ιδιότητες:

$$0 \leq f[P_N(\beta)] \leq 1, \quad (4-32\alpha)$$

$$\partial f[P_N(\beta)]/\partial P_N \leq 0, \quad (4-32\beta)$$

$$\lim_{P_N(\beta) \rightarrow P_N^{\max}} f[P_N(\beta)] = \lim_{\beta \rightarrow 0} f[P_N(\beta)] = 0, \quad (4-32\gamma)$$

$$\lim_{P_N(\beta) \rightarrow P_N^{\min}} f[P_N(\beta)] = \lim_{\beta \rightarrow 1} f[P_N(\beta)] = 1. \quad (4-32\delta)$$

Υπόθεση 3: Η συνάρτηση οφέλους των χρηστών κλήσεων από διαπομπή $U_H(\beta) = g[P_H(\beta)]$ είναι συνεχής και διαφορίσιμη συνάρτηση της αντίστοιχης

πιθανότητας μη αποδοχής νέων κλήσεων $P_H(\beta)$ και ορίζεται στο κλειστό διάστημα $[P_H^{\min}, P_H^{\max}]$. Οι ιδιότητες της συνάρτησης $g[P_H(\beta)]$ είναι οι ακόλουθες:

$$0 \leq g[P_H(\beta)] \leq 1, \quad (4-33\alpha)$$

$$\partial f[P_H(\beta)]/\partial P_H \leq 0, \quad (4-33\beta)$$

$$\lim_{P_H(\beta) \rightarrow P_H^{\max}} g[P_H(\beta)] = \lim_{\beta \rightarrow 1} f[P_H(\beta)] = 0, \quad (4-33\gamma)$$

$$\lim_{P_H(\beta) \rightarrow P_H^{\min}} g[P_H(\beta)] = \lim_{\beta \rightarrow 0} f[P_H(\beta)] = 1. \quad (4-33\delta)$$

Οι συναρτήσεις $U_N(\beta)$ και $U_H(\beta)$ λαμβάνουν τις μέγιστες τιμές τους όταν οι αντίστοιχες πιθανότητες μη αποδοχής κλήσεων ελαχιστοποιούνται. Τα άνω όρια των πιθανοτήτων μη αποδοχής νέων κλήσεων και κλήσεων από διαπομπή κλήσεων είναι P_N^{\max} και P_H^{\max} , αντίστοιχα. Λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιότητες των συναρτήσεων $U_N(\beta)$ και $U_H(\beta)$ αποδεικνύεται ότι οι συναρτήσεις οφέλους χρηστών είναι γνησίως μονότονες. Συγκεκριμένα, η συνάρτηση οφέλους χρηστών νέων κλήσεων $U_N(\beta)$ είναι αύξουσα αφού

$$\partial U_N(\beta)/\partial \beta = \partial f(P_N)/\partial P_N \cdot \partial P_N(\beta)/\partial \beta \geq 0. \quad (4-34)$$

Αντίστοιχα, για τη συνάρτηση οφέλους χρηστών κλήσεων από διαπομπή $U_H(\beta)$ ισχύει

$$\partial U_H(\beta)/\partial \beta = \partial f(P_H)/\partial P_H \cdot \partial P_H(\beta)/\partial \beta \leq 0, \quad (4-35)$$

συνεπώς η $U_H(\beta)$ είναι φθίνουσα.

Υπόθεση 4: Το μέσο πλήθος νέων κλήσεων N_N που εξυπηρετούνται κάθε στιγμή από την κυψέλη είναι συνεχής και διαφορίσιμη συνάρτηση της μεταβλητής β , δηλαδή $N_N = h(\beta)$, και ισχύει

$$N_N^{\min} \leq h(\beta) \leq N_N^{\max}, \quad (4-36)$$

όπου N_N^{\max} και N_N^{\min} ο μέγιστος και ελάχιστος μέσος αριθμός νέων κλήσεων στην κυψέλη, αντίστοιχα. Αύξηση της τιμής της παραμέτρου β συνεπάγεται αντίστοιχη αύξηση του μέσου αριθμού νέων κλήσεων στην κυψέλη· συνεπώς η συνάρτηση $h(\beta)$ είναι γνησίως αύξουσα, δηλαδή $\partial h(\beta)/\partial \beta > 0$. Επίσης, για τη συνάρτηση $h(\beta)$ ισχύει

$$\lim_{\beta \rightarrow 0} h(\beta) = N_N^{\min}, \quad (4-37\alpha)$$

$$\lim_{\beta \rightarrow 1} h(\beta) = N_N^{\max}. \quad (4-37\beta)$$

Επιπλέον, το μέσο πλήθος κλήσεων από διαπομπή N_H που εξυπηρετούνται κάθε στιγμή από την κυψέλη είναι συνεχής και διαφορίσιμη συνάρτηση της μεταβλητής β , δηλαδή $N_H = m(\beta)$. Για τη συνάρτηση $m(\beta)$ ισχύει

$$N_H^{\min} \leq m(\beta) \leq N_H^{\max}, \quad (4-38)$$

όπου N_H^{\max} και N_H^{\min} ο μέγιστος και ελάχιστος μέσος αριθμός κλήσεων από διαπομπή στην κυψέλη, αντίστοιχα. Αύξηση της τιμής της παραμέτρου β συνεπάγεται την αποδοχή νέων εισερχόμενων κλήσεων με μεγαλύτερη πιθανότητα σε βάρος των κλήσεων από διαπομπή, συνεπώς ο μέσος αριθμός κλήσεων από διαπομπή μειώνεται. Άρα, η συνάρτηση ισχύει $m(\beta)$ είναι φθίνουσα, δηλαδή $\partial m(\beta)/\partial \beta < 0$. Επιπλέον, ισχύει

$$\lim_{\beta \rightarrow 0} m(\beta) = N_H^{\max}, \quad (4-39\alpha)$$

$$\lim_{\beta \rightarrow 1} m(\beta) = N_H^{\min}. \quad (4-39\beta)$$

4.5.3. Δυναμικός Υπολογισμός της Βέλτιστης Τιμής της Πιθανοτικής

Παραμέτρου

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένας τρόπος ορισμού της δικαιοσύνης και αποδεικνύεται ότι υπάρχει κατάλληλη τιμή της πιθανότητας β για την οποία μέσω του πιθανοτικού αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων επιτυγχάνεται πλήρης δικαιοσύνη. Η άνιση αντιμετώπιση των εισερχόμενων κλήσεων από ένα αλγόριθμο αποδοχής κλήσεων αποτελεί συνέπεια της απόδοσης διαφορετικής προτεραιότητας σε κλήσεις διαφορετικών κλάσεων υπηρεσιών, συνέπεια που είναι επιθυμητή έως ένα βαθμό. Ωστόσο, όταν στην κυψέλη ενός δικτύου εμφανίζεται υψηλή τηλεπικοινωνιακή κίνηση, οι κλήσεις αυξημένης προτεραιότητας συχνά μονοπωλούν τους πόρους του δικτύου, με αποτέλεσμα οι πιθανότητες μη αποδοχής των κλήσεων χαμηλής προτεραιότητας να είναι εξαιρετικά υψηλές. Επομένως, οι εισερχόμενες κλήσεις χαμηλής προτεραιότητας δε γίνονται αποδεκτές, ενώ οι κλήσεις υψηλής προτεραιότητας γίνονται πάντα αποδεκτές μέχρι να δεσμευτούν όλοι οι πόροι μιας κυψέλης. Αυτό οδηγεί σε μη δίκαιη κατανομή των πόρων της μεταξύ κλήσεων διαφορετικών κλάσεων υπηρεσιών.

Το επίπεδο δικαιοσύνης για κάθε κλάση υπηρεσιών που υποστηρίζεται από ένα δίκτυο μπορεί να οριστεί μέσω του οφέλους των αντίστοιχων χρηστών των υπηρεσιών του δικτύου. Επομένως, το συνολικό όφελος χρηστών νέων και από διαπομπή κλήσεων είναι

$$TU_N(\beta) = N_N \times U_N(\beta) = h(\beta) \times f[P_N(\beta)], \quad (4-40)$$

$$TU_H(\beta) = N_H \times U_H(\beta) = m(\beta) \times g[P_H(\beta)], \quad (4-41)$$

αντίστοιχα. Οι συναρτήσεις $TU_N(\beta)$ και $TU_H(\beta)$ είναι συνεχείς και διαφορίσιμες ως γινόμενο συνεχών και διαφορίσιμων συναρτήσεων.

Η συνάρτηση $TU_N(\beta)$ είναι αύξουσα αφού, χρησιμοποιώντας τις ιδιότητες των συναρτήσεων $h(\beta)$ και $f(P_N(\beta))$, ισχύει

$$\frac{\partial TU_N(\beta)}{\partial \beta} = \frac{\partial [h(\beta) \times f[P_N(\beta)]]}{\partial \beta} = \frac{\partial h(\beta)}{\partial \beta} f[P_N(\beta)] + h(\beta) \frac{\partial f[P_N(\beta)]}{\partial \beta} \geq 0. \quad (4-42)$$

Με ανάλογο τρόπο, βάσει των ιδιοτήτων των συναρτήσεων $m(\beta)$ και $g(P_H(\beta))$ μπορεί να αποδειχθεί ότι η συνάρτηση $TU_H(\beta)$ είναι φθίνουσα αφού

$$\frac{\partial TU_H(\beta)}{\partial \beta} \leq 0. \quad (4-43)$$

Για να προσδιοριστεί η διαφορά των επιπέδων δικαιοσύνης μεταξύ νέων και από διαπομπή κλήσεων ορίζεται η συνάρτηση

$$q(\beta) = TU_H(\beta) - TU_N(\beta), \quad (4-44)$$

η οποία είναι συνεχής και διαφορίσιμη. Από τις σχέσεις (4-42) και (4-43) προκύπτει ότι η συνάρτηση $q(\beta)$ είναι φθίνουσα. Επομένως, υπάρχει μία μοναδική τιμή της μεταβλητής β , $\beta^* \in [0,1]$, για την οποία ισχύει $q(\beta^*) = 0$. Όταν $\beta = \beta^*$, επιτυγχάνεται πλήρης δικαιοσύνη αφού, όπως προκύπτει από τη σχέση (4-44), το συνολικό όφελος των νέων κλήσεων εξισώνεται με εκείνο των κλήσεων από διαπομπή, δηλαδή $TU_H(\beta) = TU_N(\beta)$.

Από τις ιδιότητες των συναρτήσεων $TU_N(\beta)$ και $TU_H(\beta)$ για $\beta < \beta^*$ προκύπτει

$$TU_N(\beta) < TU_N(\beta^*), \quad (4-45)$$

$$TU_H(\beta) > TU_H(\beta^*). \quad (4-46)$$

Επομένως,

$$TU_N(\beta) < TU_H(\beta) \text{ για } \beta < \beta^* \quad (4-47)$$

δηλαδή το συνολικό όφελος των χρηστών νέων κλήσεων είναι μικρότερο από το αντίστοιχο των κλήσεων από διαπομπή. Ωστόσο, για $\beta > \beta^*$ προκύπτει

$$TU_N(\beta) > TU_N(\beta^*), \quad (4-48)$$

$$TU_H(\beta) < TU_H(\beta^*). \quad (4-49)$$

Επομένως,

$$TU_N(\beta) > TU_H(\beta) \text{ για } \beta > \beta^* \quad (4-50)$$

δηλαδή η σχέση μεταξύ των συνολικών οφελών χρηστών νέων και από διαπομπή κλήσεων έχει αντιστραφεί σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση όπου $\beta < \beta^*$. Από τις σχέσεις (4-46) και (4-49) αποδεικνύεται ότι το β^* είναι η μοναδική τιμή της πιθανοτικής παραμέτρου ώστε να ικανοποιείται πλήρως το κριτήριο της δικαιοσύνης.

4.5.4. Αριθμητικά Αποτελέσματα για το Δυναμικό Υπολογισμό της Πιθανοτικής Παραμέτρου

Στις προηγούμενες υποενότητες παρουσιάστηκε ο τρόπος προσδιορισμού της βέλτιστης τιμής της πιθανοτικής παραμέτρου. Ωστόσο, οι συναρτήσεις που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του οφέλους των χρηστών περιγράφηκαν σε γενική μορφή και αναφέρθηκαν μόνο οι ιδιότητές τους. Για να γίνει αντιληπτός ο δυναμικός τρόπος προσδιορισμού της βέλτιστης τιμής της πιθανοτικής παραμέτρου και ποσοτικοποίησης του οφέλους των χρηστών παρουσιάζεται στη συνέχεια ένα αντιπροσωπευτικό αριθμητικό παράδειγμα, όπου ορίζονται πλήρως όλες οι συναρτήσεις και οι παράμετροι που υπεισέρχονται στην ανάλυση.

Η συνάρτηση οφέλους των χρηστών με βάση αναλύσεις των χαρακτηριστικών και της επίδοσης των δικτύων σε καταστάσεις κανονικής λειτουργίας καθώς και μέσω διερεύνησης του τρόπου συμπεριφοράς των χρηστών (90). Στο αριθμητικό παράδειγμα που ακολουθεί, το όφελος των χρηστών νέων και από διαπομπή κλήσεων προσδιορίζεται μέσω της εκθετικής συνάρτησης. Αυτή χρησιμοποιείται συχνά στη διεθνή βιβλιογραφία λόγω της εύκολης ενσωμάτωσής της στην ανάλυση και των ρεαλιστικών τιμών που επιστρέφει σε συνθήκες αβεβαιότητας (90; 89). Συνεπώς,

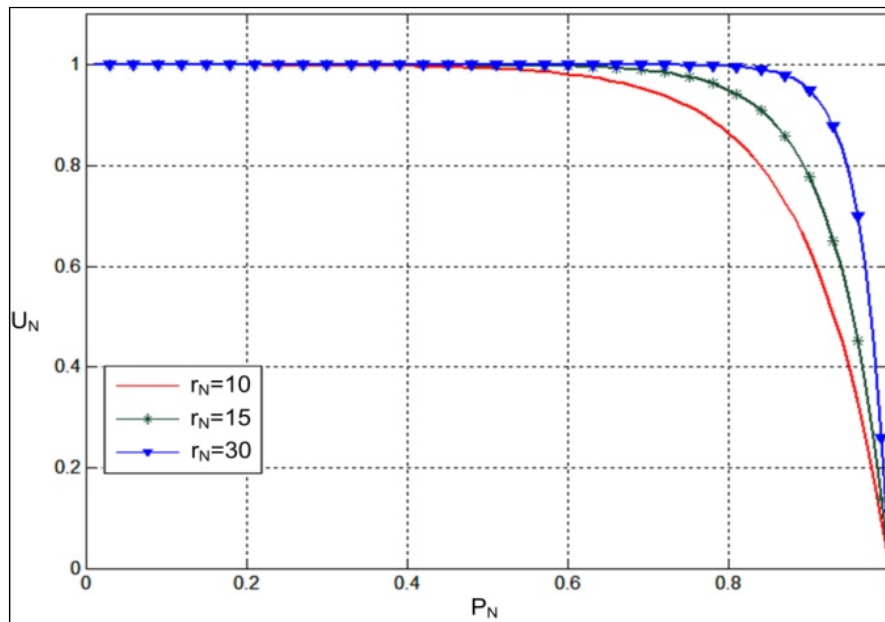
$$U_N(\beta) = 1 - e^{r_N(P_N(\beta) - P_N^{\max})}, \quad (4-51)$$

$$U_H(\beta) = 1 - e^{r_H(P_H(\beta) - P_H^{\max})}, \quad (4-52)$$

όπου οι παράμετροι r_N και r_H είναι οι σταθεροί συντελεστές αποστροφής κινδύνου των χρηστών νέων κλήσεων και κλήσεων από διαπομπή, αντίστοιχα. Οι συντελεστές αυτοί αντανακλούν τη συμπεριφορά των χρηστών σε συνθήκες αβεβαιότητας.

Ο συντελεστής αβεβαιότητας χρησιμοποιείται συνήθως σε οικονομικές αναλύσεις για τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς και της στάσης καταναλωτών και επενδυτών σε καταστάσεις που ενέχουν ένα δεδομένο βαθμό αβεβαιότητας. Στις συναρτήσεις $U_N(\beta)$ και $U_H(\beta)$ που ορίστηκαν από τις σχέσεις (4-51) και (4-52), αντίστοιχα, οι συντελεστές r_N και r_H δηλώνουν την απροθυμία των χρηστών να δεχθούν υψηλότερο αλλά μη εγγυημένο επίπεδο ποιότητας υπηρεσιών σε σχέση με χαμηλότερο αλλά εγγυημένο επίπεδο ποιότητας υπηρεσιών. Ο συντελεστής αβεβαιότητας λαμβάνει χαμηλότερες τιμές όταν οι χρήστες είναι διατεθειμένοι να αντιμετωπίσουν μεγαλύτερο κίνδυνο. Υπενθυμίζεται ότι στους αλγόριθμους αποδοχής κλήσεων το επίπεδο ποιότητας υπηρεσιών ορίζεται μέσω της πιθανότητας μη αποδοχής κλήσεων. Επομένως, χαμηλότερη τιμή του συντελεστή αβεβαιότητας δηλώνει ότι οι χρήστες επιθυμούν χαμηλότερη πιθανότητα μη αποδοχής αλλά με μεγαλύτερο βαθμό αβεβαιότητας ως προς την επίτευξή της. Στο Σχήμα 4-4 έχει παρουσιαστεί η συνάρτηση οφέλους των χρηστών νέων κλήσεων για διάφορες τιμές του συντελεστή αβεβαιότητας. Είναι φανερό ότι χαμηλότερες τιμές του συντελεστή αβεβαιότητας καθιστούν ομαλότερη τη μετάβαση από την πλήρη ικανοποίηση ($U_N = 1$) του χρήστη στην πλήρη δυσαρέσκεια ($U_N = 0$). Το αντίστοιχο διάγραμμα της συνάρτησης οφέλους των χρηστών κλήσεων από διαπομπή είναι παρόμοιο με το διάγραμμα του Σχήματος 4-4.

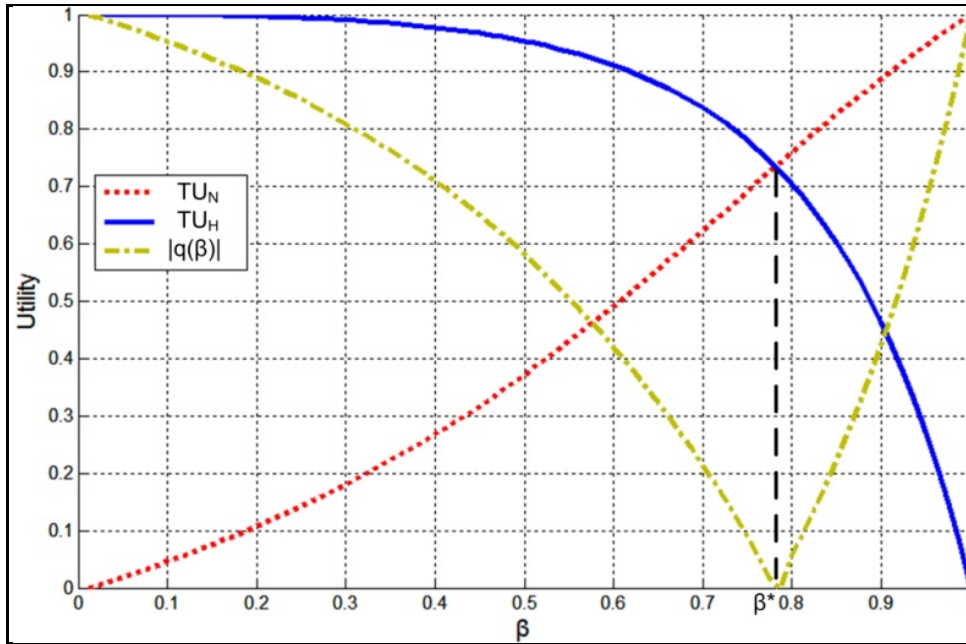
Οι μέγιστες τιμές που λαμβάνουν οι πιθανότητες μη αποδοχής νέων και από διαπομπή κλήσεων αντιστοιχούν στο ελάχιστο αποδεκτό επίπεδο ποιότητας υπηρεσιών για κάθε είδος κλήσης, το οποίο αποτελεί το κατώφλιο αποδοχής του εκ μέρους των χρηστών. Όταν οι χρήστες έχουν αυστηρές προδιαγραφές για το επιθυμητό επίπεδο ποιότητας υπηρεσιών, οι τιμές των παραμέτρων P_N^{\max} και P_H^{\max} είναι σχετικά χαμηλές. Αντιθέτως, όταν οι χρήστες παρουσιάζουν ανοχή σε χαμηλότερα επίπεδα ποιότητας υπηρεσιών, οι τιμές των μέγιστων αποδεκτών τιμών της πιθανότητας μη αποδοχής χρηστών είναι υψηλότερες.



Σχήμα 4-4: Όφελος των χρηστών νέων κλήσεων ως συνάρτηση της πιθανότητας μη αποδοχής νέων κλήσεων για μεταβλητές τιμές του συντελεστή αβεβαιότητας.

Για την αξιολόγηση της επίδοσης του δυναμικού πιθανοτικού αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων και της μεθόδου υπολογισμού της πιθανοτικής παραμέτρου, μέσω της οποίας ο αλγόριθμος προσαρμόζεται στις μεταβολές της κίνησης του δικτύου, παρουσιάζεται στη συνέχεια ένα αντιπροσωπευτικό αριθμητικό παράδειγμα. Σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάζονται το πλήθος των καναλιών και το κατώφλιο αποδοχής νέων κλήσεων είναι $C=30$ και $T=25$, αντίστοιχα. Οι τιμές των υπολοίπων παραμέτρων μεταβάλλονται ανάλογα με την περίπτωση που εξετάζεται με στόχο την ανάδειξη των χαρακτηριστικών και της επίδοσης του πιθανοτικού αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων (89).

Αρχικά εξετάζονται οι συναρτήσεις συνολικού οφέλους των χρηστών για νέες και από διαπομπή κλήσεις, όπως ορίζονται στις σχέσεις (4-40) και (4-41), αντίστοιχα. Οι δύο συναρτήσεις, $TU_N(\beta)$ και $TU_H(\beta)$, σχεδιάζονται στο Σχήμα (4-5) ως συνάρτηση του β . Οι τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν είναι: $\lambda = 1/30$, $\mu = 1/750$, $a = 0.2$, $r_N = 30$ και $r_H = 30$. Επιπλέον, στο ίδιο διάγραμμα εξετάζεται η ύπαρξη της βέλτιστης τιμής της πιθανοτικής παραμέτρου β^* . Η μείωση της τιμής της πιθανοτικής παραμέτρου έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του πλήθους των νέων κλήσεων που γίνονται αποδεκτές και την αυξημένη διαθεσιμότητα πόρων της κυψέλης προς εξυπηρέτηση κλήσεων από διαπομπή. Επομένως, η μείωση του β επιφέρει μείωση του οφέλους των

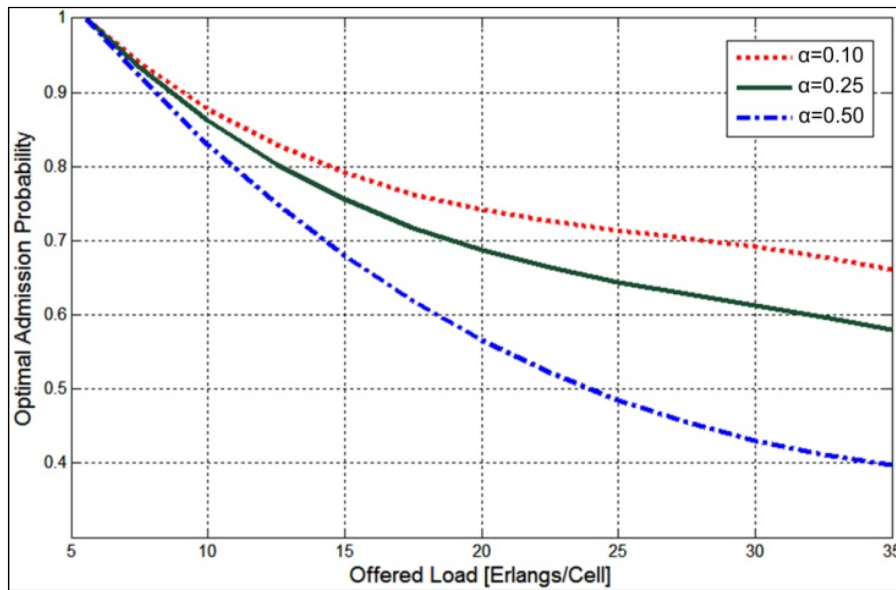


Σχήμα 4-5: Συνολικό όφελος των χρηστών νέων και από διαπομπή κλήσεων ως συνάρτηση της πιθανοτικής παραμέτρου β .

χρηστών νέων κλήσεων και την αύξηση του οφέλους των χρηστών κλήσεων από διαπομπή. Αυτό γίνεται φανερό από το Σχήμα (4-5). Αντιθέτως, αύξηση του β έχει ως αποτέλεσμα την αντίστροφη μεταβολή των συναρτήσεων $TU_N(\beta)$ και $TU_H(\beta)$, δηλαδή την αύξηση της $TU_N(\beta)$ και τη μείωση της $TU_H(\beta)$. Αυτό οφείλεται στο ότι η αύξηση της τιμής του β επιτρέπει την αύξηση του πλήθους νέων κλήσεων που γίνονται αποδεκτές, συνεπώς περιορίζονται οι πόροι της κυψέλης που διατίθενται στις κλήσεις από διαπομπή.

Από τη σχεδίαση των συναρτήσεων $TU_N(\beta)$ και $TU_H(\beta)$ στο Σχήμα (4-5) προκύπτει ότι υπάρχει μια τιμή της πιθανοτικής παραμέτρου, β^* , για την οποία τα συνολικά οφέλη των χρηστών νέων και από διαπομπή κλήσεων εξισώνονται, δηλαδή $TU_N(\beta^*) = TU_H(\beta^*)$. Στην περίπτωση αυτή επιτυγχάνεται πλήρης δικαιοσύνη ως προς το επίπεδο ποιότητας υπηρεσιών που το δίκτυο παρέχει προς τους χρήστες των δύο αυτών κατηγοριών κλήσεων. Η τιμή β^* αποτελεί τη βέλτιστη τιμή της πιθανοτικής παραμέτρου για τη συγκεκριμένη κατάσταση του δικτύου και προκύπτει από την ελαχιστοποίηση της συνάρτησης $|q(\beta)|$.

Στο Σχήμα 4-6 σχεδιάζεται η βέλτιστη τιμή της πιθανότητας β^* ως συνάρτηση του

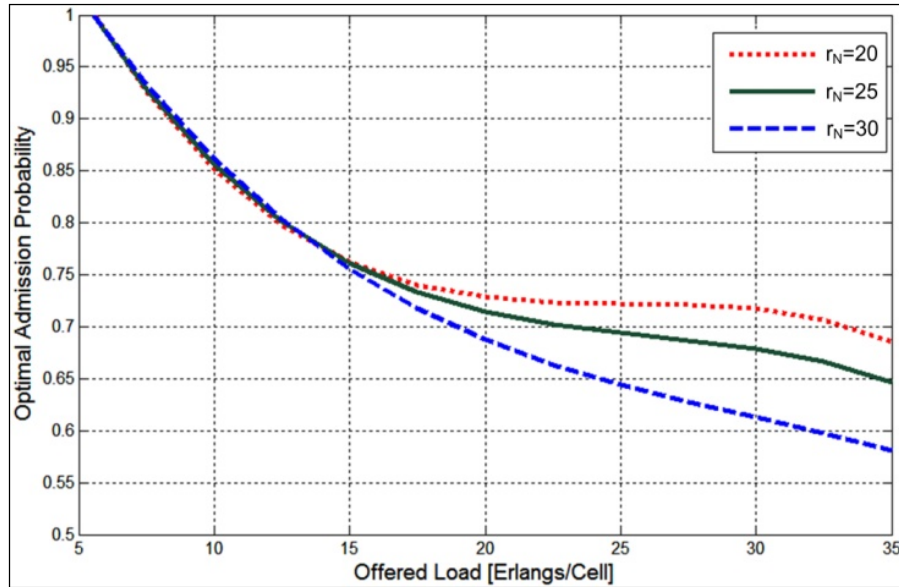


Σχήμα 4-6: Βέλτιστη τιμή της πιθανοτικής παραμέτρου β^* ως συνάρτηση του φορτίου εισόδου για διαφορετικά ποσοστά κλήσεων από διαπομπή.

