



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Παροχή εγγυήσεων Ποιότητας της
Υπηρεσίας σε ασύρματα δίκτυα 802.11

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΧΡΙΣΤΟΥ Γ. ΣΤΑΘΟΠΟΥΛΟΥ

Επιβλέπων: Συμεών Παπαβασιλείου

Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Οκτώβριος 2011



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Παροχή εγγυήσεων Ποιότητας της Υπηρεσίας σε ασύρματα δίκτυα 802.11

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

TOU

ΧΡΙΣΤΟΥ Γ. ΣΤΑΘΟΠΟΥΛΟΥ

Επιβλέπων: Συμεών Παπαβασιλείου

Av. Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 25η Οκτωβρίου 2011.

Συμένη Παπαβασιλείου

Αγ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Μυκηναϊκοί Θεολόγοι

Καθηγητές Ε.Μ.Π.

Ευαγγελίος Συνάξεις

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αιθήρα Οκτώβριος 2011

.....
Χρίστος Γ. Σταθόπουλος

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

Copyright © Χρίστος Γ. Σταθόπουλος, 2011.

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.

Ευχαριστίες

Κατ αρχάς, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας κ. Συμεών Παπαβασιλείου για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου. Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Γιώργο Αριστομενόπουλο για την πραγματικά πολύτιμη βοήθεια του στην αποπεράτωση της διπλωματικής μου εργασίας. Χωρίς την καθοριστική συμβολή του, την υπομονή που έδειξε στις δύσκολες στιγμές και την δημιουργία καλού κλίματος για συνεργασία από μέρους του, δεν θα ήταν εφικτή η εκπόνηση της εργασίας μου.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Βασίλειο Μάγχλαρη διευθυντή του Network Management and Optimal Design Laboratory και όλο το προσωπικό του εργαστηρίου για το άριστο κλίμα εργασίας στο εργαστήριο, αλλά και για το ενδιαφέρον τους, την καλή τους διάθεση και την μεταδοτικότητά τους στην πραγματοποίηση των αντίστοιχων μαθημάτων της σχολής ΗΜΜΥ-ΕΜΠ. Από την προσωπική μου εμπειρία ως φοιτητής της σχολής ΗΜΜΥ, μπορώ να πω ότι το NETMODE αποτελεί ένα από τα καλύτερα οργανωμένα εργαστήρια, πλαισιωμένο από ένα σύνολο πολύ αξιόλογων ερευνητών και διδασκόντων. Τους ευχαριστώ για όλα.

Πέρα από τα παραπάνω πρόσωπα που βοήθησαν για τη περάτωση της διπλωματικής μου εργασίας, με την ευκαιρία που μου δίνεται θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, τον αδερφό μου Κωνσταντίνο και τους φίλους μου που είναι πάντα κοντά μου, ακόμα κι αν βρίσκονται μακριά. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους φίλους-συμφοιτητές μου και την παρέα από την πρυτανεία, για την παρέα τους, την ψυχική υποστήριξη καθώς επίσης και την πολύ χρήσιμη ανταλλαγή γνώσεων και απόψεων.

Περίληψη

Την τελευταία δεκαετία, τα τοπικά ασύρματα δίκτυα υπολογιστών (WLANs) συναντώνται σχεδόν σε κάθε τομέα της καθημερινής μας ζωής, βρίσκοντας εφαρμογή σε απλά τοπικά δίκτυα υπολογιστών και διαμοιρασμού υπηρεσιών Διαδικτύου, αλλά και σε δίκτυα αισθητήρων και ενσωματωμένα συστήματα. Ωστόσο, η ραγδαία ανάπτυξη του Διαδικτύου οδήγησε με τη σειρά της στην χρησιμοποίηση πλήθους πολυμεσικών εφαρμογών ήχου και εικόνας καθιστώντας επιτακτική την ανάγκη εξεύρεσης μηχανισμών και μεθόδων παροχής αυστηρών εγγυήσεων Ποιότητας της Υπηρεσίας (QoS) ως προς την ρυθμαπόδιση και την καθυστέρηση.

Στην παρούσα εργασία, αρχικά ασχοληθήκαμε με την μελέτη, ανάλυση και πειραματική αξιολόγηση των υπαρχόντων μηχανισμών παροχής εγγυήσεων Ποιότητας της Υπηρεσίας σε ασύρματα δίκτυα τύπου IEEE 802.11, ενώ στη συνέχεια, εστιάσαμε στην επέκταση των διαθέσιμων μηχανισμών με στόχο την ικανοποίηση αυστηρών εγγυήσεων Ποιότητας της Υπηρεσίας, κυρίως όσον αφορά την ρυθμαπόδιση, στους ασύρματους κόμβους ενός ασύρματου τοπικού δικτύου 802.11.

Πιο συγκεκριμένα, εξετάζοντας τον μηχανισμό πρόσβασης μέσου EDDA του προτύπου IEEE 802.11e, εξάγαμε συμπεράσματα σχετικά με τις δυνατότητες, το εύρος χρήσης αλλά και τους περιορισμούς των παραμέτρων CW και $AIFS$ για την διαφοροποίηση κλάσεων κίνησης ως προς την ρυθμαπόδιση. Συμπερασματικά καταλήξαμε στο ότι με κατάλληλη χρήση, οι δύο αυτές παράμετροι μπορούν να παρέχουν αξιόπιστα αποτελέσματα ως προς την διαφοροποίηση της ρυθμαπόδισης ανάμεσα σε κλάσεις κίνησης σε ένα πραγματικό IEEE 802.11 δίκτυο.

Επίσης, μοντελοποιήσαμε και επιλύσαμε ένα πρόβλημα μεγιστοποίησης της ρυθμοαπόδισης του δικτύου, δεδομένου ενός συνόλου αναλογικών απαιτήσεων παρεχόμενης ρυθμαπόδισης των συνδεδεμένων κόμβων, ενώ κάνοντας χρήση μηχανισμών Ελέγχου Αποδοχής χρηστών επεκτείναμε τη παραπάνω λύση παρέχοντας αυστηρές εγγυήσεις Ποιότητας της Υπηρεσίας όσον αφορά την ρυθμαπόδιση στους χρήστες του ασύρματου τοπικού δικτύου.

Η λειτουργία των αναφερθέντων μηχανισμών καθώς και τα συμπεράσματα που αποκομίσθηκαν επιβεβαιώθηκαν κάνοντας χρήση μιας πειραματικής πλατφόρμας δοκιμών ασύρματων τοπικών δικτύων που μας παρείχε το εργαστήριο Διαχείρισης Δικτύων και Βέλτιστου Σχεδιασμού του ΕΜΠ.

Λέξεις κλειδιά

Ασύρματα Δίκτυα, Ποιότητα της Υπηρεσίας, ρυθμαπόδιση, Έλεγχος Αποδοχής, IEEE 802.11, WiFi, EDDA.

Abstract

Over the last decade, Wireless Local Area Networks (WLANs) can be found in almost every aspect of our everyday life, from simple local area computer networks and Internet gateways, to sensor networks and embedded systems. However, Internet's rapid growth has led in turn to the deployment of numerous multimedia-rich applications highlighting the urgent need of efficient Quality of Service (QoS) provisioning mechanisms and methods able providing strict throughput and delay guarantees.

In this diploma thesis, initially emphasis was placed on the study, analysis and experimental evaluation of already existing Quality of Service provisioning mechanisms for IEEE 802.11 wireless networks, while next, efficient extensions were provided towards satisfying strict Quality of Service guarantees, with respect to wireless nodes' allocated throughput.

Specifically, by studying the Media Access Control EDCA mechanism of the standard IEEE 802.11e protocol, we commented on the capabilities, the applicability and the restrictions of the CW and AIFS parameters, towards providing class categorization and traffic differentiation. Moreover, we reached the conclusion that these two parameters can, under specific circumstances, provide reliable results concerning differentiation of throughput between classes, on a real IEEE 802.11 network.

Furthermore, a network throughput maximization problem given a set of proportional requirements regarding the throughput of the connected nodes, was modeled and solved, while the adoption of Admission Control mechanisms extended the previous solution to the provisioning of strict QoS throughput guarantees to the users of the wireless network.

The operation of the aforementioned mechanisms, as well as the the derived conclusions were confirmed using an experimental platform for testing wireless local area networks provided by the laboratory of Network Management and Optimal Design of NTUA.

Keywords

Wireless Networks, Quality of Service, throughput, Admission Control, IEEE 802.11, WiFi, EDCA.

Περιεχόμενα

| | |
|--|-----------|
| 1 Εισαγωγή | 1 |
| 1.1 Εισαγωγή στα ασύρματα τοπικά δίκτυα υπολογιστών (WLAN) | 1 |
| 1.2 Η έννοια της <i>Ποιότητας της Υπηρεσίας (QoS)</i> και της παροχής εγγυήσεων ποιότητας . | 2 |
| 1.3 Στόχος της παρούσας διπλωματικής | 4 |
| 2 Παρουσίαση του προτύπου IEEE 802.11 και των διαθέσιμων μηχανισμών για διαφοροποίηση της ρυθμοαπόδοσης | 6 |
| 2.1 Το πρότυπο IEEE 802.11 | 6 |
| 2.2 Αρχιτεκτονική του προτύπου IEEE 802.11 | 7 |
| 2.3 Το Πρωτόκολλο Πρόσβασης Μέσου (MAC) στο IEEE 802.11 | 8 |
| 2.3.1 Ο Μηχανισμός Ελέγχου Πρόσβασης Μέσου | 8 |
| 2.3.2 IEEE 802.11e | 13 |
| 2.3.3 Ο Μηχανισμός <i>Βελτιωμένης Κατανεμημένης Πρόσβασης Μέσου (EDCA)</i> | 13 |
| 2.4 Παραδοσιακές μέθοδοι παροχής QoS από το υπάρχον πρότυπο IEEE 802.11e. | 16 |
| 3 Παρουσίαση της Πλατφόρμας Δοκιμών | 19 |
| 3.1 Εισαγωγική περιγραφή της Πλατφόρμας Δοκιμών | 19 |
| 3.2 Αναλυτική περιγραφή της Πλατφόρμας Δοκιμών | 19 |
| 3.2.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά των κόμβων | 19 |
| 3.2.2 Δομή του δικτυου | 20 |
| 3.2.3 Εκτέλεση των πειραμάτων | 21 |
| 4 Αξιολόγηση της επίδρασης των παραμέτρων του μηχανισμού EDCA για την παροχή QoS στο IEEE 802.11e. | 24 |
| 4.1 Μελέτη της επίδρασης της παραμέτρου CW στην αποστολή της κίνησης δεδομένων ενός δικτύου QoS | 24 |
| 4.1.1 Πιθανότητες καταστάσεων για το κανάλι (Channel state probabilities) | 25 |
| 4.1.2 Ρυθμαπόδοση του κόμβου (Station Throughput) | 26 |
| 4.1.3 Διαφοροποίηση της ρυθμαπόδοσης (Throughput Differentiation) | 27 |
| 4.1.4 Πειραματική αξιολόγηση της δυνατότητας διαφοροποίησης της ρυθμαπόδοσης με χρήση της παραμέτρου CW. | 28 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4.2 | Μελέτη της επίδρασης της παραμέτρου AIFS στην αποστολή της κίνησης δεδομένων ενός δικτύου QoS | 37 |
| 4.2.1 | Θεωρητική Μοντελοποίηση της επίδρασης της παραμέτρου AIFS. | 37 |
| 4.2.2 | Πειραματική αξιολόγηση της δυνατότητας διαφοροποίησης της ρυθμαπόδισης με χρήση της παραμέτρου AIFS. | 39 |
| 4.3 | Συμπεράσματα | 48 |
| 5 | Επιλογή κατάλληλου CW για βέλτιστη χρησιμοποίηση του καναλιού και 'Ελεγχος Αποδοχής (Admission Control). | 49 |
| 5.1 | Διατύπωση του προβλήματος | 49 |
| 5.2 | Επίλυση του προβλήματος εξεύρεσης βέλτιστων Παραθύρων Ανταγωνισμού | 50 |
| 5.3 | Πειραματική ανάλυση της επιλογής βέλτιστου συνόλου παραμέτρων CW για την διαφοροποίηση στην ρυθμαπόδιση. | 51 |
| 5.4 | Παροχή αυστηρών εγγυήσεων Ποιότητας της Υπηρεσίας μέσω μηχανισμών Ελέγχου Αποδοχής. | 57 |
| 5.4.1 | Μηχανισμοί Ελέγχου Αποδοχής για την παροχή εγγυήσεων ποιότητας ως προς την ρυθμαπόδιση. | 58 |
| 5.4.2 | Διαδικασία σηματοδοσίας του συνδυαστικού μηχανισμού Ελέγχου Αποδοχής και Βέλιστης Επιλογής Παραθύρων Ανταγωνισμού. | 60 |
| 5.5 | Συμπεράσματα | 64 |
| 6 | Επίλογος | 65 |

1 Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγή στα ασύρματα τοπικά δίκτυα υπολογιστών (WLAN)

Ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο υπολογιστών, είναι ένα δίκτυο το οποίο επιτρέπει την επικοινωνία μέσω ραδιοκυμάτων ανάμεσα σε διαφορετικά συστήματα υπολογιστών (σταθμούς), με τη χρήση ενός κεντρικού κόμβου (σημείο πρόσβασης), εντός μίας περιοχής εμβέλειας του κόμβου αυτού. Για τα περισσότερα τέτοιου τύπου δίκτυα η εμβέλεια μπορεί να κυμαίνεται από μερικές δεκάδες έως μερικές εκατοντάδες μέτρα. Ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο υπολογιστών, μπορεί να λειτουργεί αυτόνομα προσφέροντας διασύνδεση σε μία ομάδα υπολογιστών εντός της εμβέλειας του δικτύου, ή μπορεί επίσης να λειτουργεί και ως επέκταση ενός ενσύρματου δικτύου, σε ένα ενοποιημένο δίκτυο.

Πρόδρομο των σημερινών ασύρματων τοπικών δικτύων υπολογιστών αποτέλεσε ένα πειραματικό ασύρματο δίκτυο υπολογιστών, το οποίο σχεδιάστηκε στις αρχές της δεκαετίας του '70 στο πανεπιστήμιο της Hawaii, το ALOHAnet. Το ALOHAnet, αρχικά σχεδιάστηκε για την σύνδεση των χρηστών οι οποίοι βρίσκονταν στα διάφορα νησιά της Hawaii, με τον κεντρικό υπολογιστή του πανεπιστημίου στο νησί Oahu. Η πρωτοπορία του δικτύου αυτού συνίσταται στο ότι αποτέλεσε το πρώτο δίκτυο υπολογιστών, το οποίο χρησιμοποιούσε ένα κοινό μέσο επικοινωνίας για την μετάδοση των δεδομένων ανάμεσα στους κόμβους, αλλά και στο ότι συνδύαζε την τεχνολογία των πακέτων δεδομένων η οποία είχε ήδη αναπτυχθεί από τα μέσα της δεκαετίας του '60 με το ARPANET, με τις ασύρματες επικοινωνίες. Έτσι, το πρωτόκολλο επικοινωνίας του ALOHAnet αποτέλεσε τη βάση για την ανάπτυξη των πιο σύγχρονων πρωτοκόλλων επικοινωνίας όπως το Ethernet για τα ενσύρματα δίκτυα υπολογιστών και το IEEE 802.11 [1] για τα ασύρματα.

Σήμερα, η χρήση ασύρματων τοπικών δικτύων υπολογιστών, είναι πλέον εξαιρετικά διαδεδομένη, βρίσκοντας εφαρμογή σε εμπορικά, ακαδημαϊκά αλλά και προσωπικά δίκτυα υπολογιστών σε όλο τον κόσμο. Το επικρατέστερο πρότυπο επικοινωνίας για την υλοποίηση ασύρματων τοπικών δικτύων υπολογιστών, έτσι όπως έχει καθιερωθεί μέχρι σήμερα, είναι το IEEE 802.11 [1] και το οποίο από την αρχική του δημιουργία το 1997 από το Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), έχει δεχτεί έναν μεγάλο αριθμό ανανεώσεων για την καλύτερη λειτουργία του και προσθήκη νέων δυνατοτήτων σε αυτό. Στα επόμενα κεφάλαια θα μελετήσουμε αναλυτικότερα το πρωτόκολλο IEEE 802.11 και τους μηχανισμούς του.

1.2 Η έννοια της *Ποιότητας της Υπηρεσίας (QoS)* και της παροχής εγγυήσεων ποιότητας

Στα δίκτυα υπολογιστών ο όρος *Ποιότητα της Υπηρεσίας (Quality of Service, QoS)* αναφέρεται στους μηχανισμούς ελέγχου και κατανομής των διαθέσιμων πόρων ενός δικτύου, για την κατά το δυνατόν βέλτιστη εξυπηρέτηση των χρηστών.

Σε δίκτυα μεταγωγής πακέτου, όπως τα δίκτυα υπολογιστών, ενδεικτικές μετρικές για την κίνηση των δεδομένων, οι οποίες και μπορούν να υπόκεινται σε περιορισμούς λόγω συγκεκριμένων απαιτήσεων, είναι οι ακόλουθες:

- *Ρυθμιαπόδοση (Throughput).* Η ρυθμιαπόδοση είναι ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης για μία ροή δεδομένων, και μπορεί να αυξομειώνεται ανάλογα με τον συνολικό φόρτο του δικτύου ο οποίος οφείλεται στο σύνολο των χρηστών.
- *Καθυστέρηση (Latency).* Η καθυστέρηση σε μία ροή δεδομένων αφορά τον χρόνο από τη στιγμή της εκπομπής ενός πακέτου από τον αποστολέα έως την στιγμή της λήψης του από τον παραλήπτη.
- *Σφάλματα (Errors).* Τα σφάλματα αφορούν την αλλοίωση της πληροφορίας κατά την μετάδοση των δεδομένων, λόγω θορύβου ή παρεμβολών.
- *Χαμένα Πακέτα (Dropped Packets).* Η περίπτωση χαμένων πακέτων αφορά πακέτα που δεν παραδόθηκαν ποτέ στον προορισμό τους, είτε λόγω σφαλμάτων στη μετάδοση, είτε λόγω υπερφόρτωσης των ουρών αναμονής κάποιου μεταγωγέα.
- *Ασύγχρονη παράδοση πακέτων (Jitter).* Πακέτα τα οποία ακολουύθησαν διαφορετικές διαδρομές εντός του δικτύου μπορεί να φτάνουν στον παραλήπτη με διαφορετικού χρόνους καθυστέρησης.
- *Παράδοση πακέτων εκτός σειράς (Out-of-order delivery).* Τα πακέτα παραδίδονται με διαφορετική σειρά από αυτήν με την οποία εκπέμφθηκαν. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε διαφορετικές διαδρομές που ακολούθησαν κατά την δρομολόγησή τους, με την διαδρομή ενός πακέτου που εκπέμφηκε αργότερα, να εμφανίζει χαμηλότερη καθυστέρηση από αυτή ενός πακέτου που εκπέμφηκε νωρίτερα.

Για την ικανοποίηση απαιτήσεων οι οποίες αφορούν μία ή περισσότερες από τις παραπάνω μετρικές, έχουν σχεδιαστεί πολλοί και διαφορετικοί μηχανισμοί. Υπάρχει έτσι διαθέσιμη σήμερα μία πληθώρα μηχανισμών QoS, οι οποίοι συχνά συνδυάζονται μεταξύ τους για να προσδώσουν το επιθυμητό αποτέλεσμα, ανάλογα με το είδος του δικτύου στο οποίο εγκαθίστανται. Τέτοιοι μηχανισμοί μπορούν να

βρίσκονται είτε στα άκρα του δικτύου (εξυπηρετητής/πελάτης), είτε στον πυρήνα του δικτύου (δρομολογητές) και συνήθως περιλαμβάνουν μία ή περισσότερες από τις παρακάτω μεθόδους για την παροχή QoS [2]:

- *Έλεγχος Σφαλμάτων και Ανάκαμψη (Error Detection and Recovery).* Όσον αφορά τις περιπτώσεις όπου απαιτείτε αξιοπιστία, συνήθως υπάρχουν μηχανισμοί εντοπισμού σφαλμάτων, και ανάκαμψης από αυτά με την αναμετάδοση ενός εσφαλμένου ή απολεσθέντος πακέτου.
- *Υπερκάλυψη (Over-provisioning).* Μία μέθοδος για την κάλυψη απαιτήσεων QoS είναι η παροχή πολύ μεγάλης χωρητικότητας δρομολογητών, περιοχών προσωρινής αποθήκευσης και εύρους ζώνης έτσι ώστε αυτά να υπερ-επαρχούν για την κάλυψη όλων των δυνατών απαιτήσεων. Παρόλα αυτά, η μέθοδος αυτή είναι εξαιρετικά δαπανηρή σε υλικό και ασύμφορη, εφόσον υπάρχουν πιο ευέλικτοι και λιγότερο δαπανηροί τρόποι για την βελτιστηρίζηση των υλικών πόρων.
- *Προσωρινή Αποθήκευση (Temporal Storage).* Σε περιπτώσεις κατά τις οποίες υπάρχουν απαιτήσεις ως προς την παραμόρφωση του χρονισμού, οι ροές δεδομένων μπορούν να αποθηκεύονται προσωρινά στο άκρο του παραλήπτη, πριν την παράδοση με στόχο την εξομάλυνση της παραμόρφωσης χρονισμού στα πακέτα. Η συγκεκριμένη τεχνική ενώ δεν επηρεάζει την αξιοπιστία ή το εύρος ζώνης, αυξάνει την καθυστέρηση, αλλά παρόλα αυτά επιλύει τα προβλήματα της ασύγχρονης ή εκτός σειράς παράδοσης των πακέτων.
- *Μορφοποίηση Κίνησης (Traffic Shaping).* Αφορά τον έλεγχο της κίνησης του δικτύου με στόχο την βελτιστοποίηση ή την παροχή εγγυήσεων, όσον αφορά την ρυθμαπόδοση ή και την καθυστέρηση για τις διάφορες ροές δεδομένων. Αυτό, συνήθως γίνεται εφικτό, με την κατηγοριοποίηση των ροών δεδομένων εντός του δικτύου, με βάση το περιεχόμενό τους και στη συνέχεια εξυπηρετώντας διαφορετικά τις ροές, σύμφωνα με το βαθμό προτεραιότητας που τους αναλογεί.
- *Χρονοδρομολόγηση Πακέτων (Packet Scheduling).* Όσον αφορά την εξυπηρέτηση ροών δεδομένων, πολλές φορές υπάρχει ο κίνδυνος, ένας περισσότερο ενεργητικός αποστολέας να οδηγήσει σε “λιμοκτονία” λιγότερο ενεργητικές ροές δεδομένων. Για την αποφυγή ενός τέτοιου φαινομένου φορές χρησιμοποιούνται στους δρομολογητές αλγόριθμοι χρονοδρομολόγησης για την καλύτερη εξυπηρέτηση των ροών δεδομένων.
- *Αποφυγή Συμφόρησης (Congestion Avoidance).* Η Αποφυγή Συμφόρησης περιλαμβάνει μία κατηγορία τεχνικών με στόχο την βελτιστοποίηση της λειτουργίας και της απόδοσης ενός δικτύου

η οποίες μπορούν να λειτουργούν είτε ανεξάρτητα είτε σε συνδυασμό με άλλες μειόδους παροχής QoS. Σε περιπτώσεις συμφόρησης, η απόδοση του δικτύου μπορεί να μειωθεί σε μεγάλο βαθμό. Έτσι, κρίνεται αναγκαία η αποφυγή τέτοιων καταστάσεων. Με βάση την θεωρία ελέγχου, οι τεχνικές για την αποφυγή συμφόρησης μπορούν να διαιρεθούν σε δύο κατηγορίες, τις ανοικτού και τις κλειστού βρόχου. Τεχνικές ανοικτού βρόχου, βασίζονται σε τρόπους διαχείρισης της κίνησης του δικτύου οι οποίοι δεν λαμβάνουν υπόψη την τρέχουσα κατάσταση του δικτύου εστιάζοντας στην πρόληψη της συμφόρησης. Αντιθέτως, τεχνικές κλειστού βρόχου παρακολουθούν συνεχώς την κατάσταση στην οποία βρίσκεται το σύστημα, προσαρμόζοντας τη λειτουργία του συστήματος για την επιδιόρθωση του προβλήματος.

- **Δέσμευση Πόρων (Resource Reservation).** Ένας τρόπος για την παροχή εγγυήσεων ποιότητας της υπηρεσίας, αποτελεί η δέσμευση πόρων του δικτύου για την εξυπηρέτηση μίας ροής δεδομένων. Με τον καθορισμό ενός συγκεκριμένου δρομολογίου για μία ροή δεδομένων, μπορούν να δεσμευθούν κατά μήκος αυτής πόροι που αφορούν το εύρος ζώνης, περιοχές προσωρινής αποθήκευσης και κύκλους επεξεργαστή έτσι ώστε να διασφαλίζεται η ομαλή εξυπηρέτησή της.
- **Έλεγχος Αποδοχής (Admission Control).** Ο Έλεγχος Αποδοχής αφορά την δυνατότητα απόρριψης ή αποδοχής μίας ροής δεδομένων εντός του δικτύου, ανάλογα με το κατά πόσον είναι εφικτή η εξυπηρέτησή της, προς αποφυγή συμφόρησης.

Επίσης, από την σκοπιά της παροχής QoS, μπορούμε να χαρακτηρίσουμε την κίνηση την οποία παράγουν οι διάφορες εφαρμογές σε ένα δίκτυο με βάση την αυστηρότητα των απαιτήσεων της εφαρμογής ως προς την ποιότητα της κίνησης. Έτσι, χαρακτηρίζουμε ως *ελαστική (elastic)* την κίνηση κάποιας εφαρμογής η οποία δεν θέτει αυστηρές προδιαγραφές για την ρυθμαπόδοση ή την καθυστέρηση της κίνησης της, ενώ χαρακτηρίζουμε ως *ανελαστική (inelastic)* την κίνηση μίας εφαρμογής η οποία για να λειτουργήσει απαιτεί αυστηρές προδιαγραφές ρυθμαπόδοσης και καθυστέρησης.

Στην παρούσα διπλωματική, θα ασχοληθούμε κυρίως με τις μειόδους της Μορφοποίησης Κίνησης, Αποφυγής Συμφόρησης και Ελέγχου Αποδοχής για την παροχή Ποιότητας της Υπηρεσίας σε ασύρματα δίκτυα τύπου IEEE 802.11.

1.3 Στόχος της παρούσας διπλωματικής

Η παροχή εγγυήσεων Ποιότητας της Υπηρεσίας σε ασύρματα δίκτυα ανίχνευσης φέροντος (π.χ. 802.11x δίκτυα) ανέκαθεν συγκέντρωνε το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας, ιδιαίτερα λόγω της

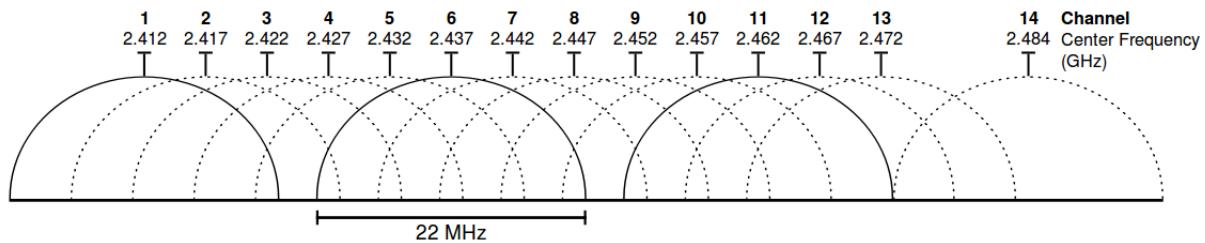
ευκαιριακής τους φύσης. Επιπλέον, η αδιάλειπτη χρήση πολυμεσικών υπηρεσιών πραγματικού χρόνου εικόνας και ήχου, που συνεπάγεται την απαίτηση για παροχή αυστηρών εγγυήσεων ρυθμαπόδισης και καθυστέρησης σε δίκτυα 802.11 αποτελεί ακόμα και σήμερα ένα ανοιχτό θέμα. Σκοπός αυτής της διπλωματικής είναι η μελέτη, ανάλυση και αξιολόγηση τρόπων παροχής εγγυήσεων ποιότητας σε ασύρματα δίκτυα ανίχνευσης φέροντος. Πιο συγκεκριμένα, θα πραγματοποιηθεί:

- Μελέτη του πρωτοκόλλου *IEEE 802.11e* που αποτελεί το υπάρχον πρότυπο παροχής Ποιότητας της Υπηρεσίας σε ασύρματα 802.11 δίκτυα.
- Μελέτη βέλτιστων και αποδοτικών τρόπων μαθηματικής μοντελοποίησης των απαιτήσεων των χρηστών σε ένα τέτοιο δίκτυο.
- Υλοποίηση και αξιολόγηση νέων τρόπων παροχής Ποιότητας της Υπηρεσίας σε ένα πραγματικό 802.11 ασύρματο δίκτυο.

2 Παρουσίαση του προτύπου ***IEEE 802.11*** και των διαθέσιμων μηχανισμών για διαφοροποίηση της ρυθμοαπόδοσης

2.1 Το πρότυπο ***IEEE 802.11***

Το *IEEE 802.11* [1] περιλαμβάνει ένα σύνολο από πρότυπα που περιγράφουν την υλοποίηση Α-σύρματων Τοπικών Δικτύων υπολογιστών (Wireless Local Area Networks ή WLANs), διαφορετικών μεθόδων διαμόρφωσης του μεταδιδόμενου σήματος και διαφορετικών μπάντων συχνοτήτων. Τα σημαντικότερα και πιο διαδεδομένα από αυτά τα πρότυπα είναι το *IEEE 802.11a*, το *IEEE 802.11b* και το *IEEE 802.11g*. Το πρότυπο *IEEE 802.11b* λειτουργεί στη μη αδειοδοτημένη μπάντα των 2.4 GHz χρησιμοποιώντας 13 κανάλια, και καταλαμβάνοντας ένα εύρος ζώνης συχνοτήτων πλάτους 104 MHz (σχήμα 2.1). Επίσης, για τη διαμόρφωση του σήματος χρησιμοποιείται η τεχνική της διασποράς φάσματος με άμεση ακολουθία (*Direct-Sequence Spread Spectrum, DSSS*), παρέχοντας ρυθμούς μετάδοσης έως και 11 Mbps.



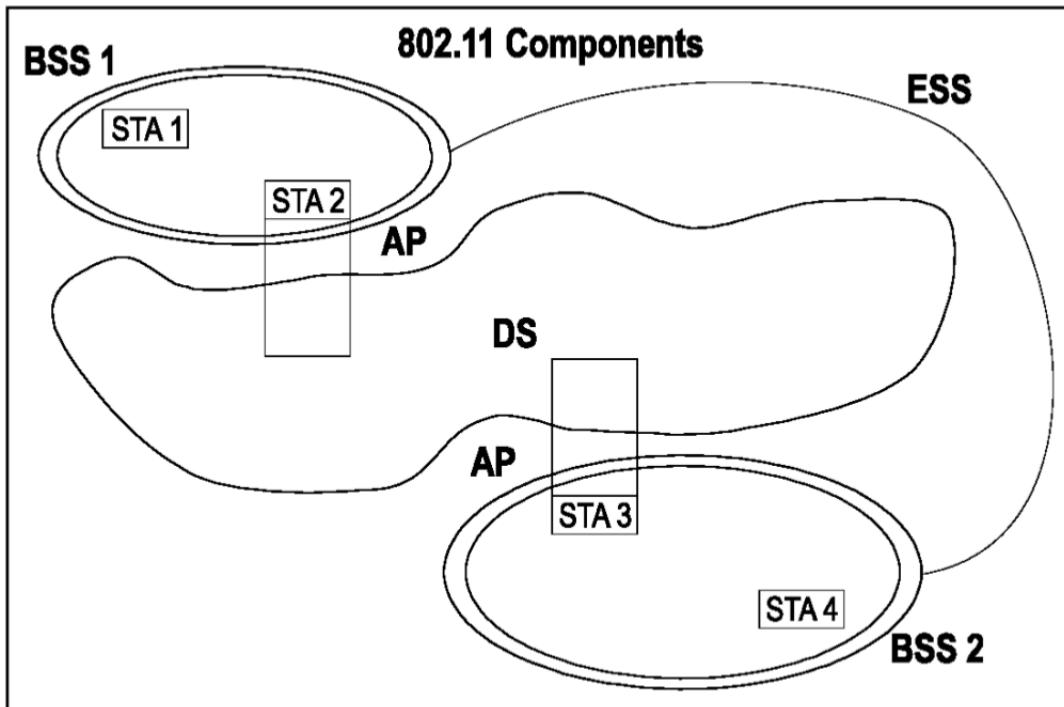
Σχήμα 2.1: Γραφική αναπαράσταση καναλιών Wi-Fi στην μπάντα των 2.4 GHz.

Το πρότυπο *IEEE 802.11a* λειτουργεί στις μπάντες των 5 GHz και 6 GHz και χρησιμοποιεί την τεχνική της ορθογωνικής πολύπλεξης διαίρεσης συχνότητας (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing, OFDM*), ενώ το *IEEE 802.11g* λειτουργεί στα 2.4 GHz και χρησιμοποιεί ένα συνδυασμό των μεθόδων διαμόρφωσης που χρησιμοποιούνται στα 802.11a και 802.11b για τις διάφορες ταχύτητες μετάδοσης. Παρά τις όποιες διαφορές, όλα αυτά τα πρότυπα μοιάζουν μεταξύ τους, υπό την έννοια ότι υποστηρίζουν την ίδια αρχιτεκτονική και χρησιμοποιούν το ίδιο πρωτόκολλο πρόσβασης μέσου (MAC), του οποίου τα βασικά χαρακτηριστικά θα αναλυθούν στη συνέχεια.

2.2 Αρχιτεκτονική του προτύπου IEEE 802.11

Η αρχιτεκτονική του προτύπου IEEE 802.11 περιλαμβάνει ένα σύνολο βασικών δομικών στοιχείων, τα οποία απαρτίζουν ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο (WLAN). Η πιο βασική δομική μονάδα ενός IEEE 802.11 WLAN είναι το Βασικό Σύνολο Υπηρεσίας (Basic Service Set, BSS) το οποίο συνήθως περιέχει ένα ή περισσότερα ασύρματα τερματικά (STAs) και ένα σταθμό βάσης ή σημείο πρόσβασης (Access Point, AP) μέσω του οποίου τα τερματικά συνδέονται στο ασύρματο δίκτυο. Το BSS προσφέρει υπηρεσίες στην περιοχή κάλυψης εντός της οποίας τα τερματικά - μέλη του βασικού συνόλου υπηρεσίας παραμένουν σε επικοινωνία με τον σταθμό βάσης. Η περιοχή αυτή ονομάζεται Περιοχή Βασικής Υπηρεσίας (Basic Service Area, BSA). Πολλά AP μπορούν να συνδέονται μεταξύ τους μέσω ενός συστήματος κατανομής (Distribution System, DS) σχηματίζοντας ένα εκτεταμένο σύνολο υπηρεσίας (Extended Service Set, ESS). Για τη διασύνδεση των AP μεταξύ τους, ένα σύστημα κατανομής μπορεί να χρησιμοποιεί είτε ενσύρματο, είτε ασύρματο μέσο.

Στο ακόλουθο διάγραμμα μπορούμε να δούμε σχηματικά τις δομικές οντότητες ενός τυπικού IEEE 802.11 WLAN.



Σχήμα 2.2: Γραφική αναπαράσταση της αρχιτεκτονικής ενός τυπικού IEEE 802.11 WLAN.

Εκτός από την τυπική διασύνδεση ενός Βασικού Συνόλου Υπηρεσίας όπου τα τερματικά συνδέονται σε ένα ήδη υπάρχον σημείο πρόσβασης, ένα δίκτυο *IEEE 802.11* μπορεί να παρέχει και απευθείας σύνδεση μεταξύ τερματικών χωρίς την ανάγκη σύνδεσης σε κάποιο AP. Σχηματίζεται έτσι ένα αποκεντρωμένο δίκτυο, το οποίο ονομάζεται Ανεξάρτητο Βασικό Σύνολο Υπηρεσίας (Independent Basic Service Set, IBSS). Αυτός ο τύπος δικτύου πολλές φορές αναφέρεται και ως *ad-hoc* δίκτυο.

2.3 Το Πρωτόκολλο Πρόσβασης Μέσου (MAC) στο *IEEE 802.11*

Το Πρωτόκολλο Πρόσβασης Μέσου (MAC) στο *IEEE 802.11* επιτελεί δύο κύριες λειτουργίες. Η μία είναι η λειτουργία της διευθυνσιοδότησης σε επίπεδο MAC και η δεύτερη είναι ο μηχανισμός έλεγχου πρόσβασης μέσου.

Σε ένα Βασικό Σύνολο Υπηρεσίας, πολλά τερματικά συνδέονται μεταξύ τους μέσω του σημείου πρόσβασης, χρησιμοποιώντας το ίδιο κανάλι μετάδοσης. Κάθε κόμβος έχει μία προσωπική και μοναδική 48-bit διεύθυνση MAC, η οποία και χρησιμεύει ως αναγνωριστικό για τον συγκεκριμένο κόμβο, κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του δικτύου.

Η δεύτερη και πιο πολύπλοκη λειτουργία, αφορά τον συγχρονισμό της επικοινωνίας, και την κατανεμημένη χρήση του μέσου (στη συγκεκριμένη περίπτωση, του ασύρματου διαύλου) από όλους τους χρήστες-εκπομπούς. Αυτή την λειτουργία την καθορίζει ο μηχανισμός ελέγχου πρόσβασης μέσου, με τον οποίο θα ασχοληθούμε στη συνέχεια.

2.3.1 Ο Μηχανισμός Ελέγχου Πρόσβασης Μέσου

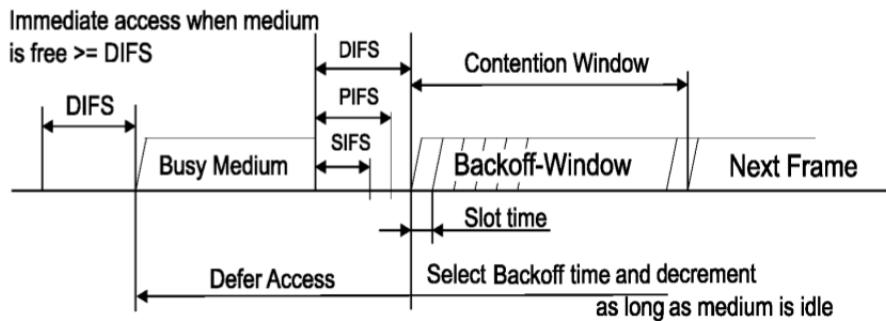
Ο βασικός μηχανισμός ελέγχου πρόσβασης μέσου στο *IEEE 802.11* ονομάζεται Μηχανισμός Κατανεμημένου Συγχρονισμού (Distributed Coordination Function, DCF) και ακολουθεί το σχήμα του μοντέλου πολλαπλής πρόσβασης *CSMA/CA* (*Carrier Sense - Multiple Access with Collision Avoidance*). Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται για την πολλαπλή χρήση του μέσου, από κόμβους που προσπαθούν να επικοινωνήσουν κάνοντας χρήση του ίδιου διαύλου.

Σύμφωνα με το μοντέλο CSMA/CA:

- ο κάθε κόμβος παρακολουθεί συνεχώς το κανάλι, έτσι ώστε να καθορίζει την κατάστασή του, με εξαίρεση το χρονικό διάστημα στο οποίο μεταδίδει, κατά το οποίο δεν μπορεί να γνωρίζει αν κάποιος άλλος κόμβος μεταδίδει ταυτόχρονα.
- κάθε κόμβος ο οποίος επιθυμεί να μεταδώσει δεδομένα, πρέπει πρώτα να παρακολουθήσει το κανάλι για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα κατά το οποίο δεν πρέπει να εντοπίσει κάποια

μετάδοση στο κανάλι. Αν και εφόσον το κανάλι εντοπιστεί ως "ανενεργό", τότε ο κόμβος μπορεί να ξεκινήσει τη διαδικασία της μετάδοσης. Σε διαφορετική περίπτωση ο κόμβος αναβάλλει τη διαδικασία.

Πιο ειδικά, για την ανάλυση των παραπάνω μεθόδων, ο χρόνος χρήσης του μέσου χωρίζεται σε χρονικές σχισμές (timeslots). Το χρονικό διάστημα ανάμεσα σε διαδοχικές μεταδόσεις πλαισίων δεδομένων (frames), ονομάζεται δια-πλαισιακό διάστημα (Inter-Frame Space, IFS). Υπάρχουν διάφοροι τύποι διαστήματος IFS. Από αυτούς, οι πιο σημαντικοί για την μελέτη μας, παρουσιάζονται στο σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.3: Τα βασικά χρονικά διαστήματα μετάδοσης ενός IEEE 802.11 WLAN με βάση την αρχική καθιέρωση του προτύπου.

- Το διάστημα SIFS (Short Inter-Frame Space) είναι το μικρότερο από τα δια-πλαισιακά διαστήματα. Το διάστημα αυτό χρησιμεύει κυρίως για την μετάδοση πακέτων επιβεβαίωσης (ACK), καθώς και στην περίπτωση που κάποιος κόμβος θέλει για κάποιο λόγο να μεταδώσει συνεχόμενα κάποια πλαίσια, καταλαμβάνοντας πλήρως το κανάλι για κάποιο χρονικό διάστημα.
- Το διάστημα DIFS (DCF Inter-Frame Space) είναι το διάστημα το οποίο χρησιμοποιείται από κόμβους οι οποίοι λειτουργούν σύμφωνα με τον μηχανισμό ελέγχου πρόσβασης μέσου DCF. Κάθε κόμβος ο οποίος εντοπίσει το μέσω ως ανενεργό, για διάστημα ίσο με DIFS ξεκινάει τη διαδικασία μετάδοσης.