φορτίου εισόδου. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για διάφορες τιμές της παραμέτρου a η οποία ποσοτικοποιεί την κινητικότητα των χρηστών· η παράμετρος a αυξάνει όταν αυξάνεται η κινητικότητα των χρηστών. Ο υπολογισμός της βέλτιστης τιμής β^* επιτυγχάνεται με χρήση της μεθόδου της πλέον απότομης πτώσεως (steepest descent method) για την ελαχιστοποίηση της συνάρτησης $|q(\beta)|$ (91). Οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται είναι: $\lambda = 1/30$, $r_N = 30$, $r_H = 30$, ενώ η παράμετρος μ μεταβάλλεται στο εύρος $1/150$ έως $1/1050$. Η παράμετρος a λαμβάνει τις τρεις τιμές 0.10, 0.25 και 0.50.

Από το Σχήμα 4-6 φαίνεται ότι η αύξηση του πλήθους των κλήσεων από διαπομπή, που οφείλεται στην αύξηση του a , έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της βέλτιστης τιμής β^* . Αυτό αποδίδεται στο ότι η κυψέλη πρέπει να παρέχει ικανοποιητικό επίπεδο παροχής υπηρεσιών σε αυξημένο πλήθος κλήσεων από διαπομπή, με αποτέλεσμα η αποδοχή νέων κλήσεων να πρέπει να περιοριστεί. Επομένως, υψηλοί βαθμοί κινητικότητας χρηστών αντιστοιχούν σε αυστηρότερες συνθήκες αποδοχής νέων κλήσεων.

Ανάλογα συμπεράσματα προκύπτουν από την παρατήρηση του Σχήματος 4-7 όπου παρουσιάζεται η εξάρτηση της βέλτιστης τιμής της πιθανοτικής παραμέτρου από το συντελεστή αποστροφής κινδύνου των χρηστών νέων κλήσεων r_N υπό μεταβλητό φορτίο



Σχήμα 4-7: Βέλτιστη τιμή της πιθανοτικής παραμέτρου β^* ως συνάρτηση του φορτίου εισόδου για διαφορετικά επίπεδα αποστροφής κινδύνου.

εισόδου. Οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται είναι $\lambda = 1/30$ και $r_H = 30$, ενώ η τιμή της παραμέτρου μ μεταβάλλεται στο εύρος $1/150$ έως $1/1050$. Επιπλέον, τρία επίπεδα αποστροφής κινδύνου υιοθετούνται για την προσέγγιση διαφορετικών τρόπων συμπεριφοράς των χρηστών νέων κλήσεων και ποσοτικοποιούνται μέσω της επιλογής $r_N = 20, 25$ και 30 . Όπως φαίνεται από το Σχήμα 4-7 η βέλτιστη τιμή β^* μειώνεται καθώς το φορτίο εισόδου αυξάνει. Επιπλέον, για χαμηλές τιμές του φορτίου εισόδου η διαφοροποίηση του επιπέδου αποστροφής κινδύνου δεν επηρεάζει τη βέλτιστη τιμή β^* , αφού οι πόροι της κυψέλης επαρκούν για την εξυπηρέτηση του συνόλου σχεδόν των εισερχόμενων κλήσεων. Ωστόσο, για μεσαίες και υψηλές τιμές του φορτίου εισόδου η αύξηση του επιπέδου αποστροφής κινδύνου αντιστοιχεί σε μειωμένες τιμές του β^* . Αυτό οφείλεται στο ότι οι χρήστες νέων κλήσεων είναι πρόθυμοι να αποδεχτούν χαμηλότερες τιμές της πιθανότητας β σε αντάλλαγμα για τη δίκαιη αντιμετώπισή τους από το δίκτυο. Συνεπώς, η αποδοχή νέων κλήσεων καθίσταται δυσκολότερη.

Όπως προκύπτει από την ανάλυση και τα αριθμητικά αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν, ο δυναμικός τρόπος υπολογισμού της πιθανοτικής παραμέτρου επιτρέπει την προσαρμογή του πιθανοτικού αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων στις μεταβολές της εισερχόμενης κίνησης με στόχο την ικανοποίηση του κριτηρίου της δικαιοσύνης. Η

ανάλυση που παρουσιάστηκε μπορεί να γενικευτεί για περισσότερες κατηγορίες εισερχόμενων κλήσεων. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να προκύψει ένα σύστημα εξισώσεων από την επίλυση του οποίου προκύπτει η βέλτιστη τιμή της πιθανοτικής παραμέτρου για κάθε τύπο εισερχόμενων κλήσεων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Κατανεμημένος Πιθανοτικός Αλγόριθμος Ελέγχου Αποδοχής Κλήσεων και Δυναμική Κατανομή Πόρων

5.1. Εισαγωγή

Ένα σημαντικό κριτήριο κατηγοριοποίησης των αλγόριθμων αποδοχής κλήσεων προκύπτει με βάση το που/πως λαμβάνεται η απόφαση αποδοχής του χρήστη. Με τον τρόπο αυτό, οι αλγόριθμοι διακρίνονται σε συγκεντρωτικούς (centralized) ή κατανεμημένους (distributed), αντίστοιχα προς το αν η απόφαση αποδοχής λαμβάνεται από το σταθμό βάσης ή από το κινητό τερματικό. Αυτό που έχει μεγάλη αξία και στις δύο περιπτώσεις είναι η πληροφορία για την κατάσταση του δικτύου τη στιγμή λήψης της απόφασης (92; 93).

Στους συγκεντρωτικούς αλγόριθμους η κατάσταση κάθε κυψέλης του δικτύου είναι γνωστή αφού υπάρχει διαρκής επικοινωνία μεταξύ χρηστών και σταθμών βάσης. Ωστόσο, στην περίπτωση όπου ο αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων που χρησιμοποιείται βασίζει τη λήψη της απόφασης στην κατάσταση του ασύρματου διαύλου επικοινωνίας μεταξύ του σταθμού βάσης και του κινητού τερματικού, απαιτείται ανταλλαγή πληροφορίας σε

πραγματικό χρόνο μεταξύ όλων των κινητών τερματικών που έχουν σε εξέλιξη μια κλήση και του σταθμού βάσης (94; 95). Στην περίπτωση όπου δεν παραβιάζονται οι προϋποθέσεις παροχής εγγυημένης ποιότητας υπηρεσιών, η νέα κλήση γίνεται αποδεκτή, διαφορετικά απορρίπτεται. Αντιθέτως, στους αλγόριθμους που βασίζονται στους πόρους του δικτύου και όχι στην κατάσταση του ασύρματου διαύλου, η πληροφορία για τους διαθέσιμους πόρους της κυψέλης είναι γνωστή, συνεπώς δεν απαιτείται επιπλέον ανταλλαγή πληροφορίας για τη λήψη της απόφασης αποδοχής ή απόρριψης μιας εισερχόμενης κλήσης (43).

Στην περίπτωση των κατανεμημένων αλγόριθμων απαιτείται η ανταλλαγή πληροφορίας μεταξύ του εισερχόμενου χρήστη και των εκάστοτε ενεργών χρηστών της κυψέλης. Ο εισερχόμενος χρήστης αποφασίζει αν θα εισέλθει στην κυψέλη αποδεχόμενος τους όρους που θέτει ο αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων. Ωστόσο, η ανταλλαγή πληροφορίας μεταξύ των χρηστών επιβαρύνει τη λειτουργία του δικτύου και αυξάνει το χρονικό διάστημα που απαιτείται για τη λήψη απόφασης, ιδιαίτερα στις περιπτώσεις όπου το πλήθος των χρηστών είναι μεγάλο, π.χ. καταστάσεις έκτακτης ανάγκης. Εντούτοις, υπάρχουν εξελιγμένοι κατανεμημένοι αλγόριθμοι αποδοχής κλήσεων οι οποίοι υποστηρίζουν τη μετάδοση εξαιρετικά χαμηλού όγκου πληροφορίας, καθώς το μεγαλύτερο μέρος της επεξεργασίας αυτής πραγματοποιείται στο σταθμό βάσης. Στη συνέχεια, το αποτέλεσμα της επεξεργασίας των δεδομένων μεταβιβάζεται στον εισερχόμενο χρήστη, ο οποίος βάσει των κριτηρίων αποδοχής λαμβάνει την απόφαση για την είσοδό του στο δίκτυο. Με τον τρόπο αυτό ένας κατανεμημένος αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων μπορεί να υποστηρίξει μεγάλο πλήθος εισερχόμενων χρηστών, χωρίς να αυξάνει το κόστος λόγω αυτής ακριβώς της ανταλλαγής πληροφορίας. Το κόστος αποτιμάται είτε ως χρονική καθυστέρηση για τη λήψη της απόφασης είτε ως επιβάρυνση του δικτύου που προκαλείται λόγω μετάδοσης της πρόσθετης πληροφορίας.

Στους κατανεμημένους αλγόριθμους αποδοχής κλήσεων η απόφαση για την αποδοχή ενός χρήστη λαμβάνεται από το κινητό τερματικό. Οι προϋποθέσεις για να γίνει αποδεκτός ο χρήστης από ένα δίκτυο είναι: α) να συμφωνήσουν όλοι οι ενεργοί χρήστες της κυψέλης, β) να παρέχεται η ελάχιστη αποδεκτή ποιότητας υπηρεσιών στους χρήστες του δικτύου και γ) να αποδεχθεί ο εισερχόμενος χρήστης το επίπεδο ποιότητας υπηρεσιών που του προσφέρει το δίκτυο (28; 92). Στην περίπτωση όπου κάποια από τις προηγούμενες προϋποθέσεις δεν ικανοποιείται, με βάση τον αλγόριθμο αποδοχής κλήσεων που χρησιμοποιείται είτε ο εισερχόμενος χρήστης απορρίπτεται είτε ακολουθεί νέος κύκλος διαπραγματεύσεων. Ο νέος κύκλος διαπραγματεύσεων αποσκοπεί στη μείωση της

παρεχόμενης ποιότητας υπηρεσιών στους ενεργούς χρήστες σε ένα χαμηλότερο το οποίο, όμως, είναι αποδεκτό.

Η τεχνική επαναδιαπραγμάτευσης της παρεχόμενης ποιότητας υπηρεσιών (QoS renegotiation technique) βασίζεται στην ελαστικότητα των απαιτήσεων όσον αφορά τις υπηρεσίες που παρέχει ένα δίκτυο (96). Ένα από τα πλέον διαδεδομένα κριτήρια επαναδιαπραγμάτευσης περιλαμβάνει την εξοικονόμηση πόρων μέσω της μείωσης του ρυθμού μετάδοσης των ενεργών χρηστών. Αυτό είναι εφικτό καθώς οι υπηρεσίες που υποστηρίζουν τα συστήματα κινητών επικοινωνιών είναι υπηρεσίες προσαρμοστικού ρυθμού (rate adaptive services), δηλαδή ο ρυθμός μετάδοσής τους μπορεί να κυμαίνεται εντός ενός εύρους (97; 98; 99). Χαρακτηριστικό παράδειγμα υπηρεσιών αυτού του τύπου είναι η περιήγηση του παγκόσμιου ιστού (Internet browsing), η μεταφορά δεδομένων, η υπηρεσία ηλεκτρονικής αλληλογραφίας (e-mail service) κ.α. Η μείωση του ρυθμού μετάδοσης των οποίων υφίστανται οι ενεργοί χρήστες λόγω επαναδιαπραγμάτευσης μπορεί να είναι μόνιμη ή προσωρινή. Στη δεύτερη περίπτωση, ο μηχανισμός αποκατάστασης της παρεχόμενης ποιότητας υπηρεσιών (QoS restoration mechanism) ενεργοποιείται όταν απελευθερωθούν πόροι του δικτύου ικανοί να επιτρέψουν την υποστήριξη υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης (28).

Στη συνέχεια του κεφαλαίου, προτείνεται ένας κατανεμημένος αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων βασισμένος στον πιθανοτικό αλγόριθμο αποδοχής κλήσεων. Αρχικά αναλύεται ένα παίγνιο που περιγράφει το διαμερισμό μιας «πίτας» μεταξύ των παικτών, όπου η πίτα στην περίπτωση των δικτύων αντιστοιχεί στη χωρητικότητα της κυψέλης και οι παίκτες στους χρήστες. Η ανάλυση του παιγνίου ολοκληρώνεται με την εξαγωγή αναλυτικών σχέσεων για τον υπολογισμό των μεριδίων της πίτας, δηλαδή του πλήθους των μονάδων χωρητικότητας, που λαμβάνει κάθε χρήστης. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται ο τρόπος υπολογισμού των πιθανοτικών παραμέτρων του προτεινόμενου αλγόριθμου βάσει των μεριδίων των πόρων που αντιστοιχούν στους χρήστες. Ακολουθεί η περιγραφή του δυναμικού κατανεμημένου αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων που ενσωματώνει το παίγνιο εκχώρησης πόρων και τη δυναμική μεταβολή των κριτηρίων αποδοχής κλήσεων. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την παρουσίαση αριθμητικών αποτελεσμάτων τα οποία διακρίνονται στα αποτελέσματα που αφορούν το παίγνιο εκχώρησης πόρων και σε εκείνα που σχετίζονται με την επίδοση του προτεινόμενου αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων.

5.2. Θεωρία Παιγνίων και Μοντέλα Διαπραγματεύσεων

Η θεωρία παιγνίων (game theory) αποτελεί τμήμα της επιστήμης των εφαρμοσμένων μαθηματικών. Ως παίγνιο ορίζεται μια ανταγωνιστική διαδικασία μεταξύ διαφορετικών παικτών οι οποίοι έχουν διαφορετικό στόχο, ανταγωνίζονται μεταξύ τους βάσει ενός συνόλου κανόνων κατά τέτοιο τρόπο ώστε οι ενέργειες κάθε παίκτη έχουν επίδραση στους υπόλοιπους (100). Η θεωρία παιγνίων αποσκοπεί στη μελέτη, κατανόηση, ανάλυση και μαθηματική διατύπωση των παιγνίων παρέχοντας το κατάλληλο υπόβαθρο για την εύρεση της λύσης τους. Αν και το αρχικό πεδίο εφαρμογής της περιοριζόταν σε σύνθετα επιχειρηματικά και επενδυτικά προβλήματα καθώς και σε πολεμικές στρατηγικές, πλέον, η θεωρία παιγνίων έχει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών σε διάφορους τομείς, όπως η βιολογία, η επιδημιολογία, οι πολιτικές επιστήμες κ.α., όπου απαιτείται η λήψη απόφασης μεταξύ διαφορετικών στρατηγικών. Η μεγάλη αξία της έγκειται στο ότι επιτρέπει:

1. τη δομημένη ανάλυση σύνθετων προβλημάτων όπου συμμετέχουν πολλοί παίκτες,
2. την κατανόηση των μεταξύ τους αλληλεπιδράσεων,
3. την πρόβλεψη των πιθανών ενεργειών των παικτών ως απάντηση σε ενέργεια κάποιου παίκτη και
4. την εκτίμηση του τελικού αποτελέσματος, όταν αυτό εξαρτάται από τις ενέργειες άλλων παικτών οι οποίοι ανταγωνίζονται μεταξύ τους.

Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχει μεγάλο πλήθος αναλύσεων για παίγνια που αντιστοιχούν σε διάφορα προβλήματα και πιθανές στρατηγικές που μπορούν να ακολουθηθούν από τους παίκτες. Στη συνέχεια, μελετώνται παίγνια που σχετίζονται με το διαμερισμό μιας ορισμένης οντότητας (πίτας) μοναδιαίου μεγέθους μεταξύ διαφορετικών χρηστών. Κοινό χαρακτηριστικό αυτών των παιγνίων αποτελεί η διαπραγμάτευση μεταξύ των παικτών για το τμήμα της πίτας που θα λάβει κάθε παίκτης. Σε κάθε κύκλο του παιγνίου ένας παίκτης υποβάλλει μια πρόταση η οποία είτε γίνεται αποδεκτή από τους υπόλοιπους και το παίγνιο τερματίζεται καθώς υπάρχει συμφωνία, είτε απορρίπτεται από ένα τουλάχιστον από τους υπόλοιπους παίκτες, οπότε το παίγνιο συνεχίζεται και ακολουθεί νέος κύκλος όπου ο επόμενος παίκτης υποβάλλει πρόταση.

Η κατηγορία των παιγνίων όπου περιλαμβάνεται ο διαμερισμός μιας πίτας μοναδιαίου μεγέθους επιλύονται με τη βοήθεια του μοντέλου διαπραγμάτευσης Rubinstein-Ståhl (Rubinstein-Ståhl model of strategic bargaining) (101; 100). Το μοντέλο αυτό περιορίζεται στη μελέτη δύο παικτών και έχει αποδειχθεί ότι στην περίπτωση της διαπραγμάτευσης

απεριόριστου χρόνου (infinite-horizon bargaining) με πλήρη γνώση (complete knowledge) των επιλογών των αντιπάλων υπάρχει μοναδικό σημείο ισορροπίας (equilibrium) (102). Πολλές εργασίες προσπάθησαν να επεκτείνουν το μοντέλο αυτό προς διάφορες κατευθύνσεις (103). Η πρώτη μελέτη που παρουσιάστηκε για την επέκταση του μοντέλου σε πολλαπλούς παίκτες παρουσιάστηκε από τους Dutta και Gerves το 1984 (104). Ωστόσο, το μοντέλο αυτό περιορίζεται στη χρήση του ίδιου παράγοντα υποβάθμισης (discount factor) για κάθε παίκτη, γεγονός που περιορίζει την χρησιμότητά του. Σε άλλα μοντέλα που έχουν παρουσιαστεί, οι παίκτες έχουν μερική γνώση (incomplete knowledge) των επιλογών των υπολοίπων παικτών με αποτέλεσμα να υπάρχουν πολλαπλά σημεία ισορροπίας. Τα χαρακτηριστικά και οι ιδιαιτερότητες των μοντέλων για πολλαπλούς παίκτες έχουν παρουσιαστεί αναλυτικά από τους Shutton και Cai (105; 106).

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το μοντέλο διαπραγματεύσεων των Rubinstein-Stähl και η αντίστοιχη ανάλυση για τον προσδιορισμό του σημείου ισορροπίας. Επιπλέον, προτείνεται ένας συστηματικός τρόπος για την επέκταση του μοντέλου σε πολλαπλούς παίκτες με διαφορετικό παράγοντα υποβάθμισης για καθένα από αυτούς. Στην ανάλυση που παρουσιάζεται προτείνεται η αντιστοιχία του μοντέλου διαπραγμάτευσης με μια μη αναγόμενη, στάσιμη αλυσίδα Markov (irreducible stationary Markov chain). Η ανάλυση επικεντρώνεται στον υπολογισμό των στάσιμων σημείων ισορροπίας Markov (stationary Markov equilibria) όταν οι στρατηγικές των παικτών είναι ανεξάρτητες των προηγούμενων επιλογών τους. Η βασική αρχή του παίγνιου που παρουσιάζεται περιλαμβάνει την υποβολή μιας προσφοράς από κάποιο παίκτη, η οποία είναι συνάρτηση του χρόνου. Οι υπόλοιποι παίκτες είτε την αποδέχονται, οπότε το παίγνιο τερματίζεται, είτε την απορρίπτουν και το παίγνιο συνεχίζεται με τον επόμενο κύκλο. Η αποδοχή μιας προσφοράς από κάποιο παίκτη γίνεται μόνο εφόσον αυτή είναι μεγαλύτερη από την απαίτησή του. Στην ανάλυση που παρουσιάζεται αποδεικνύεται η ύπαρξη ενός μοναδικού σημείου ισορροπίας το οποίο και προσδιορίζεται.

Συγκεκριμένα, στο μοντέλο διαπραγμάτευσης που προτείνεται στη συνέχεια ορίζεται ένας διαφορετικός συντελεστής διαπραγμάτευσης (bargaining operator) για κάθε παίκτη. Βάσει των ανεξάρτητων συντελεστών διαπραγμάτευσης δημιουργείται μια αλυσίδα Markov, κάθε κατάσταση της οποίας χαρακτηρίζεται από το μερίδιο που αναλογεί σε κάθε παίκτη. Η μετάβαση από μια κατάσταση σε μια άλλη πραγματοποιείται βάσει του προφίλ δράσεων των παικτών. Το αναλλοίωτο μέτρο (invariant measure) της αλυσίδας, δηλαδή τα σταθερά μερίδια που δε μεταβάλλονται από την εξέλιξη του συστήματος, αντιστοιχούν στο σημείο ισορροπίας του μοντέλου διαπραγματεύσεων το οποίο ονομάζεται σημείο

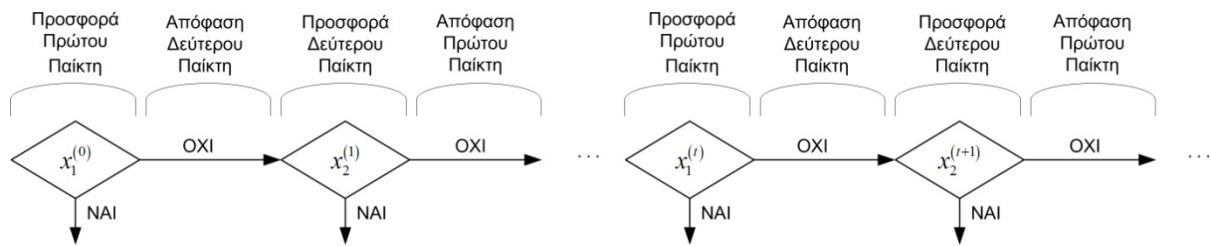
ισοροπίας Markov (Markov equilibrium). Μέσω της διασύνδεσης που επιτυγχάνεται επιτρέπεται η διατήρηση της λογικής συνέχειας στην ανάλυση προς την εξαγωγή του τελικού αποτελέσματος με την ταυτόχρονη δυνατότητα του μοντέλου να υποστηρίξει πολλαπλούς παίκτες.

5.2.1. Διμερής Διαπραγμάτευση

5.2.1.1. Περιγραφή του Παιγνίου Rubinstein-Ståhl

Το μοντέλο διαπραγμάτευσης Rubinstein-Ståhl περιλαμβάνει δύο παίκτες οι οποίοι πρέπει να συμφωνήσουν για τον τρόπο που θα μοιράσουν μια πίτα μοναδιαίου μεγέθους (100). Στους άρτιους κύκλους της διαπραγμάτευσης, $t=2k$, $k \in \mathbb{N}$, μεταξύ των χρηστών ο πρώτος παίκτης προτείνει στο δεύτερο ένα τρόπο διαμερισμού $(x, 1-x)$ της πίτας. Εφόσον ο δεύτερος παίκτης αποδεχθεί την πρόταση του πρώτου, το παίγνιο τερματίζεται. Σε διαφορετική περίπτωση, δηλαδή αν για $t=2k$ ο δεύτερος παίκτης απορρίψει την πρόταση του πρώτου, το παίγνιο συνεχίζει με τον επόμενο κύκλο, $t=2k+1$, όπου ο δεύτερος παίκτης αντιπροτείνει ένα διαφορετικό τρόπο κατανομής της πίτας, $(x', 1-x')$. Εφόσον ο πρώτος παίκτης αποδεχθεί την προσφορά του δεύτερου, το παίγνιο τερματίζεται, διαφορετικά, υποβάλλεται εκ νέου προσφορά από τον πρώτο παίκτη στον επόμενο κύκλο. Η διαδικασία υποβολής προσφορών συνεχίζεται μέχρι να υπάρξει συμφωνία. Ωστόσο, σε κάθε γύρο το κέρδος του κάθε παίκτη μειώνεται ανάλογα με το συντελεστή διαπραγμάτευσης δ_i , $\delta_i \in (0,1)$, κάθε παίκτη $i = \{1,2\}$. Επομένως, αν η συμφωνία επιτευχθεί μετά από t κύκλους διαπραγμάτευσης για την κατανομή $(x, 1-x)$, τότε το πραγματικό κέρδος κάθε παίκτη είναι $(\delta_1^t x, \delta_2^t (1-x))$, καθώς μειώνεται σύμφωνα με τον αντίστοιχο συντελεστή διαπραγμάτευσης και το χρονικό διάστημα που μεσολάβησε μέχρι τη λήψη της απόφασης μετρούμενο σε πλήθος κύκλων διαπραγμάτευσης (101).

Η διαδικασία αυτή αποτελεί ένα παίγνιο μη πεπερασμένου χρόνου (infinite-horizon game) πλήρους γνώσης (107; 100). Πρέπει να σημειωθεί ότι κάθε κύκλος του παιγνίου αποτελείται από δύο φάσεις. Στην πρώτη φάση ένας παίκτης έχει ευθύνη να αποφασίσει την αποδοχή ή όχι της προσφοράς του άλλου, ενώ στη δεύτερη φάση οι ρόλοι εναλλάσσονται.



Σχήμα 5-1: Τρόπος λειτουργίας του παιγνίου διαπραγμάτευσης.

5.2.1.2. Τέλεια Ισορροπία Υποπαιγνίου (Subgame-Perfect Equilibrium)

Ορισμός 5.1

Ένα προφίλ στρατηγικών αποτελεί σημείο τέλειας ισορροπίας υποπαιγνίου όταν είναι σημείο ισορροπίας Nash για κάθε υποπαίγνιο του αρχικού παιγνίου. Αυτό σημαίνει ότι αν: α) οι παίκτες του παιγνίου παίζουν ένα περιορισμένο παίγνιο που αποτελεί μέρος του αρχικού παιγνίου και β) το σύνολο ενεργειών τους αποτελεί σημείο ισορροπίας Nash του υποπαιγνίου, το σύνολο ενεργειών των παικτών αποτελεί σημείο τέλειας ισορροπίας υποπαιγνίου για το αρχικό παίγνιο (108).

Σε παίγνια όπως το προηγούμενο υπάρχουν πολλά σημεία ισορροπίας Nash (Nash equilibria) (108; 100). Για παράδειγμα, σημείο ισορροπίας Nash αποτελεί ένα προφίλ στρατηγικών όπου ο πρώτος παίκτης απαιτεί πάντα ολόκληρη την πίτα, $x = 1$, αρνούμενος κάθε μικρότερο τμήμα αυτής, ενώ ο δεύτερος παίκτης προσφέρει πάντα ολόκληρη την πίτα και συμβιβάζεται με οποιαδήποτε προσφορά. Ωστόσο, αν ο δεύτερος παίκτης απορρίπτει την προσφορά του πρώτου και στον επόμενο κύκλο προσφέρει ένα μερίδιο $x \geq \delta_1$, ο πρώτος παίκτης πρέπει να το αποδεχθεί καθώς, αν αρνηθεί, στον επόμενο κύκλο το πολύ να λάβει ολόκληρη την πίτα, η οποία, όμως, θα έχει πλέον αξία δ_1 . Αυτό το προφίλ στρατηγικών δεν αποτελεί τέλειο σημείο ισορροπίας υποπαιγνίου.