Η διαδικασία μετάδοσης στο DCF ορίζεται ως εξής:

Κάθε κόμβος αναμένει έως ότου το κανάλι εντοπιστεί για διάστημα ίσο με DIFS ως ανενεργό. Με το που συμβεί αυτό, ο κόμβος περιμένει ένα τυχαίο χρονικό διάστημα (Backoff Time), και ξεκινάει να μεταδίδει.

Το χρονικό διάστημα αυτό, είναι ίσο με:

$$\text{BackoffTime} = \text{Random}() \times aSlotTime$$

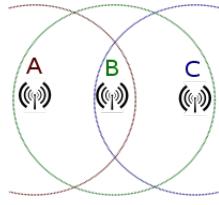
όπου ως $aSlotTime$ ορίζεται το χρονικό διάστημα μίας αδρανούς χρονικής σχισμής και η συνάρτηση **Random()** επιστρέφει έναν ψευδοτυχαίο φυσικό αριθμό από ομοιόμορφη κατανομή στο διάστημα $[0, CW]$.

Ο αριθμός CW , Contention Window ή *Παράθυρο Ανταγωνισμού* ονομάζεται έτσι, λόγω του φυσικού ρόλου που επιτελεί. Όπως προκύπτει από τη διαδικασία, ο κόμβος με το μικρότερο Backoff Time θα είναι αυτός ο οποίος θα μεταδώσει πρώτος. Έτσι, όλοι οι κόμβοι, ανάλογα με το ποιον αριθμό θα τύχουν, ανταγωνίζονται για προτεραιότητα στην εκπομπή.

Ειδικότερα, όταν ξεκινήσει η διαδικασία ανταγωνισμού (μετά την πάροδο ενός διαστήματος DIFS) κάθε κόμβος ξεκινάει να μετρά αντίστροφα από το χρόνο Backoff που έχει επιλέξει. Όταν το χρονόμετρό του μηδενιστεί, ξεκινάει την εκπομπή. Αν κατά τη διάρκεια της αντίστροφης μέτρησης του κόμβου, κάποιος άλλος κόμβος εκπέμψει (γιατί πιθανόν έληξε πρώτα το δικό του διάστημα αναμονής), τότε για τον χρόνο αυτόν της εκπομπής, ο αρχικός κόμβος σταματάει προσωρινά την αντίστροφη μέτρηση, και την συνεχίζει με την πάροδο ενός νέου διαστήματος DIFS. Στο σημείο αυτό, γίνεται κατανοητό ότι κάθε κόμβος επιλέγει ένα Backoff Time αφού εκπέμψει, και όχι κάθε φορά που ανιχνεύει το μέσο ως ανενεργό για ένα διάστημα DIFS. Το γεγονός αυτό κάνει τον ανταγωνισμό πιο δίκαιο μακροπρόθεσμα, χωρίς να επηρεάζει διαφορετικά το αποτέλεσμα της διαδικασίας.

Με του κόμβους όμως να διαλέγουν ψευδοτυχαίους φυσικούς αριθμούς σε ένα προκαθορισμένο διάστημα, και χωρίς να γνωρίζει ο ένας τον αριθμό που διάλεξε ο άλλος, υπάρχει πάντα η πιθανότητα δύο ή περισσότεροι κόμβοι να τύχουν τον ίδιο αριθμό, με αποτέλεσμα να προσπαθήσουν να εκπέμψουν ταυτόχρονα. Αυτή είναι η περίπτωση που στο κανάλι έχουμε *Σύγκρουση* (Collision). Για κατασκευαστικούς λόγους, όταν ένας κόμβος εκπέμπει, είναι κοστοβόρο να μπορεί ταυτόχρονα να ανιχνεύει το κανάλι, ώστε να εντοπίσει την εκπομπή ενός άλλου κόμβου. Επιπλέον, δύο κόμβοι που κάνουν μετάδοση ταυτόχρονα προς το σημείο πρόσβασης, μπορεί να μην βρίσκονται σε απόσταση λήψης μεταξύ τους, με αποτέλεσμα να μην μπορεί ο ένας να αναγνωρίσει αν ο άλλος κόμβος εκπέμπει (Hidden node problem). Για τους παραπάνω λόγους, ο εκπομπός δεν έχει την δυνατότητα να ανιχνεύσει άμεσα άντελικώς μπορεί να μεταδώσει το πλαίσιο δεδομένων επιτυχώς (Successfull Transmission) ή συμβαίνει Σύγκρουση. Αυτό μπορεί να το εξετάσει στη συνέχεια, κάνοντας χρήση του μηχανισμού ανίχνευσης μή επιτυχώς εκπεμφθέντων πακέτων, εφόσον αυτός είναι ενεργοποιημένος. Στην περίπτωση σύγκρουσης,

δεν πρόκειται να δεχτεί πλαίσιο επιβεβαίωσης επιτυχούς αποστολής από τον παραλήπτη (πλαίσιο ACK).



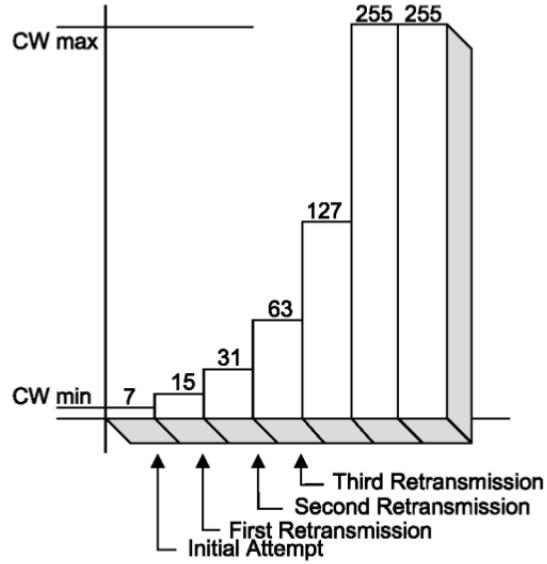
Σχήμα 2.4: Το πρόβλημα του χρυμμένου τερματικού (Hidden node problem).

Καθώς ο αριθμός των κόμβων στο κανάλι αυξάνει, για ένα συγκεκριμένο Παράθυρο Ανταγωνισμού (CW), αυξάνει και η πιθανότητα του ενδεχομένου να υπάρξει Collision κατά τη μετάδοση. Αυτή η πιθανότητα, μπορεί να γίνει αρκετά μεγάλη, σε σημείο που να δυσχεραίνει σημαντικά την επικοινωνία, και την απόδοση του δικτύου. Για αυτό το λόγο, η παράμετρος CW σε κάθε κόμβο, κατά τη λειτουργία του δικτύου δεν παραμένει απαραίτητα σταθερή, αλλά μπορεί να αλλάζει σε ένα εύρος ανάμεσα στο aCWmin και aCWmax, $aCW_{min} \leqslant CW \leqslant aCW_{max}$.

Οι αποδεκτές τιμές εντός του συγκεκριμένου εύρους για το CW είναι αυτές της μορφής $CW = 2^n - 1$ όπου $n \in \mathbb{N}$. Αρχικά, το Παράθυρο Ανταγωνισμού CW είναι ίσο με aCWmin. Στην περίπτωση που συμβεί κάποιο Collision τότε το CW παίρνει την επόμενη αποδεκτή τιμή κατά αύξουσα σειρά, εντός του εύρους $[aCW_{min}, aCW_{max}]$. Αν ξανασυμβεί Collision η διαδικασία συνεχίζεται, μέχρις ότου το CW πάρει τη μεγαλύτερη αποδεκτή τιμή aCWmax. Η παράμετρος, τελικώς επανέρχεται στην αρχική της τιμή aCWmin, στην περίπτωση επιτυχούς μετάδοσης. Η διαδικασία αυτή είναι γνωστή και ως μέθοδος εκθετικής αύξησης του χρόνου αναμονής ή Exponential Backoff procedure και παρουσιάζεται σχηματικά στο σχήμα 2.5.

Η διαδικασία εκθετικής αύξησης του Παραθύρου Ανταγωνισμού, συμβάλει σημαντικά στην αποφυγή των συγκρούσεων, ιδιαίτερα στην περίπτωση της υψηλής συμφόρησης λόγω πιθανής ύπαρξης μεγάλου αριθμού κόμβων που ανταγωνίζονται για εκπομπή.

Εντός του βασικού μηχανισμού πρόσβασης μέσου DCF υπάρχουν και κάποιοι επιπλέον μηχανισμοί για την καλύτερη λειτουργία. Για την αποφυγή των συγκρούσεων, ο εκπομπός ενός πλαισίου, δηλώνει σε κάθε πλαίσιο την χρονική διάρκεια μετάδοσης του, έτσι ώστε ο κάθε κόμβος να γνωρίζει το ελάχιστο χρονικό διάστημα για το οποίο θα αναβάλει την δική του διαδικασία εκπομπής. Πέραν της απλής λειτουργίας ανταγωνισμού εκπομπής, υπάρχει και η δυνατότητα σε ένα κόμβο, να δεσμεύσει αποκλειστικά το κανάλι για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα, έτσι ώστε να μεταδώσει πολλά πλαίσια στη σειρά. Αυτό



Σχήμα 2.5: Διαδικασία εκθετικής αύξησης του χρόνου αναμονής (Exponential Backoff procedure).

γίνεται μέσω του μηχανισμού *Αίτησης Αποστολής / Αδειοδότησης Αποστολής (RTS/CTS)*. Όταν ο μηχανισμός Αίτησης Αποστολής / Αδειοδότησης Αποστολής (RTS/CTS) είναι ενεργοποιημένος, κάθε χόμβος ο οποίος θέλει να εκπέμψει μία σειρά πακέτων, αποστέλλει πρώτα ένα πλαίσιο Αίτησης Αποστολής (Request-To-Send, RTS) προς τον παραλήπτη. Ο παραλήπτης με την σειρά του απαντά με ένα πλαίσιο Αδειοδότησης Αποστολής (Clear-To-Send, CTS). Και τα δύο αυτά πλαίσια αναγράφουν την διάρκεια για την οποία ο αποστολέας θέλει να δεσμεύσει το κανάλι. Με αυτό τον τρόπο, οποιοσδήποτε χόμβος ακούσει έστω και ένα από τα δύο πλαίσια, θα γνωρίζει εκ των προτέρων το χρόνο για τον οποίο θα πρέπει να αναβάλει την διαδικασία εκπομπής του. Επιπλέον, καθότι τα πλαίσια αυτά είναι μικρά, στην περίπτωση σύγκρουσης κατά τη διάρκεια εκπομπής τους, το χρονικό κόστος θα είναι μικρό σε σχέση με ένα κανονικό πλαίσιο.

Τέλος, για λόγους καλύτερης αποδοτικότητας, ένας εκπομπός, μπορεί να χρειαστεί να καταχερματίσει ένα μεγάλο πακέτο προς μετάδοση, και να το εκπέμψει σταδιακά σε περισσότερα του ενός πλαίσια. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται *κατακερματισμός (fragmentation)*.

Εκτός από τον βασικό μηχανισμό ελέγχου πρόσβασης μέσου DCF, ο οποίος είναι αποκεντρωμένος υπό την έννοια ότι δεν υπάρχει κεντρική διαχείριση για την χρονική κατανομή της πρόσβασης, το αρχικό πρότυπο IEEE 802.11 υποστηρίζει άλλον ένα μηχανισμό ελέγχου πρόσβασης μέσου, το PCF (Point Coordination Function) ο οποίος ακολουθεί ένα συγκεντρωτικό μοντέλο διαχείρισης. Στον PCF, το Access Point (AP) λείτουργει ως Σημείο Συντονισμού (Point Coordinator, PC) για τους υπόλοιπους

χόμβους του βασικού συνόλου υπηρεσίας. Αυτό γίνεται με την αποστολή ειδικών πλαισίων CF-Poll, με τα οποία παρέχεται η δικαιοδοσία μετάδοσης σε ένα σταθμό (STA) κατά την περίοδο απουσίας ανταγωνισμού (Contention Free Period). Όπως παρατηρούμε στο σχήμα 2.3, κατά τη λειτουργία του PCF, οι χόμβοι μεταδίδουν έπειτα από μία περίοδο αναμονής PIFS (PCF Inter-Frame Space) η οποία είναι μικρότερη από την περίοδο DIFS και έτσι δεν υπάρχει ανταγωνισμός κατά τη μετάδοση.

Ο PCF δεν γνώρισε ευρεία αποδοχή στην αγορά, και δεν συμπεριλαμβάνεται στις περισσότερες εμπορικές συσκευές.

2.3.2 IEEE 802.11e

Το IEEE 802.11e (2005) αποτελεί μία εγκεκριμένη τροπολογία του βασικού προτύπου IEEE 802.11 (1997), η οποία ψεπίζει ορισμένες επαυξήσεις στο αρχικό πρότυπο, έτσι ώστε να υπάρχει η δυνατότητα υποστήριξης *Ποιότητας της Υπηρεσίας (QoS)*. Με αυτή την τροπολογία, η οποία είναι συμβατή με όλες τις τροπολογίες 802.11b/g/n που αφορούν το φυσικό επίπεδο, πέραν των δύο αρχικών μηχανισμών ελέγχου πρόσβασης μέσου DCF και PCF, καθιερώνονται επιπλέον δύο νέοι. Αυτοί είναι ο *Μηχανισμός Βελτιωμένης Κατανεμημένης Πρόσβασης Μέσου (Enhanced Distributed Channel Access, EDCA)* και ο *Μηχανισμός Υψηλού Ελεγχόμενης Πρόσβασης Μέσου (HCF Controlled Channel Access, HCCA)* οι οποίοι αποτελούν βελτιωμένες εκδόσεις των DCF και PCF αντίστοιχα.

Στη συνέχεια θα ασχοληθούμε μόνο με τον EDCA, καθώς ο HCCA, όπως και ο PCF δεν είναι ευρέως χρησιμοποιούμενος.

2.3.3 Ο Μηχανισμός Βελτιωμένης Κατανεμημένης Πρόσβασης Μέσου (EDCA)

Ο Μηχανισμός Βελτιωμένης Κατανεμημένης Πρόσβασης Μέσου (EDCA) βασίζεται στον DCF, με κάποιες όμως σημαντικές τροποποιήσεις που του δίνουν τη δυνατότητα να υποστηρίζει *Ποιότητα της Υπηρεσία (QoS)*.

Έτσι, ο Μηχανισμός Βελτιωμένης Κατανεμημένης Πρόσβασης Μέσου μπορεί να προσφέρει διαφοροποίηση στην εξυπηρέτηση της κίνησης δεδομένων, ρυθμίζοντας τις ακόλουθες παραμέτρους:

- Τον χρόνο για τον οποίο ένας κόμβος πρέπει να ανιχνεύσει το κανάλι ως ανενεργό, προτού ξεκινήσει την διαδικασία αντίστροφης μέτρησης για μετάδοση (Backoff Procedure). Το χρονικό αυτό διάστημα ονομάζεται και Arbitration Inter-Frame Space, AIFS.
- Το μέγεθος του Παραθύρου Ανταγωνισμού (CW) που θα χρησιμοποιηθεί για την επιλογή του χρόνου αναμονής (Backoff Time).

- Τη χρονική διάρκεια για την οποία ο κόμβος μπορεί να μεταδώσει, αφού καταλάβει το κανάλι. Η διάρκεια αυτή ονομάζεται και Ευκαιρία Μετάδοσης (Transmission Oportunity, TXOP).

Πιο ειδικά, ο EDDA προσφέρει διαφοροποιημένη κατανεμημένη πρόσβαση στο μέσο, χρησιμοποιώντας οκτώ διαφορετικές Προτεραιότητες Χρήστη (User Priorities, UPs). Επίσης, ο EDDA ορίζει τέσσερις Κατηγορίες Πρόσβασης (Access Categories, ACs) για την μετάδοση κίνησης με διαφορετικές προτεραιότητες χρήστη. Η αντιστοιχία των προτεραιοτήτων χρήστη (UPs) σε Κατηγορίες Πρόσβασης (ACs) φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα.

| Priority | UP (Same as 802.1D user priority) | 802.1D designation | AC | Designation (informative) |
|----------|--|-----------------------|-------|------------------------------|
| Low | 1 | BK | AC_BK | Background |
| | 2 | — | AC_BK | Background |
| | 0 | BE | AC_BE | Best Effort |
| | 3 | BE | AC_BE | Best Effort |
| | 4 | CL | AC_VI | Video |
| | 5 | VI | AC_VI | Video |
| | 6 | VO | AC_VO | Voice |
| High | 7 | NC | AC_VO | Voice |

Πίνακας 2.1: Αντιστοιχίες Προτεραιοτήτων Χρήστη (UPs) σε Κατηγορίες Πρόσβασης του EDDA (ACs).

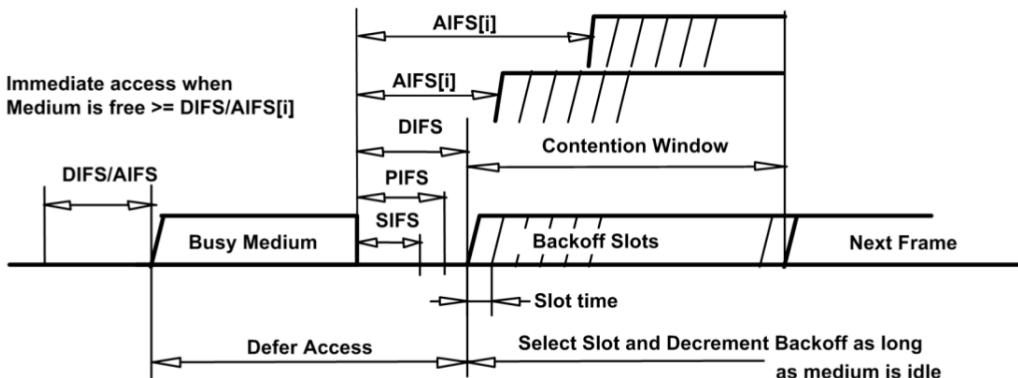
Για κάθε Κατηγορία Πρόσβασης, μία ξεχωριστή υλοποίηση ενός βελτιωμένου μηχανισμού DCF τρέχει ταυτόχρονα σε κάθε κόμβο. Οι υλοποιήσεις αυτές ανταγωνίζονται μεταξύ τους για την δυνατότητα εκπομπής, σαν να βρίσκονταν σε διαφορετικούς κόμβους, κάνοντας χρήση των δικών της EDDA παραμέτρων η κάθε μία. Στην περίπτωση που μηδενιστεί το χρονόμετρο εκπομπής (Backoff timer) για κάποια Κατηγορία Πρόσβασης, τότε ο κόμβος ξεκινάει την εκπομπή για χρόνο ίσο με το προκαθορισμένο TXOP για αυτή την Κατηγορία Πρόσβασης.

Τυπικές EDDA παράμετροι για κάποιο Access Category αποτελούν τα CWmin, CWmax, το AIFS και το Maximum TXOP, οι οποίες και καθορίζουν την πιθανότητα που έχει ένας κόμβος να εκπέμψει από μία συγκεκριμένη κατηγορία πρόσβασης, έναντι κάποιας άλλης κατηγορίας. Λ.χ. μία κατηγορία

με μικρά CWmin, CWmax, μικρό AIFS και μεγάλο TXOP έχει πολύ μεγαλύτερη πιθανότητα να έχει πρόσβαση στο κανάλι, σε σχέση με μία κατηγορία με μεγάλα CWmin, CWmax, μεγάλο AIFS και μικρό TXOP, πράγμα που σημαίνει ότι τελικώς θα έχει μεγαλύτερη προτεραιότητα η κίνηση δεδομένων της.

Με την εισαγωγή της παραμέτρου TXOP γίνεται επίσης εφικτό, να επιλυθεί το πρόβλημα, όπου ένας κόμβος με μικρή ταχύτητα μετάδοσης, για τη μετάδοση του πλαισίου του, καταλαμβάνει το κανάλι για δυσανάλογα μεγαλύτερο χρονικό διάστημα έναντι ενός κόμβου με μεγάλη ταχύτητα μετάδοσης. Στο σημείο αυτό να αναφέρουμε ότι στην περίπτωση όπου το πλαίσιο προς μετάδοση ενός κόμβου δεν μπορεί να μεταδοθεί στο διάστημα ενός TXOP, τότε αυτό θα να μεταδοθεί τμηματικά σε περισσότερα TXOPs, κάνοντας χρήση της διαδικασίας κατακερματισμού (fragmentation).

Στο διάγραμμα 2.6 παρουσιάζονται ποιοτικά οι βασικές παράμετροι του EDCA στο πεδίο του χρόνου.



Σχήμα 2.6: Τα βασικά χρονικά διαστήματα μετάδοσης ενός IEEE 802.11e WLAN σύμφωνα με το EDCA.

Από τα παραπάνω, γίνεται κατανοητό ότι ο Μηχανισμός EDCA, μας δίνει ένα ευρύ φάσμα επιλογών για την διαφοροποίηση στην εξυπηρέτησης της κίνησης διαφορετικών Προτεραιοτήτων Χρήστη. Αντικείμενο ευρείας μελέτης από πολλούς ερευνητές είναι οι δυνατότητες και οι τρόποι αξιοποίησης των συγκεκριμένων μηχανισμών, που παρέχει ο EDCA, για την παροχή Ποιότητας της Υπηρεσίας, καθώς και η πιθανή ανάγκη για τη δημιουργία νέων μηχανισμών για τον ίδιο σκοπό.