Ένα σημείο τέλειας ισορροπίας υποπαιγνίου για το παίγνιο αυτό έχει ως ακολούθως. Ο πρώτος παίκτης απαιτεί πάντα ένα ποσοστό $(1 - \delta_2) / (1 - \delta_1 \delta_2)$ της πίτας όταν είναι η σειρά του να υποβάλει προσφορά. Επομένως, αποδέχεται οποιαδήποτε προσφορά από το δεύτερο παίκτη ίση ή μεγαλύτερη από $\delta_1 (1 - \delta_2) / (1 - \delta_1 \delta_2)$ και απορρίπτει κάθε χαμηλότερη προσφορά. Επομένως, το μερίδιο που απαιτεί ο πρώτος παίκτης πρέπει να είναι ίσο με το μέγιστο μερίδιο της πίτας που προσφέρει ο δεύτερος παίκτης στον πρώτο, δηλαδή

$$\frac{1-\delta_2}{1-\delta_1\delta_2} = 1 - \frac{\delta_2(1-\delta_1)}{1-\delta_1\delta_2}. \quad (5-1)$$

Ο πρώτος παίκτης δε μπορεί να επωφεληθεί κάνοντας μια νέα προσφορά στο δεύτερο παίκτη με μικρότερο τμήμα από αυτό που του προσφέρει ο δεύτερος στην τρέχουσα προσφορά, αφού στην περίπτωση αυτή θα γίνει αποδεκτή. Αν όμως η νέα προσφορά του πρώτου περιλαμβάνει μεγαλύτερο ποσοστό για αυτόν σε σχέση με το ποσοστό της τρέχουσας προσφοράς, ο δεύτερος παίκτης την απορρίπτει υποβάλλοντας στον επόμενο κύκλο νέα προσφορά. Αυτό έχει ως συνέπεια τη ζημία του πρώτου παίκτη, καθώς μειώνεται η αξία της πίτας και συνεπώς η αξία του δικού του μεριδίου, αφού το νέο πλέον μερίδιο που αντιστοιχεί σε αυτόν είναι

$$\delta_1 \left(1 - \frac{1-\delta_2}{1-\delta_1\delta_2} \right) = \delta_1^2 \frac{1-\delta_2}{1-\delta_1\delta_2} < \frac{1-\delta_2}{1-\delta_1\delta_2}. \quad (5-2)$$

Επομένως, το βέλτιστο για τον πρώτο παίκτη είναι να αποδεχθεί οποιαδήποτε προσφορά που είναι όχι μικρότερη του μεριδίου $\delta_1(1-\delta_2)/(1-\delta_1\delta_2)$ και να απορρίπτει οποιαδήποτε προσφορά μικρότερη αυτού του μεριδίου, αφού κάθε φορά που απορρίπτει μια προσφορά απαιτεί ένα μερίδιο ίσο με $(1-\delta_2)/(1-\delta_1\delta_2)$ στον επόμενο γύρο.

Στη συνέχεια εξετάζεται το παίγνιο πεπερασμένου χρόνου. Το κέρδος κάθε παίκτη είναι ίση με την τρέχουσα προσφορά για την εκάστοτε αξία της πίτας. Επομένως, αν

Χρονική Περίοδος t	Προσφορά	Μερίδιο Πρώτου Παίκτη $x_1^{(t)}$	Μερίδιο Δεύτερου Παίκτη $x_2^{(t)}$
$2k-1$	$2 \rightarrow 1$	0	1
$2k-2$	$1 \rightarrow 2$	$1-\delta_2$	δ_2
$2k-3$	$2 \rightarrow 1$	$\delta_1(1-\delta_2)$	$1-\delta_1(1-\delta_2)$
$2k-4$	$1 \rightarrow 2$	$1-\delta_2[1-\delta_1(1-\delta_2)]$	$\delta_2[1-\delta_1(1-\delta_2)]$
...	
1	$2 \rightarrow 1$	$\delta_1[1-\delta_2[1-\delta_1[1-\dots]]]$	$1-\delta_1[1-\delta_2[1-\delta_1[1-\dots]]]$
0	$1 \rightarrow 2$	$1-\delta_2[1-\delta_1[1-\delta_2[1-\delta_1[1-\dots]]]]]$	$\delta_2[1-\delta_1[1-\delta_2[1-\delta_1[1-\dots]]]]]$

Πίνακας 5-1: Μερίδια των παικτών σε κάθε χρονική περίοδο του παιγνίου.

επιτευχθεί συμφωνία στην περίοδο t , το κέρδος του παίκτη $i = \{1, 2\}$ για την τρέχουσα περίοδο 0 είναι $\delta_i^t x_i^{(t)}$, όπου $x_i^{(t)}$ το μερίδιο του παίκτη i τη χρονική περίοδο t . Στον Πίνακα 5-1 παρουσιάζονται τα μερίδια των δύο παικτών για τις $T = 2k$ περιόδους της διαπραγμάτευσης.

Θεώρημα 5.1

Το πεπερασμένου χρόνου ($T = 2k$) παίγνιο (finite-horizon game) μεταξύ δύο παικτών έχει μοναδικό σημείο τέλειας ισορροπίας υποπαιγνίου, όπου τα μερίδια του πρώτου και δεύτερου παίκτη είναι $x_1(T) = \frac{(1 - \delta_2)(1 - \delta_1^k \delta_2^k)}{1 - \delta_1 \delta_2}$ και $x_2(T) = \frac{\delta_2 (1 - \delta_1)(1 - \delta_1^k \delta_2^k)}{1 - \delta_1 \delta_2} + \delta_1^k \delta_2^k$, αντίστοιχα.

Η απόδειξη των σχέσεων που αποδίδουν τα μερίδια των παικτών που αναφέρονται στο θεώρημα 5.1 προκύπτει χρησιμοποιώντας προς τα πίσω επαγωγή (backward induction) (109). Το μοναδικό σημείο ισορροπίας υποπαιγνίου περιλαμβάνει στον τελευταίο κύκλο την απαίτηση ολόκληρης της πίτας εκ μέρους του παίκτη που υποβάλλει προσφορά, έστω του δεύτερου παίκτη, και την αποδοχή της προσφοράς αυτής από τον άλλο. Στον προηγούμενο γύρο, ο παίκτης που υπέβαλε τελευταίος προσφορά (δεύτερος παίκτης) αρνείται κάθε προσφορά που του αποδίδει λιγότερο από δ_2 , καθώς με την άρνησή του θα εξασφαλίσει $\delta_2 \cdot 1$, κ.ο.κ.

Επομένως, για ένα παίγνιο που διαρκεί $T = 2k$ γύρους, το μερίδιο του πρώτου παίκτη για τον τρέχοντα γύρο 0 είναι σύμφωνα με τον Πίνακα 5-1

$$\begin{aligned} x_1(T) &= 1 - \delta_2 \left[1 - \delta_1 \left[1 - \delta_2 \left[1 - \delta_1 \left[1 - \delta_2 \left[1 - \dots \right] \dots \right] \right] \right] \right] = \\ &= 1 - \delta_2 + \delta_1 \delta_2 - \delta_1 \delta_2^2 + \delta_1^2 \delta_2^2 - \dots - \delta_1^{k-1} \delta_2^k \\ &= (1 - \delta_2) \left(1 + \delta_1 \delta_2 + \delta_1^2 \delta_2^2 + \dots + \delta_1^{k-1} \delta_2^{k-1} \right) \\ &= \frac{(1 - \delta_2)(1 - \delta_1^k \delta_2^k)}{1 - \delta_1 \delta_2}. \end{aligned} \quad (5-3)$$

Κατά παρόμοιο τρόπο υπολογίζεται το μερίδιο του δεύτερου παίκτη για τον ίδιο κύκλο, συνεπώς

$$x_2(T) = \frac{\delta_2 (1 - \delta_1)(1 - \delta_1^k \delta_2^k)}{1 - \delta_1 \delta_2} + \delta_1^k \delta_2^k. \quad (5-4)$$

■

Έστω ότι Δ^2 συμβολίζει ένα χώρο δύο διαστάσεων που περιλαμβάνει όλες τις επιτρεπτές προσφορές μεταξύ των δύο παικτών. Το επόμενο θεώρημα περιγράφει το σημείο ισορροπίας για το μη πεπερασμένου χρόνου παίγνιο μεταξύ δύο παικτών (101).

Θεώρημα 5.2 (Rubinstein 1982)

Για το παίγνιο μη πεπερασμένου χρόνου μεταξύ δύο παικτών υπάρχει μοναδικό σημείο τέλειας ισορροπίας υποπαιγνίου $x^* = (x_1^*, x_2^*) \in \Delta^2$ όπου $x^* = \left(\frac{1-\delta_2}{1-\delta_1\delta_2}, \frac{\delta_2(1-\delta_1)}{1-\delta_1\delta_2} \right)$.

Έστω ότι δύο παίκτες ανταγωνίζονται για να μοιράσουν μία πίτα μοναδιαίου μεγέθους. Κάθε κύκλος του παιγνίου επιφέρει μείωση στην αξία της πίτας κατά δ_1 και δ_2 για τον πρώτο και δεύτερο παίκτη, αντίστοιχα. Στον πρώτο κύκλο του παιγνίου ο πρώτος παίκτης απαιτεί x_1 μερίδιο της πίτας. Αν ο δεύτερος αρνηθεί, προτείνει να λάβει μερίδιο ίσο με x_2 . Ο δεύτερος παίκτης αρνείται αν πιστεύει ότι μπορεί να λάβει μερίδιο x_2 τέτοιο ώστε $\delta_2 x_2 \geq 1 - x_1$, αφού η αξία του μεριδίου του μετά από έναν κύκλο θα γίνει $\delta_2 x_2$. Ομοίως, ο πρώτος παίκτης αρνείται αν μπορεί να λάβει μερίδιο x_1 για το οποίο $\delta_1 x_1 \geq 1 - x_2$. Επομένως, για τα μέγιστα αποδεκτά μερίδια x_1 και x_2 ισχύει $\delta_1 x_1 = 1 - x_2$ και $\delta_2 x_2 = 1 - x_1$. Συνεπώς,

$$\delta_1 x_1 = 1 - x_2 \Rightarrow \delta_1 \delta_2 x_1 = \delta_2 - \delta_2 x_2 \Rightarrow \delta_1 \delta_2 x_1 = \delta_2 - 1 + x_1 \Rightarrow 1 - \delta_2 = x_1 (1 - \delta_1 \delta_2) \Rightarrow$$

$$x_1 = \frac{1 - \delta_2}{1 - \delta_1 \delta_2}. \quad (5-5)$$

Αναλόγως, προκύπτει

$$1 - x_1 = \frac{\delta_2 (1 - \delta_1)}{1 - \delta_1 \delta_2}. \quad (5-6)$$

Επομένως, αν x^* είναι το σημείο τέλειας ισορροπίας υποπαιγνίου, τότε

$$x^* = \left(\frac{1 - \delta_2}{1 - \delta_1 \delta_2}, \frac{\delta_2 (1 - \delta_1)}{1 - \delta_1 \delta_2} \right). \quad (5-7)$$

Η απόδειξη για την ύπαρξη μοναδικού x^* δίδεται στο Παράρτημα Β. ■

5.2.1.3. Διερεύνηση του Συντελεστή Διαπραγμάτευσης

Σημαντικό ζήτημα σε οποιοδήποτε παίγνιο διαπραγμάτευσης είναι η απόδοση διαφορετικών προτεραιοτήτων μεταξύ των διαγωνιζόμενων παικτών. Άλλωστε αυτό είναι απαραίτητο στα συστήματα ασυρμάτων επικοινωνιών που υποστηρίζουν πολλαπλές κλάσεις υπηρεσιών με διαφορετικά επίπεδα προτεραιότητας. Επιπλέον, σε ένα παίγνιο έχει μεγάλη σημασία η σειρά με την οποία κάποιος παίκτης εισέρχεται στο παίγνιο. Στη συνέχεια υποτίθεται ότι ο πρώτος παίκτης υποβάλλει πρόταση στον πρώτο κύκλο διαπραγμάτευσης.

Η τιμή που αποδίδεται στο συντελεστή διαπραγμάτευσης είναι καθοριστική για την προτεραιότητα του παίκτη. Αν τεθεί $\delta_1 \rightarrow 1$ υπό δεδομένο δ_2 , ο πρώτος παίκτης λαμβάνει ολόκληρη την πίτα, ενώ το αντίθετο συμβαίνει όταν $\delta_2 \rightarrow 1$ υπό δεδομένη τιμή του δ_1 . Επίσης, αν $\delta_2 = 0$, ο πρώτος παίκτης λαμβάνει και πάλι όλη την πίτα καθώς ο δεύτερος θα αποδεχθεί οποιαδήποτε προσφορά αντί για να διεκδικήσει δεύτερο κύκλο προσφορών. Ωστόσο, στην περίπτωση όπου $\delta_1 = 0$ και $\delta_2 < 1$, ο δεύτερος παίκτης δε λαμβάνει όλη την πίτα, αφού ο πρώτος παίκτης έχει πλεονέκτημα καθώς είναι αυτός που υποβάλλει την πρώτη προσφορά. Στο γεγονός αυτό, δηλαδή στο πλεονέκτημα του πρώτου παίκτη να υποβάλει πρώτος προσφορά, οφείλεται το βελτιωμένο μερίδιο σε σχέση με το δεύτερο παίκτη που λαμβάνει όταν οι δύο παίκτες έχουν τον ίδιο συντελεστή διαπραγμάτευσης, $\delta_1 = \delta_2 = \delta$. Στην περίπτωση αυτή το σημείο τέλειας ισορροπίας υποπαιγνίου για το παίγνιο μη πεπερασμένου χρόνου είναι με βάση την (5-7)

$$x^* = \left(\frac{1}{1+\delta}, \frac{\delta}{1+\delta} \right). \quad (5-8)$$

Όπως προκύπτει από την (5-8), $x_1^* = 1/(1+\delta) > 0.5$ γεγονός που επιβεβαιώνει το πλεονέκτημα του πρώτου παίκτη.

5.2.1.4. Ορισμός του Τελεστή Διαπραγμάτευσης (Bargaining Operator)

Η τεχνική της προς τα πίσω επαγωγής που εφαρμόστηκε προηγουμένως για τον προσδιορισμό του σημείου τέλειας ισορροπίας υποπαιγνίου στην περίπτωση του παιγνίου πεπερασμένου χρόνου δεν είναι εύχρηστη όταν χρησιμοποιηθεί μια αρχική συνθήκη $x(T) = (x_1(T), x_2(T))$ για την περίοδο T ή όταν στο παίγνιο συμμετέχουν πολλοί παίκτες με διαφορετικούς συντελεστές διαπραγμάτευσης. Για την αντιμετώπιση αυτής της

δυσκολίας στη διεθνή βιβλιογραφία έχει προταθεί η προσεγγιστική επίλυση του προβλήματος υποθέτοντας ίδιους συντελεστές διαπραγμάτευσης για όλους τους παίκτες (100). Επομένως, προκύπτει η ανάγκη εύρεσης ενός αποτελεσματικού και συστηματικού τρόπου για την επέκταση του μοντέλου διαπραγμάτευσης Rubinstein-Ståhl σε πολλούς χρήστες.

Για το λόγο αυτό προτείνεται η εισαγωγή του τελεστή διαπραγμάτευσης (bargaining operator), ο οποίος είναι διαφορετικός για κάθε παίκτη που συμμετέχει στο παίγνιο και εξαρτάται από το συντελεστή διαπραγμάτευσής του. Οι τελεστές διαπραγμάτευσης στην περίπτωση του παιγνίου μεταξύ δύο παικτών ορίζονται μέσω των πινάκων

$$B_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1-\delta_2 \\ 0 & \delta_2 \end{bmatrix} \text{ και } B_2 = \begin{bmatrix} \delta_1 & 0 \\ 1-\delta_1 & 1 \end{bmatrix} \quad (5-9)$$

για τον πρώτο και δεύτερο παίκτη, αντίστοιχα. Ως τελεστής διαπραγμάτευσης του παιγνίου B ορίζεται το γινόμενο των δύο επιμέρους τελεστών, δηλαδή

$$B = B_1 B_2 = \begin{bmatrix} 1-\delta_2(1-\delta_1) & 1-\delta_2 \\ \delta_2(1-\delta_1) & \delta_2 \end{bmatrix}. \quad (5-10)$$

Με βάση τον τελεστή B διατυπώνεται το επόμενο θεώρημα.

Θεώρημα 5.3

- A. Έστω $x(t) = (x_1^{(t)}, x_2^{(t)}) \in \Delta^2$ μια αποδεκτή προσφορά που γίνεται από τον παίκτη j τη χρονική περίοδο t . Τότε, η προσφορά $x(t-1) = B_j x(t)$ είναι μια αποδεκτή προσφορά που γίνεται από τον παίκτη i τη χρονική περίοδο $t-1$, όπου $i, j = \{1, 2\}$ και $i \neq j$.
- B. Έστω $x(t) = (x_1^{(t)}, x_2^{(t)}) \in \Delta^2$ μια αποδεκτή προσφορά που γίνεται από τον παίκτη i τη χρονική περίοδο t . Τότε, η προσφορά $x(t-2k) = B^k x(t) = (B_i B_j)^k x(t)$ είναι μια αποδεκτή προσφορά που γίνεται από τον ίδιο παίκτη τη χρονική περίοδο $t-2k$, $k \in \mathbb{N}$.

Για την απόδειξη του σκέλους A του θεωρήματος γίνεται η υπόθεση ότι $x(t) = (x_1^{(t)}, x_2^{(t)})$ είναι μια προσφορά που γίνεται από το δεύτερο παίκτη και είναι αποδεκτή και από τους δύο παίκτες. Εύκολα αποδεικνύεται ότι η προσφορά

$x(t-1) = B_1 x(t) = (1 - \delta_2 x_2^{(t)}, \delta_2 x_2^{(t)})$ του πρώτου παίκτη αποτελεί μια ασθενώς κυρίαρχη στρατηγική Pareto (weakly Pareto dominant). Αυτό δηλώνει ότι υπάρχει ένα σύνολο προσφορών του δεύτερου παίκτη για τις οποίες η τρέχουσα προσφορά του πρώτου είναι ανώτερη από αυτές, ενώ οι υπόλοιπες προσφορές του δεύτερου παίκτη παρέχουν στον πρώτο τουλάχιστον το ίδιο κέρδος με αυτό που λαμβάνει από την προσφορά $x(t-1)$. Για το λόγο αυτό η τελευταία γίνεται αποδεκτή και από τους δύο παίκτες. Το ίδιο σκεπτικό μπορεί να εφαρμοστεί όταν η προσφορά γίνεται από τον πρώτο παίκτη και ο αντίστοιχος τελεστής διαπραγμάτευσης που χρησιμοποιείται είναι B_2 .

Το σκέλος B του θεωρήματος αποδεικνύεται με επαγωγή, επαναλαμβάνοντας την απόδειξη του A σκέλους του θεωρήματος για $2k$ φορές. ■

Το σημείο τέλειας ισορροπίας για το μη πεπερασμένου χρόνου παίγνιο διαπραγμάτευσης μεταξύ δύο παικτών έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά.

Θεώρημα 5.4

- A. Το μαρκοβιανό σημείο τέλειας ισορροπίας υποπαιγνίου $x^* = ((1 - \delta_2)/(1 - \delta_1 \delta_2), (\delta_2(1 - \delta_1))/(1 - \delta_1 \delta_2))$ παραμένει αναλλοίωτο στο χώρο Δ^2 από την εφαρμογή του τελεστή διαπραγμάτευση του παιγνίου B .
- B. Δεδομένης οποιασδήποτε αρχικής συνθήκης $x(0) \in \Delta^2$, η ακολουθία $x(k) = B^k x(0)$ συγκλίνει στο μοναδικό μαρκοβιανό σημείο τέλειας ισορροπίας υποπαιγνίου x^* .

Η απόδειξη και των δύο σκελών του θεωρήματος προκύπτει με άμεση εκτέλεση πράξεων. Συγκεκριμένα, για το πρώτο σκέλος του θεωρήματος ισχύει

$$Bx^* = \begin{bmatrix} 1 - \delta_2(1 - \delta_1) & 1 - \delta_2 \\ \delta_2(1 - \delta_1) & \delta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1 - \delta_2}{1 - \delta_1 \delta_2} & \frac{\delta_2(1 - \delta_1)}{1 - \delta_1 \delta_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1 - \delta_2}{1 - \delta_1 \delta_2} & \frac{\delta_2(1 - \delta_1)}{1 - \delta_1 \delta_2} \end{bmatrix} = x^*. \quad (5-11)$$

Ανάλογα αποδεικνύεται το δεύτερο σκέλος του θεωρήματος. ■

5.2.2. Πολυμερής Διαπραγμάτευση

Η εφαρμογή του μοντέλου διαπραγμάτευσης Rubinstein-Ståhl που παρουσιάστηκε προηγουμένως περιορίζεται μεταξύ δύο παικτών. Ο στόχος της ενότητας αυτής είναι η επέκτασή του σε πολλούς παίκτες με διαφορετικούς συντελεστές διαπραγμάτευσης, δηλαδή

διαφορετικό συντελεστή διαπραγμάτευσης για κάθε υποστηριζόμενο παίκτη. Η επέκταση του αρχικού μοντέλου καθίσταται εφικτή χρησιμοποιώντας τους τελεστές διαπραγμάτευσης που ορίστηκαν προηγουμένως, μέσω των οποίων γίνεται δυνατή η αντιστοίχιση της διαδικασίας διαπραγμάτευσης με αλυσίδα Markov. Το αναλλοίωτο μέτρο της αλυσίδας Markov, δηλαδή τα σταθερά μεγέθη που δεν αλλοιώνονται από την εξέλιξη του συστήματος, αποτελούν το μοναδικό σημείο ισορροπίας Markov του μοντέλου διαπραγμάτευσης.

5.2.2.1. Περιγραφή του Παιγνίου

Έστω ότι υπάρχει ένα μέγεθος/ποσότητα (πίτα) το οποίο πρέπει να μοιραστεί σε μερίδια μεταξύ n διαφορετικών ατόμων/παικτών του παιγνίου. Ο χρόνος t λαμβάνει τιμές $0, 1, 2, \dots, T$, όπου $T \in \mathbb{N} \cup \infty$. Ξεκινώντας από τον πρώτο, κάθε παίκτης υποβάλλει μια προσφορά $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ για τον τρόπο με τον οποίο προτείνει να μοιραστεί η πίτα μεταξύ τους. Ο i παίκτης υποβάλλει προσφορά τις χρονικές περιόδους $t_i = \{t \mid i = t \bmod n\}$, $i = 1, 2, \dots, n$. Αν μια προσφορά γίνει αποδεκτή από όλους τους παίκτες, το μέγεθος μοιράζεται ανάλογα με το μερίδιο που αντιστοιχεί σε κάθε παίκτη. Αν, όμως, έστω και ένας παίκτης απορρίψει την προσφορά του παίκτη i , το παίγνιο συνεχίζεται σε επόμενο κύκλο κατά τον οποίο ο παίκτης $i+1$ υποβάλλει νέα προσφορά. Σε κάθε κύκλο του παιγνίου, ο συντελεστής διαπραγμάτευσης $\delta_i < 1$ πολλαπλασιάζει το μερίδιο του παίκτη i , μειώνοντας την αξία του.

Όπως και στην περίπτωση του παιγνίου δύο παικτών, έτσι και στην περίπτωση των n παικτών διακρίνονται δύο περιπτώσεις: α) το παίγνιο πεπερασμένου χρόνου T περιόδων το οποίο συμβολίζεται ως $G(T)$ και β) το παίγνιο μη πεπερασμένου χρόνου $G(\infty)$.

5.2.2.2. Θεώρημα Perron-Frobenius

Για να αποδειχθεί ότι η αλυσίδα Markov που ορίστηκε προηγουμένως είναι μη αναγόμενη (irreducible) είναι απαραίτητη η χρήση του θεωρήματος Perron-Frobenius (110). Στη συνέχεια παρουσιάζεται το θεώρημα αυτό μαζί με τις επιπτώσεις του στις μη αναγόμενες αλυσίδες Markov.

Έστω ότι \mathbb{R}^n ο n -διάστατος Ευκλείδειος χώρος, \mathbb{R}_+^n ο θετικός υποχώρος του \mathbb{R}^n , $\mathbb{R}_+^n = \{x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n \mid x_1, x_2, \dots, x_n > 0\}$ και \mathbb{R}_{++}^n εσωτερικός χώρος του \mathbb{R}_+^n .

Επιπλέον, με Δ^n συμβολίζεται ο χώρος όλων των εφικτών τρόπων διαμερισμού της πίτας μεταξύ των n διαπραγματευόμενων παικτών. Συνεπώς

$$\Delta^n = \left\{ x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \mid x_i \geq 0, \sum_{i=1}^n x_i = 1 \right\}. \quad (5-12)$$

Ορισμός 5.2

- A. Ένας γραμμικός τελεστής $A: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ είναι μη αρνητικός αν αφήνει το \mathbb{R}_+^n αναλλοίωτο, δηλαδή ισχύει $A(\mathbb{R}_+^n) \subset \mathbb{R}_+^n$ (110; 111).
- B. Ένας γραμμικός τελεστής $A: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ είναι θετικός αν ισχύει $A(\mathbb{R}_+^n) \subset \mathbb{R}_{++}^n$ (112).

Στη συνέχεια, ακολουθεί το θεώρημα Perron-Frobenius που αποτελεί υποπερίπτωση του θεωρήματος Krein-Rutman, από το οποίο προκύπτει αν γίνει η υπόθεση για πεπερασμένης διάστασης χώρο (110; 113).

Θεώρημα 5.5

- A. Έστω C ένας $n \times n$ μη αρνητικός τετραγωνικός πίνακας και $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ οι ιδιοτιμές του (eigenvalues). Το σύνολο των ιδιοτιμών ορίζεται ως φάσμα (matrix spectrum) του πίνακα C και συμβολίζεται $\lambda(C) = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\}$. Η μέγιστη κατά απόλυτη τιμή ιδιοτιμή του πίνακα C καλείται φασματική ακτίνα (spectral radius) του πίνακα και συμβολίζεται με $\rho(C)$, $\rho(C) = \max_{1 \leq i \leq n} \{|\lambda_i|\}$. Υπάρχει ιδιοτιμή $\lambda_{PF} \in \lambda(C)$ του πίνακα C η οποία είναι πραγματικός μη αρνητικός αριθμός τέτοια ώστε $\lambda_{PF} = \rho(C)$. Η λ_{PF} αντιστοιχεί σε ένα μη αρνητικό ιδιοδιάνυσμα (eigenvector) $x^* \in \mathbb{R}_+^n$ (114).
- B. Επιπλέον, αν ο πίνακας C είναι μη αναγόμενος⁴, τουλάχιστον μια από τις ιδιοτιμές του λ_{PF} είναι θετικός πραγματικός αριθμός και είναι μεγαλύτερη ή

⁴ Ένας πραγματικός τετραγωνικός πίνακας C τάξης n με μη αρνητικές τιμές καλείται αναγόμενος (reducible) εάν υπάρχει πίνακας μετάθεσης Q τέτοιος ώστε

ιση κατά απόλυτη τιμή από όλες τις υπόλοιπες ιδιοτιμές του πίνακα C , δηλαδή ισχύει $\lambda_{PF} > 0$ και $\lambda_{PF} = \rho(C) \geq \lambda_i, \forall \lambda_i \in \lambda(C)$ (114). Επίσης, η συγκεκριμένη ιδιοτιμή λ_{PF} έχει πολλαπλότητα ένα, δηλαδή δεν επαναλαμβάνεται εντός του συνόλου $\lambda(C)$, και αντιστοιχεί σε ένα θετικό ιδιοδιάνυσμα $x^* \in \mathbb{R}_{++}^n$.

- Γ. Αν ο πίνακας C είναι πρωταρχικός ⁵(primitive), τουλάχιστον μια από τις ιδιοτιμές του λ_{PF} είναι θετικός πραγματικός αριθμός και είναι μεγαλύτερη κατά απόλυτη τιμή από όλες τις υπόλοιπες ιδιοτιμές του πίνακα C , δηλαδή ισχύει $\lambda_{PF} = \rho(C) > \lambda_i, \forall \lambda_i \in \lambda(C), \lambda_{PF} \neq \lambda_i$. Η ιδιοτιμή λ_{PF} έχει πολλαπλότητα ένα, δηλαδή δεν επαναλαμβάνεται εντός του συνόλου $\lambda(C)$, και αντιστοιχεί σε ένα θετικό ιδιοδιάνυσμα $x^* \in \mathbb{R}_{++}^n$ (114).

Στη συνέχεια, ακολουθεί ο ορισμός των στοχαστικών τελεστών, που αποτελούν μια υποκατηγορία των μη αρνητικών τελεστών.

Ορισμός 5.3

Ένας μη αρνητικός γραμμικός τελεστής $A: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ ονομάζεται κατά στήλη στοχαστικός (column stochastic) όταν το άθροισμα όλων των στοιχείων της στήλης είναι ίσο με ένα (115).

Με άμεση εφαρμογή του θεωρήματος 5.5 προκύπτει το επόμενο θεώρημα.

$$Q^T C Q = \begin{bmatrix} X & Y \\ 0 & Z \end{bmatrix}$$

όπου οι X και Z είναι τετραγωνικοί πίνακες. Διαφορετικά, ο πίνακας C καλείται μη αναγόμενος (123).

⁵ Ένας πραγματικός τετραγωνικός πίνακας C τάξης n με μη αρνητικές τιμές καλείται πρωταρχικός εφόσον υπάρχει $k \in \mathbb{N}$ τέτοιο ώστε ο πίνακας C^k να έχει μόνο θετικές τιμές (110).

Θεώρημα 5.6

Έστω U ένας στοχαστικός τελεστής.

- A. Ο τελεστής U αφήνει το χώρο Δ^n αναλλοίωτο.
- B. Αν ο πίνακας του τελεστή U είναι πρωταρχικός, η μεγαλύτερη ιδιοτιμή του U είναι ίση με τη μονάδα, $\lambda_{\max} = 1$, ενώ για όλες τις υπόλοιπες ιδιοτιμές του ισχύει $|\lambda| < 1$.
- Γ. Αν ο πίνακας του τελεστή U είναι μη αναγόμενος, ο τελεστής U έχει ένα μοναδικό σταθερό σημείο $x^* \in \Delta^n$, δηλαδή ισχύει $Ux^* = x^*$.
- Δ. Επιπλέον, όταν ο πίνακας του τελεστή U είναι μη αναγόμενος, η ακολουθία $x^k = U^k x$ συγκλίνει σε ένα μοναδικό σταθερό σημείο $x^* \in \Delta^n$ για οποιοδήποτε $x \in \Delta^n$.

5.2.2.3. Τελεστής Διαπραγμάτευσης Πολλαπλών Παικτών

Ο τελεστής διαπραγμάτευσης του παίκτη i ορίζεται ως ο τετραγωνικός $n \times n$ πίνακας

$$B_i = \begin{bmatrix} \delta_1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \delta_2 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1-\delta_1 & 1-\delta_2 & \dots & 1-\delta_{i-1} & 1 & 1-\delta_{i+1} & \dots & 1-\delta_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & \delta_n \end{bmatrix} = [b_{kl}^{(i)}]_{n \times n}, \quad (5-13)$$

όπου τα στοιχεία της κύριας διαγωνίου είναι ίσα με τους αντίστοιχους συντελεστές διαπραγμάτευσης του κάθε παίκτη, δηλαδή $b_{jj} = \delta_j$, $j \neq i$, το στοιχείο b_{ii} της κύριας διαγωνίου είναι ίσο με τη μονάδα και τα υπόλοιπα στοιχεία της γραμμής i είναι ίσα με $b_{ij} = 1 - \delta_j$, $j \neq i$. Όλα τα υπόλοιπα στοιχεία του πίνακα B_i είναι μηδενικά. Ο τελεστής διαπραγμάτευσης του παιγνίου B ορίζεται ως το γινόμενο όλων των επιμέρους τελεστών B_i , δηλαδή

$$B = B_1 B_2 \dots B_n. \quad (5-14)$$

Θεώρημα 5.7

- A. Κάθε ανεξάρτητος τελεστής διαπραγμάτευσης B_i είναι ένας κατά στήλη στοχαστικός τελεστής που αφήνει το χώρο Δ^n αναλλοίωτο.

- B. Ο τελεστής διαπραγμάτευσης του παιγνίου B είναι ένας θετικός στοχαστικός τελεστής.
- Γ. Το σταθερό σημείο x^* του B στο χώρο Δ^n είναι μοναδικό και επιπλέον ισχύει $x^* = \lim_{k \rightarrow \infty} B^k x^T$ για κάθε αρχική συνθήκη $x^T \in \Delta^n$ της προς τα πίσω αναδρομής.

Η απόδειξη του σκέλους Α του θεωρήματος 5.7 βασίζεται στην παρατήρηση ότι το άθροισμα των στοιχείων κάθε στήλης του πίνακα B_i είναι ίσο με τη μονάδα, δηλαδή ισχύει

$$\sum_{k=1}^n b_{kl}^{(i)} = 1. \text{ Επομένως, για κάθε } x \in \Delta^n \text{ ισχύει}$$

$$\sum_{k=1}^n (B_i x)_k = \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n (b_{kl}^{(i)} x_l) = \sum_{l=1}^n \sum_{k=1}^n (b_{kl}^{(i)}) x_l = \sum_{l=1}^n x_l = 1. \quad (5-15)$$

Συνδυάζοντας τη σχέση 5-15 με το γεγονός ότι τα στοιχεία του πίνακα B_i είναι μη αρνητικά προκύπτει ότι ο B_i αφήνει το χώρο Δ^n αναλλοίωτο για κάθε $i = 1, 2, \dots, n$.

Για την απόδειξη του σκέλους Β του θεωρήματος, εξετάζεται αρχικά το (i, j) στοιχείο του πίνακα B , συνεπώς

$$\begin{aligned} b_{ij} &= \sum_{h_{n-1}=1}^n \dots \sum_{h_2=1}^n \sum_{h_1=1}^n b_{ih_1}^{(1)} b_{h_1 h_2}^{(2)} \dots b_{h_{n-1} j}^{(n)} \\ &> b_{ij}^{(1)} b_{ij}^{(2)} \dots b_{ij}^{(n)} \\ &= (1 - \delta_j) \delta_j \dots 1 \dots \delta_j \\ &= \begin{cases} \delta_j^{n-2} (1 - \delta_j) > 0 & \text{για } i \neq j \\ \delta_j^{n-1} > 0 & \text{για } i = j. \end{cases} \end{aligned} \quad (5-16)$$

Επομένως, ο τελεστής B είναι θετικός αφού κάθε στοιχείο του είναι θετικός αριθμός. Στη συνέχεια, εξετάζεται ο τελεστής B ως προς την ιδιότητα του στοχαστικού πίνακα. Επειδή κάθε παράγοντας B_i είναι κατά στήλη στοχαστικός πίνακας, ο πίνακας B είναι και αυτός στοχαστικός, οπότε

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n b_{ij} &= \sum_{i=1}^n \left(\sum_{h_{n-1}=1}^n \dots \sum_{h_2=1}^n \sum_{h_1=1}^n b_{ih_1}^{(1)} b_{h_1 h_2}^{(2)} \dots b_{h_{n-1} j}^{(n)} \right) \\ &= \sum_{h_{n-1}=1}^n \dots \sum_{h_2=1}^n \sum_{h_1=1}^n \sum_{i=1}^n (b_{ih_1}^{(1)}) b_{h_1 h_2}^{(2)} \dots b_{h_{n-1} j}^{(n)} \\ &= \sum_{h_{n-1}=1}^n \dots \sum_{h_2=1}^n \sum_{h_1=1}^n (b_{h_1 h_2}^{(2)}) \dots b_{h_{n-1} j}^{(n)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \dots \\
 &= \sum_{h_{n-1}=1}^n b_{h_{n-1}j}^{(n)} \quad (5-17) \\
 &= 1.
 \end{aligned}$$

Για την απόδειξη του σκέλους Γ του θεωρήματος ισχύει ότι ο τελεστής B είναι θετικός, στοχαστικός και πρωταρχικός, συνεπώς ο B είναι μη αναγόμενος. Επομένως, ο B έχει ένα μοναδικό σταθερό σημείο στο χώρο Δ^n που αντιστοιχεί σε ένα μοναδικό ιδιοδιάνυσμα με την αντίστοιχη ιδιοτιμή να είναι η μέγιστη μεταξύ των ιδιοτιμών του B και ίση με τη μονάδα. ■

5.3. Ύπαρξη Τέλειας Ισορροπίας στο Υποπαίγνιο Markov

Με βάση τη διατύπωση του προβλήματος και την ανάλυση που παρουσιάστηκε μέχρι τώρα είναι δυνατή η εύρεση του σημείου τέλειας ισορροπίας για το υποπαίγνιο Markov πολλαπλών παικτών. Αρχικά, αναλύεται η περίπτωση του παιγνίου πεπερασμένου χρόνου και, στη συνέχεια, η ανάλυση επεκτείνεται στην περίπτωση του παιγνίου μη πεπερασμένου χρόνου.

5.3.1. Διαπραγμάτευση Περασμένου Χρόνου

Στο επόμενο θεώρημα αποδεικνύεται η ύπαρξη μοναδικού σημείου τέλειας ισορροπίας υποπαιγνίου Markov για το παίγνιο πεπερασμένου χρόνου $G(T)$. Το σημείο ισορροπίας προσδιορίζεται σε κλειστή μορφή (closed form expression) μέσω εξίσωσης στην οποία εμπλέκονται οι τελεστές διαπραγμάτευσης των παικτών.

Θεώρημα 5.8

- A. Έστω x μια αποδεκτή προφορά που έγινε από τον παίκτη i τη χρονική περίοδο t . Τότε $x' = B_{i-1}x$ είναι μια αποδεκτή προσφορά που έγινε από τον παίκτη $(i-1)$ τη χρονική περίοδο $(t-1)$, όπου ως παίκτης 0 νοείται ο παίκτης n .
- B. Το παίγνιο έχει ένα μοναδικό σημείο τέλειας ισορροπίας υποπαιγνίου Markov που υπολογίζεται μέσω της σχέσης ως εξής

$$x^* = B^{\lfloor T/n \rfloor} B_1 B_2 \dots B_{i-1} I_i, \quad (5-18)$$

όπου $T = l \bmod n$, $I_l = (0, \dots, 1, \dots, 0)$ διάνυσμα με μηδενικά στοιχεία εκτός από το l στοιχείο που είναι ίσο με τη μονάδα και $\lfloor T/n \rfloor$ το ακέραιο μέρος του T/n .

Για την απόδειξη του σκέλους Α του θεωρήματος γίνεται η υπόθεση ότι \mathcal{X} είναι μια αποδεκτή προσφορά του i παίκτη από όλους τους παίκτες τη χρονική περίοδο t . Τότε, το μερίδιο $[B_{i-1}x]_j$ είναι το μόνο αποδεκτό τη χρονική περίοδο $(t-1)$ σε σχέση με το x_j για $j \neq i-1$. Στην περίπτωση όπου $j = i-1$ το μερίδιο $[B_{i-1}x]_{i-1}$ είναι σαφώς προτιμότερο από το x_{i-1} . Επομένως, η προσφορά $x' = B_{i-1}x$ είναι αποδεκτή από όλους τους παίκτες.

Η απόδειξη του σκέλους Β του θεωρήματος βασίζεται στην υπόθεση ότι I_l είναι η μόνη αποδεκτή προσφορά από όλους τους παίκτες την τελευταία περίοδο T της διαπραγμάτευσης. Συνεπώς, σύμφωνα με την προς τα πίσω επαγωγή η μόνη αποδεκτή προσφορά την περίοδο $T-1$ είναι η $B_{l-1}I_l$. Επαγωγικά είναι εύκολο να αποδειχθεί ότι η προσφορά $x^* = B^{\lfloor T/n \rfloor} B_1 B_2 \dots B_{l-1} I_l$ είναι η μόνη αποδεκτή την πρώτη περίοδο. Επομένως, υπάρχει μοναδικό σημείο ισορροπίας υποπαιγνίου Markov για το οποίο τα μερίδια κέρδους κάθε παίκτη είναι σαφώς καθορισμένα. ■

5.3.2. Διαπραγμάτευση Απεριόριστου Χρόνου

Έστω ότι το $G(T)$ δηλώνει μια ακολουθία παιγνίων όταν η χρονική παράμετρος T μεταβάλλεται εντός του διαστήματος $[0, \infty)$. Τότε, το παίγνιο $G(T')$ με $T' \geq T$ ονομάζεται επέκταση του $G(T)$ αν ισχύει $G(T) = G(T')|_{[0, T]}$, όπου ο συμβολισμός $G(T')|_{[0, T]}$ δηλώνει ότι η παράμετρος T' λαμβάνει όλες τις τιμές του διαστήματος $[0, T]$. Το παίγνιο $G(T')$ είναι συνεχές στο άπειρο εφόσον ισχύει

$$\limsup_{T \rightarrow \infty, h|_{[0, T]} = h'|_{[0, T]}} \|u(h) - u(h')\| = 0, \quad (5-19)$$

όπου $h|_{[0, T]}$ και $h'|_{[0, T]}$ τα μερίδια του ίδιου παίκτη για τα παίγνια $G(T)$ και $G(T')$, αντίστοιχα, και $u(\cdot)$ η συνάρτηση υπολογισμού της αξίας του κέρδους του παίκτη. Η συνθήκη της εξίσωσης (5-19) υπαγορεύει ότι το απώτερο μέλλον του παιγνίου $G(\infty)$ είναι

πρακτικά ασήμαντο. Επομένως, η απολαβή κάθε παίκτη στο παίγνιο $G(\infty)$ μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια ε από τις διαπραγματεύσεις σε ένα πεπερασμένου χρόνου παίγνιο. Το σκεπτικό αυτό βασίζεται στην ιδέα ότι οι παίκτες ενδεχομένως να μην ενδιαφέρονται να αλλάξουν τη στρατηγική τους στη βέλτιστη δυνατή που μεγιστοποιεί την ωφέλειά τους εφόσον το κέρδος που λαμβάνουν από την τρέχουσα στρατηγική υπολείπεται κατά ε από τη βέλτιστη. Αυτή η παρατήρηση οδηγεί στην ανάγκη ορισμού του σημείου ισορροπίας ε -Nash (ε -Nash equilibrium) (116).

Έστω ότι $s = (s_1, \dots, s_n)$ ένα προφίλ στρατηγικών των n παικτών, s_i η στρατηγική του παίκτη i και s_{-i} το προφίλ όλων των στρατηγικών εκτός αυτής του παίκτη i , δηλαδή $s_{-i} = (s_1, \dots, s_{i-1}, s_{i+1}, \dots, s_n)$.

Ορισμός 5.3 (ε -Nash)

Δεδομένου ενός αριθμού $\varepsilon > 0$, ένα προφίλ στρατηγικών $s = (s_1, \dots, s_n)$ αποτελεί σημείο ισορροπίας ε -Nash αν για κάθε i παίκτη, $i = 1, \dots, n$, με $s'_i \neq s_i$ ισχύει $u_s(s_i, s_{-i}) \geq u_s(s'_i, s_{-i}) - \varepsilon$, όπου $u_s(\cdot, \cdot)$ η συνάρτηση κέρδους που αντιστοιχεί στο προφίλ στρατηγικών των ορισμάτων της.

Χαρακτηριστική ιδιότητα των σημείων ισορροπίας ε -Nash είναι ότι υπάρχουν πάντα, όταν υπάρχει σημείο ισορροπίας Nash (117). Συγκεκριμένα, γύρω από κάθε σημείο ισορροπίας Nash υπάρχει μια περιοχή ακτίνας $\varepsilon > 0$ της οποίας κάθε σημείο αποτελεί σημείο ισορροπίας ε -Nash. Το σκεπτικό ότι οι παίκτες ενδεχομένως να μην είναι πρόθυμοι να αλλάξουν τη στρατηγική τους για να επιτύχουν μια πολύ μικρή βελτίωση του κέρδους τους είναι ρεαλιστικό. Πέραν αυτού, είναι και εξαιρετικά πρακτικό για τους αλγόριθμους εύρεσης των σημείων ισορροπίας Nash, καθώς την πράξη οι αλγόριθμοι υπολογίζουν τα σημεία ισορροπίας ε -Nash, όπου $\varepsilon > 0$ αποτελεί την ακρίβεια των αλγόριθμων⁶,

⁶ Η ακρίβεια των αλγόριθμων εξαρτάται από τη δομή του αλγόριθμου αλλά και από τους τεχνολογικούς περιορισμούς. Τα σύγχρονα υπολογιστικά συστήματα επιτυγχάνουν ακρίβεια της τάξης του 10^{-16} ή και μικρότερη.

λαμβάνοντας υπόψη ένα πεπερασμένο σύνολο από προφίλ μικτών στρατηγικών⁷ (mixed strategies) αντί του συνόλου των στρατηγικών του συνεχούς χώρου (118).

Το ακόλουθο θεώρημα των Fudenberg and Levine καθορίζει τη σχέση μεταξύ του τέλει σημείου ισορροπίας υποπαιγνίου για το $G(\infty)$ και των σημείων ισορροπίας ε -Nash, $E^\varepsilon(T)$, του πεπερασμένου παιγνίου $G(T)$.

Θεώρημα 5.9 (Fudenberg and Levine)

Έστω ότι το παίγνιο $G(\infty)$ είναι μια συνεχής επέκταση του παιγνίου $G(T)$ όταν $T \rightarrow \infty$ (107).

- A. Το σύνολο των σημείων ισορροπίας υποπαιγνίου για το $G(\infty)$ είναι μη κενό και συμπαγές⁸.
- B. Το προφίλ στρατηγικών s^* αποτελεί σημείο τέλει ισορροπίας υποπαιγνίου για το παίγνιο $G(\infty)$ αν και μόνο αν ισχύει $s^*|_{[0,T]} = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} s_T^\varepsilon$ όταν $T \rightarrow \infty$, όπου $s_T^\varepsilon \in E^\varepsilon(T)$.

⁷ Έστω ότι $s_i = \{1, \dots, m_i\}$ δηλώνει το σύνολο των στρατηγικών του i παίκτη, όπου κάθε στοιχείο του συνόλου s_i αντιστοιχεί σε διαφορετική στρατηγική του παίκτη. Μικτή στρατηγική (mixed strategy) x_i του i παίκτη ονομάζεται μια κατανομή πιθανότητας (probability distribution) στο σύνολο των στοιχείων του s_i (118). Επομένως, η μικτή στρατηγική x_i είναι ένα διάνυσμα, $x_i = (x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(m_i))$, για το οποίο ισχύει $x_i(j) \geq 0$, $j = 1, \dots, m_i$ και $\sum_{j=1}^{m_i} x_i(j) = 1$. Συνεπώς, ο παίκτης επιλέγει με πιθανότητα x_i τη στρατηγική που θα ακολουθήσει στο παίγνιο. Για ένα παίγνιο n παικτών το $x = x_1 \times x_2 \times \dots \times x_n$ αποτελεί το σύνολο όλων των πιθανών συνδυασμών και καλείται προφίλ μικτών στρατηγικών.

⁸ Συμπαγές (compact) υποσύνολο ενός μετρικού χώρου ονομάζεται κάθε κλειστό (όλα τα οριακά του σημεία ανήκουν στο σύνολο) και φραγμένο (αν η απόσταση κάθε σημείου του από συγκεκριμένο σημείο του χώρου είναι μικρότερη από κάποιο θετικό αριθμό) υποσύνολο του χώρου (124).

Στο ακόλουθο θεώρημα αποδεικνύεται ότι υπάρχει μοναδικό σημείο ισορροπίας στο χώρο Δ^n για το παίγνιο πολλαπλών χρηστών το οποίο ταυτίζεται με το σημείο τέλειας ισορροπίας υποπαιγνίου Markov για το παίγνιο $G(\infty)$.

Θεώρημα 5.10

- A. Υπάρχει μοναδικό σημείο τέλειας ισορροπίας υποπαιγνίου Markov $x^* \in \Delta^n$ για το παίγνιο $G(\infty)$.
- B. Το μοναδικό σημείο τέλειας ισορροπίας υποπαιγνίου Markov x^* αποτελεί σταθερό σημείο για τον πίνακα $B = B_1 \cdots B_n$ στο χώρο Δ^n , δηλαδή ισχύει $Bx^* = x^*$.
- Γ. Για κάθε $x^0 \in \Delta^n$, η ακολουθία $x^k = B^k x^0$ συγκλίνει στο μοναδικό σημείο τέλειας ισορροπίας υποπαιγνίου Markov x^* .

Για την απόδειξη του θεωρήματος (5.10) εξετάζεται αρχικά η συνέχεια του παιγνίου $G(\infty)$ στο ∞ . Αυτό ισχύει επειδή το κέρδος του παίκτη i , $u_i = \delta_i^t x_i$, για την επιτευχθείσα συμφωνία X στη χρονική περίοδο t είναι συνεχής συνάρτηση. Επομένως, το σύνολο των τέλειων σημείων ισορροπίας υποπαιγνίου είναι συμπαγές.

Έστω $G^1(\infty)$ το υποπαίγνιο που ξεκινάει τη χρονική περίοδο $t=n$ με τον πρώτο παίκτη να υποβάλλει πρώτος προσφορά. Πρέπει να σημειωθεί ότι το παίγνιο $G^1(\infty)$ είναι ισόμορφο⁹ (isomorphic game) με το αρχικό $G(\infty)$ (119). Συνεπώς, τα σύνολα των σημείων τέλειας ισορροπίας υποπαιγνίου E_G και E_{G^1} για τα παίγνια $G(\infty)$ και $G^1(\infty)$, αντίστοιχα, είναι ίσα, δηλαδή $E_G = E_{G^1} \subset \Delta^n$. Γενικότερα, έστω $G^k(\infty)$ το υποπαίγνιο που ξεκινάει τη

⁹ Δύο παίγνια G και G' N -παικτών λέγονται ισόμορφα (isomorphic games) όταν υπάρχει αμφιμονοσήμαντη αντιστοιχία μεταξύ των κατανομών για τα παίγνια G και G' , για κάθε υποσύνολο $n' \leq n$ των παικτών, ώστε αν α και β δύο κατανομές του παιγνίου G και, αντίστοιχα, α' και β' δύο κατανομές του παιγνίου G' τότε ισχύει $\alpha \succ_{n'} \beta$, αν και μόνο αν, $\alpha' \succ_{n'} \beta'$ (119).

χρονική περίοδο $t = kn$, $k \in \mathbb{N}^*$, με τον πρώτο παίκτη να υποβάλλει πρώτος προσφορά. Τότε, το $G^k(\infty)$ είναι ισόμορφο του $G(\infty)$ και ισχύει $E = E_G = E_{G^k} \subset \Delta^n$, όπου E_{G^k} είναι το σύνολο των σημείων τέλειας ισορροπίας υποπαιγνίου του $G^k(\infty)$.

Η ιδιότητα της τελειότητας υποπαιγνίου υπαγορεύει ότι το $x \in E_G$ αποτελεί τέλειο σημείο ισορροπίας υποπαιγνίου Markov αν και μόνο αν υπάρχει αντίστοιχο $x' \in E_{G^k}$ για το οποίο ισχύει $x = Bx'$. Συνεπώς, ισχύει $E = B(E) = \dots = B^k(E)$. Δεδομένου ότι ο B είναι μη αναγόμενος και στοχαστικός τελεστής, υπάρχει μοναδικό σταθερό σημείο $x^* \in \Delta^n$ του B και ισχύει $x^* = \lim_{k \rightarrow \infty} B^k x^0$ για κάθε αρχική συνθήκη $x^0 \in \Delta^n$. Επομένως, ισχύει $E = \{x^*\} = \lim_{k \rightarrow \infty} B^k(\Delta^n)$. ■

5.4. Παραδείγματα Διαπραγματεύσεων

Στη συνέχεια ακολουθούν δύο παραδείγματα που υποδεικνύουν τον τρόπο υπολογισμού του τέλειου σημείου ισορροπίας σε κάθε περίπτωση.