2.4 Παραδοσιακές μέθοδοι παροχής QoS από το υπάρχον πρότυπο IEEE 802.11e.

Για την κάλυψη των επειγουσών αναγκών της αγοράς, η *Wi-Fi Alliance* TM το 2004 θέσπισε το πρότυπο *Wi-Fi Multimedia* TM (WMM[®]) [3], το οποίο βασίζεται στο υπάρχον πρότυπο IEEE 802.11e. Μέσα από το WMM καθιερώνεται μία σειρά προκαθορισμένων ρυθμίσεων για τους υπάρχοντες μηχανισμούς παροχής Quality of Service του IEEE 802.11e. Οι ρυθμίσεις αυτές στοχεύουν στην διαφοροποίηση της εξυπηρέτησης της κίνησης για διαφορετικές κατηγορίες πρόσβασης, ούτως ώστε να προστατεύονται οι κατηγορίες ανελαστικής κίνησης (λ.χ audio, video), από την υπερφόρτωση λόγω του μή διαχωρισμού τους από κατηγορίες ελαστικής κίνησης (λ.χ μεταφορά αρχείων).

Σύμφωνα με το πρότυπο WMM για ένα ασύρματο δίκτυο QoS IEEE 802.11b, οι προκαθορισμένες παράμετροι λειτουργίας του μηχανισμού EDCA για τις τέσσερις κατηγορίες κίνησης (AC_BK, AC_BE, AC_VI, AC_VO) φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα 2.2.

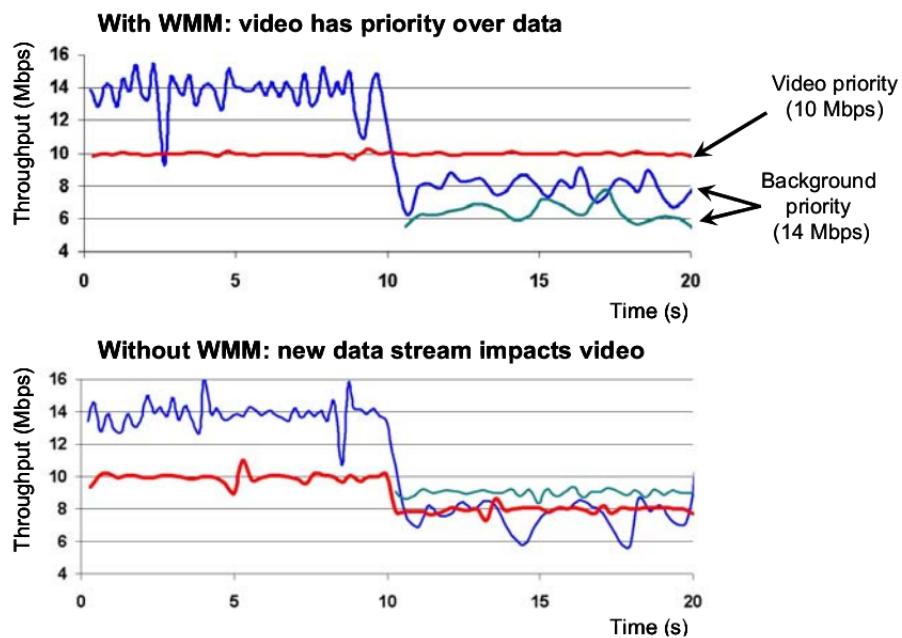
| AC | CWmin | CWmax | AIFS | Max TXOP |
|---------------------|-------|-------|------|----------|
| Background (AC_BK) | 31 | 1023 | 7 | 0 |
| Best Effort (AC_BE) | 31 | 1023 | 3 | 0 |
| Video (AC_VI) | 15 | 31 | 2 | 3.008ms |
| Voice (AC_VO) | 7 | 15 | 2 | 1.504ms |

Πίνακας 2.2: Πίνακας τυπικού συνόλου παραμέτρων EDCA.

Με βάση τις συγκεκριμένες παραμέτρους, κάθε κατηγορία κίνησης έχει διαφορετική πιθανότητα εκπομπής στο κανάλι, ανάλογη της προτεραιότητας της. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε, κατηγορίες με χαμηλή προτεραιότητα, όπως η κατηγορία AC_BK, έχει υψηλές τιμές παραμέτρων CW και AIFS με αποτέλεσμα να έχει χαμηλή πιθανότητα εκπομπής στο κανάλι, ενώ κατηγορίες με υψηλή προτεραιότητα, όπως η κατηγορία AC_VO, έχει χαμηλές τιμές παραμέτρων CW και AIFS με αποτέλεσμα να έχει υψηλή πιθανότητα εκπομπής στο κανάλι. Έτσι, στην περίπτωση συμφόρησης, όπου το εύρος ζώνης της γραμμής δεν μπορεί να εξυπηρετήσει ολόκληρη την παραγόμενη κίνηση, η ροή δεδομένων λ.χ. μίας εφαρμογής μετάδοσης ήχου σε πραγματικό χρόνο, θα προηγείται σε εξυπηρέτηση, σε σχέση με την κίνηση μίας εφαρμογής με μικρότερη προτεραιότητα, κι έτσι ο χρήστης δεν θα παρατηρεί διακοπή του ήχου κατά την χρήση της εφαρμογής του.

Τα παραπάνω γίνονται εμφανή εξετάζοντας τα αποτελέσματα ενός ενδεικτικού πειράματος. Στα ακόλουθα διαγράμματα φαίνεται η ρυθμαπόδοση τριών ροών δεδομένων στο πεδίο του χρόνου. Η πρώτη

ροή δεδομένων είναι τύπου AC_VI και οι άλλες δύο είναι τύπου AC_BK. Για τα πρώτα δέκα δευτερόλεπτα του πειράματος έχουμε δύο μόνο ροές δεδομένων, για την εξυπηρέτηση των οποίων η χωρητικότητα της γραμμής επαρκεί. Στη συνέχεια, εισέρχεται στο πείραμα και μία τρίτη ροή δεδομένων, με αποτέλεσμα η γραμμή πλέον να μην επαρκεί για την εξυπηρέτηση και των τριών ροών. Στο πρώτο διάγραμμα όπου έχουμε το μηχανισμό WMM σε λειτουργία, παρατηρούμε οτι μετά τα πρώτα δέκα δευτερόλεπτα, ενώ η ροή AC_BK επηρεάζεται, παρόλα αυτά δεν έχουμε πτώση της ρυθμαπόδοσης για την ροή AC_VI. Αντιθέτως, στο δεύτερο πείραμα φαίνεται πως με την είσοδο της τρίτης ροής, επηρεάζονται και οι δύο αρχικές κατηγορίες κίνησης. Πρακτικά αυτό σημαίνει οτι στην δεύτερη περίπτωση, η εφαρμογή της AC_VI ροής δεν θα μπορούσε να λειτουργήσει με αποδεκτό τρόπο.



Σχήμα 2.7: Παράδειγμα εφαρμογής της λειτουργίας WMM σε ένα ασύρματο δίκτυο (Πηγή [3]).

Το πρότυπο WMM® παρέχει μία χονδροειδή διαφοροποίηση της εξυπηρέτησης για τις διάφορες κατηγορίες κίνησης, η οποία μπορεί να είναι συνήθως επαρκής για απλές εφαρμογές. Παρόλα αυτά, δεν παρέχει καμία εγγύηση για την ποιότητα της παρεχόμενης υπηρεσίας. Επίσης, το πρότυπο, ενέχει μία σειρά από άλλα μειονεκτήματα τα οποία σχετίζονται με την δικαιοσύνη αλλά και την αποδοτικότητα ώς προς την εξυπηρέτηση των διάφορων ροών δεδομένων ενός δικτύου. Έτσι, παρόλο που το WMM® είναι σχεδιασμένο για την κατά το δυνατόν προσαρμογή στις περισσότερες εφαρμογές, σε ειδικότερες περιπτώσεις δεν παρέχει τη βέλτιστη δυνατότητα χρησιμοποίησης του καναλιού. Λ.χ. στην περίπτωση που το κανάλι, οριακά επαρκεί για την εξυπηρέτηση ενός αριθμού χρίσματων ροών δεδομένων ανελαστικής

κίνησης, με το υπάρχον πρότυπο θα υπάρχει σπατάλη πόρων για εφαρμογές ελαστικής κίνησης, εις βάρος των εφαρμογών ανελαστικής κίνησης. Επίσης, σε περιπτώσεις όπου έχουμε είτε πολύ μικρό, είτε πολύ μεγάλο αριθμό κόμβων στο δίκτυο, υπάρχει η πιθανότητα να έχουμε υψηλότερο χρόνο αναμονής από τον αναγκαίο και άρα υψηλή καθυστέρηση είτε χαμηλότερο μέσο χρόνο αναμονής από τον αναγκαίο και άρα υψηλό αριθμό συγχρούσεων στο κανάλι. Τέτοιου είδους προβλήματα θα προσπαθήσουμε να επιλύσουμε στη συνέχεια, με στόχο την παροχή εγγυήσεων ποιότητας αλλά και την βέλτιστη χρησιμοποίηση του καναλιού για αυτό το σκοπό.

3 Παρουσίαση της Πλατφόρμας Δοκιμών

3.1 Εισαγωγική περιγραφή της Πλατφόρμας Δοκιμών

Για την πειραματική αξιολόγηση των παραδοσιακών αλλά και των νέων μεθόδων παροχής QoS τις οποίες όμως μελετήσουμε στη συνέχεια, όμως χρησιμοποιήσουμε την πλατφόρμα δοκιμών Ασύρματων Τοπικών Δικτύων του Εργαστηρίου Διαχείρησης Δικτύων και Βέλτιστου Σχεδιασμού *Network Management and Optimal Design lab* του *ΕΜΠ*. Η πλατφόρμα δοκιμών μας επιτρέπει να υλοποιήσουμε ένα πραγματικό *IEEE 802.11* δίκτυο, ενώ ταυτόχρονα μας παρέχει όλα τα απαραίτητα εργαλεία και μηχανισμούς για τον έλεγχο αυτού, διευκολύνοντας έτσι την υλοποίηση και ενσωμάτωση νέων αλγορίθμων προς αξιολόγηση, αλλά και την δυνατότητα εξαγωγής και περαιτέρω ανάλυσης των πειραματικών αποτελεσμάτων από αυτό.

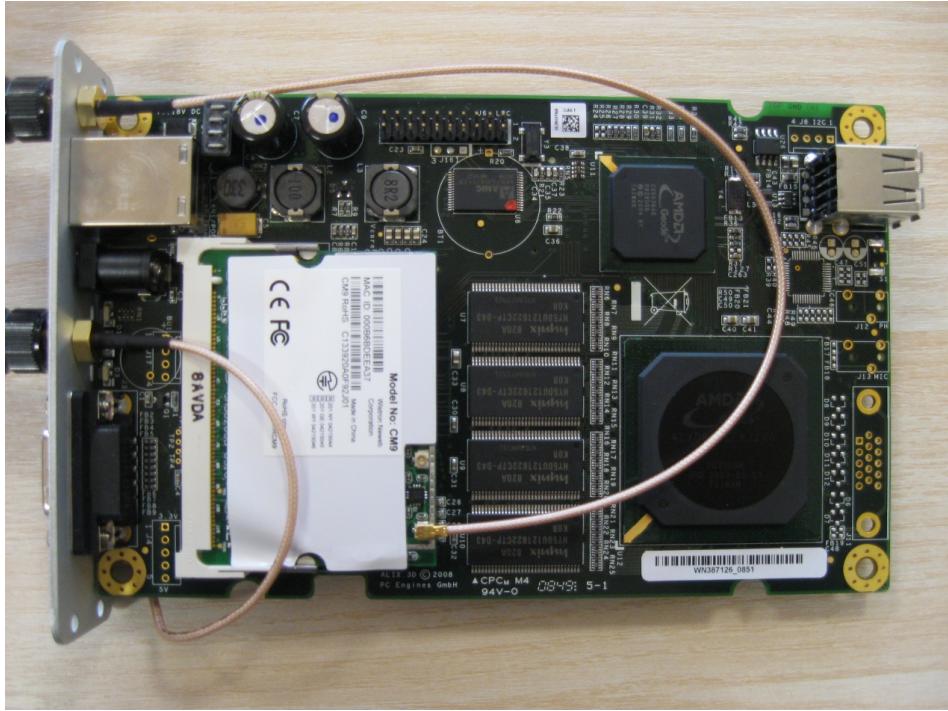
3.2 Αναλυτική περιγραφή της Πλατφόρμας Δοκιμών

Στην συνέχεια όμως περιγράψουμε τον τρόπο και τις παραμέτρους υλοποίησης της πειραματικής πλατφόρμας δοκιμών, αναλύοντας τα τεχνικά χαρακτηριστικά των κόμβων, την δομή του δικτύου και τον τρόπο εκτέλεσης των πειραμάτων.

3.2.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά των κόμβων

Η πλατφόρμα δοκιμών του εργαστηρίου Network Management and Optimal Design lab αποτελείται από 10 ασύρματους κόμβους *ALIX.3* (σχήμα 3.1), έναν κεντρικό εξυπηρετητή ελέγχου System Orchestrator, καθώς ένα switch για την ενσύρματη καλωδίωση τους. Οι ασύρματοι κόμβοι διαθέτουν μία θύρα LAN τύπου Ethernet για σύνδεση τους με τον κεντρικό εξυπηρετητή, και δύο κάρτες ασύρματου δικτύου *Wistron CM9 MiniPCI* για σύνδεση σε ασύρματα δίκτυα τύπου *IEEE 802.11*. Το chipset που χρησιμοποιούν οι ασύρματες κάρτες είναι το *Atheros AR5004*. Τα καθήκοντα του κεντρικού εξυπηρέτησης ελέγχου περιλαμβάνουν την διαχείριση και τον έλεγχο των ασύρματων κόμβων, την συγκέντρωση αναλυτικών στοιχείων της απόδοσης αυτών, καθώς και την επίβλεψη της ορθής λειτουργίας τους και ανάκαμψης από σφάλματα.

Το λογισμικό που χρησιμοποιήσαμε για τη λειτουργία των συγκεκριμένων συστημάτων είναι μία ελαφριά έκδοση *Linux* κατάλληλη για ενσωματωμένα συστήματα, το *Linux Voyage* [4], με πυρήνα 2.6.30-voyage. Για τη λειτουργία των ασύρματων καρτών, καταλήξαμε στη χρήση του *Madwifi driver* [5]. Ο συγκεκριμένος driver μας παρείχε υψηλή δυνατότητα παραμετροποίησης, πράγμα αναγκαίο για



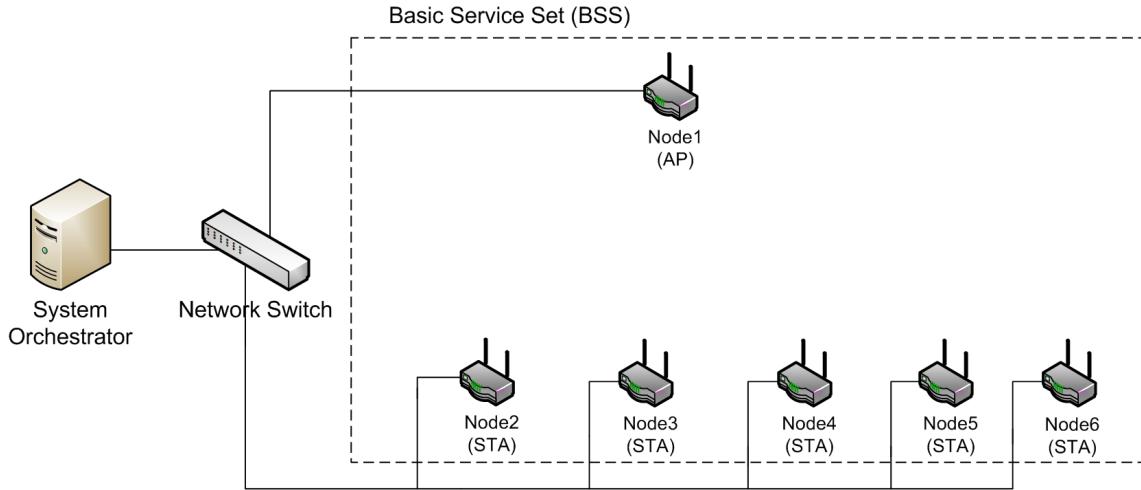
Σχήμα 3.1: Ασύρματος κόμβος δικτύου ALIX.3 οποίος διαθέτει θύρα LAN και δύο ασύρματες κάρτες δικτύου IEEE 802.11.

την εκτέλεση των πειραμάτων. Επίσης, λόγω της μεγάλης κοινότητας ανοιχτού κώδικα που ασχολήθηκε με την ανάπτυξή του, μας παρείχε υψηλές δυνατότητες υποστήριξης για την επέλυση των προβλημάτων που προέκυψαν.

3.2.2 Δομή του δικτυου

Η δομή του πειραματικού μας δικτύου, ακολουθεί την κλασική αρχιτεκτονική IEEE 802.11 για το Βασικό Σύνολο Υπηρεσίας (BSS). Κάθε ένα από τα ενσωματωμένα συστήματα, στα οποία από εδώ και στο εξής θα αναφερόμαστε απλώς και ως κόμβοι, συνδέεται μέσω του ενός wireless interface του στο ασύρματο δίκτυο. Ένας από τους κόμβους λειτουργεί ως σημείο πρόσβασης (Access Point) ενώ οι υπόλοιποι λειτουργούν απλά ως ασύρματα τερματικά (STAs).

Όλοι οι κόμβοι, μέσω της θύρας τοπικού δικτύου τους συνδέονται στον κεντρικό εξυπηρετητή ελέγχου του εργαστηρίου (System Orchestrator) από όπου και μπορούμε να ελέγχουμε τη λειτουργία αλλά και την παραμετροποίησή τους.



Σχήμα 3.2: Λογικό διάγραμμα της τοπολογίας του πειραματικού δικτύου.

3.2.3 Εκτέλεση των πειραμάτων

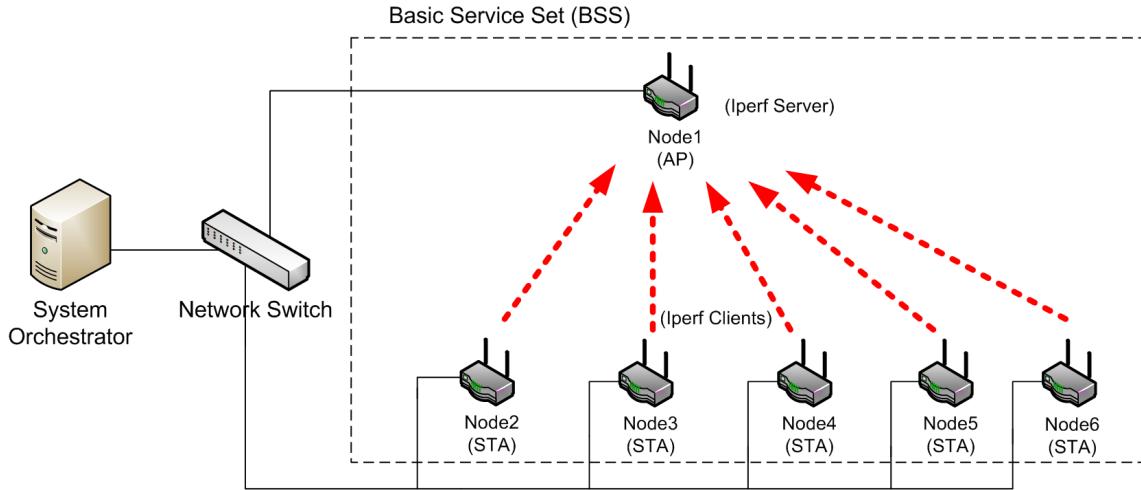
Στα πειράματά μας, μπορούμε με κεντρικό έλεγχο από τον εξυπηρετητή ελέγχου του εργαστηρίου να επηρεάσουμε όλο το πλήθος των παραμέτρων για κάθε κόμβο ξεχωριστά, ανάλογα με το είδος του πειράματος που θέλουμε να πραγματοποιήσουμε καθώς επίσης και να συλλέξουμε τα δεδομένα των πειραματικών αποτελεσμάτων στο τέλος του πειράματος.

Κατά την εκτέλεση των πειραμάτων μας, χρειάζεται να μεταδίδουμε κίνηση δεδομένων από τα ασύρματα τερματικά (STAs), μέσω της ασύρματης ζεύξης, προς τον κεντρικό κόμβο (Access Point). Ο κεντρικός κόμβος, μπορεί να καταγράφει τα στατιστικά δεδομένα για την κίνηση που δέχεται από το κάθε τερματικό, και με το τέλος του πειράματος έχουμε τη δυνατότητα να συλλέξουμε και να αναλύσουμε τα δεδομένα αυτά.

Για το σκοπό αυτό, θα χρησιμοποιήσουμε το πρόγραμμα iperf [6], το οποίο είναι κατάλληλο για την μέτρηση και καταγραφή στατιστικών δεδομένων όσον αφορά γραμμές δικτύων υπολογιστών. Το iperf μπορεί να παράγει ροές δεδομένων είτε TCP είτε UDP, συγκεκριμένων προδιαγραφών που μπορούμε να ορίσουμε εμείς, καθώς επίσης και να καταγράψει τα αποτελέσματα των ληφθέντων δεδομένων.