5.4.1. Παράδειγμα 1^ο: Τριμερής Διαπραγμάτευση με Διαφορετικούς

Συντελεστές Διαπραγμάτευσης

Έστω δ_1 , δ_2 και δ_3 οι συντελεστές διαπραγμάτευσης των τριών παικτών. Για ένα τριών παικτών ορίζεται ο αντίστοιχος τελεστής διαπραγμάτευσης ως εξής

$$B_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1-\delta_2 & 1-\delta_3 \\ 0 & \delta_2 & 0 \\ 0 & 0 & \delta_3 \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} \delta_1 & 0 & 0 \\ 1-\delta_1 & 1 & 1-\delta_3 \\ 0 & 0 & \delta_3 \end{bmatrix}, B_3 = \begin{bmatrix} \delta_1 & 0 & 0 \\ 0 & \delta_2 & 0 \\ 1-\delta_1 & 1-\delta_2 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5-20)$$

Επομένως, $B = B_1 B_2 B_3$ είναι ο τελεστής διαπραγμάτευσης του τριμερούς παιγνίου. Ο τελεστής B έχει μοναδικό σταθερό σημείο στο χώρο Δ^3 , το οποίο αποτελεί το σημείο τέλειας ισορροπίας υποπαιγνίου Markov και υπολογίζεται από τη σχέση

$$\begin{bmatrix} x_1^* \\ x_2^* \\ x_3^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(1-\delta_2)(1-\delta_3)(1+\delta_3+\delta_2\delta_3)}{(1-\delta_1\delta_2\delta_3)^2 + \delta_1\delta_3(\delta_2-\delta_3) + \delta_1\delta_2(\delta_3-\delta_1) + \delta_2\delta_3(\delta_1-\delta_2)} \\ \frac{\delta_2(1-\delta_1)(1-\delta_3)(1+\delta_1+\delta_1\delta_3)}{(1-\delta_1\delta_2\delta_3)^2 + \delta_1\delta_3(\delta_2-\delta_3) + \delta_1\delta_2(\delta_3-\delta_1) + \delta_2\delta_3(\delta_1-\delta_2)} \\ \frac{\delta_3^2(1-\delta_1)(1-\delta_2)(1+\delta_2+\delta_1\delta_2)}{(1-\delta_1\delta_2\delta_3)^2 + \delta_1\delta_3(\delta_2-\delta_3) + \delta_1\delta_2(\delta_3-\delta_1) + \delta_2\delta_3(\delta_1-\delta_2)} \end{bmatrix}. \quad (5-21)$$

Όταν οι τρεις παίκτες έχουν τον ίδιο συντελεστή διαπραγμάτευσης, $\delta_1 = \delta_2 = \delta_3 = \delta$, ισχύει

$$B = \begin{bmatrix} 1-\delta+\delta^3 & 1-\delta & 1-\delta \\ \delta(1-\delta) & \delta(1-\delta+\delta^2) & \delta(1-\delta) \\ \delta^2(1-\delta) & \delta^2(1-\delta) & \delta^2 \end{bmatrix}. \quad (5-22)$$

Στην περίπτωση αυτή η σχέση υπολογισμού του σημείου τέλειας ισορροπίας (5-21) απλοποιείται ως εξής

$$\begin{bmatrix} x_1^* \\ x_2^* \\ x_3^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{1+\delta+\delta^2} \\ \frac{\delta}{1+\delta+\delta^2} \\ \frac{\delta^2}{1+\delta+\delta^2} \end{bmatrix}. \quad (5-23)$$

Επομένως, το σημείο τέλειας ισορροπίας υποπαιγνίου Markov x^* για το παίγνιο μεταξύ τριών με ταυτόσημους τελεστές διαπραγμάτευσης δίνεται από τη σχέση

$$x^* = \left(\frac{1}{1+\delta+\delta^2}, \frac{\delta}{1+\delta+\delta^2}, \frac{\delta^2}{1+\delta+\delta^2} \right). \quad (5-24)$$

5.4.2. Παράδειγμα 2^ο: Διαπραγμάτευση n-Παικτών με Ίδιους Συντελεστές Διαπραγμάτευσης

Ο τελεστής διαπραγμάτευσης B_i του παίκτη i , $i=1,2,\dots,n$, στην περίπτωση του παιγνίου μεταξύ n παικτών με ίδιους συντελεστές διαπραγμάτευσης $\delta_1 = \dots = \delta_n = \delta$ προκύπτει ως εξής

$$B_i = \begin{bmatrix} \delta & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \delta & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1-\delta & 1-\delta & \dots & 1-\delta & 1-\delta & 1-\delta & \dots & 1-\delta \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & \delta \end{bmatrix}. \quad (5-25)$$

Επομένως, ο τελεστής διαπραγμάτευσης του παιγνίου είναι

$$B = B_1 B_2 \dots B_n = \begin{bmatrix} 1-\delta + \delta^n & 1-\delta & 1-\delta & \dots & 1-\delta & 1-\delta \\ \delta - \delta^2 & \delta - \delta^2 + \delta^n & \delta - \delta^2 & \dots & \delta - \delta^2 & \delta - \delta^2 \\ \delta^2 - \delta^3 & \delta^2 - \delta^3 & \delta^2 - \delta^3 + \delta^n & \dots & \delta^2 - \delta^3 & \delta^2 - \delta^3 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \delta^{n-2} - \delta^{n-1} & \delta^{n-2} - \delta^{n-1} & \delta^{n-2} - \delta^{n-1} & \dots & \delta^{n-2} - \delta^{n-1} + \delta^n & \delta^{n-2} - \delta^{n-1} \\ \delta^{n-1} - \delta^n & \delta^{n-1} - \delta^n & \delta^{n-1} - \delta^n & \dots & \delta^{n-1} - \delta^n & \delta^{n-1} \end{bmatrix}. \quad (5-26)$$

Σύμφωνα με το θεώρημα (5-10), ο B είναι θετικός, κατά στήλη στοχαστικός πίνακας με μοναδικό σταθερό σημείο στο Δ^n . Αυτό το σταθερό σημείο αποτελεί το μοναδικό σημείο τέλειας ισορροπίας υποπαιγνίου Markov για το παίγνιο $G(\infty)$ και υπολογίζεται από τη σχέση

$$x^* = \left(\frac{1-\delta}{1-\delta^n}, \frac{\delta(1-\delta)}{1-\delta^n}, \frac{\delta^2(1-\delta)}{1-\delta^n}, \dots, \frac{\delta^{n-1}(1-\delta)}{1-\delta^n} \right). \quad (5-27)$$

5.5. Αναλυτικός Υπολογισμός του Σημείου Τέλειας Ισορροπίας

Στην υποενότητα αυτή παρέχεται η αναλυτική σχέση υπολογισμού του αποτελέσματος του παιγνίου διαπραγμάτευσης μεταξύ n παικτών. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται ένα γνωστό θεώρημα της θεωρίας πινάκων (120).

Θεώρημα 5.10

Έστω B ένας στοχαστικός πίνακας. Τότε, το όριο $\lim_{n \rightarrow \infty} B^n$ υπάρχει αν και μόνο αν ο πίνακας B είναι πρωταρχικός. Στην περίπτωση αυτή ισχύει

$$\lim_{n \rightarrow \infty} B^n = \frac{A(1)}{c'(1)}, \quad (5-28)$$

όπου $A(\lambda) = \text{adj}(\lambda I - B)$ ο συμπληρωματικός πίνακας (adjoint matrix) του $(\lambda I - B)$, $c(\lambda)$ το χαρακτηριστικό πολυώνυμο του B , $c(\lambda) = \det(\lambda I - B)$, και $c'(1)$ η πρώτη παράγωγος του $c(\lambda)$ υπολογισμένη στο $\lambda = 1$.

Ο τελεστής διαπραγμάτευσης B_k του k παίκτη μπορεί να ξαναγραφεί υπό μορφή σύνθετου πίνακα ως εξής

$$B_k = (b_{ij}^{(k)})_{n \times n} = \begin{bmatrix} B_{11}^{(k)} & B_{12}^{(k)} \\ B_{21}^{(k)} & B_{22}^{(k)} \end{bmatrix}, \quad (5-29)$$

όπου ο πίνακας $B_{11}^{(k)}$ έχει διάσταση 1×1 , δηλαδή αποτελείται από ένα μόνο στοιχείο, και ο πίνακας $B_{22}^{(k)}$ είναι ένας τετραγωνικός πίνακας διαστάσεων $(n-1) \times (n-1)$. Βάσει των $B_{11}^{(k)}$ και $B_{22}^{(k)}$ μπορούν εύκολα να υπολογιστούν οι διαστάσεις των $B_{12}^{(k)}$ και $B_{21}^{(k)}$ που είναι $1 \times (n-1)$ και $(n-1) \times 1$, αντίστοιχα. Ο τελεστής διαπραγμάτευσης του παιγνίου B μπορεί να γραφεί υπό μορφή που ανάλογη με αυτήν της (5-29) για τον πίνακα B_k . Συνεπώς

$$B = (b_{ij})_{n \times n} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix}, \quad (5-30)$$

Έστω η συνάρτηση $g(\delta_2, \delta_3, \dots, \delta_n) \equiv \det(I - B_{22})$ για την οποία ισχύει το ακόλουθο θεώρημα.

Θεώρημα 5.11

Η $g(\delta_2, \delta_3, \dots, \delta_n)$ είναι πολωνυμική συνάρτηση και ανεξάρτητη του συντελεστή διαπραγμάτευσης για τον πρώτο παίκτη δ_1 . Επιπλέον, ισχύει

$$g(\delta_2, \delta_3, \dots, \delta_n) \equiv \det(I - B_{22}) = \det(I - B_{22}^{(1)} B_{22}^{(2)} \dots B_{22}^{(n)}). \quad (5-31)$$

Από τη σχέση (5-29) μπορεί εύκολα να παρατηρηθεί ότι $B_{12}^{(k)}$ είναι μηδενικός για $k = 2, \dots, n$. Επομένως, ο υποπίνακας B_{12} του τελεστή διαπραγμάτευσης B είναι επίσης μηδενικός πίνακας. Συνεπώς, ισχύει $B_{22} = B_{22}^{(1)} B_{22}^{(2)} \dots B_{22}^{(n)}$, όπου κανένας από τους παράγοντες του γινομένου δεν εξαρτάται από το δ_1 . Άρα, η ορίζουσα $\det(I - B_{22})$ είναι πολωνυμική συνάρτηση των μεταβλητών $(\delta_2, \delta_3, \dots, \delta_n)$. ■

Έστω $g_k(\delta_1, \dots, \delta_{k-1}, \delta_{k+1}, \dots, \delta_n) = g(\delta_{k+1}, \dots, \delta_n, \delta_1, \dots, \delta_{k-1})$ η πολυωνυμική συνάρτηση $(n-1)$ μεταβλητών που προκύπτει αν περιστρέψουμε κυκλικά τους συντελεστές διαπραγμάτευσης στη συνάρτηση $g(\cdot)$. Στο θεώρημα που ακολουθεί παρουσιάζεται η αναλυτική σχέση υπολογισμού της λύσης του παιγνίου διαπραγμάτευσης n παικτών χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση $g_k(\cdot)$.

Θεώρημα 5.12

Το μοναδικό αποτέλεσμα της αποδοτικής διαπραγματευτικής συμφωνίας (efficient bargaining outcome) είναι $x^* = (x_1^*, \dots, x_n^*)$, όπου

$$x_k^* = \frac{\delta_k^{k-1} g_k(\delta_1, \dots, \delta_{k-1}, \delta_{k+1}, \dots, \delta_n)}{c'(1)}, \quad (5-31)$$

το μερίδιο του παίκτη k και $g_k(\delta_1, \dots, \delta_{k-1}, \delta_{k+1}, \dots, \delta_n) = \det(I - B_{22}^{(k)} \dots B_{22}^{(n)} B_{22}^{(1)} \dots B_{22}^{(k-1)})$.

Για την απόδειξη του θεωρήματος, αρχικά χρησιμοποιείται το αποτέλεσμα του θεωρήματος 5.10 από το οποίο είναι γνωστό ότι ισχύει $\lim_{n \rightarrow \infty} B^n = A(1)/c'(1)$ και $B A(1)/c'(1) = \lim_{n \rightarrow \infty} B^{n+1} = A(1)/c'(1)$, $B = B_1 B_2 \dots B_n$. Επομένως, κάθε στήλη του πίνακα $A(1)/c'(1)$ αποτελεί ένα ιδιοδιάνυσμα του πίνακα B το οποίο αντιστοιχεί σε μια μοναδική ιδιοτιμή. Οπότε, κάθε μη μηδενική στήλη του πίνακα $A(1)/c'(1)$ αποτελεί το αποτέλεσμα της διαπραγματευτικής συμφωνίας αφού ο τελεστής διαπραγμάτευσης B είναι πρωταρχικός πίνακας και η μοναδιαία ιδιοτιμή του έχει πολλαπλότητα ένα.

Στη συνέχεια εξετάζεται το στοιχείο $(1,1)$ του πίνακα $A(1)/c'(1)$, το οποίο είναι το $\det(I - B_{22})/c'(1)$, όπου ο πίνακας B_{22} είναι υποπίνακας του B . Για τον πίνακα B_{22} είναι γνωστό ότι είναι διαστάσεων $(n-1) \times (n-1)$ και ορίζεται ως $B_{22} = B_{22}^{(1)} B_{22}^{(2)} \dots B_{22}^{(n)}$, όπου κάθε ένας από τους $B_{22}^{(2)}, \dots, B_{22}^{(n)}$ είναι στοχαστικός πίνακας διαστάσεων $(n-1) \times (n-1)$ και ο $B_{22}^{(1)} = \text{diag}(\delta_2, \delta_3, \dots, \delta_n)$ είναι διαγώνιος πίνακας με φασματική ακτίνα μικρότερη της μονάδας. Αυτό σημαίνει ότι ο πίνακας B_{22} έχει επίσης φασματική ακτίνα μικρότερη της μονάδας. Επομένως, ισχύει $\det(I - B_{22}) \neq 0$, δηλαδή το πρώτο στοιχείο του πίνακα

$A(1)/c'(1)$ είναι μη μηδενικό και ισούται με το αποτέλεσμα της διαπραγματευτικής συμφωνίας, x^* . Συνεπώς, το μερίδιο του πρώτου παίκτη ταυτίζεται με το στοιχείο $(1,1)$ του πίνακα $A(1)/c'(1)$, δηλαδή $x_1^* = \det(I - B_{22})/c'(1) = g(\delta_2, \delta_3, \dots, \delta_n)/c'(1)$.

Κατά το δεύτερο κύκλο του παιγνίου ο δεύτερος παίκτης υποβάλλει προσφορά. Στην περίπτωση αυτή ο τελεστής διαπραγμάτευσης είναι $\tilde{B} = B_2 \dots B_n B_1$. Οι πίνακες B και \tilde{B} είναι όμοιοι, αφού ισχύει $B = B_1 \tilde{B} B_1^{-1}$, οπότε θα έχουν το ίδιο χαρακτηριστικό πολυώνυμο, δηλαδή $c_{\tilde{B}}(\lambda) = c_B(\lambda) = c(\lambda)$. Επιπλέον, οι πρώτες παράγωγοι των χαρακτηριστικών πολυωνύμων για τους δύο πίνακες είναι επίσης ίδιες, $c'_{\tilde{B}}(1) = c'_B(1) = c'(1)$.

Ισχύει $\det(I - \tilde{B}_{22}) = \det(I - B_{22}^{(2)} \dots B_{22}^{(n)} B_{22}^{(1)}) = g_2(\delta_1, \delta_3, \dots, \delta_n) = g(\delta_3, \dots, \delta_n, \delta_1)$, συνεπώς το μερίδιο του δεύτερου παίκτη αν αυτός εκκινούσε πρώτος τη διαδικασία προσφορών είναι $x_2^* = g(\delta_3, \dots, \delta_n, \delta_1)/c'(1)$. Στην προκειμένη περίπτωση, επειδή ο δεύτερος παίκτης υποβάλλει προσφορά κατά τη δεύτερη περίοδο, το μερίδιό του έχει μειωθεί σύμφωνα με το συντελεστή διαπραγμάτευσής του, δ_2 , άρα $x_2^* = \delta_2 g(\delta_3, \dots, \delta_n, \delta_1)/c'(1)$. Ακολουθώντας το ίδιο σκεπτικό προκύπτει ότι το αποτέλεσμα της αποδοτικής διαπραγματευτικής συμφωνίας για το μερίδιο του k παίκτη είναι $x_k^* = \delta_k^{k-1} g_k(\delta_1, \dots, \delta_{k-1}, \delta_{k+1}, \dots, \delta_n)/c'(1)$. ■

5.6. Εφαρμογή της Θεωρίας Παιγνίων στους Αλγόριθμους

Αποδοχής Κλήσεων

Στα επόμενα εδάφια παρουσιάζεται ο τρόπος χρήσης του παιγνίου διαπραγμάτευσης που παρουσιάστηκε προηγουμένως για τη δυναμική εκχώρηση των πόρων του δικτύου μεταξύ των χρηστών και τον υπολογισμό των παραμέτρων του πιθανοτικού αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων. Επιπλέον, παρουσιάζεται ο κατανεμημένος δυναμικός αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων και τα βελτιωμένα αποτελέσματα που επιτυγχάνει σε σχέση με άλλους αλγόριθμους αποδοχής κλήσεων που προτείνονται στη διεθνή βιβλιογραφία (35).

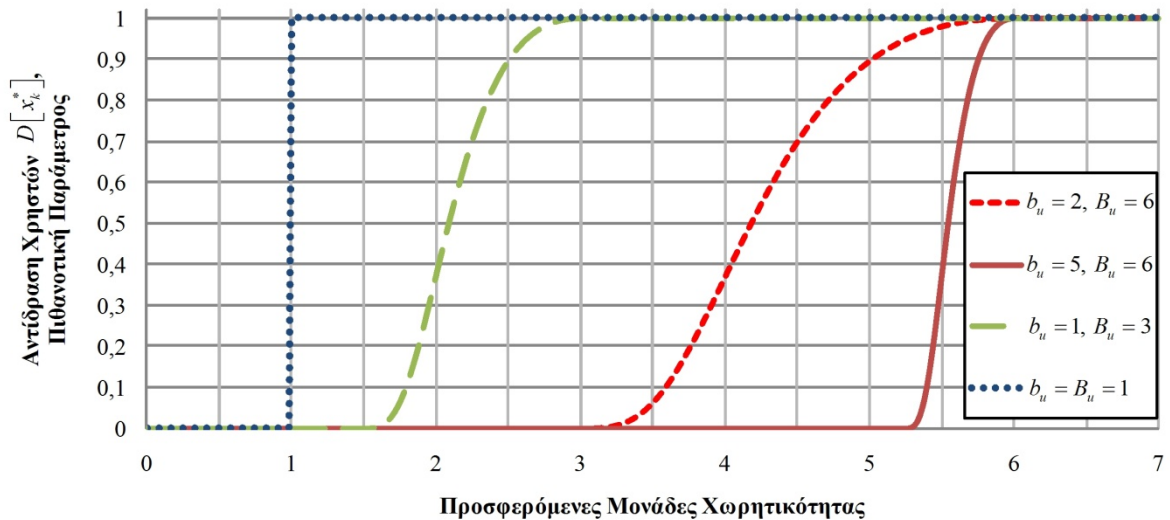
5.6.1. Δυναμική Εκχώρηση των Πόρων του Δικτύου

Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή του κεφαλαίου, οι σύγχρονες υπηρεσίες που υποστηρίζουν τα συστήματα κινητών επικοινωνιών έχουν τη δυνατότητα να μεταβάλλουν το ρυθμό μετάδοσης των εξυπηρετούμενων χρηστών μεταξύ ενός κατώτερου και ανώτερου ορίου. Έστω b_s και B_s το κατώτερο και ανώτερο όριο μονάδων χωρητικότητας, αντίστοιχα, για τις κλήσεις της S κλάσης υπηρεσιών. Η δυναμική μεταβολή των πόρων που αντιστοιχούν στους χρήστες έχει ως αποτέλεσμα την αντίστοιχη αλλαγή της συμπεριφοράς τους έναντι του δικτύου. Επομένως, οι εισερχόμενοι χρήστες αποφασίζουν να εισέλθουν στο δίκτυο ανάλογα με τους πόρους που τους προσφέρονται κάθε φορά από το δίκτυο, υπό την προϋπόθεση ότι δεν παραβιάζεται το κατώτερο όριο πόρων που αντιστοιχούν στο σύνολο των εξυπηρετούμενων χρηστών. Οι πόροι που αντιστοιχούν σε κάθε χρήστη είναι το αποτέλεσμα του παιγνίου διαμερισμού των πόρων όπως αυτό αναλύθηκε στις προηγούμενες ενότητες. Επομένως, το μερίδιο που αντιστοιχεί στον k παίκτη είναι $x_k^* = \delta_k^{k-1} g_k(\delta_1, \dots, \delta_{k-1}, \delta_{k+1}, \dots, \delta_n) / c'(1)$, $k = 1, \dots, n$, όπου $x^* = (x_1^*, \dots, x_n^*)$ είναι το αποτέλεσμα της αποδοτικής διαπραγματευτικής συμφωνίας για το παίγνιο.

Η αντίδραση των χρηστών στις μεταβολές των πόρων που διατίθενται από την κυψέλη για την εξυπηρέτησή τους προσδιορίζεται από τη συνάρτηση ζήτησης $D[x_k^*]$ (90). Συνεπώς, το αποτέλεσμα της συνάρτησης ζήτησης δηλώνει τη θέληση των χρηστών να αποδεχθούν τους προσφερόμενους πόρους της κυψέλης, όπως αυτοί προσδιορίζονται από το παίγνιο. Εκτός από το μερίδιο των πόρων που αντιστοιχεί σε κάθε χρήστη, η συνάρτηση ζήτησης εξαρτάται από τη χωρητικότητα M_j της j κυψέλης και τα όρια b_u και B_u για τους πόρους της κλάσης υπηρεσιών στην οποία αντιστοιχεί η κλήση. Επομένως, η συνάρτηση $D[x_k^*]$ ορίζεται ως εξής

$$D[x_k^*] = \begin{cases} 0, & \alpha\nu x_k^* M_j < b_u \\ \exp\left(-\left(\frac{B_u - b_u}{x_k^* M_j - b_u} - 1\right)^2\right), & \alpha\nu b_u \leq x_k^* M_j < B_u \\ 1, & \alpha\nu B_u \leq x_k^* M_j \end{cases} \quad (5-31)$$

Όπως απορρέει από τη σχέση (5-31) ένας χρήστης δεν αποδέχεται το μερίδιο πόρων x_k^* που προκύπτει από το παίγνιο, δηλαδή $D[x_k^*] = 0$, όταν αυτό υπολείπεται του κάτω ορίου b_u των πόρων, όπου u η κλάση υπηρεσιών στην οποία ανήκει ο χρήστης k .



Σχήμα 5-2: Διάγραμμα της συνάρτησης ζήτησης συναρτήσει των κατώτερων και ανώτερων ορίων μονάδων χωρητικότητας.

Αντιθέτως, αποδέχεται πλήρως το μερίδιο x_k^* όταν αυτό υπερβαίνει το αντίστοιχο άνω όριο των πόρων B_u που ορίζεται για την κλάση υπηρεσιών στην οποία ανήκει, δηλαδή $D[x_k^*] = 1$. Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση, το μερίδιο των πόρων που του προσφέρεται βρίσκεται μεταξύ του άνω και κάτω ορίου, οπότε η αντίδραση του χρήστη κλιμακώνεται από το μηδέν έως τη μονάδα, όπου το μηδέν αντιστοιχεί στην απόρριψη ενώ η μονάδα στην άνευ όρων αποδοχή της προσφοράς.

Στο Σχήμα 5-2 απεικονίζεται η συνάρτηση $D[x_k^*]$ για διάφορες τιμές του άνω και κάτω ορίου πόρων. Από το διάγραμμα παρατηρείται ότι όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά μεταξύ των ορίων αυτών τόσο ομαλότερη είναι η μετάβαση από την πλήρη απόρριψη, $D[x_k^*] = 0$, στην πλήρη αποδοχή, $D[x_k^*] = 1$, από το χρήστη των προσφερόμενων πόρων της κυψέλης. Επιπλέον, όταν τα όρια αυτά ταυτίζονται, δηλαδή η προσφερόμενη υπηρεσία δεν επιτρέπει διακύμανση στο πλήθος των πόρων του δικτύου που δεσμεύει κάθε κλήση της, τότε η μετάβαση από την απόρριψη στην πλήρη αποδοχή είναι ασυνεχής.

5.6.2. Υπολογισμός των Πιθανοτικών Παραμέτρων

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο τρόπος υπολογισμού των πιθανοτικών παραμέτρων για τον προτεινόμενο πιθανοτικό αλγόριθμο αποδοχής κλήσεων. Αρχικά, αναλύεται το

πρόβλημα υπολογισμού της πιθανότητας $a_{g(n_j),ij}$ για το διαμερισμό των πόρων εντός μιας συγκεκριμένης κλάσης υπηρεσιών και ακολουθεί η ανάλυση για τον τρόπο προσδιορισμού της πιθανοτικής παραμέτρου $b_{g(n_j),ij}$, που αποδίδει διαφορετική προτεραιότητα μεταξύ των κλήσεων διαφορετικών κλάσεων υπηρεσιών.

5.6.2.1. Μεταξύ Κλήσεων των Ίδιων Κλάσεων Υπηρεσιών

Στο παίγνιο εκχώρησης πόρων της κυψέλης μεταξύ n_u -χρηστών της ίδιας κλάσης υπηρεσιών χρησιμοποιείται το παίγνιο n_u -παικτών με κοινό συντελεστή διαπραγμάτευσης. Η χρησιμοποίηση του ίδιου συντελεστή διαπραγμάτευσης επιβάλλεται επειδή οι κλήσεις ανήκουν στην ίδια κλάση υπηρεσιών, οπότε έχουν κοινά χαρακτηριστικά. Επομένως, το μερίδιο των πόρων που λαμβάνει κάθε χρήστης δίνεται από την (5-27). Όπως προκύπτει από το παίγνιο, όσο αργότερα εισέρχεται ένας χρήστης-παίκτης στο παίγνιο τόσο μικρότερο μερίδιο πόρων λαμβάνει, αφού το μερίδιο πόρων που αντιστοιχεί σε ένα χρήστη πολλαπλασιάζεται με το μικρότερο της μονάδας συντελεστή δ .

Στην περίπτωση όπου ένας νέος χρήστης αυτής της κλάσης υπηρεσιών εισέλθει στο σύστημα, οι πόροι που αντιστοιχούν στις κλήσεις της κλάσης υπηρεσιών θα μοιραστούν σε $n+1$ χρήστες, δηλαδή θα μειωθούν σε σχέση με την προηγούμενη κατανομή σε

$$x^* = \left(\frac{1-\delta}{1-\delta^{n_u+1}}, \frac{\delta(1-\delta)}{1-\delta^{n_u+1}}, \frac{\delta^2(1-\delta)}{1-\delta^{n_u+1}}, \dots, \frac{\delta^{n_u-1}(1-\delta)}{1-\delta^{n_u+1}}, \frac{\delta^{n_u}(1-\delta)}{1-\delta^{n_u+1}} \right). \quad (5-32)$$

Η πιθανότητα αποδοχής της εισερχόμενης κλήσης από το δίκτυο ισούται με την τιμή της συνάρτησης $D[x_{n_u+1}^*]$, $a_{g(n_j),ij} = D[x_{n_u+1}^*]$, όπου $x_{n_u+1}^* = \delta^{n_u}(1-\delta)/(1-\delta^{n_u+1})$ το μερίδιο πόρων που αντιστοιχεί στο n_u+1 χρήστη. Πρέπει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση αυτή οι πόροι που ανατίθενται στην συγκεκριμένη κλάση υπηρεσιών διαμοιράζονται μεταξύ των χρηστών. Οι πόροι είναι ίσοι με τη χωρητικότητα της κυψέλης όταν το σύστημα ασύρματων επικοινωνιών υποστηρίζει μια μόνο κλάση υπηρεσιών. Σε κάθε άλλη περίπτωση, η παράμετρος M_j στη σχέση (5-31) αντικαθίσταται από την M_{ij} , που δηλώνει το πλήθος των πόρων που ανατίθενται στην u κλάση υπηρεσιών. Ο τρόπος υπολογισμού της παραμέτρου M_{ij} παρουσιάζεται στην επόμενη υποενότητα. Επομένως, η τιμή της πιθανότητας $a_{g(n_j),ij}$ υπολογίζεται από τη σχέση

$$a_{g(n_j).uj} = D[x_{n_u+1}^*] = \begin{cases} 0, & \alpha\nu x_{n_u+1}^* M_{uj} < b_u \\ \exp\left(-\left(\frac{B_u - b_u}{x_{n_u+1}^* M_{uj} - b_u} - 1\right)^2\right), & \alpha\nu b_u \leq x_{n_u+1}^* M_{uj} < B_u \\ 1, & \alpha\nu B_u \leq x_{n_u+1}^* M_{uj} \end{cases} \quad (5-33)$$

5.6.2.2. Μεταξύ Διαφορετικών Κλάσεων Υπηρεσιών

Στην περίπτωση όπου το σύστημα ασύρματων επικοινωνιών υποστηρίζει πολλαπλές κλάσεις υπηρεσιών, πρέπει να υπολογιστεί η πιθανότητα $b_{g(n_j).uj}$ που χρησιμοποιείται για την αποδοχή των εισερχόμενων κλήσεων της u κλάσης υπηρεσιών. Ο τρόπος είναι παρόμοιος με αυτόν που εφαρμόστηκε για προηγούμενες κλήσεις της ίδιας κλάσης υπηρεσιών. Η μόνη διαφορά έγκειται στο κατώτερο b_u και ανώτερο B_u όριο των πόρων που απαιτούνται από τις κλήσεις που αντιστοιχούν στην u κλάση υπηρεσιών, τα οποία ορίζονται ως εξής

$$b_u = n_u b_u, \quad (5-34\alpha)$$

$$B_u = n_u B_u. \quad (5-34\beta)$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι το πλήθος των χρηστών n_u που λαμβάνεται υπόψη στις σχέσεις (5-34α,β) είναι αυξημένο κατά ένα, $n_u + 1$, σε εκείνη την κλάση υπηρεσιών για την οποία υπάρχει αίτημα εξυπηρέτησης ενός νέου εισερχόμενου χρήστη.