Όπως παρουσιάζεται στο σχετικό σχήμα 3.3, για τη μέτρηση της απόδοσης των ζεύξεων του δικτύου, έχουμε εγκαταστήσει τον server του iperf στο Access Point και στα τερματικά έχουμε εγκαταστήσει το iperf client. Κατά την εκτέλεση ενός πειράματος, τα επιλεγμένα STAs συνδέονται στον iperf server του Access Point και ξεκινούν να μεταδίδουν δεδομένα. Στα πειράματα μας θα θεωρήσουμε ότι οι κόμβοι μας είναι "greedy", δηλαδή ότι έχουν πάντα δεδομένα προς αποστολή, και πως προσπαθούν

πάντα να καταλάβουν το μεγαλύτερο δυνατό εύρος ζώνης της γραμμής για τον εαυτό τους.



Σχήμα 3.3: Γραφική αναπαράσταση των ροών δεδομένων κατά την εκτέλεση πειραμάτων.

Για την αποστολή των δεδομένων από τους clients χρησιμοποιήσαμε την κατηγορία κίνησης AC_BK.

Ο λόγος ήταν οτι για αυτή την κατηγορία ο driver μας έδινε τη δυνατότητα ρύθμισης των παραμέτρων EDCA. Για να το επιτύχουμε αυτό, μαρκάραμε τα πακέτα προς αποστολή του iperf, με τη χρήση του λογισμικού iptables στα STAs, με τα κατάλληλα Type-of-Service (TOS) Bits, που τα εντάσσουν στη συγκεκριμένη κατηγορία κίνησης.

Για την εκτέλεση των πειραμάτων στην παρούσα διπλωματική, χρησιμοποιήθηκαν κάποιες σταθερές παράμετροι σε όλους τους κόμβους, οι οποίες φαίνονται στον πίνακα 3.1.

| Parameter | value |
|-----------------------------|----------------|
| Wi-Fi mode | 802.11b |
| R (TxRate) | 11Mbps (fixed) |
| $aSlotTime$ | $20\mu sec$ |
| T_{SIFS} | $10\mu sec$ |
| T_{DIFS} | $50\mu sec$ |
| T_{pre} (short preamble) | $96\mu sec$ |
| T_{phy} | $48\mu sec$ |
| H_{MAC} MAC header size | 34 bytes |
| L_{UDP} UDP datagram size | 1470 bytes |

Πίνακας 3.1: Πίνακας σταθερών τιμών που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα.

Επίσης, κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, για να παρατηρήσουμε με μεγαλύτερη άνεση τα φαινόμενα ανταγωνισμού για μετάδοση, έχουμε απενεργοποιήσει τον μηχανισμό RTS/CTS και τον μηχανισμό ελέγχου σφαλμάτων για το MAC layer (NoAckPolicy). Τέλος, εκτός κι αν αναφέρεται διαφορετικά, οι προεπιλεγμένες τιμές AIFS και TXOPlimit θα είναι 2 και 0 αντίστοιχα. Η τιμή $TXOPlimit = 0$ σημαίνει ότι ο κόμβος επιτρέπεται να μεταδώσει πλαίσια οποιουδήποτε μεγέθους και έτσι, δεν χρειάζεται να κάνει κατακερματισμό πακέτων κατά τη μετάδοση.

Στη συνέχεια, θα χρησιμοποιήσουμε την παραπάνω πλατφόρμα δοκιμών, για την πειραματική αξιολόγηση και ανάλυση της επίδρασης στη απόδοση του δικτύου των διαφόρων παραμέτρων που μας παρέχει ο μηχανισμός EDCA.

4 Αξιολόγηση της επίδρασης των παραμέτρων του μηχανισμού EDDA για την παροχή QoS στο IEEE 802.11e.

Όπως αναφέραμε και προηγουμένως ο μηχανισμός EDDA του πρωτοκόλλου IEEE 802.11e μας παρέχει μεγάλη ευελιξία όσον αφορά τις παραμέτρους που μπορούμε να μεταβάλλουμε επιδιώκοντας την παροχή Ποιότητας της Υπηρεσίας στους ασύρματους κόμβους του δικτύου. Απεναντίας, αυτή η πληθώρα διαθέσιμων επιλογών δυσκολεύει την πραγματική κατανόηση του μηχανισμού EDDA και τον συγκεκριμένο ρόλο της εκάστοτε παραμέτρου του. Για αυτό το λόγο και στη συνέχεια θα μελετήσουμε την κάθε παράμετρο ξεχωριστά. Πιο συγκεκριμένα, αρχικά θα μελετήσουμε την επίδραση της παραμέτρου CW στην αποστολή της κίνησης δεδομένων και στη συνέχεια θα μελετήσουμε την αντίστοιχη επίδραση της παραμέτρου AIFS. Αυτό θα γίνει με μία μαθηματική μοντελοποίηση της αναμενόμενης συμπεριφοράς του δικτύου και για τις δύο περιπτώσεις, και στη συνέχεια με την πειραματική επαλήθευση και αξιολόγηση του μαθηματικού μοντέλου στο πειραματικό δίκτυο της πλατφόρμας δοκιμών.

4.1 Μελέτη της επίδρασης της παραμέτρου CW στην αποστολή της κίνησης δεδομένων ενός δικτύου QoS

Στη συνέχεια θα αξιολογήσουμε αναλυτικά άλλα και πειραματικά τη δυνατότητα που μας παρέχει η παράμετρος CW για τη διαφοροποίηση στην παράδοση της κίνησης για διαφορετικές ροές δεδομένων.

Όπως παρουσιάσαμε στο κεφάλαιο 2, η παράμετρος CW μπορεί να παίρνει συγκεκριμένες τιμές της μορφής $CW = 2^n - 1$ όπου $n \in \mathbb{N}$. Στο πειραματικό μας δίκτυο, αυτές οι τιμές μπορούν να είναι στο διάστημα από 1 έως 1023.

Στο παραδοσιακό μοντέλο WMM, όπως αναφέραμε στην παράγραφο 2.4 η παράμετρος CW μπορεί να κινείται ανάμεσα στις παραμέτρους CW_{min} και CW_{max}, σύμφωνα με τη διαδικασία εκθετικής αύξησης του CW. Ο μηχανισμός αυτός συμβάλει στην αποσυμφόρηση του δικτύου στην περίπτωση που υπάρχουν πολλές συγχρούσεις στο κανάλι, με αποτέλεσμα την καλύτερη επικοινωνία. Στην ειδική περίπτωση που γνωρίζουμε εκ των προτέρων το μέγεθος του φόρτου στο κανάλι, λ.χ. γνωρίζοντας τον αριθμό των κόμβων και τις απαιτήσεις τους, μπορούμε να υπολογίσουμε μία βέλτιστη τιμή CW για κάθε χρήστη, έτσι ώστε να υπάρχει μία ισορροπία ανάμεσα στον αριθμό των συγχρούσεων που συμβαίνουν στο κανάλι, και στο μέσο χρόνο αναμονής των κόμβων. Με αυτό τον τρόπο μπορούμε να επιτύχουμε τη βέλτιστη χρησιμοποίηση του καναλιού. Για τους παραπάνω λόγους, στα πειράματά μας θα μελετήσουμε το CW ως μία και μόνη παράμετρο, αφού θα έχουμε $CW_{min} = CW_{max}$.

Για την μελέτη της παραμέτρου CW, θα υπολογίσουμε οτι όλοι οι κόμβοι χρησιμοποιούν ίδιες τις υπόλοιπες παραμέτρους του EDCA, και εμείς θα μεταβάλουμε μόνο το παράθυρο ανταγωνισμού. Συνεπώς για όλους τους κόμβους το AIFS θα είναι σταθερό και ίσο με $SIFS + 2 \times aSlotTime$.

4.1.1 Πιθανότητες καταστάσεων για το κανάλι (Channel state probabilities)

Αρχικά για την εξαγωγή των εξισώσεων περιγραφής της λειτουργίας του καναλιού με βάση τις παραμέτρους EDCA των κόμβων πρέπει να υπολογίσουμε την πιθανότητα ένας κόμβος να προσπαθήσει να εκπέμψει σε μία χρονική σχισμή στο κανάλι. Σύμφωνα με το μοντέλο του p-persistent CSMA, κάθε κόμβος j έχει μία σταθερή και ανεξάρτητη πιθανότητα τ_j να εκπέμψει, σε κάθε μία από τις χρονικές σχισμές, μετά από μία περίοδο εκπομπής. Δεδομένου ότι ο αριθμός της χρονικής σχισμής όπου θα εκπέμψει ο κόμβος προέρχεται από ομοιόμορφη κατανομή στο διάστημα $[0, CW_j]$, μπορούμε να πούμε ότι ο μέσος χρόνος αναμονής σε αριθμό χρονικών σχισμών ισούται με $\overline{backoff}_j = \frac{CW_j + 1}{2}$, και κατά συνέπεια η πιθανότητα εκπομπής για μία τυχαία χρονική στιγμή στο κανάλι από τον κόμβο j ισούται με:

$$\tau_j = \frac{2}{CW_j + 1} \quad (4.1)$$

Αναλυτική απόδειξη του παραπάνω τύπου μπορούμε να βρούμε στο paper των Bianchi, Fratta και Oliveri [7].

Στη συνέχεια θα μελετήσουμε το εύρος των καταστάσεων στις οποίες δύναται να βρίσκεται το κανάλι στη διάρκεια του χρόνου, και θα υπολογίσουμε και τις αντίστοιχες πιθανότητες να βρεθεί σε μία από τις καταστάσεις αυτές. Έτσι, μπορούμε να ορίσουμε τις τρεις ακόλουθες καταστάσεις για το κανάλι:

1. I_k - Κατάσταση Αδράνειας.

Η κατάσταση αδράνειας περιλαμβάνει οποιαδήποτε χρονική σχισμή στην περίοδο ανταγωνισμού, κατά την οποία δεν μεταδίδει κανένας σταθμός. Ο δείκτης k όταν υπάρχει, αναφέρεται στον αριθμό της συγκεκριμένης χρονικής σχισμής αδράνειας, μετά από μία περίοδο εκπομπής ή μία περίοδο σύγχρουσης. Αναφορικά, η πρώτη χρονική σχισμή αδράνειας είναι αυτή μετά από μία περίοδο εκπομπής ή σύγχρουσης σύν το διάστημα SIFS.

2. S_j - Κατάσταση Επιτυχούς Μετάδοσης.

Αυτή η κατάσταση περιλαμβάνει στη χρονική περίοδο επιτυχούς εκπομπής από έναν κόμβο j .

3. C - Κατάσταση Σύγκρουσης

Η Κατάσταση Σύγκρουσης αναφέρεται στην περίοδο κατά την οποία δύο ή περισσότεροι κόμβοι, θα προσπαθήσουν αποτυχημένα να μεταδώσουν ταυτόχρονα.

Για Μ συνολικό αριθμό ενεργών κόμβων, και ορίζοντας το γινόμενο $\prod_{j=1}^M (1 - \tau_j) \triangleq A_M$, μπορούμε να εκφράσουμε τις πιθανότητες να βρεθεί το κανάλι σε μία από τις προαναφερθέντες καταστάσεις. [10]

Πιθανότητα το κανάλι να παραμείνει αδρανές για μία χρονική σχισμή:

$$P_I = \prod_{j=1}^M (1 - \tau_j) = A_M$$

Πιθανότητα στη συγκεκριμένη χρονική σχισμή να έχουμε επιτυχή εκπομπή από τον κόμβο j :

$$P_{S_j} = \frac{\tau_j}{1 - \tau_j} A_M$$

Πιθανότητα ύπαρξης σύγκρουσης στο κανάλι:

$$P_C = 1 - P_I - \sum_{j=1}^M P_{S_j}$$

Έχοντας υπολογίσει τις πιθανότητες καταστάσεων για το κανάλι μπορούμε να υπολογίσουμε την αναμενόμενη ρυθμαπόδοση των κόμβων με βάση τις παραμέτρους EDDCA για τον κάθε κόμβο.

4.1.2 Ρυθμαπόδοση του κόμβου (Station Throughput)

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της προηγούμενη παραγράφου και δεδομένων των χρόνων μίας αδρανούς χρονικής σχισμής (t_s), *macetimeoutmethod*(T_D), και μίας χρονικής σχισμής σύγκρουσης (T_C) αντίστοιχα, εκφράζουμε το μέσο χρόνο διάρκειας μιας οποιασδήποτε χρονικής σχισμής ίσο με

$$\bar{t} = t_s P_I + T_D \sum_{j=1}^M P_{S_j} + T_C P_C$$

Θεωρώντας για λόγους απλότητας ότι το χρονικό διάστημα της σύγκρουσης είναι περίπου ίσο με το χρονικό διάστημα της επιτυχούς εκπομπής, τελικά, μπορούμε να υπολογίσουμε τη μέση ρυθμαπόδοση για έναν κόμβο j ως:

$$\eta_j = \frac{\bar{m} \times P_{S_j}}{\bar{t}} = \frac{\bar{m}}{T_D} \frac{\frac{\tau_j}{1-\tau_j} A_M}{1 - A_M(1 - \frac{t_s}{T_D})}, \quad (T_C \simeq T_D) \quad (4.2)$$

όπου το \bar{m} είναι το φορτίο σε bit το οποίο μεταδίδεται σε ένα χρονικό διάστημα επιτυχούς μετάδοσης T_D από έναν κόμβο.

Επίσης αντίστοιχα μπορούμε να υπολογίσουμε και τη μέση συνολική - αιθροιστική ρυθμαπόδοση του συνόλου των κόμβων ως:

$$\eta_{total} = \frac{\bar{m} \times P_S}{\bar{t}} = \frac{\bar{m}}{T_D} \frac{(\sum_i^M \frac{\tau_i}{1-\tau_i}) A_M}{1 - A_M(1 - \frac{t_s}{T_D})} \quad (4.3)$$

Στο σημείο αυτό, να συμπληρώσουμε αναφορικά, ότι για τον υπολογισμό του χρόνου επιτυχούς μετάδοσης T_D στους τύπους (4.2) και (4.3), χρησιμοποιούμε τον ακόλουθο τύπο, τον οποίο μπορούμε να βρούμε και στο [8]

$$T_D = \frac{8 \times (L_{DATA} + H_{MAC})}{R} + T_{pre} + T_{phy} + T_{IFS}$$

όπου το L_{DATA} είναι το μέγεθος του TCP ή UDP πακέτου σε byte, H_{MAC} είναι το μέγεθος σε byte της επικεφαλίδας MAC για κάθε πλαίσιο μετάδοσης, R είναι ο ρυθμός μετάδοσης και τα T_{pre} , T_{phy} και T_{IFS} είναι οι χρόνοι εκπομπής του προοιμίου φυσικού επιπέδου, της επικεφαλίδας φυσικού επιπέδου και το διαπλαισιακό χρονικό διάστημα αντίστοιχα.

Έχοντας πλέον τη δυνατότητα υπολογισμού της συνολικής ρυθμαπόδοσης, αλλά και της ρυθμαπόδοσης κάθε επιμέρους κόμβου, με βάση τις παραμέτρους του δικτύου, στη συνέχεια θα μελετήσουμε τη δυνατότητα διαφοροποίησης της ρυθμαπόδοσης σύμφωνα με το συγκεκριμένο μοντέλο.

4.1.3 Διαφοροποίηση της ρυθμαπόδοσης (Throughput Differentiation)

Όπως παρατηρούμε από τους τύπους (4.1) και (4.2), η ρυθμαπόδοση του κάθε κόμβου εξαρτάται άμεσα από την παράμετρο του Παραθύρου Ανταγωνισμού του (CW). Αυτό πρακτικά, μας δίνει τη δυνατότητα διαφοροποίησης της ρυθμαπόδοσης ανάμεσα στους κόμβους, ρυθμίζοντας κατάλληλα τις αντίστοιχες παραμέτρους τους.

Βρίσκοντας το λόγο της ρυθμαπόδοσης ανάμεσα σε δύο κόμβους i και j ως συνάρτηση της πιθανότητας εκπομπής των κόμβων αυτών, έχουμε:

$$\frac{\eta_i}{\eta_j} = \frac{\tau_i(1 - \tau_j)}{\tau_j(1 - \tau_i)}$$

Για σχετικά μεγάλες τιμές της παραμέτρου CW, η πιθανότητα εκπομπής του κόμβου τείνει στο μηδέν, άρα μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την προσέγγιση $(1 - \tau) \simeq 1$, με αποτέλεσμα:

$$\frac{\eta_i}{\eta_j} = \frac{\tau_i}{\tau_j} \quad (4.4)$$

Από την παραπάνω σχέση, μπορούμε επίσης να πάρουμε την εξής αναλογία:

$$\frac{\eta_j}{\eta_{total}} = \frac{\tau_j}{\sum_{i=1}^M \tau_i} \quad (4.5)$$

η οποία και συνδέει τη ρυθμαπόδοση ενός κόμβου με τη συνολική ρυθμαπόδοση, και τις αντίστοιχες πιθανότητες εκπομπής των κόμβων.

Με βάση τον αρχικό τύπο (4.1) μπορούμε να εκφράσουμε την παραπάνω σχέση (4.4), συναρτήσει των παραμέτρων CW ως εξής:

$$\frac{\eta_i}{\eta_j} = \frac{CW_j + 1}{CW_i + 1} \quad (4.6)$$

σύμφωνα με την οποία, για σχετικά μεγάλες τιμές του CW, η ρυθμαπόδοση ενός κόμβου είναι αντιστρόφως ανάλογη της παραμέτρου του Παραθύρου Ανταγωνισμού του. Αυτό αποτελεί ένα πολύ σημαντικό συμπέρασμα, το οποίο θα χρησιμοποιήσουμε στη συνέχεια για την επίλυση προβλημάτων διαφοροποίησης της ρυθμαπόδοσης και παροχής εγγυήσεων Ποιότητας της Υπηρεσίας.

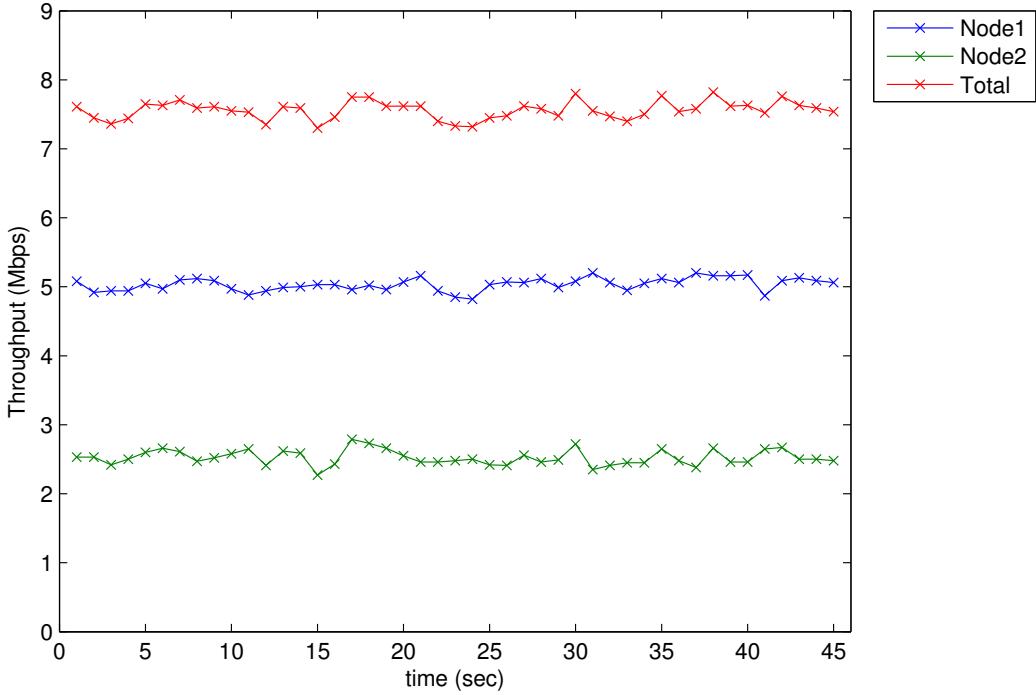
4.1.4 Πειραματική αξιολόγηση της δυνατότητας διαφοροποίησης της ρυθμαπόδοσης με χρήση της παραμέτρου CW.

Στη συνέχεια, θα προσπαθήσουμε να αξιολογήσουμε πειραματικά τη δυνατότητα διαφοροποίησης της ρυθμαπόδοσης στο IEEE 802.11e, με ρύθμιση της παραμέτρου του Παραθύρου Ανταγωνισμού (CW). Για την αξιολόγηση αυτή, θα χρησιμοποιήσουμε την πλατφόρμα δοκιμών που έχουμε υλοποιήσει. Έτσι, εκτελώντας μία σειρά πειραμάτων, θα μπορέσουμε να ελέγξουμε το κατά πόσον το θεωρητικό μοντέλο που προαναφέραμε, μας παρέχει μια ικανοποιητική περιγραφή της πραγματικής συμπεριφοράς του συστήματος.

Πείραμα 4.1

Στο πρώτο πείραμα που θα εκτελέσουμε, θα χρησιμοποιήσουμε δύο μόνο κόμβους ως σταθμούς αποστολής δεδομένων (STAs), καθώς και ένα Access Point για τη λήψη των ροών δεδομένων. Για τους δύο αυτούς κόμβους θα προσπαθήσουμε να ελέγχουμε την αναμενόμενη ρυθμαπόδοση που θα έχουν, ρυθμίζοντας κατάλληλα τις αντίστοιχες παραμέτρους CW για τον καθέναν. Πιο συγκεκριμένα, στον πρώτο κόμβο θα δώσουμε Παράθυρο Ανταγωνισμού $CW_1 = 31$ ενώ ο κόμβος 2 θα έχει $CW_2 = 63$. Με βάση τον τύπο (4.6) αναμένουμε ο κόμβος 1 να εμφανίσει την διπλάσια ρυθμαπόδοση από τον κόμβο 2.

Έτσι, ξεκινάμε να μεταδίδουμε κίνηση UDP και από τους δύο κόμβους ταυτόχρονα για 45 δευτερόλεπτα. Τα αποτελέσματα της κίνησης καταγράφονται ανά δευτερόλεπτο, και παρουσιάζονται στο ακόλουθο σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.1: Ρυθμαπόδοση των κόμβων 1 και 2 για $CW_1 = 31$ και $CW_2 = 63$ σε διάστημα 45 δευτερολέπτων.

Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε, πράγματι ο λόγος της μετρούμενης ρυθμαπόδοσης των δύο κόμβων η_1/η_2 είναι συνεχώς κοντά στο 2 με πολύ μικρές αποκλίσεις.

Εκτός από τη σχετική ρυθμαπόδοση, κάνοντας χρήση των τύπων (4.2) και (4.3), μπορούμε να συνάγουμε συμπεράσματα για την απόλυτη ρυθμαπόδοση των κόμβων. Με βάση τις τιμές των παραμέτρων για το συγκεκριμένο πείραμα, ο τύπος (4.3) μας δίνει αναμενόμενη συνολική ρυθμαπόδοση $\eta_{total} \simeq 7.75 Mbit/s$. Παρόλα αυτά, η μέση παρατηρούμενη συνολική ρυθμαπόδοση στο δίκτυο, κινείτε γύρο στα $7.55 Mbit/s$. Η διαφορά ανάμεσα στη θεωρητικά αναμενόμενη ρυθμαπόδοση, και στην πρακτικά παρατηρούμενη, μπορεί να οφείλεται σε διαφορετικούς παράγοντες, όπως χαμένα πλαίσια λόγω κακής λήψης, ή παρεμβολών στο δίκτυο, καθώς και σε παράλληλη χρήση του μέσου από τους κόμβους για άλλους λόγους όπως λ.χ. για αποστολή πλαισίων διαχείρισης (beacon frames) κλπ.

Σε κάθε περίπτωση παρά την μικρή διαφορά σε απόλυτα μεγέθη ρυθμαπόδοσης από το θεωρητικό μοντέλο, οι σχετικές τιμές της ρυθμαπόδοσης ανάμεσα στους δύο κόμβους παραμένουν αρκετά κοντά στις αναμενόμενες.

Πείραμα 4.2

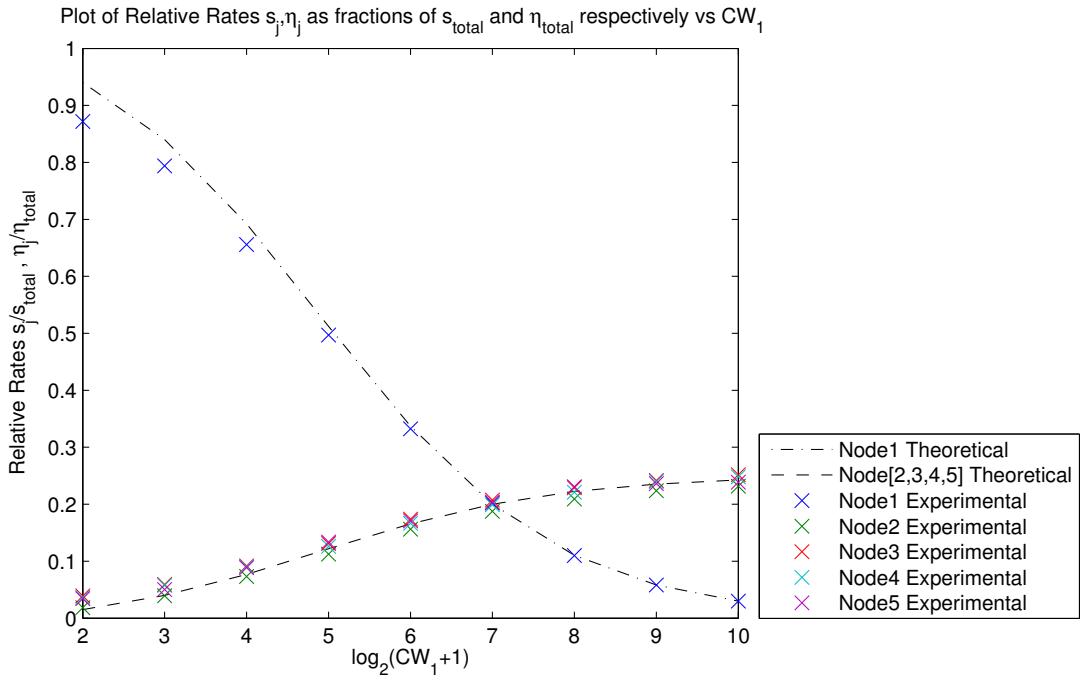
Για την αξιολόγηση της διαφοροποίησης στη ρυθμαπόδοση σε μεγαλύτερο εύρος, θα εκτελέσουμε άλλο ένα σχετικό πείραμα. Τώρα, θα χρησιμοποιήσουμε 5 κόμβους αποστολής δεδομένων. Από τους 5 αυτούς κόμβους οι τέσσερις (2,3,4,5) θα έχουν σταθερό $CW = 127$, ενώ θα μεταβάλουμε το CW του κόμβου 1 στο διάστημα [3, 1023]. Η κίνηση των κόμβων θα καταγράφεται για διάστημα 30 δευτερολέπτων. Με αυτό τον τρόπο θα μπορέσουμε να δούμε την επίδραση μεγαλύτερων διαφορών ως προς το παραθύρο ανταγωνισμού και ανάμεσα σε περισσότερους κόμβους.

Αρχικά θα συγκρίνουμε το θεωρητικό μοντέλο, με τα πρακτικά αποτελέσματα του πειράματος, ως προς τη δυνατότητα παροχής σχετικής ρυθμαπόδοσης ανάμεσα στους κόμβους, ως κλάσματος της συνολικής ρυθμαπόδοσης κάνοντας χρήση των τύπων (4.2) και (4.3). Για να ποσοτικοποιήσουμε την ικανότητα του μηχανισμού ως προς την παροχή σχετικής ρυθμαπόδοσης ανάμεσα στους κόμβους, θα χρησιμοποιήσουμε τον δείκτη αναλογικής δικαιοσύνης Ψ που χρησημοποιεί ο Jain στο [9], με

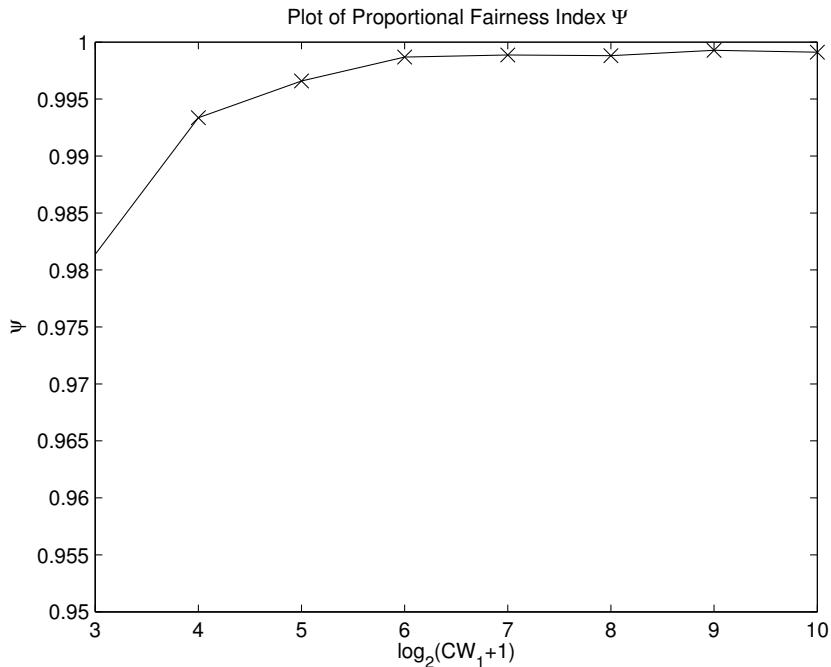
$$\Psi = \frac{(\sum_{j=1}^M s_j / \eta_j)^2}{M \sum_{j=1}^M (s_j / \eta_j)^2} \quad (4.7)$$

όπου M ο αριθμός των κόμβων, η_j η θεωρητικώς εκτιμώμενη τιμή της ρυθμαπόδοσης του κόμβου j και s_j η πειραματική τιμή της ρυθμαπόδοσης του κόμβου j . Ο δείκτης Ψ , παίρνει πραγματικές τιμές στο διάστημα $[0, 1]$ με την τιμή 1 να σημαίνει την καλύτερη δυνατή αναλογική δικαιοσύνη με βάση τις θεωρητικώς εκτιμώμενες τιμές η_j .

Στα παρακάτω σχήματα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του πειράματος. Στο σχήμα 4.2 παρουσιάζονται ο λόγος της πειραματικής σχετικής ρυθμαπόδοσης s_j / s_{total} και ο αντίστοιχος λόγος η_j / η_{total} των θεωρητικών τιμών, ως συνάρτηση της μεταβλητής του Παραθύρου Ανταγωνισμού για τον κόμβο 1 (CW_1). Όπως παρατηρούμε από το διάγραμμα οι πειραματικές τιμές της ρυθμαπόδοσης των κόμβων ως κλάσματος της συνολικής, είναι πολύ κοντά στις θεωρητικώς αναμενόμενες. Αυτό σημαίνει ότι για τις συγκεκριμένες τιμές των παραμέτρων EDCA, όσον αφορά την διαφοροποίηση της ρυθμαπόδοσης, οι τύποι (4.2) και (4.3) μας παρείχαν μια αρκετά αξιόπιστη περιγραφή του συστήματος. Αυτό φαίνεται και από το αντίστοιχο διάγραμμα 4.3 του δείκτη δικαιοσύνης. Όπως βλέπουμε στο διάγραμμα του δείκτη δικαιοσύνης, για υψηλότερες τιμές της παραμέτρου CW_1 έχουμε καλύτερη αναλογική δικαιοσύνη, από ότι για χαμηλότερες. Παρόλα αυτά, ο δείκτης Ψ παραμένει σε υψηλά επίπεδα για τις περισσότερες τιμές της παραμέτρου CW_1 .

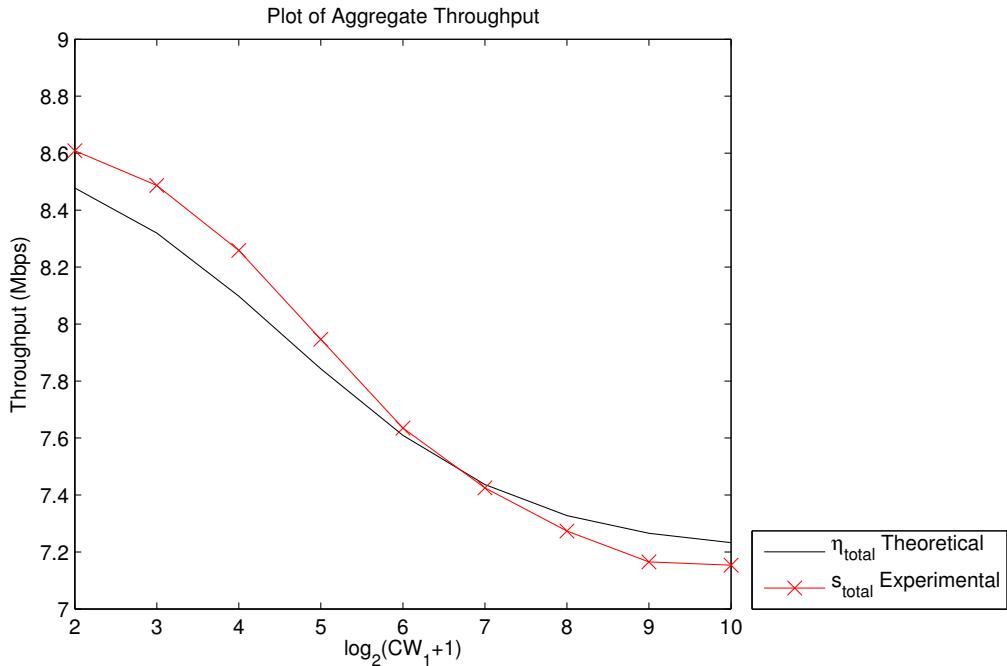


Σχήμα 4.2: Διάγραμμα των λόγων s_j/s_{total} και $\eta_j/\eta_{\text{total}}$ συναρτήσει του Παραθύρου Ανταγωνισμού του κόμβου 1. $CW_{j \neq 1} = 127$.



Σχήμα 4.3: Διάγραμμα του δείκτη αναλογικής δικαιοσύνης Ψ , συναρτήσει του Παραθύρου Ανταγωνισμού του κόμβου 1. $CW_{j \neq 1} = 127$.

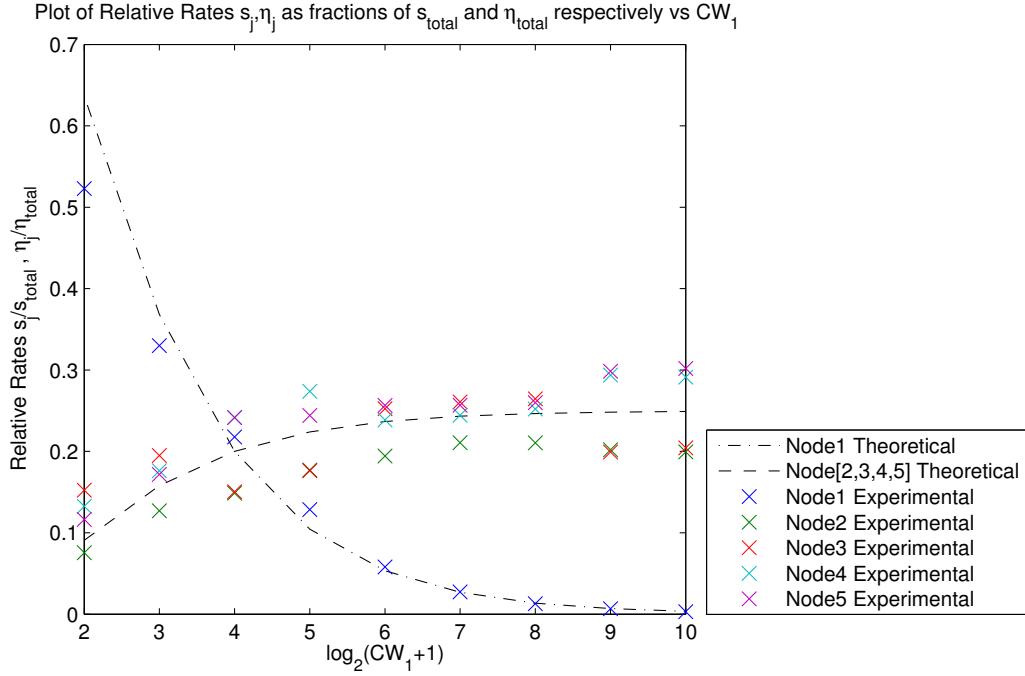
Όσον αφορά τις απόλυτες τιμές της ρυθμαπόδοσης για τους κόμβους, προκύπτουν ως κλάσματα της συνολικής μετρούμενης ρυθμαπόδοσης s_{total} η οποία φαίνεται στο σχήμα 4.4. Στο ίδιο διάγραμμα έχουμε συμπεριλάβει και την αντίστοιχη θεωρητική τιμή της συνολικής ρυθμαπόδοσης η_{total} , όπως υπολογίζεται από τον τύπο (4.3). Παρατηρούμε οτι η συνολική ρυθμαπόδοση και στις δύο καμπύλες, αυξάνει για τιμές του CW , καθώς ο μέσος χρόνος αναμονής για εκπομπή μικραίνει. Επίσης, όπως είναι εμφανές, η καμπύλη της πειραματικής ρυθμαπόδοσης, ακολουθεί παρόμοιο μοτίβο με τη θεωρητική καμπύλη. Παρόλα αυτά, για τιμές του CW μεγαλύτερες από 64 εμφανίζεται να έχουμε ελαφρώς χαμηλότερη ρυθμαπόδοση από τη θεωρητική, πράγμα αναμενόμενο για τους ίδιους λόγους που περιγράψαμε στο προηγούμενο παράδειγμα. Για τιμές του CW μικρότερες από 64, παρατηρούμε μία ελαφρώς αυξημένη ρυθμαπόδοση, σε σχέση με την θεωρητικά αναμενόμενη. Αυτό αποτελεί μία ιδιόμορφη συμπεριφορά, την οποία θα προσπαθήσουμε να εξηγήσουμε στο επόμενο παράδειγμα.



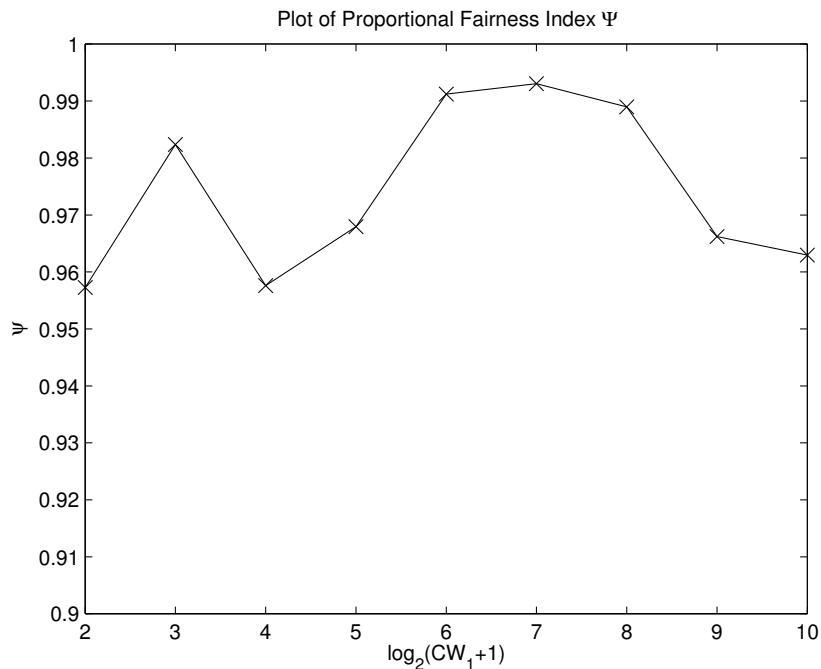
Σχήμα 4.4: Διάγραμμα της συνολικής ρυθμαπόδοσης συναρτήσει του Παραθύρου Ανταγωνισμού του κόμβου 1. $CW_{j \neq 1} = 127$.

Πείραμα 4.3

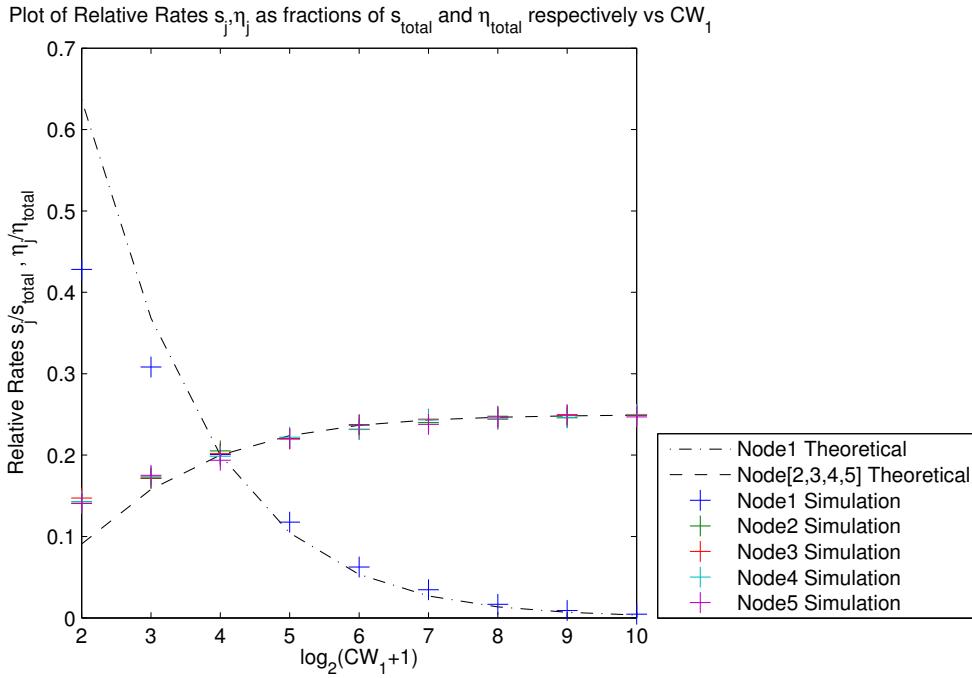
Στο τρίτο πείραμα θα χρησιμοποιήσουμε την ίδια ακριβώς διάταξη του δεύτερου πειράματος, αλλά αυτή τη φορά, οι κόμβοι (2,3,4,5) θα έχουν χαμηλότερη τιμή $CW = 15$. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα φαίνονται στη συνέχεια.