Το παίγνιο που αναλύθηκε προηγουμένως εφαρμόζεται μεταξύ των διαφορετικών κλάσεων υπηρεσιών, έτσι ώστε να προκύψει το μερίδιο των πόρων που αντιστοιχεί σε καθεμία. Στη γενική περίπτωση, οι συντελεστές διαπραγμάτευσης των κλάσεων υπηρεσιών είναι διαφορετικοί, δ_u , $u = 1, \dots, U$, ώστε να υπάρχει δυνατότητα διαφοροποίησης μεταξύ τους ανάλογα με την προτεραιότητά τους και τις απαιτήσεις τους ως προς το επίπεδο ποιότητας υπηρεσιών που προσφέρουν. Συνεπώς, το αποτέλεσμα της αποδοτικής διαπραγματευτικής συμφωνίας για το μερίδιο x_u^* της u κλάσης υπηρεσιών προκύπτει από την (5-31) ως εξής

$$x_u^* = \frac{\delta_u^{u-1} g_u(\delta_1, \dots, \delta_{u-1}, \delta_{u+1}, \dots, \delta_U)}{c'(1)}. \quad (5-35)$$

Ωστόσο, αν οι διαφορές μεταξύ των χαρακτηριστικών διαφορετικών κλάσεων υπηρεσιών είναι μικρές είναι επιτρεπτό να χρησιμοποιηθεί ο ίδιος συντελεστής διαπραγμάτευσης για όλες τις κλάσεις. Στην περίπτωση αυτή, η παροχή διαφορετικών επιπέδων προτεραιότητας

μεταξύ των κλάσεων πραγματοποιείται μέσω της σειράς εισόδου των κλάσεων υπηρεσιών στο παίγνιο εκχώρησης πόρων. Όσο αργότερα εισέρχεται η κλάση στο παίγνιο τόσο μικρότερο είναι το επίπεδο προτεραιότητάς της.

Για τον προσδιορισμό της πιθανότητας $b_{g(n_j),uj}$ της u κλάσης υπηρεσιών χρησιμοποιείται η συνάρτηση $D[x_u^*]$ της (5-31) με τη διαφορά ότι στην περίπτωση των κλάσεων υπηρεσιών χρησιμοποιούνται τα όρια b_u και B_u . Συνεπώς,

$$b_{g(n_j),uj} = D[x_u^*] = \begin{cases} 0, & \alpha\nu x_u^* M_j < b_u \\ \exp\left(-\left(\frac{B_u - b_u}{x_u^* M_j - b_u} - 1\right)^2\right), & \alpha\nu b_u \leq x_u^* M_j < B_u \\ 1, & \alpha\nu B_u \leq x_u^* M_j \end{cases} \quad (5-36)$$

Ο προσδιορισμός του πλήθους των πόρων που ανατίθενται στην u κλάση υπηρεσιών, M_{uj} , μπορεί να γίνει επίσης βάσει του μεριδίου πόρων που αντιστοιχεί σε κάθε κλάση υπηρεσιών x_u^* , συνεπώς

$$M_{uj} = x_u^* M_j. \quad (5-37)$$

5.6.3. Περιγραφή του Δυναμικού Αλγόριθμου Αποδοχής Κλήσεων

Για να γίνει αποδεκτή μια εισερχόμενη κλήση από μια κυψέλη δεν αρκεί μόνο να αποδεχθεί ο αντίστοιχος χρήστης το μερίδιο πόρων που προκύπτει από το παίγνιο, αλλά πρέπει και οι υπόλοιποι χρήστες να αποδεχθούν τη μείωση του μεριδίου πόρων που τους αντιστοιχεί. Επομένως, μια εισερχόμενη κλήση της u κλάσης υπηρεσιών γίνεται αποδεκτή βάσει των πιθανοτικών παραμέτρων $a_{g(n_j),uj}$ και $b_{g(n_j),uj}$ υπό την προϋπόθεση ότι ισχύει

$$M_{uj} \geq b_u, \quad \forall u = 1, \dots, U \quad (5-38)$$

και

$$x_k^* M_{uj} \geq b_u, \quad \forall k = 1, \dots, n_u, \quad \forall u = 1, \dots, U. \quad (5-39)$$

Σύμφωνα με τις προηγούμενες σχέσεις κανένας χρήστης δεν μπορεί να λάβει μερίδιο πόρων μικρότερο του κάτω ορίου που αντιστοιχεί στην κλάση υπηρεσιών όπου ανήκει η κλήση του. Εξετάζοντας και τις δύο σχέσεις προκύπτει ότι ικανή και αναγκαία συνθήκη για να ισχύει η (5-38) αποτελεί η ικανοποίηση της (5-39). Επομένως, αρκεί να ελέγχεται κάθε φορά από τον αλγόριθμο αποδοχής κλήσεων η συνθήκη συγκατάθεσης στην αποδοχή μιας εισερχόμενης κλήσης για κάθε εξυπηρετούμενο χρήστη του δικτύου, δηλαδή η (5-39). Στην

περίπτωση όπου έστω και ένας χρήστης υπηρεσιών του δικτύου του οποίου η κλήση βρίσκεται σε εξέλιξη διαφωνήσει ως προς το νέο προσφερόμενο μερίδιο πόρων, η εισερχόμενη κλήση δε γίνεται αποδεκτή. Συνεπώς, η πιθανότητα αποδοχής $a_{g(n_j),uj}$ μιας εισερχόμενης κλήσης εντός της u κλάσης υπηρεσιών από το δίκτυο αποτελεί δεσμευμένη πιθανότητα που ορίζεται από την ακόλουθη σχέση

$$a_{g(n_j),uj} = \left\{ D \left[x_{n_u+1}^* \right] \mid x_k^* M_{uj} \geq b_u, \forall k = 1, \dots, n_u, \forall u = 1, \dots, U \right\}, \quad (5-40)$$

όπου το $D \left[x_{n_u+1}^* \right]$ ορίζεται από την (5-33). Με τον ίδιο τρόπο υπολογίζεται η αντίστοιχη πιθανοτική παράμετρος $b_{g(n_j),uj}$. Συνεπώς,

$$b_{g(n_j),uj} = \left\{ D \left[x_u^* \right] \mid x_k^* M_{uj} \geq b_u, \forall k = 1, \dots, n_u, \forall u = 1, \dots, U \right\}, \quad (5-41)$$

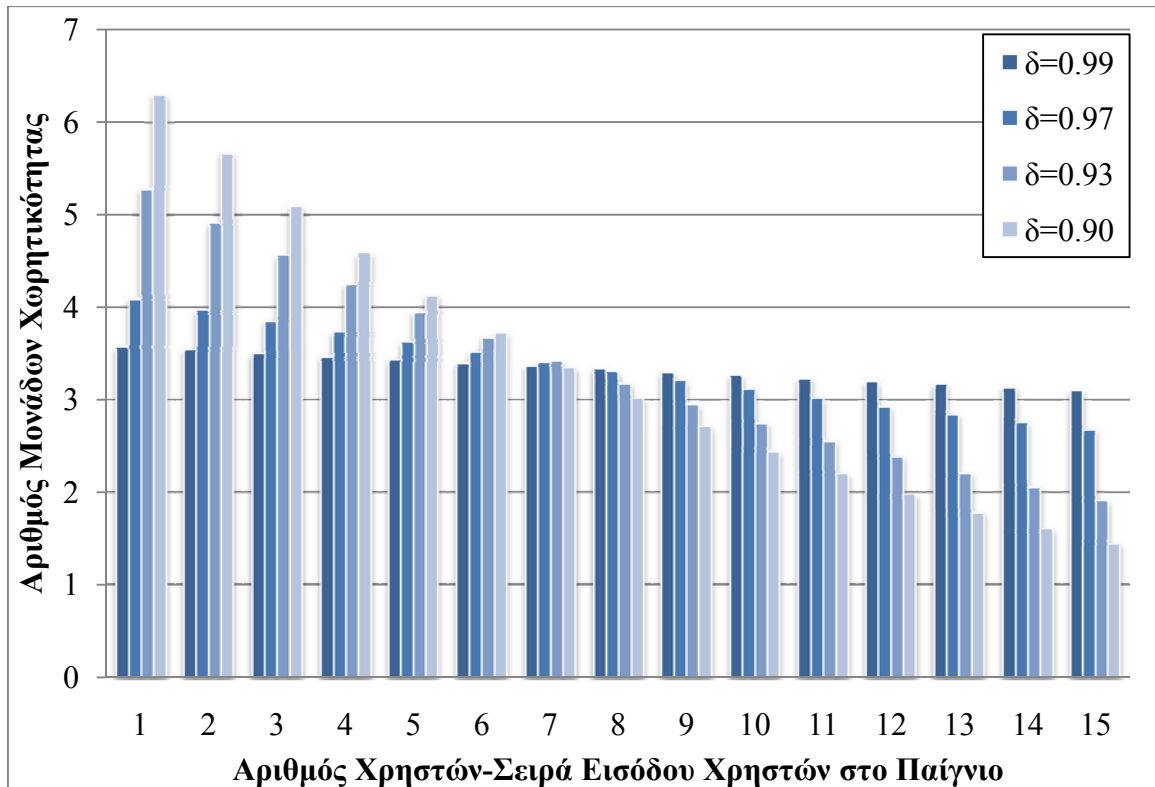
όπου το $D \left[x_u^* \right]$ ορίζεται από την (5-36). Στη συνέχεια, ο πιθανοτικός αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων εφαρμόζεται όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 3 και οι αντίστοιχες πιθανότητες μη αποδοχής κλήσεων προκύπτουν από τις αντίστοιχες σχέσεις που παρουσιάστηκαν για κάθε περίπτωση του δικτύου, χρησιμοποιώντας τις πιθανοτικές παραμέτρους των (5-40) και (5-41).

5.7. Αριθμητικά Αποτελέσματα

Στη συνέχεια εξετάζεται αρχικά η επίδοση του παιγνίου εκχώρησης πόρων και μετά ο κατανεμημένος πιθανοτικός αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων. Αν και ο τελευταίος έχει ενσωματωμένο το παίγνιο εκχώρησης πόρων, η αυτοτελής μελέτη του παιγνίου επιτρέπει την εξαγωγή συμπερασμάτων για την επίδραση της τιμής του συντελεστή διαπραγματεύσεως στον τρόπο κατανομής των πόρων του δικτύου.

5.7.1. Επίδοση του Παιγνίου Εκχώρησης Πόρων

Η επίδοση του προτεινόμενου κατανεμημένου αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων εξετάζεται μέσα από μια σειρά αριθμητικών αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται στη συνέχεια. Για ευκολία έχουν χρησιμοποιηθεί δύο κλάσεις υπηρεσιών, Real Time (RT) και Non Real Time (NRT) (121). Στις κλήσεις της κλάσης RT αποδίδεται απόλυτη προτεραιότητα έναντι των NRT κλήσεων. Επομένως, οι πρώτες θα γίνονται αποδεκτές από το δίκτυο εφόσον υπάρχουν αρκετές διαθέσιμες μονάδες χωρητικότητας να τις



Σχήμα 5-3: Πλήθος μονάδων χωρητικότητας ανά χρήστη βάσει της σειράς εισόδου του χρήστη στο παίγνιο. Η χωρητικότητα της κυψέλης έχει οριστεί ίση με 50 μονάδες χωρητικότητας, δηλαδή $M_j = M = 50$.

εξυπηρετήσουν. Συνεπώς, η πιθανοτική παράμετρος του αλγόριθμου που προκύπτει από το παίγνιο εκχώρησης πόρων χρησιμοποιείται μόνο στην περίπτωση των NRT κλήσεων.

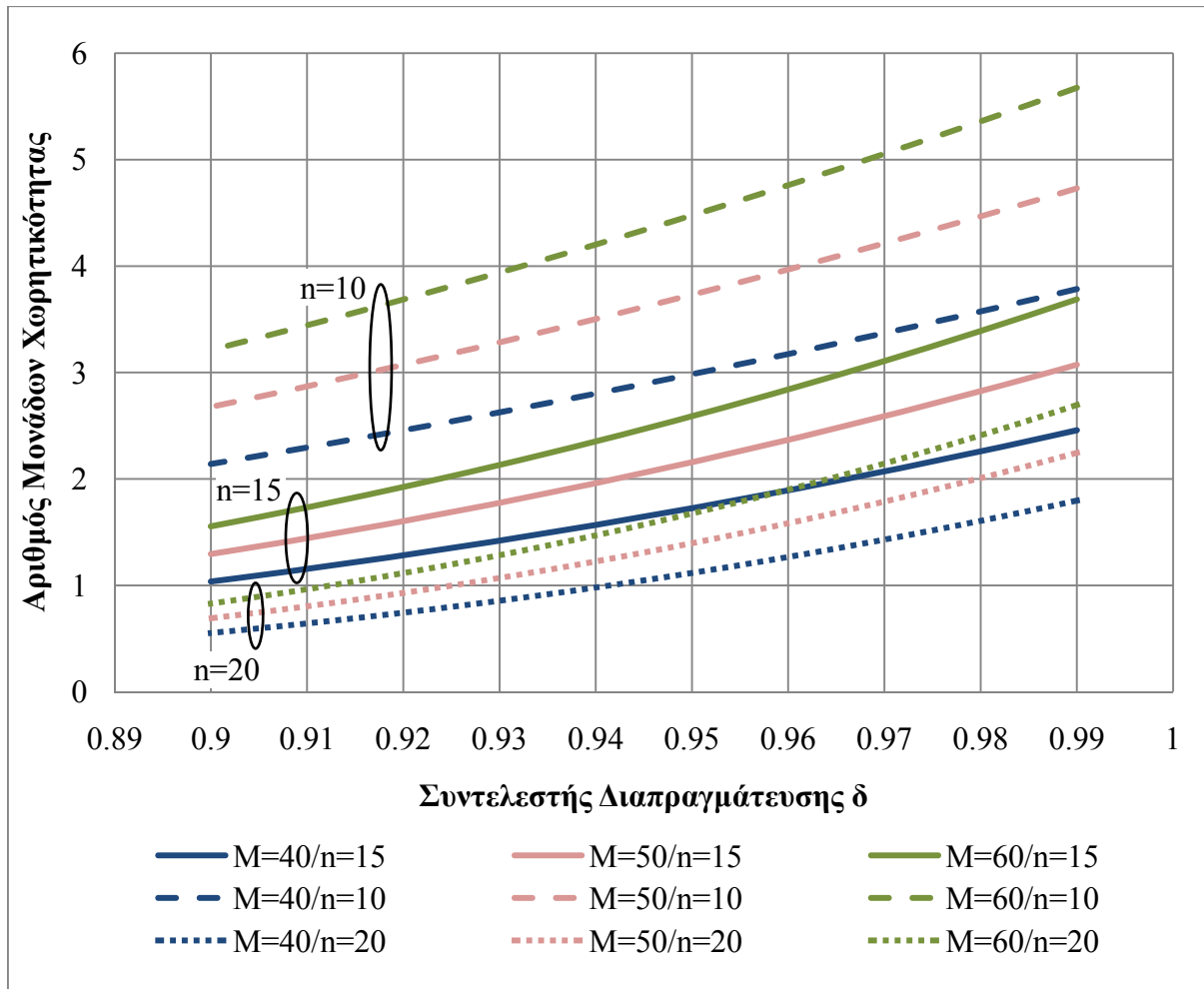
Αρχικά, μελετάται η λειτουργία του παιγνίου εκχώρησης πόρων για το οποίο χρησιμοποιείται κοινός συντελεστής διαπραγμάτευσης δ . Στο Σχήμα 5-3 παρουσιάζεται το πλήθος των μονάδων χωρητικότητας που αντιστοιχούν σε κάθε παίκτη-χρήστη για διαφορετικές τιμές του συντελεστή διαπραγμάτευσης. Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι το πλήθος των πόρων της κυψέλης που αντιστοιχούν σε κάθε χρήστη μειώνεται όσο αργότερα εισέρχεται ο παίκτης στο παίγνιο. Αυτό άλλωστε είναι αναμενόμενο αφού το μερίδιο κάθε παίκτη πολλαπλασιάζεται με $\delta < 1$ για κάθε περίοδο που παρέχεται μέχρι να εισέλθει στο παίγνιο (Σχέση 5-27). Επιπλέον, όσο μειώνεται η τιμή του συντελεστή διαπραγμάτευσης τόσο ανισότιμα κατανέμονται οι πόροι του δικτύου μεταξύ των χρηστών, αφού η διαφορά των κατανεμημένων πόρων μεταξύ πρώτου και τελευταίου χρήστη αυξάνεται με την αύξηση του δ . Επομένως, μεγαλύτερες τιμές του δ αντιστοιχεί σε περισσότερο δίκαιη κατανομή των πόρων μεταξύ των χρηστών του δικτύου. Αυτή η παρατήρηση έχει μεγάλη σημασία για την τιμή του δ που τελικά επιλέγεται από τον

πιθανοτικό αλγόριθμο αποδοχής κλήσεων, καθώς, όπως θα προκύψει από τα επόμενα διαγράμματα, επιλέγοντας μεγαλύτερη τιμή για το δ επιτυγχάνεται βελτιωμένη λειτουργία στο σύνολο του κατανεμημένου αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων.

Στο Σχήμα 5-4 μελετάται η επίδραση της χωρητικότητας της κυψέλης ($M_j = M$) και του πλήθους των χρηστών n εντός αυτής στον καθορισμό των μονάδων χωρητικότητας που κατανέμονται στον τελευταίο χρήστη για διάφορες τιμές του συντελεστή διαπραγμάτευσης δ . Η μελέτη επικεντρώνεται στον τελευταίο κατά σειρά εισόδου χρήστη αφού αυτός λαμβάνει τις λιγότερες μονάδες χωρητικότητας από το παίγνιο εκχώρησης πόρων. Επομένως, εφόσον ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις του τελευταίου κατά σειρά εισόδου χρήστη της κυψέλης είναι ευνόητο ότι έχουν ικανοποιηθεί και οι υπόλοιποι χρήστες. Από το διάγραμμα του Σχήματος 5-4 επιβεβαιώνεται το συμπέρασμα που προέκυψε και από το Σχήμα 5-3, δηλαδή οι πόροι της κυψέλης κατανέμονται δικαιότερα όσο αυξάνει η τιμή του δ , αφού όπως παρατηρείται οι πόροι του δικτύου που αντιστοιχούν στον τελευταίο χρήστη είναι περισσότεροι για μεγαλύτερες τιμές του συντελεστή διαπραγμάτευσης.

Επιπλέον, από το διάγραμμα προκύπτει ότι όσο αυξάνεται το πλήθος των χρηστών υπό δεδομένη χωρητικότητα της κυψέλης και σταθερή τιμή του δ , οι πόροι που αντιστοιχούν στον τελευταίο χρήστη μειώνονται. Αυτό είναι αναμενόμενο, αφού ένα σταθερό πλήθος πόρων κατανέμεται σε περισσότερους χρήστες. Όπως προκύπτει από το διάγραμμα, σημαντικό είναι το γεγονός ότι με κατάλληλη επιλογή της τιμής του δ μπορεί να επιτευχθεί ικανοποίηση των απαιτήσεων του τελευταίου χρήστη παρά την αύξηση του πλήθους των χρηστών. Ως παράδειγμα εξετάζεται η περίπτωση για την οποία οι ελάχιστες απαιτήσεις των χρηστών είναι 2 μονάδες χωρητικότητας και η χωρητικότητα της κυψέλης είναι 60. Αν επιλεγεί $\delta = 0.925$, επιτυγχάνεται ικανοποίηση των απαιτήσεων των χρηστών στην περίπτωση όπου το πλήθος τους είναι 15. Κάτι τέτοιο δε συμβαίνει όταν το πλήθος των χρηστών είναι 20. Στην περίπτωση αυτή απαιτείται η μεταβολή της τιμής του δ σε $\delta = 0.965$, ώστε να ικανοποιηθεί και ο 20^{ος} χρήστης. Επομένως, η μεταβολή της τιμής του συντελεστή διαπραγμάτευσης ανάλογα με το πλήθος των εξυπηρετούμενων κλήσεων είναι δυνατό να επιφέρει ικανοποίηση σε μεγαλύτερο πλήθος χρηστών.

Το προηγούμενο συμπέρασμα επιβεβαιώνεται από τα αποτελέσματα του διαγράμματος του Σχήματος 5-5, όπου παρουσιάζεται το πλήθος των χρηστών που μπορούν να ικανοποιηθούν συναρτήσει του συντελεστή διαπραγμάτευσης για δεδομένες ελάχιστες απαιτήσεις χρηστών και συγκεκριμένη χωρητικότητα κυψέλης. Η αύξηση της τιμής του συντελεστή διαπραγμάτευσης επιφέρει αύξηση του πλήθους των εξυπηρετούμενων

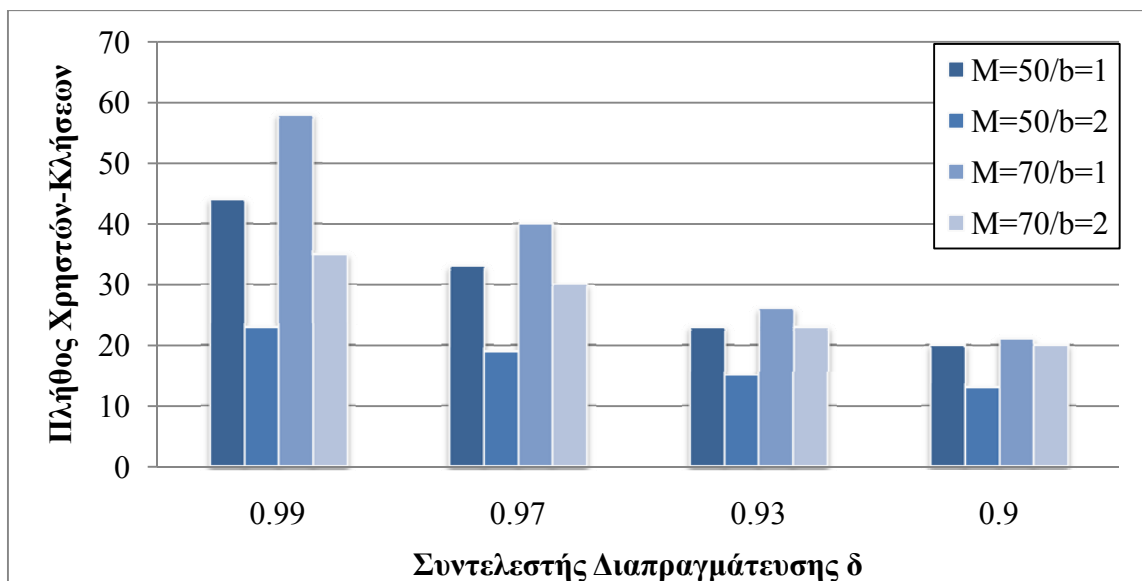


Σχήμα 5-4: Πλήθος μονάδων χωρητικότητας που αντιστοιχούν στον τελευταίο χρήστη ως συνάρτηση του συντελεστή διαπραγμάτευσης δ .

χρηστών, η οποία είναι εντονότερη όσο χαμηλότερες είναι οι ελάχιστες απαιτήσεις των χρηστών.

Επιπλέον, παρατηρείται ότι η μεταβολή της τιμής των ελάχιστων απαιτήσεων των χρηστών επιφέρει ανεπαίσθητη μεταβολή στο πλήθος των εξυπηρετούμενων χρηστών για πολύ χαμηλές τιμές του δ . Αυτό οφείλεται στο ότι για χαμηλές τιμές του συντελεστή διαπραγμάτευσης ο ρυθμός μείωσης των μεριδίων που αντιστοιχούν στους χρήστες είναι μεγάλος με αποτέλεσμα η μεταβολή των ελάχιστων απαιτήσεων να αντιστοιχεί σε ένα πολύ μικρό πλήθος χρηστών που βρίσκονται εντός του αντίστοιχου εύρους μεταβολής των μεριδίων που προκύπτουν από το παίγνιο.

Ένα ακόμα συμπέρασμα που προκύπτει από το διάγραμμα αφορά τη μεταβολή της χωρητικότητας της κυψέλης. Είναι αναμενόμενο να αυξάνεται το πλήθος των εξυπηρετούμενων χρηστών όταν αυξάνεται η χωρητικότητα μιας κυψέλης. Ωστόσο, το



Σχήμα 5-5: Μέγιστο πλήθος χρηστών που ικανοποιεί την απαίτηση για κατώτερο όριο μονάδων χωρητικότητας και μπορεί να εξυπηρετηθεί, ως συνάρτηση του συντελεστή διαπραγμάτευσης δ .

πλεονέκτημα της αυξημένης χωρητικότητας εξαλείφεται σταδιακά με μείωση του συντελεστή διαπραγμάτευσης.

5.7.2. Επίδοση του Κατανεμημένου Πιθανοτικού Αλγόριθμου Αποδοχής Κλήσεων

Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν έως τώρα περιορίστηκαν στην επίδοση του παιγνίου εκχώρησης πόρων. Στη συνέχεια, μελετάται η επίδοση του κατανεμημένου πιθανοτικού αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων, που ενσωματώνει το παίγνιο εκχώρησης πόρων, για διάφορες τιμές του συντελεστή διαπραγμάτευσης. Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην ενότητα αυτή, μια μικρή αλλαγή στην τιμή του δ επιφέρει σημαντικές μεταβολές στην πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων του αλγόριθμου.

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: α) υπό μεταβλητό RT φορτίο και β) υπό μεταβλητό NRT φορτίο. Οι παράμετροι της κυψέλης του δικτύου που χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-2.

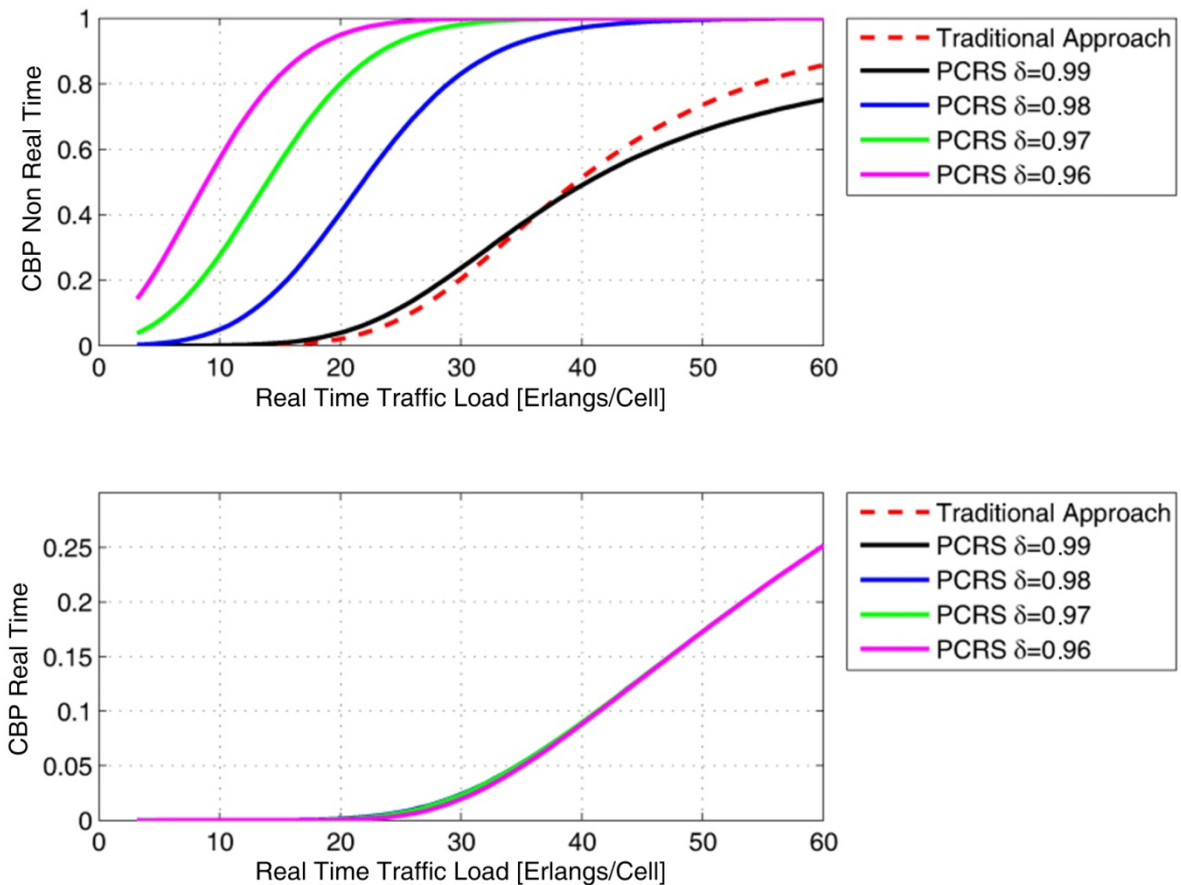
Στο Σχήμα 5-6 παρουσιάζεται η πιθανότητα μη αποδοχής του πιθανοτικού αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων υπό μεταβλητό RT φορτίο. Επιπλέον, στο ίδιο διάγραμμα παρουσιάζεται ο NRTL αλγόριθμος ο οποίος αποτελεί την κλασική προσέγγιση (Traditional

Παράμετρος	Μεταβλητό RT Φορτίο	Μεταβλητό NRT Φορτίο
$\lambda_{NRT,j}$	1/40	1/20
$\lambda_{RT,j}$	1/30	1/30
M_j		70
T_j		65
$\mu_{NRT,j}$	1/600	1/240 μέχρι 1/2400
$\mu_{RT,j}$	1/200 μέχρι 1/1200	1/350

Πίνακας 5-2: Τιμές παραμέτρων του δικτύου για την εφαρμογή του κατανεμημένου πιθανοτικού αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων για δύο κλάσεις υπηρεσιών.