Σχήμα 4.5: Διάγραμμα των λόγων s_j/s_{total} και η_j/η_{total} συναρτήσει του Παραθύρου Ανταγωνισμού του κόμβου 1. $CW_{j \neq 1} = 15$.

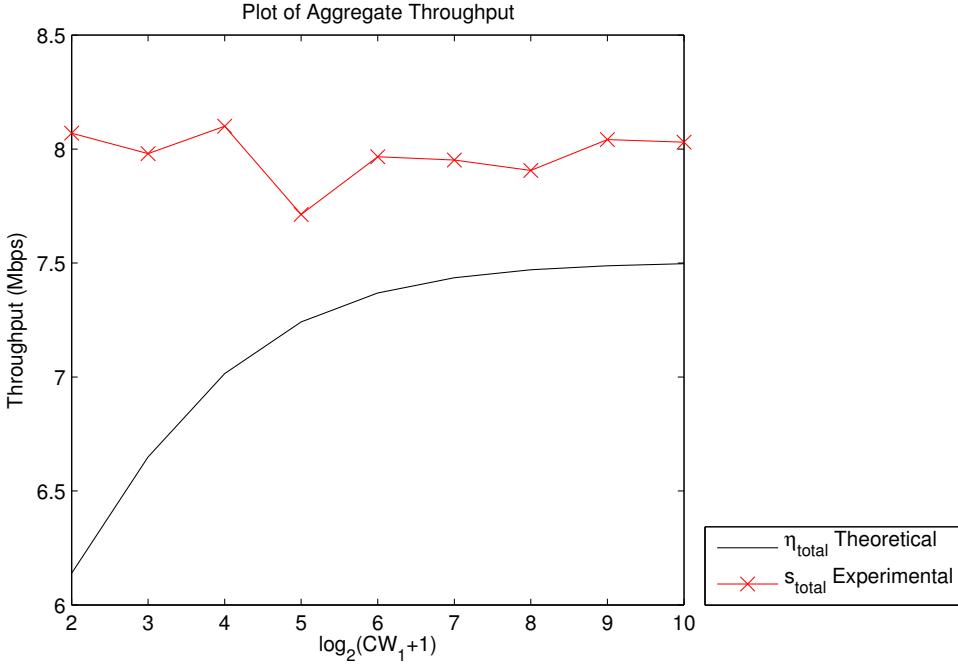


Σχήμα 4.6: Διάγραμμα του δείκτη αναλογικής δικαιοσύνης Ψ , συναρτήσει του Παραθύρου Ανταγωνισμού του κόμβου 1. $CW_{j \neq 1} = 15$.



Σχήμα 4.7: Διάγραμμα των αποτελεσμάτων προσομοίωσης των λόγων s_j/s_{total} και $\eta_j/\eta_{\text{total}}$ συναρτήσει του Παραθύρου Ανταγωνισμού του κόμβου 1. $CW_{j \neq 1} = 15$.

Εδώ, μπορούμε να συμπεράνουμε από τα διαγράμματα 4.5 και 4.6 ότι για το σύνολο των μετρήσεων, και ειδικά για τους κόμβους (2,3,4,5) η αναλογική δικαιοσύνη ανάμεσα στους κόμβους είναι σε σταθερά χαμηλότερα επίπεδα από το προηγούμενο παράδειγμα. Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι αυτού του είδους η συμπεριφορά συσχετίζεται με τη χρήση μικρών παραμέτρων CW στους κόμβους, όπου υπάρχει πολύ υψηλός ανταγωνισμός. Η μεγαλύτερη αυτή διασπορά στις τιμές της ρυθμαπόδοσης και η απόκλιση τους από τη θεωρητικώς αναμενόμενες είναι ένα φαινόμενο το οποίο δεν μπορεί να εξηγηθεί επαρκώς από το θεωρητικό μας μοντέλο. Σε έναν βαθμό μπορεί να οφείλεται στον αυξημένο αφιθμό συγκρούσεων στο κανάλι αφήνοντας έτσι λιγότερο χρόνο για εκπομπές έπειτα από ανταγωνισμό. Για να μπορέσουμε να αποφανθούμε επαρκώς ως προς τα αίτια του φαινομένου αυτού, καταφεύγουμε στην προσομοίωση. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιούμε το MATLAB για να μοντελοποιήσουμε τον μηχανισμό πρόσβασης μέσου EDCA και προσομοιώνουμε το παραπάνω πείραμα. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο σχήμα 4.7. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε στο σχήμα 4.7, στα αποτελέσματα της προσομοίωσης, δεν εμφανίζεται αντίστοιχη διασπορά των τιμών ρυθμαπόδοσης, οπότε μπορούμε να εικάσουμε ότι η συγκεκριμένη συμπεριφορά πιθανόν είναι να οφείλεται σε λόγους που έχουν να κάνουν με την υλοποίηση του πρωτοκόλλου στο υλικό των κόμβων του δικτύου.



Σχήμα 4.8: Διάγραμμα της συνολικής ρυθμαπόδοσης συναρτήσει του Παραθύρου Ανταγωνισμού του κόμβου 1. $CW_{j \neq 1} = 15$.

Παρατηρώντας επίσης το διάγραμμα συνολικής ρυθμαπόδοσης 4.8 για το πείραμα 4.3, εντοπίζουμε άλλη μία ιδιομορφία στη συμπεριφορά. Αυτή αφορά τη συνολική πειραματική ρυθμαπόδοση, η οποία εμφανίζεται να έχει υψηλότερες τιμές από την θεωρικά αναμενόμενη. Αυτό το φαινόμενο, επίσης δεν μπορεί να εξηγηθεί με βάση το θεωρητικό μοντέλο που έχουμε υιοθετήσει μέχρι στιγμής και το οποίο βασίζεται στο p-persistent CSMA/CA. Ετσι, για την εξήγηση της ιδιόμορφης αυτής συμπεριφοράς, θα αποταθούμε στη μελέτη των Hu, Kim, Hou, Chi και Sai Shankar στο [10].

Όπως αναφέραμε και αρχικά, στο p-persistent μοντέλο, μετά από μία περίοδο επιτυχούς εκπομπής ή σύγκρουσης, για τις χρονικές σχισμές που ακολουθούν, ο κάθε κόμβος έχει μία σταθερή πιθανότητα να εκπέμψει. Σύμφωνα με το [10], αυτό το μοντέλο, σε ένα πραγματικό σταθμό IEEE 802.11 δεν ισχύει. Αυτό που συμβαίνει στην πραγματικότητα είναι ότι, καθώς ένας κόμβος εκπέμπει μόλις ο μετρητής καθυστέρησης του (Backoff timer) γίνει μηδέν, οι μετρητές των υπόλοιπων κόμβων παγώνουν λόγω του εντοπισμού της παρούσας μετάδοσης στο χανάλι. Ετσι, οι μετρητές των κόμβων αυτών, θα έχουν τιμή τουλάχιστον 1. Αυτό σημαίνει ότι ένας κόμβος ο οποίος δεν συμμετείχε στη μετάδοση, στη χρονική σχισμή αμέσως μετά από αυτή της μετάδοση, δεν πρόκειται να εκπέμψει. Αντιθέτως, ένας κόμβος ο οποίος μόλις εξέπεμψε, έχει τη δυνατότητα εκπομπής στην αμέσως επόμενη σχισμή μετά την

περίοδο εκπομπής του, και μάλιστα με πολύ μικρότερο ή και καθόλου ανταγωνισμό. Το φαινόμενο αυτό αναφέρεται και ως φαινόμενο του post-busy slot. Έτσι, για μικρές τιμές παραμέτρων CW όπου υπάρχει ισχυρός ανταγωνισμός και υψηλή πιθανότητα συγκρούσεων ένας κόμβος μπορεί πιο εύκολα, εφόσον εκπέμψει μία φορά, να καταλάβει το κανάλι για ένα χρονικό διάστημα, και να συνεχίσει να εκπέμπει με άνισο τρόπο, χωρίς ανταγωνισμό ή πιθανότητα σύγκρουσης. Αυτό μπορεί να εξηγήσει και την ασυνήθιστα υψηλή ρυθμαπόδοση, που παρατηρείται κατά το πείραμα, και δεν μπορεί να εξηγηθεί με το κλασικό μοντέλο. Η συμπεριφορά αυτή δε, μπορεί να γίνεται όλο και πιο αισθητή για μικρότερες τιμές παραμέτρων CW .

4.2 Μελέτη της επίδρασης της παραμέτρου AIFS στην αποστολή της κίνησης δεδομένων ενός δικτύου QoS

Η παράμετρος AIFS καθορίζεται με βάση τον τύπο $AIFS = SIFS + AIFSN * aSlotTime$, όπου $AIFSN$ είναι η ο αριθμός των αδρανών χρονικών σχισμών κατά τις οποίες ο κόμβος θα περιμένει επιπλέον, προτού ξεκινήσει τη διαδικασία ανταγωνισμού. Στο πειραματικό μας δίκτυο, οι τιμές που μπορεί να πάρει το AIFSN είναι ανάμεσα σε 0 και 15, με την προκαθορισμένη τιμή να είναι 2 ($AIFS = DIFS = SIFS + 2 * aSlotTime$).

Όπως έχουμε ήδη παρατηρήσει, στην περίπτωση χρήσης διαφορετικών παραμέτρων AIFS ανάμεσα στους κόμβους οι οποίοι ανταγωνίζονται για εκπομπή στο κανάλι, ο αριθμός των κόμβων που μπορεί να έχει πρόσβαση σε κάθε χρονική σχισμή, δεν είναι σταθερός για όλες τις χρονικές σχισμές, αλλά εξαρτάται από το χρονικό διάστημα το οποίο έχει περάσει από την τελευταία περίοδο μετάδοσης. Αυτό σημαίνει ότι εδώ, η υπόθεση που κάναμε στην παράγραφο 4.1, σύμφωνα με την οποία οι πιθανότητες εκπομπής είναι σταθερές για κάθε χρονική σχισμή, δεν ισχύει πλέον. Συνεπώς, δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την ίδια ανάλυση που αναπτύξαμε για την διαφοροποίηση της ρυθμαπόδοσης με βάση την παράμετρο CW.

Η πλήρης μοντελοποίηση της συμπεριφοράς του δικτύου όταν υπάρχει διαφοροποίηση με βάση την παράμετρο AIFS, είναι αρκετά πολύπλοκη, και ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης μπορεί να απευθυνθεί σε αναλύσεις όπως αυτές που βρίσκουμε στα [11], [12] και [13]. Στην παρούσα εργασία, για μια πρώτη ανάλυση της επίδρασης της παραμέτρου AIFS στη διαφοροποίηση της ρυθμαπόδοσης, καθώς και για την πραγματοποίηση και αξιολόγηση των πειραμάτων μας, θα χρησιμοποιήσουμε μια πιο απλή, αλλά παράλληλα αποτελεσματική προσέγγιση, η οποία αναφέρεται στο [14], και θα παρουσιαστεί στη συνέχεια.

4.2.1 Θεωρητική Μοντελοποίηση της επίδρασης της παραμέτρου AIFS.

Σύμφωνα με τη θεώρηση μας, επιλέγουμε να έχουμε δύο κλάσεις υπηρεσίας, με διαφορετικό AIFS. Η πρώτη κλάση (a) έχει παράμετρο $AIFSN_a$ και η δεύτερη κλάση (b) έχει $AIFSN_b$ με $AIFSN_a < AIFSN_b$. Η κάθε κλάση, περιλαμβάνει έναν αριθμό κόμβων, N_a και N_b αντίστοιχα. Όλοι οι κόμβοι ανεξαρτήτως της κλάση στην οποία ανήκουν, ψεωρούμε ότι έχουν κοινό και σταθερό Παράθυρο Ανταγωνισμού (CW). Επίσης, ψεωρούμε ότι έχουμε αμεληταίο αριθμό συγχρούσεων στο κανάλι, κάτι που συμβαίνει γενικά όταν υπάρχει επαρκώς μεγάλο CW. Με αυτό ως δεδομένο, μπορούμε να πούμε ότι όλοι οι κόμβοι και των δύο κλάσεων έχουν την ίδια πιθανότητα εκπομπής σε κάθε χρονική σχισμή κατά

την οποία επιτρέπεται να εκπέμψουν, ίση με

$$\tau_a \simeq \tau_b \simeq \frac{2}{CW + 1} = \tau \quad (4.8)$$

όπως προκύπτει από τον τύπο (4.1).

Οι κόμβοι της κλάσης (b) έχουν τη δυνατότητα πρόσβασης στο μέσο, αφού πρώτα παρέλθει επιπλέον χρόνος ίσος με $\delta_b = AIFSN_b - AIFSN_a$, σε σχέση με τους κόμβους της κλάσης (a). Έτσι, η πιθανότητα κανένας κόμβος από την (a) κλάση να μην μεταδώσει στις πρώτες δύο χρονικές σχισμές είναι ίση με

$$(1 - \tau)^{N_a \delta_b}$$

Μετά την πάροδο των πρώτων δύο χρονικών σχισμών, η πιθανότητα μετάδοσης, όπως λήφθηκε είναι ίδια και στις δύο κλάσεις. Έτσι, η πιθανότητα να μεταδώσει κάποιος σταθμός της κλάσης (b) τη χρονική περίοδο πέραν των πρώτων δύο χρονικών σχισμών είναι ίση με

$$\frac{N_b}{N_a + N_b}$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω, μπορούμε πλέον να εξάγουμε τον λόγο της ρυθμαπόδοσης που αντιστοιχεί στις δύο κλάσεις με βάση τον λόγο των πιθανοτήτων επιτυχίας κατά τον ανταγωνισμό για την κάθε μία από αυτές.

Συνεπώς θα είναι:

$$\frac{\eta_b}{\eta_a} \simeq \frac{\frac{N_b}{N_a + N_b} (1 - \tau)^{N_a \delta_b}}{1 - \frac{N_b}{N_a + N_b} (1 - \tau)^{N_a \delta_b}} = \lambda \quad (4.9)$$

Έχοντας ως δεδομένο επίσης ότι

$$\eta_a + \eta_b = \eta_{total}$$

με

$$\eta_a = N_a \cdot \eta_{a,i} \quad \text{και} \quad \eta_b = N_b \cdot \eta_{b,j}$$

όπου $\eta_{a,i}$, $i = 1..N_a$ η αναμενόμενη ρυθμαπόδοση για τους κόμβους κλάσης (a), και $\eta_{b,j}$, $j = 1..N_b$ η αναμενόμενη ρυθμαπόδοση για τους κόμβους κλάσης (b), μπορούμε εύκολα να υπολογίσουμε την ρυθμαπόδοση του κάθε κόμβου, συναρτήσει της συνολικής ρυθμαπόδοσης ως εξής:

$$\eta_{a,i} = \frac{1}{N_a} \frac{1}{\lambda + 1} \eta_{total} \quad \text{και} \quad \eta_{b,j} = \frac{1}{N_b} \cdot \frac{\lambda}{\lambda + 1} \eta_{total} \quad (4.10)$$

Έτσι γίνεται εμφανές ότι, μπορούμε πλέον να υπολογίσουμε, με βάση τη συνολική ρυθμαπόδοση, την αντίστοιχη ρυθμαπόδοση για κάθε κόμβο και των δύο κλάσεων.

4.2.2 Πειραματική αξιολόγηση της δυνατότητας διαφοροποίησης της ρυθμαπόδοσης με χρήση της παραμέτρου AIFS.

Για την αξιολόγηση των παραπάνω ισχυρισμών, θα εκτελέσουμε στη συνέχεια, μία σειρά πειραμάτων σχετικών με την ρύθμιση της παραμέτρου AIFS με στόχο τη διαφοροποίηση στη ρυθμαπόδοση ανάμεσα σε κόμβους.

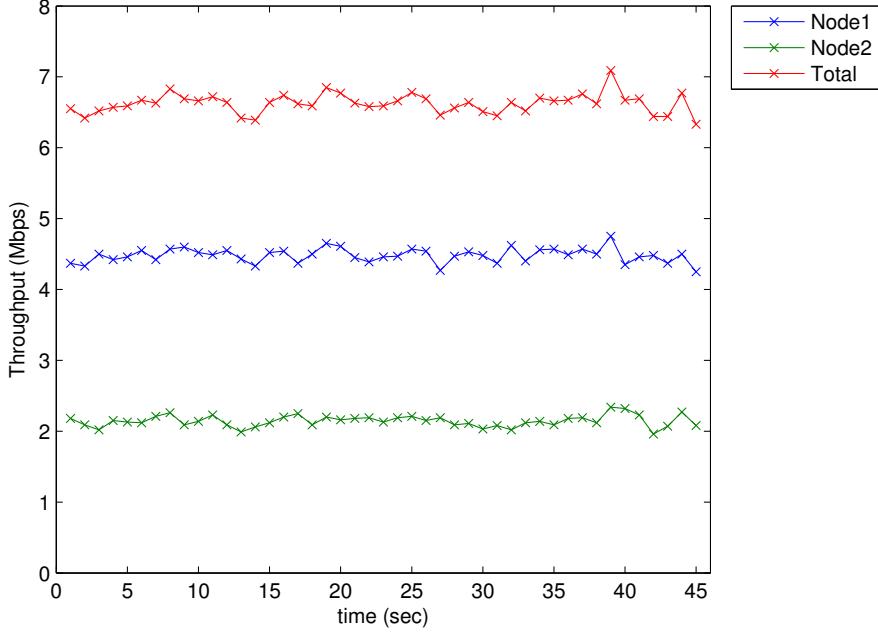
Πείραμα 4.4

Στο αρχικό πείραμα για την παράμετρο AIFS, θα χρησιμοποιήσουμε δύο κόμβους ως σταθμούς αποστολής δεδομένων, με έναν σταθμό λήψης (Access Point). Για τους δύο αυτούς κόμβους θα προσπαθήσουμε να ελέγχουμε την αναμενόμενη ρυθμαπόδοση που θα έχουν, ρυθμίζοντας την παράμετρο $AIFSN$ για τον καθέναν. Πιο συγκεκριμένα, ο πρώτος κόμβος θα έχει $AIFSN_1 = 2$ ενώ ο κόμβος 2 θα έχει $AIFSN_2 = 15$. Και οι δύο κόμβοι, θα έχουν κοινό Παράθυρο Ανταγωνισμού $CW_{1,2} = 63$. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι έχουμε δύο κλάσεις με διαφορετικό AIFS, η κάθε μία από τις οποίες περιλαμβάνει ένα μόνο κόμβο ($N_a = N_b = 1$).

Έτσι, ξεκινάμε να μεταδίδουμε κίνηση UDP καί από τους δύο κόμβους ταυτόχρονα για 45 δευτερόλεπτα, όπως και στο πείραμα 4.1. Τα αποτελέσματα της κίνησης καταγράφονται ανά δευτερόλεπτο, και παρουσιάζονται στο σχήμα 4.9.

Όπως παρατηρούμε, οι μετρούμενες μέσες τιμές της ρυθμαπόδοσης για τους δύο κόμβους είναι $s_1 = 4.4800 Mbps$ και $s_2 = 2.1436 Mbps$. Με βάση τους τύπους (4.9) και (4.10) οι αντίστοιχες θεωρητικές αναμενόμενες τιμές που προκύπτουν είναι $\eta_1 = 4.4317 Mbps$ και $\eta_2 = 2.1919 Mbps$. Είναι λοιπόν προφανές ότι οι θεωρητικές προβλέψεις μας, είναι εξαιρετικά κοντά στις πειραματικές τιμές που πάρνουμε από την πλατφόρμα δοκιμών.

Για τις προβλέψεις μας, χρησιμοποιήσαμε ως συνολική ρυθμαπόδοση η_{total} στους τύπους (4.10) την πειραματικά μετρούμενη τιμή s_{total} , καθώς αυτή είναι άμεσα διαθέσιμη, αλλά και διότι η θεωρητική προσέγγιση που έχουμε υιοθετήσει όσον αφορά την παράμετρο του AIFS, δεν μας παρέχει κάποια θεωρητική εκτίμηση για την συνολική-απόλυτη ρυθμαπόδοση. Αυτό, καθώς και η συμμετοχή περισσότερων κλάσεων προς ανάλυση, θα ήταν εφικτά με τη χρήση κάποιου πιο εξελιγμένου μοντέλου, όπως αυτά που παρουσιάζονται στις αναφορές που προτείναμε νωρίτερα, και αφήνονται για μελλοντική περαιτέρω εργασία.