Approach) που προτείνεται στη διεθνή βιβλιογραφία εφαρμόζοντας κατώφλια αποκοπής T_j για τις κλήσεις χαμηλής προτεραιότητας. Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος επιτυγχάνει καλύτερη επίδοση συγκριτικά με τον NRTL για υψηλές τιμές του συντελεστή διαπραγμάτευσης με κριτήριο την πιθανότητα μη αποδοχής των NRT κλήσεων. Πρέπει να σημειωθεί ότι η βελτιωμένη επίδοση του προτεινόμενου αλγόριθμου αυξάνει καθώς αυξάνεται το εισερχόμενο φορτίο. Η αντίστοιχη πιθανότητα μη αποδοχής των RT κλήσεων παραμένει σχεδόν ανεπηρέαστη από τη μεταβολή του δ και ταυτίζεται με την επίδοση που επιτυγχάνει ο NRTL αλγόριθμος. Αυτό είναι αναμενόμενο αφού σε αυτή τη σειρά αποτελεσμάτων το φορτίο NRT κλήσεων θεωρείται σταθερό, οπότε η μεταβολή του συντελεστή δ υπό μεταβλητό RT φορτίο έχει αμελητέα επίπτωση στην πιθανότητα μη αποδοχής των RT κλήσεων.

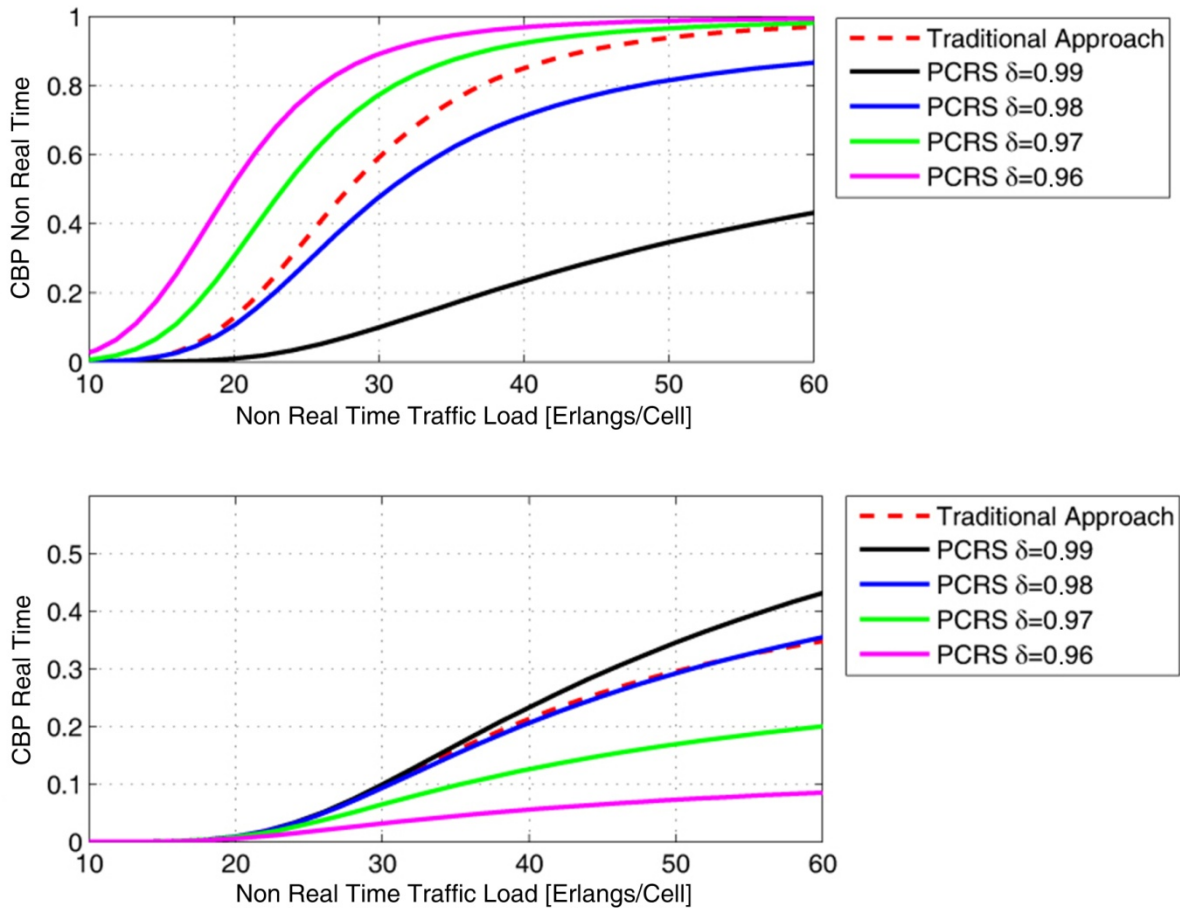
Στο Σχήμα 5-7 απεικονίζεται η πιθανότητα μη αποδοχής των NRT και RT κλήσεων υπό μεταβλητό NRT φορτίο για διάφορες τιμές του συντελεστή διαπραγμάτευσης. Τα αποτελέσματα αυτά είναι ιδιαίτερα σημαντικά καθώς η χρήση μεταβλητού NRT φορτίου αποκαλύπτει τα πλεονεκτήματα της εφαρμογής πιθανότητας για την αποδοχής τους, η οποία προκύπτει από το παίγνιο εκχώρησης πόρων. Από την παρατήρηση και των δύο διαγραμμάτων του σχήματος προκύπτει ότι με κατάλληλη επιλογή της τιμής του συντελεστή διαπραγμάτευσης είναι δυνατό να επιτευχθεί βελτιωμένη απόδοση του



Σχήμα 5-6: Διαγράμματα πιθανότητας μη αποδοχής των NRT και RT κλήσεων υπό μεταβλητό RT φορτίο για διάφορες τιμές του συντελεστή διαπραγμάτευσης δ .

προτεινόμενου αλγόριθμου έναντι του NRTL. Ως παράδειγμα αναφέρεται η τιμή $\delta = 0.98$ για την οποία ο πιθανοτικός αλγόριθμος επιτυγχάνει χαμηλότερη πιθανότητα μη αποδοχής των NRT κλήσεων σε σχέση με τον NRTL, ενώ οι αντίστοιχες πιθανότητες μη αποδοχής των RT κλήσεων είναι σχεδόν ίσες. Ωστόσο, μέσω του κατανεμημένου αλγόριθμου αποδοχής κλήσεων προσφέρεται η δυνατότητα για επίτευξη ακόμα χαμηλότερης πιθανότητας μη αποδοχής των RT κλήσεων επιλέγοντας μικρότερες τιμές του συντελεστή διαπραγμάτευσης, με μικρή βέβαια αύξηση της αντίστοιχης πιθανότητας των NRT κλήσεων.

Επιπλέον, πρέπει να σημειωθεί ότι η μείωση της τιμής του συντελεστή διαπραγμάτευσης αυξάνει την πιθανότητα μη αποδοχής των NRT κλήσεων, ενώ μειώνει την αντίστοιχη πιθανότητα μη αποδοχής των RT κλήσεων. Αυτό οφείλεται στο ότι χαμηλότερες τιμές του δ αντιστοιχούν σε μικρότερα μερίδια πόρων για τον τελευταίο χρήστη που εισάγεται στην κυψέλη. Επομένως, μειώνεται αντίστοιχα η πιθανότητα



Σχήμα 5-7: Διαγράμματα πιθανότητας μη αποδοχής των NRT και RT κλήσεων υπό μεταβλητό NRT φορτίο για διάφορες τιμές του συντελεστή διαπραγμάτευσης δ .

αποδοχής NRT κλήσεων από το δίκτυο.

Τα πλεονεκτήματα του κατανεμημένου πιθανοτικού αλγόριθμου δεν περιορίζονται μόνο στα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν προηγουμένως. Ιδιαίτερα σημαντικό είναι το ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος ενσωματώνει χαρακτηριστικά κατανεμημένου αλγόριθμου, όπου οι χρήστες αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και τελικά η απόφαση λαμβάνεται από τον εισερχόμενο χρήστη και όχι από τον κεντρικό σταθμό βάσης. Επιπλέον, ο προτεινόμενος αλγόριθμος περιλαμβάνει τη χρήση ενός παιγνίου κατανομής πόρων, το οποίο κατανέμει δυναμικά τους πόρους του δικτύου στους χρήστες, δηλαδή ανάλογα με τις μεταβολές του πλήθους των εξυπηρετούμενων χρηστών. Επομένως, ο αλγόριθμος μεταβάλλει δυναμικά το κριτήριο αποδοχής αντίστοιχα προς τις αλλαγές των χαρακτηριστικών του δικτύου ενσωματώνοντας, εκτός από το κατανεμημένο χαρακτήρα και την ιδιότητα της δυναμικής συμπεριφοράς.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Ανάλυση Απλή Ουράς Αναμονής

Οι διαδικασίες γεννήσεων-θανάτων είναι χρήσιμες για την περιγραφή συστημάτων όπου διάφορες διεργασίες, μια κάθε φορά και όχι σε ομάδες, εισέρχονται στο ή εξέρχονται από το σύστημα. Η κατάσταση του συστήματος μπορεί να περιγραφεί από το πλήθος των διεργασιών n εντός αυτού. Μια άφιξη νέας διεργασίας καλείται γέννηση και έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή της κατάστασης από n σε $n+1$. Αντιστοίχως, η αναχώρηση μιας διεργασίας από το σύστημα καλείται θάνατος και επιφέρει αλλαγή της κατάστασης από n σε $n-1$. Σύμφωνα με τους δύο αυτούς κανόνες, το σύστημα μπορεί να περιγραφεί ως μια διαδικασία γεννήσεων-θανάτων.

Στο παράρτημα αυτό παρουσιάζεται ο τρόπος υπολογισμού της πιθανότητας σταθερής κατάστασης (steady state probability) του συστήματος για μια απλή ουρά αναμονής (122). Το διάγραμμα καταστάσεων της διαδικασίας γεννήσεων-θανάτων παρουσιάζεται στο Σχήμα Α-1. Ο μέσος ρυθμός γεννήσεων όταν το σύστημα βρίσκεται στην κατάσταση n συμβολίζεται με λ_n και υποτίθεται ότι περιγράφεται στατιστικά μέσω της κατανομής Poisson. Ο μέσος ρυθμός θανάτων όταν το σύστημα βρίσκεται στην κατάσταση n συμβολίζεται με μ_n και υποτίθεται ότι περιγράφεται από την εκθετική κατανομή. Με βάση το επόμενο θεώρημα υπολογίζονται οι πιθανότητες σταθερής κατάστασης του συστήματος.

Θεώρημα Α.1

Η πιθανότητα ώστε μια διαδικασία γεννήσεων-θανάτων να βρίσκεται στην κατάσταση n ονομάζεται πιθανότητα σταθερής κατάστασης p_n και υπολογίζεται από τη σχέση

$$p_n = \frac{\lambda_0 \lambda_1 \cdots \lambda_{n-1}}{\mu_1 \mu_2 \cdots \mu_n} p_0, \quad n = 1, 2, \dots, \infty, \quad (\text{A-1})$$

όπου $n = 1, 2, \dots, \infty$ είναι οι καταστάσεις του συστήματος και p_0 είναι η πιθανότητα της μηδενικής κατάστασης.

Για την απόδειξη του θεωρήματος γίνεται η υπόθεση ότι για μια τυχαία χρονική στιγμή t το σύστημα βρίσκεται στην κατάσταση j , δηλαδή υπάρχουν j διεργασίες εντός αυτού. Στο επόμενο χρονικό διάστημα Δt , το οποίο υποτίθεται ότι είναι πολύ μικρής διάρκειας, το σύστημα μπορεί να μεταβεί στην $j+1$, που αντιστοιχεί στην άφιξη μιας νέας διεργασίας, ή στην $j-1$ κατάσταση, που αντιστοιχεί στην αναχώρηση μιας διεργασίας από το σύστημα, με πιθανότητες

$$\Pr \{n(t + \Delta t) = j + 1 \mid n(t) = j\} = \lambda_j \Delta t, \quad (\text{A-2}\alpha)$$

και

$$\Pr \{n(t + \Delta t) = j - 1 \mid n(t) = j\} = \mu_j \Delta t, \quad (\text{A-2}\beta)$$

αντίστοιχα. Αν καμία διεργασία δεν εισέλθει στο ή αναχωρήσει από το σύστημα, τότε αυτό παραμένει στην κατάσταση j με πιθανότητα

$$\Pr \{n(t + \Delta t) = j \mid n(t) = j\} = 1 - \lambda_j \Delta t - \mu_j \Delta t. \quad (\text{A-2}\gamma)$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι το Δt είναι αρκετά μικρό ώστε η πιθανότητα να συμβούν δύο ή περισσότερες ενέργειες (δύο αφίξεις, δύο αναχωρήσεις ή μια άφιξη και μια αναχώρηση) εντός του Δt είναι μηδέν.

Έστω $p_j(t)$ η πιθανότητα το σύστημα να βρίσκεται στην κατάσταση j τη χρονική στιγμή t . Με βάση την πιθανότητα $p_j(t)$ και το Σχήμα A-1 γράφεται το ακόλουθο σύστημα γραμμικών εξισώσεων

$$\begin{aligned} p_0(t + \Delta t) &= (1 - \lambda_0 \Delta t) p_0(t) + \mu_1 \Delta t p_1(t) \\ p_1(t + \Delta t) &= \lambda_0 \Delta t p_0(t) + (1 - \mu_1 \Delta t - \lambda_1 \Delta t) p_1(t) + \mu_2 \Delta t p_2(t) \\ p_2(t + \Delta t) &= \lambda_1 \Delta t p_1(t) + (1 - \mu_2 \Delta t - \lambda_2 \Delta t) p_2(t) + \mu_3 \Delta t p_3(t) \\ &\vdots \\ p_j(t + \Delta t) &= \lambda_{j-1} \Delta t p_{j-1}(t) + (1 - \mu_j \Delta t - \lambda_j \Delta t) p_j(t) + \mu_{j+1} \Delta t p_{j+1}(t) \end{aligned} \quad (\text{A-3})$$

Από την j εξίσωση του συστήματος εξισώσεων (A-3) προκύπτει

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{p_j(t + \Delta t) - p_j(t)}{\Delta t} = \lambda_{j-1} p_{j-1}(t) - (\mu_j + \lambda_j) p_j(t) + \mu_{j+1} p_{j+1}(t)$$

$$\frac{dp_j(t)}{dt} = \lambda_{j-1} p_{j-1}(t) - (\mu_j + \lambda_j) p_j(t) + \mu_{j+1} p_{j+1}(t) \quad (\text{A-4})$$

Όταν το σύστημα έχει σταθεροποιηθεί η πιθανότητα $p_j(t)$ πλησιάζει τη σταθερή τιμή p_j , δηλαδή

$$\lim_{t \rightarrow \infty} p_j(t) = p_j \quad (\text{A-5})$$

και

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{dp_j(t)}{dt} = 0. \quad (\text{A-6})$$

Με αντικατάσταση των (A-5) και (A-6) στην (A-4) προκύπτει

$$0 = \lambda_{j-1} p_{j-1} - (\mu_j + \lambda_j) p_j + \mu_{j+1} p_{j+1}. \quad (\text{A-7})$$

Επομένως,

$$p_{j+1} = \left(\frac{\mu_j + \lambda_j}{\mu_{j+1}} \right) p_j - \frac{\lambda_{j-1}}{\mu_{j+1}} p_{j-1}, \quad (\text{A-8α})$$

όπου $j = 1, 2, 3, \dots$ και

$$p_1 = \frac{\lambda_0}{\mu_1} p_0. \quad (\text{A-8β})$$

Από την επίλυση του συστήματος εξισώσεων (A-8) προκύπτει

$$p_n = \frac{\lambda_0 \lambda_1 \cdots \lambda_{n-1}}{\mu_1 \mu_2 \cdots \mu_n} p_0$$

$$= p_0 \prod_{j=0}^{n-1} \frac{\lambda_j}{\mu_{j+1}}, \quad n = 1, 2, \dots, \infty \quad (\text{A-9}) \quad \blacksquare$$

Το θεώρημα A.1 επιτρέπει τον υπολογισμό των πιθανοτήτων σταθερής κατάστασης p_n συναρτήσει της πιθανότητας της μηδενικής κατάστασης p_0 , η οποία μπορεί να υπολογιστεί από την επιπλέον συνθήκη που οφείλουν να πληρούν οι πιθανότητες σταθερής κατάστασης του συστήματος, ότι, δηλαδή, το άθροισμά τους είναι ίσο με τη μονάδα. Συνεπώς,

$$p_0 = \frac{1}{1 + \sum_{n=1}^{\infty} \prod_{j=0}^{n-1} \frac{\lambda_j}{\mu_{j+1}}}. \quad (\text{A-10})$$

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Απόδειξη Ύπαρξης Μοναδικού Σημείου Τέλεια Ισορροπίας Υποπαιγνίου για το Παίγνιο Rubinstein- Ståhl

Έστω \underline{u} και \bar{u} το ελάχιστο και μέγιστο κέρδος του πρώτου παίκτη, αντίστοιχα, που προκύπτει αν συνεχιστεί το παίγνιο όταν ο πρώτος παίκτης έχει αρχίσει την κατάθεση προσφορών. Στην αντίθετη περίπτωση, δηλαδή όταν ο δεύτερος παίκτης έχει εκκινήσει την κατάθεση προσφορών, το ελάχιστο και μέγιστο κέρδος του πρώτου παίκτη αν συνεχιστεί το παίγνιο συμβολίζεται με \underline{w}_1 και \bar{w}_1 αντίστοιχα. Τα σύμβολα αυτά μαζί με τα αντίστοιχα του δεύτερου παίκτη παρουσιάζονται στον Πίνακα Β-1.

Όταν ο πρώτος παίκτης υποβάλλει προσφορά, ο δεύτερος παίκτης την αποδέχεται αν το κέρδος του μεριδίου που του αναλογεί υπερβαίνει το $\delta_2 \bar{u}_2$, καθώς δε μπορεί να λάβει μεγαλύτερο κέρδος από το \bar{u}_2 στη συνέχεια του παιγνίου. Επομένως, ισχύει

$$\underline{u}_1 \geq 1 - \delta_2 \bar{u}_2. \quad (\text{B-1})$$

Ομοίως, για τον πρώτο παίκτη προκύπτει ότι αποδέχεται οποιαδήποτε προσφορά της οποίας το κέρδος του μεριδίου υπερβαίνει το $\delta_1 \bar{w}_1$. Επιπλέον,

$$\underline{u}_2 \geq 1 - \delta_1 \bar{w}_1. \quad (\text{B-2})$$

Παίκτης	Παίκτης που		
	Εκκινεί τις Προσφορές	Ελάχιστο Κέρδος	Μέγιστο Κέρδος
Πρώτος	Πρώτος Παίκτης	\underline{u}_1	\bar{u}_1
	Δεύτερος Παίκτης	\underline{w}_1	\bar{w}_1
Δεύτερος	Πρώτος Παίκτης	\underline{u}_2	\bar{u}_2
	Δεύτερος Παίκτης	\underline{w}_2	\bar{w}_2

Πίνακας Β-1: Παράμετροι μέγιστου και ελάχιστου κέρδους για τους δύο παίκτες του παιχνιδιού Rubinstein-Ståhl

Επειδή ο δεύτερος παίκτης δε θα προσφέρει ποτέ στον πρώτο μερίδιο η αξία του οποίου θα υπερβαίνει το $\delta_1 \bar{u}_1$, το \bar{w}_1 είναι το πολύ ίσο με $\delta_1 \bar{u}_1$. Εφόσον ο δεύτερος παίκτης μπορεί να λάβει τουλάχιστον \underline{u}_2 στη συνέχεια του παιχνιδιού απορρίπτοντας την προσφορά του πρώτου παίκτη, ο δεύτερος παίκτης απορρίπτει οποιαδήποτε προσφορά η αξία της οποίας είναι μικρότερη του $\delta_2 \underline{u}_2$. Επομένως,

$$\bar{u}_1 \leq \max(1 - \delta_2 \underline{u}_2, \delta_1 \bar{w}_1) \leq \max(1 - \delta_2 \underline{u}_2, \delta_1^2 \bar{u}_1). \quad (\text{B-3})$$

Επίσης, εύκολα αποδεικνύεται ότι

$$\max(1 - \delta_2 \underline{u}_2, \delta_1^2 \bar{u}_1) = 1 - \delta_2 \underline{u}_2. \quad (\text{B-4})$$

Αν δεν ίσχυε η (B-4) τότε προκύπτει $\bar{u}_1 < \delta_1^2 \bar{u}_1$, δηλαδή $\bar{u}_1 < 0$, γεγονός που είναι άτοπο.

Άρα, εφόσον $\delta_1 \leq 1$ και $\underline{u}_2 \leq 1$, ισχύει η (B-4). Επομένως, προκύπτει

$$\bar{u}_1 \leq 1 - \delta_2 \underline{u}_2. \quad (\text{B-5})$$

Ομοίως, αποδεικνύεται ότι

$$\bar{u}_2 \leq 1 - \delta_1 \underline{u}_1. \quad (\text{B-6})$$

Συνδυάζοντας τις ανισότητες (B-1), (B-2), (B-5) και (B-6) προκύπτει

$$\underline{u}_1 \geq 1 - \delta_2 \bar{u}_2 \geq 1 - \delta_2 (1 - \delta_1 \underline{u}_1) \Leftrightarrow$$

$$v_1 \geq \frac{1-\delta_2}{1-\delta_1\delta_2}. \quad (\text{B-7})$$

και

$$\bar{v}_1 \leq 1-\delta_2 v_2 \leq 1-\delta_2(1-\delta_1\bar{v}_1) \Leftrightarrow$$

$$\bar{v}_1 \leq \frac{1-\delta_2}{1-\delta_1\delta_2}. \quad (\text{B-8})$$

Εφόσον $v_1 \leq \bar{v}_1$, από τις (B-7) και (B-8) προκύπτει

$$v_1 = \bar{v}_1 = \frac{1-\delta_2}{1-\delta_1\delta_2}. \quad (\text{B-9})$$

Ανάλογα, προκύπτουν

$$v_2 = \bar{v}_2 = \frac{1-\delta_1}{1-\delta_1\delta_2}, \quad (\text{B-10})$$

$$w_1 = \bar{w}_1 = \frac{\delta_1(1-\delta_2)}{1-\delta_1\delta_2}, \quad (\text{B-11})$$

και

$$w_2 = \bar{w}_2 = \frac{\delta_2(1-\delta_1)}{1-\delta_1\delta_2}. \quad (\text{B-12})$$

Επομένως, το σημείο τέλειας ισορροπίας υποπαιγνίου είναι

$$x^* = \left(\frac{1-\delta_2}{1-\delta_1\delta_2}, \frac{\delta_2(1-\delta_1)}{1-\delta_1\delta_2} \right). \quad (\text{B-13}) \quad \blacksquare$$

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. *The Cellular Concept*. **McDonald, H. V.** 1, January 1979, Bell Systems Technical Journal, Vol. 58, pp. 15-49.
2. *Overview of Wireless Personal Communications*. **Padgett, Jay E., Günther, Christoph G. and Hattori, Takeshi.** 1, January 1995, IEEE Communications Magazine, Vol. 33, pp. 28-41.
3. *Forward error correction strategies for media streaming over wireless networks*. **Nafaa, A., Taleb, T. and Murphy, L.** 1, January 2008, IEEE Communications Magazine, Vol. 46, pp. 72 -79.
4. *Forward error correction schemes for digital communications*. **Bhargava, V.** 1, January 1983, IEEE Communications Magazine, Vol. 21, pp. 11 - 19.
5. *Time slot assignment techniques for TDMA digital cellular systems*. **Sourour, E.** 1, February 1994, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 43, pp. 121 -127.
6. *Time-slot management in digital portable radio systems*. **Bernhardt, R. C.** 1, February 1991, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 40, pp. 261 -272.
7. *Securing the wireless internet*. **Gupta, V. and Gupta, S.** 12, December 2001, IEEE Communications Magazine, Vol. 39, pp. 68 -74.
8. *Securing ad hoc networks*. **Zhou, L. and Haas, Z. L.** 6, November-December 1999, IEEE Network, Vol. 13, pp. 24 -30.
9. **Halonen, T., Romero, J. and Melero, J.** *GSM, GPRS and EDGE Performance: Evolution Towards 3G/UMTS*. Chichester, England : Wiley, October, 2003.
10. *Overview of the GSM System and Protocol Architecture*. **Rahnema, Moe.** 4, 1993, IEEE Communications Magazine, Vol. 31, pp. 92 - 100 .
11. **Heine, G.** *GPRS, EDGE, HSCSD, and the Path to 3G*. s.l. : Artech House Publishers, October, 2000.
12. *A survey of mobile data networks*. **Salkintzis, K. A.** 3, Third Quarter 1999, IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 2, pp. 2 - 18.
13. *Wireless LAN design alternatives*. **Bantz, D. F. and Bauchot, F. J.** 2, March-April 1994, IEEE Network, Vol. 8, pp. 43 - 53.
14. *Design Alternatives for Wireless Local Area Networks*. **Nicopolitidis, P., Papadimitriou, G. I. and Pomportsis, A. S.** 1, s.l. : Wiley, January 2001, International Journal of Communication Systems, Vol. 14, pp. 1 - 42.

15. **Johnsson, M.** *HIPERLAN/2: The Broadband Radio Transmission Technology Operating in the 5 GHz Frequency Band.* s.l. : HiperLAN/2 Global Forum, 1999.
16. *Overview and Performance of HIPERLAN Type 2-A Standard for Broadband Wireless Communications.* **Jush, J. K., et al.** Tokyo : Ericsson Review, May 2000. Vehicular Technology Conference 2000. Vol. 1, pp. 112 - 117.
17. *Bluetooth: technology for short-range wireless apps.* **Bhagwat, P.** 3, May-June 2001, IEEE Internet Computing, Vol. 5, pp. 96-103.
18. *The Bluetooth radio system.* **Haartsen, J. C.** 1, February 2000 , IEEE Personal Communications, Vol. 7, pp. 28 - 36 .
19. *The Design and Implementation of HomeRF: A Radio Frequency Wireless Networking Standard for the Connected Home.* **Lansford, J. and Bahl, P.** 10, October 2000, Proceedings of the IEEE , Vol. 88, pp. 1662 - 1676.
20. *Home Networking with IEEE 802.15.4: A Developing Standard for Low-Rate Wireless Personal Area Networks.* **Callaway, E., et al.** 8, August 2002, IEEE Communications Magazine, Vol. 40, pp. 70 - 77 .
21. *Paving the Way for Personal Area Network Standards: An Overview of the IEEE P802.15 Working Group for Wireless Personal Area Networks.* **Siep, T. M., et al.** 1, February 2000, IEEE Personal Communications, Vol. 7, pp. 37 - 43.
22. *Satellite Communication-A Continuing Revolution.* **Anonymous.** 10, October 2000, IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, Vol. 15, pp. 95 - 107. Jubilee Issue.
23. *An Overview of Third-Generation Wireless Personal Communications: A European Perspective.* **Ojanpera, T. and Prasad, D.** 6, December 1998 , IEEE Personal Communications , Vol. 5, pp. 59 - 65.
24. *Packet Mode in Wireless Networks: Overview of Transition to Third Generation.* **Sarikaya, B.** 9, September 2000, IEEE Communications Magazine, Vol. 38, pp. 164 - 172.
25. **Nilsson, M.** *Third-Generation Radio Access Standards.* s.l. : Ericsson Review, 1999. 3.
26. *Issues in Emerging 4G Wireless Networks.* **Varshney, U. and Jain, R.** 6, June 2001 , IEEE Computer , Vol. 34, pp. 94 - 96 .
27. *Development of Mobile Communications Systems Beyond Third Generation.* **Mohr, W.** 2-3, s.l. : Kluwer Academic Publishers, June 2001, Wireless Personal Communications: An International Journal, Vol. 17, pp. 191 - 207 .
28. *Admission Control for QoS support in Heterogeneous 4G Wireless Networks.* **Tragos, E., et al.** 3, 2008, IEEE Network Magazine, Vol. 22, pp. 30-37.

29. *The Challenges of Mobile Computing*. **Forman, G. H. and Zahorjan, J.** 4, April 1994, IEEE Computer , Vol. 27, pp. 38 - 47 .
30. **ITU-D, Study Group 2.** Teletraffic Engineering Handbok. [Online] May 2008. [Cited: April 18, 2009.] <http://oldwww.com.dtu.dk/teletraffic/handbook.html>.
31. *Distributed Multimedia and QOS: A Survey*. **Vogel, A., et al.** 2, 1995, IEEE Multimedia, Vol. 2, pp. 10 - 19.
32. *Call Admission Control in Wireless Networks: A Comprehensive Survey*. **Ahmed, M. H.** 1, 2005, IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 7, pp. 50-66.
33. *Call Admission Control in Wireless Networks: Probabilistic Approach and Efficiency Evaluation*. **Stratogiannis, D. G., Tsiropoulos, G. I. and Cottis, P. G.** Crete Island : IEEE, 2008. International Conference on Wireless Communications and Mobile Computing Conference 2008 (IWCMC '08). pp. 712 - 717.
34. *Efficiency evaluation of class-based call admission control schemes for wireless communications*. **Tsiropoulos, G. I., et al.** Reykjavik : IEEE, 2008. IEEE International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS '08). pp. 69 - 73 .
35. *Call admission control schemes and performance analysis in wirelessmobile networks*. **Fang, Y. and Zhang, Y.** 2, March 2002, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 51, pp. 371-382.
36. *SIR-based call admission control for DS-CDMA cellular systems*. **Liu, Z. and Zarki, M. El.** 4, May 1994, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 12, pp. 638-644.
37. *Next generation networks*. **Nguyen, T. H. and Sadiku, M. N. O.** 2, Apr/May 2002, IEEE Potentials, Vol. 21, pp. 6-8.
38. *Virtual network resource management for next-generation networks*. **Leon-Garcia, A. and Mason, L. G.** 7, July 2003, IEEE Communications Magazine, Vol. 41, pp. 102- 109.
39. **Stratogiannis, D. G., et al.** Chapter 14: 4G Wireless Networks. [book auth.] T. Lagkas. *Wireless Network Traffic and Quality of Service Support: Trends and Standards*. s.l. : Igi Global, March, 2010, pp. 347-377.
40. *Call Admission Control for an Adaptive Heterogeneous Multimedia Mobile Network*. **Li, W. and Chao, X.** 2, 2007, IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 6, pp. 515-525.
41. *Intergration of Pricing with Call Admission Control to Meet QoS Requirements in Cellular Networks*. **Hou, J., Yang, J. and Papavassiliou, S.** 9, 2002, IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, Vol. 13, pp. 898-910.

42. **Tsiropoulos, G. I., et al.** Chapter 17: Admission Control for QoS Provision in Mobile Wireless Networks. [book auth.] T. Lagkas. *Wireless Network Traffic and Quality of Service Support: Trends and Standards*. s.l. : Igi Global, March, 2010, pp. 427-457.
43. *Centralized and distributed adaptive call admission control in cellular IP networks.* **Naja, R. and Tohme, S.** Beijing, China : s.n., September 2003. Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2003. Vol. 3, pp. 2596- 2600.
44. *Distributed call admission control in mobile/wireless networks.* **Naghshineh, M. and Schwartz, M.** 4, May 1996, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 14, pp. 711-717.
45. *Distributed call admission control for a heterogeneous PCS network.* **Yieh-Ran, H. and Jan-Ming, H.** 12, December 2002, IEEE Transactions on Computers, Vol. 51, pp. 1400-1409.
46. *Bounding the performance of dynamic channel allocation with QoS provisioning for distributed admission control in wireless networks.* **Xusheng, T. and Chuanyi, J.** 2, March 2001, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 50, pp. 388-397.
47. *Admission Control for Heterogeneous Networks.* **O'Callaghan, M., et al.** Lyon : s.n., 2004. 13th IST Mobile & Wireless Communications.
48. *A bandwidth allocation technique for high speed networks.* **Jabbari, B.** December, 1990. IEEE GLOBECOM '90. pp. 355-359.
49. *Adaptive traffic admission for integrated services in CDMA wireless-access networks.* **Dziong, Z., Jia, M. and Mermelstein, P.** 9, 1996, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 14, pp. 1737-1747.
50. *Predictive QoS-based admission control for multiclass traffic in cellular wireless networks.* **Epstein, B. M. and Schwartz, M.** 3, March 2000, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 18, pp. 523 -534.
51. *Call Admission Control for QoS provisioning in 4G Wireless Networks: Issues and Approaches.* **Niyato, D. and Hossain, E.** 5, Setember/October 2005, IEEE Network, Vol. 19, pp. 5-11.
52. *Call admission in power controlled CDMA systems.* **Huang, C. Y. and Yates, R. D.** Atlanta, USA : s.n., May, 1996. Vehicular Technology Conference 1996. Vol. 3, pp. 1665 -1669.
53. *Toward scalable admission control for VoIP networks.* **Mase, K.** 7, July 2004, IEEE Communications Magazine, Vol. 42, pp. 42- 47.

54. *A Measurement-based Admission Control Algorithm for Integrated Services Packet Networks.* **Jamin, S., et al.** 1, February 1997, IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol. 5, pp. 56-70.
55. **Floyd, S.** *Comments on measurement-based admission control for controlled-load services.* Berkeley : Lawrence Berkeley Laboratory, 1996.
56. *Call admission control for non-uniform traffic in wireless networks.* **Kim, J. M., Jeong, E. H. and Cho, J. W.** 1, January 2000, Electronics Letters, Vol. 36, pp. 96-97.
57. *Uplink Blocking Probability for a Cell with WCDMA Radio Interface and Differently Loaded Neighbouring Cells.* **Stasiak, M., Wisniewski, A. and Zwierzykowski, P.** Lisbon : IEEE Computer Society, 2005. Advanced Industrial Conference on Telecommunications/Service Assurance with Partial and Intermittent Resources Conference/E-Learning on Telecommunications Workshop (AICT/SAPIR/ELETE'05). pp. 402-407.
58. *Call admission control for multimedia services in mobile cellular networks: a Markov decision approach.* **Choi, J., et al.** Antibes-Juan les Pins : s.n., July, 2000. ISCC 2000. pp. 594 -599.
59. *Call admission control algorithm for cellular CDMA systems based on best achievable performance.* **Nuaymi, L., Godlewski, P. and Mihailescu, C.** Tokyo, Japan : s.n., 2000. VTC 2000. Vol. 1, pp. 375 -379.
60. *Efficient call admission control for heterogeneous services in wireless mobile ATM networks.* **Zhao, D., Shen, X. and Mark, J. W.** 10, October 2000, IEEE Communications Magazine, Vol. 38, pp. 72 -78.
61. *Call admission control for heterogeneous services in wireless networks.* **Zhao, D., Shen, X. and Mark, J. W.** New Orleans, USA : s.n., June, 2000. ICC 2000. Vol. 2, pp. 964 -968.
62. *QOS provisioning in micro-cellular networks supporting multimedia traffic.* **Naghshineh, M. and Acampora, A. S.** Boston, USA : s.n., April, 1995. INFOCOM '95. Vol. 3, pp. 1075 -1084.
63. *Call admission control for prioritized adaptive multimedia services in wireless/mobile networks.* **Kim, S., Kwon, T. and Choi, Y.** Tokyo, Japan : s.n., May, 2000. VTC 2000. Vol. 2, pp. 1536 -1540.
64. *On optimal call admission control in cellular networks.* **Ramjee, R., Nagarajan, R. and Towsley, D.** San Francisco : IEEE, 1996. INFOCOM '96. Vol. 1, pp. 43 - 50.

65. —. **Ramjee, R., Towsley, D. and Nagarajan, R.** 1, 1997, *Wireless Networks*, Vol. 3, pp. 29 - 41.
66. *Population-based call admission control in wireless cellular networks.* **Han, M. and Nilsson, A. A.** New Orleans, USA : s.n., June, 2000. ICC 2000. Vol. 3, pp. 1519 -1523.
67. *Admission control for mixed services in downlink WCDMA in different propagation environments.* **Missiroli, M., Patelli, R. and Vignali, L.** San Diego, USA : s.n., September-October 2001. PIMRC 2001. Vol. 2, pp. 32-37.
68. *Optimizing Admission Control for Multiservice Wireless Networks With Bandwidth Asymmetry Between Uplink and Downlink.* **Yang, X. and Feng, G.** 2, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 56, pp. 907 -917.
69. *Call admission control for multiservice wireless networks with bandwidth asymmetry between uplink and downlink.* **Yang, X., Feng, G. and Kheong, D. S. C.** 1, January 2006, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 55, pp. 360- 368.
70. *Smoothing, statistical multiplexing, and call admission control for stored video.* **Zhang, J. L., et al.** 6, August 1997, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 15, pp. 1148 -1166.
71. *Adaptive admission control in wireless multimedia networks under non-uniform traffic conditions.* **Misic, J. and Bun, T. Y.** 11, November 2000, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 18, pp. 2429 -2442.
72. *A framework for end-to-end deterministic-delay service provisioning in multiservice packet networks.* **Elsayed, K. M. F.** 3, June 2005, IEEE Transactions on Multimedia, Vol. 7, pp. 563 - 571.
73. *Is Handoff Traffic Really Poissonian?* **Chlebus, E. and Ludwin, W.** Tokyo : IEEE, 1995. Fourth IEEE International Conference on Universal Personal Communications. pp. 348-353.
74. *Probabilistic Framework and Performance Evaluation for Prioritized Call Admission Control in Next Generation Networks.* **Tsiropoulos, G. I., et al.** 2010, Computer Communications. In press.
75. *Probabilistic call admission control in wireless multiservice networks.* **Stratogiannis, Dimitrios G., et al.** 10, October 2009, IEEE Communications Letters, Vol. 13, pp. 746 - 748 .
76. *A new scheme to achieve weighted fairness for WLAN supporting multimedia services.* **Cheng, R. G., et al.** 5, May 2006, IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 5, pp. 1095-1102.

77. *Fair resource allocation with guaranteed statistical QoS for multimedia traffic in wideband CDMA cellular network.* **Xu, L., Shen, X. and Mark, J. W.** 2, March-April 2005, IEEE Transactions on Mobile Computing, Vol. 4, pp. 166 - 177.
78. *Fair bandwidth sharing in distributed systems: a game-theoretic approach.* **Rakshit, S. and Guha, R. K.** 11, November 2005, IEEE Transactions on Computers, Vol. 54, pp. 1384 - 1393.
79. *A Decentralized, 'Optimal', Multiple User, Flow Control Algorithm.* **Jaffe, J. M.** October, 1980. Proceedings of the Fifth International Conference on Computer Communications. pp. 839-844.
80. *Bottleneck Flow Control.* **Jaffe, J. M.** 7, July 1981, IEEE Transactions on Communications, Vol. 29, pp. 954-962.
81. *Flow Control and Routing Algorithms for Data Networks.* **Gallager, R. G. and Golestaani, S. J.** Atlanta, USA : s.n., October, 1980. Proc. 5th Int. Conf. Computer Comm. pp. 779-784.
82. *Fairness in Flow Controlled Networks.* **Gerla, M. and Staskauskas, M.** 1980, Journal of Telecommunication Networks, Vol. 1, pp. 19-30.
83. *A New Approach to Performance-Oriented Flow Control.* **Bharath-Kumar, K. and Jaffe, J. M.** 4, April 1981, IEEE Transactions on Communications, Vol. 29, pp. 427 - 435.
84. *Fairness in Local Computer Networks.* **Marsan, M. A. and Gerla, M.** Philadelphia, USA : s.n., June, 1982. International Communications Conference. pp. 2F.41-6.
85. *On Fairness in Packet-Switching Networks.* **Sauve, J., Wong, J. and Field, J.** Washington, USA : s.n., September, 1980. 21st IEEE Computer Society International Conference. pp. 466-470.
86. *Queuing network models of packet switching networks part 1: Open networks.* **Wong, J. W. and Lam, S. S.** 1, May 1982, Performance Evaluation, Vol. 2, pp. 9-21 .
87. *A Study of Fairness in Packet-Switching Networks.* **Wong, J. W., Sauve, F. P. and Field, J. A.** 2, 1982 , IEEE Transactions on Communications, Vol. 30, pp. 346 - 353 .
88. **Jain, R. K., Chiu, D. M. and Hawe, W. R.** *A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer systems.* Maynard, Massachusetts : Digital Equipment Corporation, 1984. Technical Report DEC-TR-301.
89. *Fairness optimization of thinning Call Admission Control in wireless networks.* **Tsiropoulos, G. I., et al.** St. Petersburg, Russia : s.n., October, 2009. ICUMT 2009. Vol. 1, pp. 1-6.

90. *Dynamic behavior of differential pricing and quality of service options for the Internet.* **Fishburn, P. C. and Odlyzko, A. M.** 1-2, March 2000, Decision Support Systems, Vol. 28, pp. 123 - 136.
91. **Greenbaum, A.** *Iterative Methods for Solving Linear Systems.* Philadelphia, USA : Society for Industrial & Applied Mathematics, U.S., 1997.
92. *Call admission control in mobile cellular networks: a comprehensive survey.* **Ghaderi, M. and Boutaba, R.** 1, February 2006, Wireless Communications & Mobile Computing, Vol. 6, pp. 69-93.
93. *Price bargaining integration with dynamic Call Admission Control in wireless multiservice networks.* **Stratogiannis, D. G., et al.** St. Petersburg, Russia : s.n., 2009. ICUMT 2009. Vol. 1, pp. 1-6.
94. *Centralized total received power based call admission control for high altitude platform station UMTS.* **Foo, Y. C., Lim, W. L. and Tafazolli, R.** Lisboa, Portugal : s.n., September, 2002. PIMRC 2002. Vol. 4, pp. 1596 - 1600.
95. *Centralized downlink call admission control for high altitude platform station UMTS with onboard power resource sharing.* **Foo, Y. C., Lim, W. L. and Tafazolli, L.** Vancouver, Canada : s.n., 2002. Vehicular Technology Conference 2002. Vol. 1, pp. 549-553.
96. *Stability and performance analysis of networks supporting elastic services.* **Veciana, G., Lee, T.-J. and Konstantopoulos, T.** 1, 2001, IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol. 9, pp. 2 - 14.
97. *Adaptive power and rate allocation for service curve assurance in DS-CDMA network.* **Tong, L. and Ramanathan, P.** 2, March 2004, IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 3, pp. 555 - 564.
98. *Call-Level and Packet-Level Quality of Service and User Utility in Rate-Adaptive Cellular CDMA Networks: A Queuing Analysis.* **Niyato, D. and Hossain, E.** 12, December 2006, IEEE Transactions on Mobile Computing, Vol. 5, pp. 1749 -1763.
99. *Model and performance evaluation for multiservice network link supporting ABR and CBR services.* **Lee, T. J. and De Veciana, G.** 11, November 2000, IEEE Communications Letters, Vol. 4, pp. 375 -377.
100. **Fudenberg, D. and Tirole, J.** *Game Theory.* London, England : MIT Press, 1991.
101. *Perfect equilibrium in a bargaining model.* **Rubinstein, A.** 1, 1982, Econometrica, Vol. 50, pp. 97-110.
102. **Thomas, L. C.** *Games, Theory and Applications.* s.l. : Ellis Horwood, January, 1984.

103. **Osborne, M. and Rubinstein, A.** *Bargaining and Markets*. San Diego, California : ACADEMIC PRESS, 1990.
104. **Dutta, B. and Gevers, L.** *On majority rules, veto rights and perfect equilibrium allocations of a shrinking cake*. Namur, Belgium : Cahiers de la Faculté des sciences économiques et sociales de Namur, Série Recherche 60, Facultés universitaires Notre-Dame de la Paix, 1984.
105. *Non-Cooperative Bargaining Theory: An Introduction*. **Sutton, J.** 5, October 1986, Review of Economic Studies, Vol. 53, pp. 709-724.
106. *Delay in Multilateral Bargaining under Complete Information*. **Cai, H.** 2, August 2000, Journal of Economic Theory, Vol. 93, pp. 260-276.
107. *Subgame-perfect equilibria of finite- and infinite-horizon games*. **Fudenberg, D. and Levine, D.** 32, December 1983, Journal of Economic Theory, Vol. 2, pp. 251-268.
108. **Dutta, P. K.** *Strategies and Games: Theory and Practice*. s.l. : MIT Press, February, 1999.
109. *Statistical Backwards Induction: A Simple Method for Estimating Recursive Strategic Models*. **Muhammet, M. A., Signorino, C. S. and Walker, R. W.** 1, January 2008, Political Analysis, Vol. 16, pp. 21-40.
110. **Horn, R. A. and Johnson, C. R.** *Matrix Analysis*. s.l. : Cambridge University Press, December, 1985 .
111. **Bhatia, R.** *Positive definite matrices*. s.l. : Princeton University Press, December, 2006.
112. **Conway, J. B.** *A course in functional analysis*. s.l. : Springer-Verlag New York Inc, October, 1990.
113. *Linear operator leaving invariant a cone in a Banach space*. **Krein, M. G. and Rutman, M. A.** 23 [1], 1948 [1950], Uspehi Matematicheskii Nauk [American Mathematical Society Translations], Vol. 3 [10], pp. 3-95 [199–325].
114. **Golub, G. H. and Van Loan, C. F.** *Matrix Computations*. s.l. : The Johns Hopkins University Press, October, 1996.
115. **Latouche, G. and Ramaswami, V.** *Introduction to Matrix Analytic Methods in Stochastic Modeling*. s.l. : Society for Industrial Mathematics, January, 1987.
116. **Leyton-Brown, K. and Shoham, Y.** *Essentials of Game Theory: A Concise, Multidisciplinary Introduction*. s.l. : Morgan & Claypool Publishers, November, 2008.
117. **Dresher, M., Tucker, A. W. and Wolfe, P.** *Contributions to the Theory of Games, Vol. III (Annals of Mathematics Studies)*. s.l. : Princeton University Press, November, 1957.

118. **Narahari, Y., et al.** *Game Theoretic Problems in Network Economics and Mechanism Design Solutions*. s.l. : Springer, February, 2009.
119. **McKinsey, J. C. C.** *Introduction to the Theory of Games*. s.l. : Dover Publications, April, 2003.
120. **Lancaster, P. and Tismenetsky, M.** *The Theory of Matrices*. s.l. : Academic Press, June, 1985.
121. *A probabilistic approach for fair-efficient call admission control in wireless multiservice networks*. **Stratogiannis, D. G., et al.** s.l. : Taylor & Francis, June 2010, International Journal of Electronics. In press.
122. **Doob, J. L.** *Stochastic Processes*. s.l. : Wiley-Interscience, January, 1990.
123. **Gradshteyn, I. S., et al.** *Table of Integrals, Series, and Products*. s.l. : Academic Press, August, 2000.
124. **Johnsonbaugh, R. and Pfaffenberger, W. E.** *Foundations of Mathematical Analysis*. s.l. : Dover Publications, August, 2002.
125. *Call Admission Control in Wireless Networks: Probabilistic Approach and Efficiency Evaluation*. **Tsiropoulos, G. I., Stratogiannis, D. G. and Cottis, P. G.** Crete Island, Greece : s.n., August, 2008. IWCMC 2008. Vol. 1, pp. 712-717.

ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ ΕΡΓΟ

Δημοσιεύσεις σε διεθνή περιοδικά με κριτές

1. E. Z. Tragos, **G. I. Tsiropoulos**, G. T. Karetsos, and S. A. Kyriazakos, “Admission Control or QoS Support in Heterogeneous 4G Wireless Networks”, *IEEE Network*, vol. 22, issue 3, May-June 2008, pp. 30-37.
2. G. Stratogiannis, **G. I. Tsiropoulos**, P. G. Cottis, and J. D. Kanellopoulos, “Probabilistic call admission control in wireless multiservice networks”, *IEEE Communications Letters*, vol. 13, issue 10 October 2009, pp. 746-748.
3. M. Sarafi, **G. I. Tsiropoulos** and P. G. Cottis, “Hybrid wireless-broadband over power lines: A promising broadband solution in rural areas”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 47, issue 11, November 2009, pp. 140-147.
4. **G. I. Tsiropoulos**, D. G. Stratogiannis, P. G. Cottis, and J. D. Kanellopoulos, “Probabilistic Framework and Performance Evaluation for Prioritized Call Admission Control in Next Generation Networks”, *Computer Communications*, in press.
5. G. Stratogiannis, **G. I. Tsiropoulos**, J. D. Kanellopoulos and P. G. Cottis, “A Probabilistic Approach for Fair-Efficient Call Admission Control in Wireless Multiservice Networks”, *International Journal of Electronics*, in press.

Ανακοινώσεις σε διεθνή συνέδρια – Δημοσιεύσεις σε πρακτικά διεθνών συνεδρίων με κριτές

1. **G. I. Tsiropoulos**, D. G. Stratogiannis and P. G. Cottis, “Call Admission Control in Wireless Networks: Probabilistic Approach and Efficiency Evaluation”, in *Proc. IWCMC 2008*, vol. 1, pp. 712-717.
2. **G. I. Tsiropoulos**, D. G. Stratogiannis, E. E. I. Tsiropoulou and P. G. Cottis, “Energy Distribution Networks Evolution towards Smart Grid Networks Incorporating Power Line Communications Technology & Services”, in *Proc. WSPLC 2008*.
3. **G. I. Tsiropoulos**, A. M. Sarafi and P. G. Cottis, “Power line communications network trial in Larissa, Greece”, in *Proc. WSPLC 2008*.

4. D. G. Stratogiannis, **G. I. Tsiropoulos**, J. D. Kanellopoulos and P. G. Cottis, “QoS Driven Call Admission Control for Wireless-Broadband over Power Line Networks”, in *Proc. WSPLC 2008*.
5. **G.I. Tsiropoulos**, A. Vazintari, P.G. Cottis, “Converting Energy Distribution Networks into Smart Grid Networks with the Use of Broadband Over Powerlines Technology”, in *Proc. MedPower 2008*, vol. 1, pp. 1-6.
6. **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*, vol. 1, pp. 69-73.
7. **G. I. Tsiropoulos**, D. G. Stratogiannis and P. G. Cottis, “Call Admission Control with QoS guarantees for multiservice Wireless-Broadband over Power Line networks”, in *Proc. ISWCS 2008*, vol. 1, pp. 168-172.
8. D. G. Stratogiannis, **G. I. Tsiropoulos**, P. G. Cottis, and J. D. Kanellopoulos, “Price bargaining integration with dynamic Call Admission Control in wireless multiservice networks”, in *Proc. ICUMT 2009*, vol. 1, pp. 1-6.
9. **G. I. Tsiropoulos**, D. G. Stratogiannis, P. G. Cottis, and J. D. Kanellopoulos, “Fairness optimization of thinning Call Admission Control in wireless networks”, in *Proc. ICUMT 2009*, vol. 1, pp. 1-6.
10. **G. I. Tsiropoulos**, A. M. Sarafi and P. G. Cottis, “Wireless-broadband over power lines networks: A promising broadband solution in rural areas”, in *Proc. PowerTech 2009*, vol. 1, pp. 1-6.

Συμμετοχή σε συγγραφή βιβλίων

1. **G. I. Tsiropoulos**, D. G. Stratogiannis, P. G. Cottis, and J. D. Kanellopoulos, *Wireless Network Traffic and Quality of Service Support: Trends and Standards*, Chapter 17: Admission Control for QoS Provision in Mobile Wireless Networks, pp. 427-457, IGI, 2010.
2. D. G. Stratogiannis, **G. I. Tsiropoulos**, P. G. Cottis, and J. D. Kanellopoulos, *Wireless Network Traffic and Quality of Service Support: Trends and Standards*, Chapter 14: 4G Wireless Networks, pp. 347-377, IGI, 2010.

Εισηγήσεις σε διεθνή συνέδρια

1. IWCMC 2008, “Call Admission Control in Wireless Networks: Probabilistic Approach and Efficiency Evaluation”, by **Georgios I. Tsiropoulos**.
2. WSPLC 2008, “Energy Distribution Networks Evolution towards Smart Grid Networks Incorporating Power Line Communications Technology & Services”, by **Georgios I. Tsiropoulos**.
3. ISWCS 2008, “Call Admission Control with QoS guarantees for multiservice Wireless-Broadband over Power Line networks”, by **Georgios I. Tsiropoulos**.
4. ICUMT 2009, “Fairness optimization of thinning Call Admission Control in wireless networks”, by **Georgios I. Tsiropoulos**.
5. Mobilight 2009, Athens, “Mobile Lightweight Wireless Systems - Rising to the Challenge!” by Vasilis Tsoulkas, Constantinos B. Papadias, **Georgios I. Tsiropoulos** and Dimitrios Stratogiannis.

Διπλωματικές Εργασίες

1. «Έλεγχος Αποδοχής Κλήσεων σε Ετερογενή Συστήματα Ασύρματων Επικοινωνιών Τέταρτης Γενιάς (4G)», Διπλωματική Εργασία, **Τσιρόπουλος Ι. Γεώργιος**, Δεκέμβριος 2005.
2. «Παροχή Υπηρεσιών Έξυπνου Δικτύου Μέσω της Τεχνολογίας Power Line Communications», Διπλωματική Εργασία, **Τσιρόπουλος Ι. Γεώργιος**, Φεβρουάριος 2009.

Διοργάνωση Διεθνών Συνεδρίων

1. Workshop on Mobile Computing and Networking Technologies 2009 (WMCNT'09), <http://wmcnt09.ntua.gr>, St. Petersburg, Russia, October 2009.
2. Workshop on Mobile Computing and Networking Technologies 2010 (WMCNT'10), <http://wmcnt.ntua.gr>, Moscow, Russia, October 2010.
3. Workshop on Mobile Computing and Emerging Communication Networks 2010 (MCECN'10), <http://mcecn.ntua.gr>, Miami, Florida, USA, December 2010.