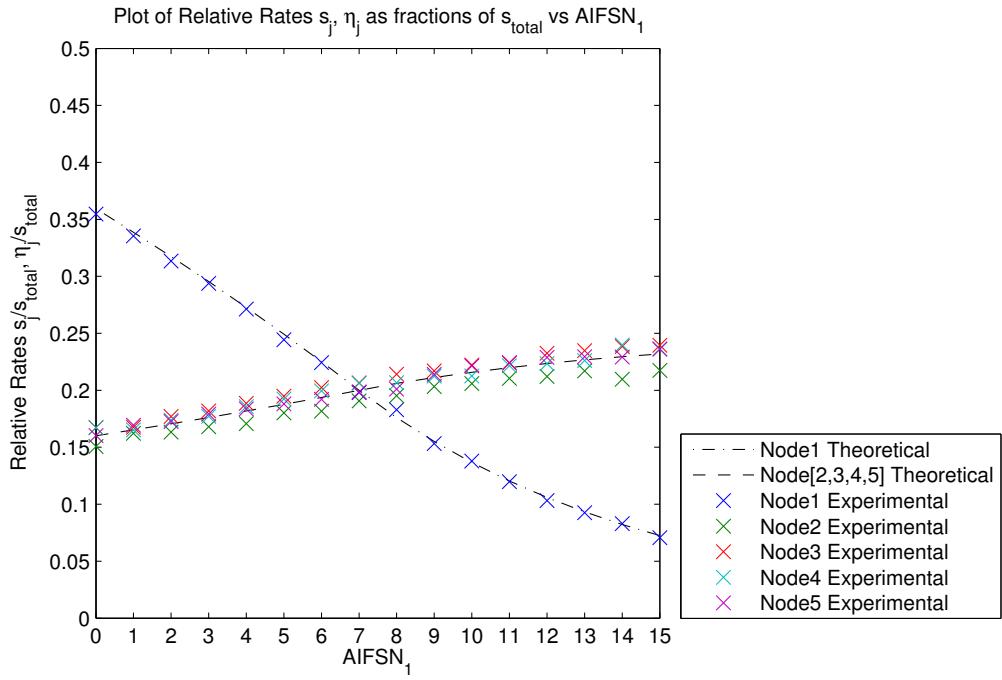


Σχήμα 4.9: Ρυθμαπόδοση των κόμβων 1 και 2 για $AIFSN_1 = 2$, $AIFSN_2 = 15$ και $CW_{1,2} = 63$ σε διάστημα 45 δευτερολέπτων.

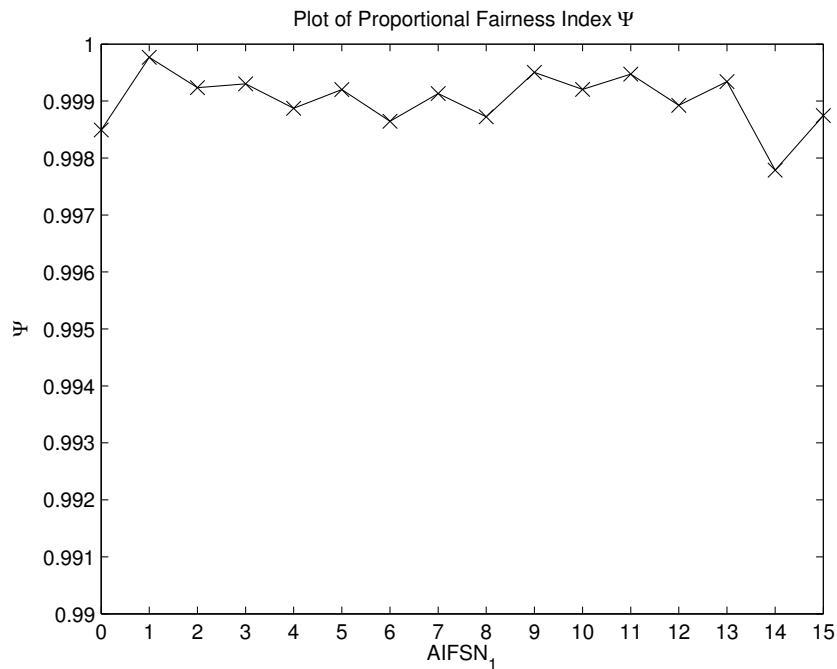
Πείραμα 4.5

Σε αυτό το πείραμα, θα αυξήσουμε τον αριθμό των κόμβων που συμμετέχουν στην αποστολή δεδομένων, και επίσης θα μεταβάλουμε την παράμετρο AIFSN σε μεγαλύτερο εύρος. Έτσι, θα έχουμε πάλι δύο κλάσεις με διαφορετικό AIFS. Για τους κόμβους 2,3,4,5, της κλάσης (b) θα έχουμε σταθερό $AIFSN_{j \neq 1} = 7$ ενώ για τον κόμβο 1, της κλάσης (a), θα μεταβάλουμε την παράμετρο $AIFSN_1$ στο εύρος 0 ως 15. Όλοι κόμβοι, και των δύο κλάσεων, θα έχουν CW σταθερό, ίσο με 63. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα σχήματα 4.10, 4.11, 4.12.

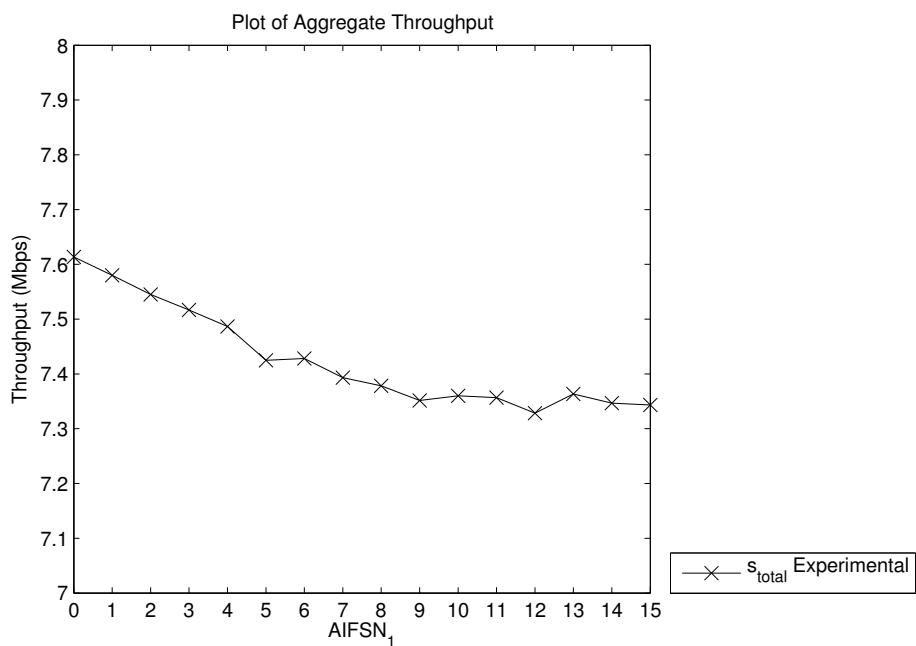
Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε στο σχήμα 4.10, η διαφοροποίηση στη ρυθμαπόδοση που πετυχαίνουμε για τους κόμβους, είναι πολύ κοντά στην αναμενόμενη. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τις πολύ υψηλές τιμές του δείκτη αναλογικής δικαιοσύνης Ψ στο σχήμα 4.11. Επίσης, στο σχήμα 4.12 φαίνεται η συνολική μετρούμενη ρυθμαπόδοση στο σύστημα, η οποία όπως είναι αναμενόμενο, αυξάνει για μικρότερες τιμές του AIFS₁ καθώς ο μέσος χρόνος αναμονής ανάμεσα σε διαδοχικές μεταδόσεις μικραίνει.



Σχήμα 4.10: Διάγραμμα του λόγου s_j/s_{total} συναρτήσει της παραμέτρου $AIFSN_1$ του κόμβου 1. $CW_{a,b} = 63$, $AIFSN_b = 7$.



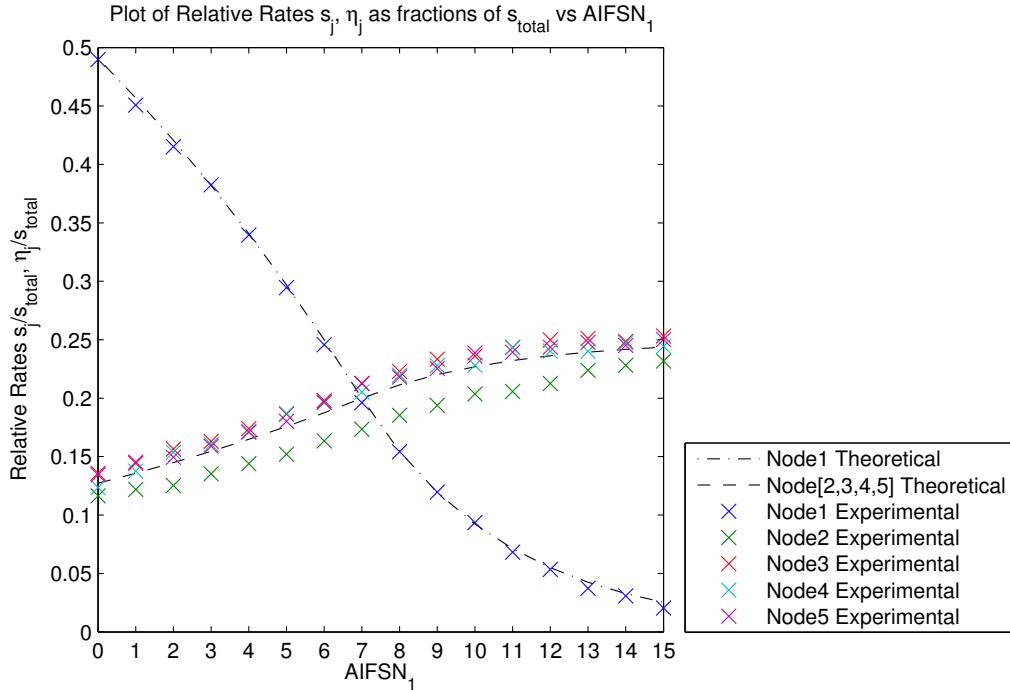
Σχήμα 4.11: Διάγραμμα του δείκτη αναλογικής δικαιοσύνης Ψ , συναρτήσει της παραμέτρου $AIFSN_1$ του κόμβου 1. $CW_{a,b} = 63$, $AIFSN_b = 7$.



Σχήμα 4.12: Διάγραμμα της συνολικής ρυθμαπόδοσης, συναρτήσει της παραμέτρου $AIFSN_1$ του κόμβου 1. $CW_{a,b} = 63$, $AIFSN_b = 7$.

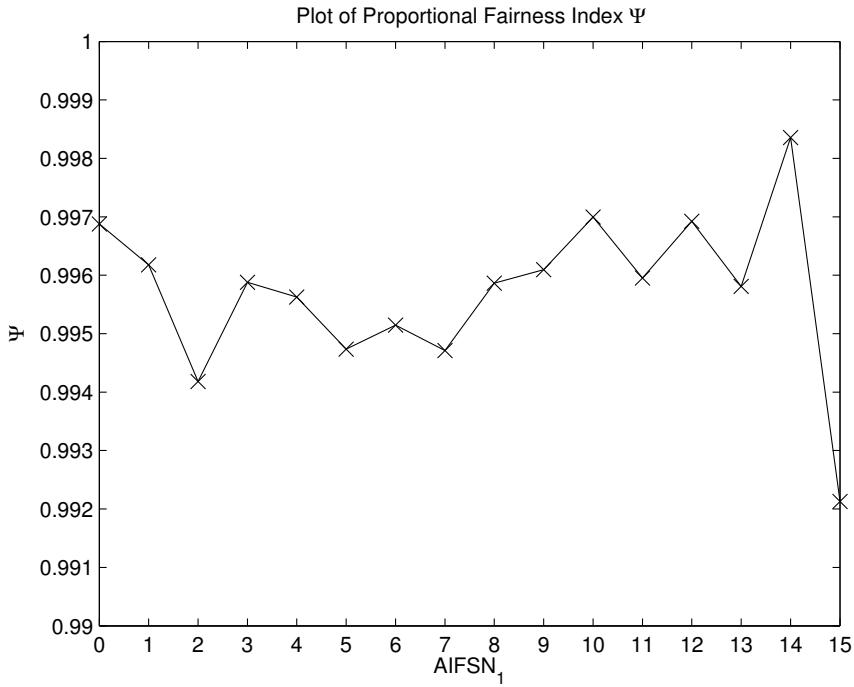
Πείραμα 4.6

Στο πείραμα 4.6, θα διατηρήσουμε τις κλάσεις, το κοινό AIFS της κλάσης $AIFSN_b = 7$ και το εύρος της μεταβολής για την παράμετρο $AIFSN_1$, όπως και στο προηγούμενο πείραμα. Αυτή τη φορά όμως, θα μεταβάλουμε το Παράθυρο Ανταγωνισμού όλων των κόμβων, από $CW = 63$ που ήταν προηγουμένως σε $CW = 31$. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα σχήματα 4.13, 4.14, 4.15.



Σχήμα 4.13: Διάγραμμα του λόγου s_j/s_{total} συναρτήσει της παραμέτρου $AIFSN_1$ του κόμβου 1. $CW_{a,b} = 31$, $AIFSN_b = 7$.

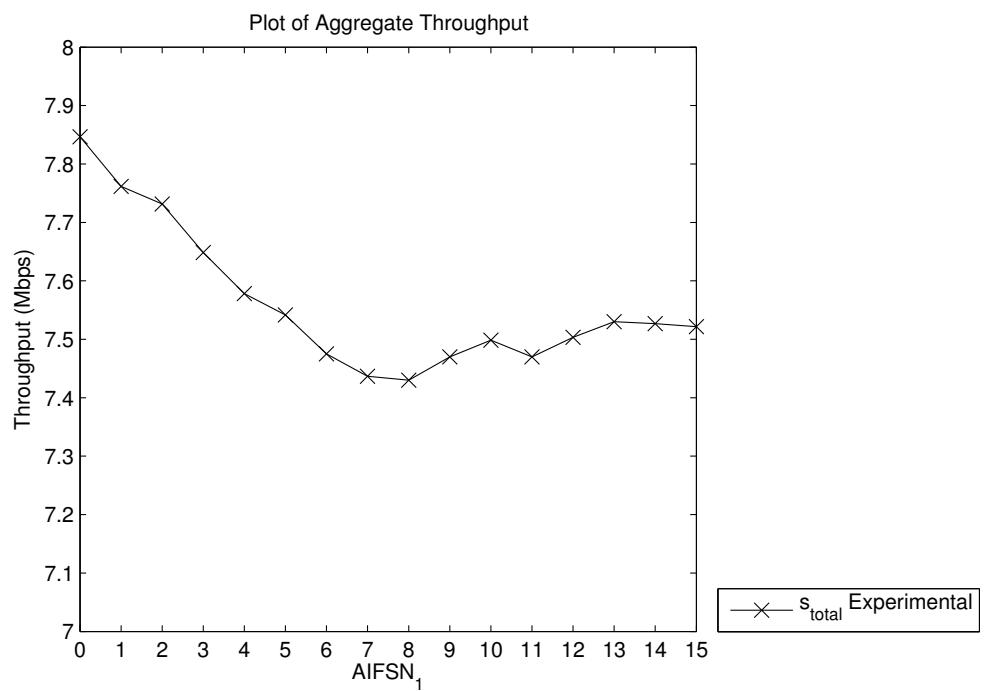
Μελετώντας τα αποτελέσματα του πειράματος και συγκρίνοντας τα με αυτά του πειράματος 5, μπορούμε να συνάγουμε ενδιαφέροντα συμπεράσματα. Έχοντας μειώσει την παράμετρο CW στους κόμβους στο μισό, μπορούμε να παρατηρήσουμε καταρχάς ότι, η καμπύλη που αφορά την ρυθμαπόδοση του κόμβου 1, γίνεται αισθητά πιο απότομη πράγμα που σημαίνει ότι για μικρότερες τιμές του Παραθύρου Ανταγωνισμού, η διαφοροποίηση της ρυθμαπόδοσης με βάση την παράμετρο AIFS γίνεται ισχυρότερη ενώ για μεγαλύτερες τιμές του CW η επίδραση αυτή φθίνει. Πέραν αυτού, όπως και στα πειράματα για το παράθυρο ανταγωνισμού, έχουμε μείωση της ακρίβειας των πειραματικών μετρήσεων, επί του θεωρητικού μοντέλου, γεγονός που οφείλεται στον αυξημένο αριθμό συγκριύσεων στο κανάλι. Αυτό



Σχήμα 4.14: Διάγραμμα του δείκτη αναλογικής δικαιοσύνης Ψ , συναρτήσει της παραμέτρου $AIFSN_1$ του κόμβου 1. $CW_{a,b} = 31$, $AIFSN_b = 7$.

επιβεβαιώνεται και από την αντίστοιχη πτώση στις τιμές του δείκτη αναλογικής δικαιοσύνης Ψ (σχήμα 4.14), σε σύγκριση με αυτών του προηγούμενου πειράματος (σχήμα 4.11).

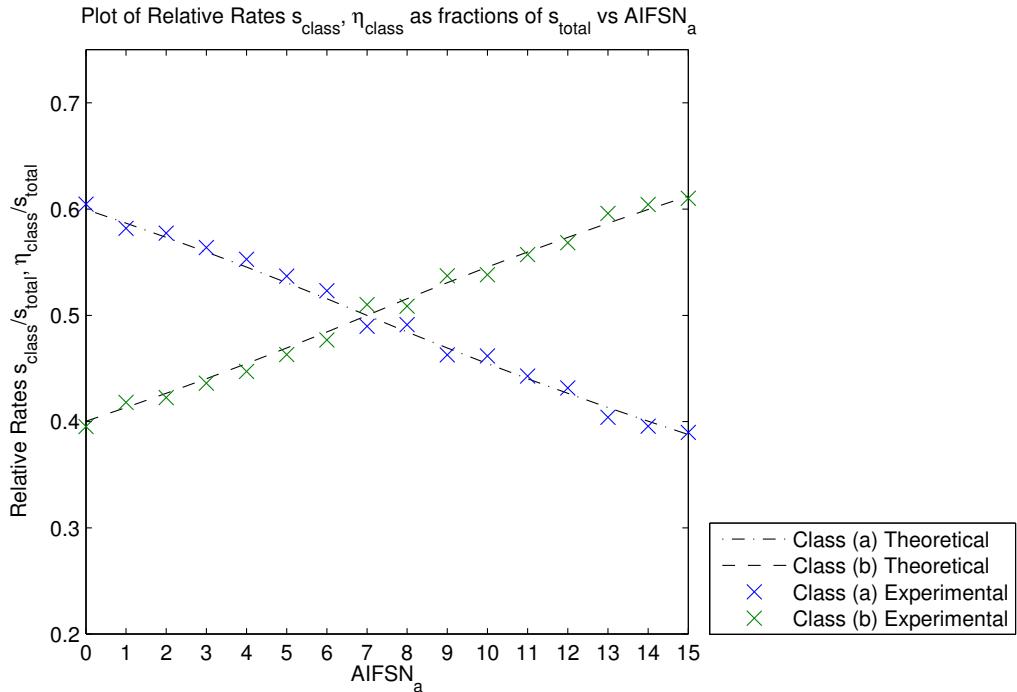
Όσον αφορά τη συνολική ρυθμαπόδοση η οποία παρουσιάζεται στο σχήμα 4.15, μπορούμε επίσης να διωχρίνουμε μία ιδιόμορφη συμπεριφορά. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε, για μικρότερες τιμές της παραμέτρου $AIFS$ του κόμβου 1, σε σχέση με τους άλλους κόμβους, η συνολική ρυθμαπόδοση αυξάνεται, πράγμα αναμενόμενο, καθώς ο μέσος χρόνος αναμονής στο κανάλι μειώνεται. Παρόλα αυτά και για μεγαλύτερες τιμές της παραμέτρου $AIFS$ του κόμβου 1, ενώ ο μέσος χρόνος αναμονής στο κανάλι μειώνεται, παρατηρούμε παρόμοια αύξηση. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να εξηγηθεί ως εξής. Έχοντας πολύ μικρό Παράθυρο Ανταγωνισμού στο κανάλι ($CW = 31$) αυξάνεται πολύ ο αριθμός των συγκρούσεων. Μεταθέτοντας στη συνέχεια την περίοδο ανταγωνισμού του κόμβου 1 κατά έναν αριθμό χρονικών σχισμών αργότερα, αφήνουμε ένα παράθυρο λιγότερο “έντονου” ανταγωνισμού ανάμεσα στους υπόλοιπους κόμβους μέσα στο οποίο μπορούν να εκπέμψουν χωρίς σπατάλη χρόνου λόγω υπερβολικού αριθμού συγκρούσεων. Εποι, μειώνοντας με αυτό τον τρόπο την υψηλή συμφόρηση, παρατηρούμε και την αντίστοιχη αύξηση στην συνολική ρυθμαπόδοση.



Σχήμα 4.15: Διάγραμμα της συνολικής ρυθμαπόδισης, συναρτήσει της παραμέτρου AIFSN₁ του κόμβου 1. $CW_{a,b} = 31$, $AIFSN_b = 7$.

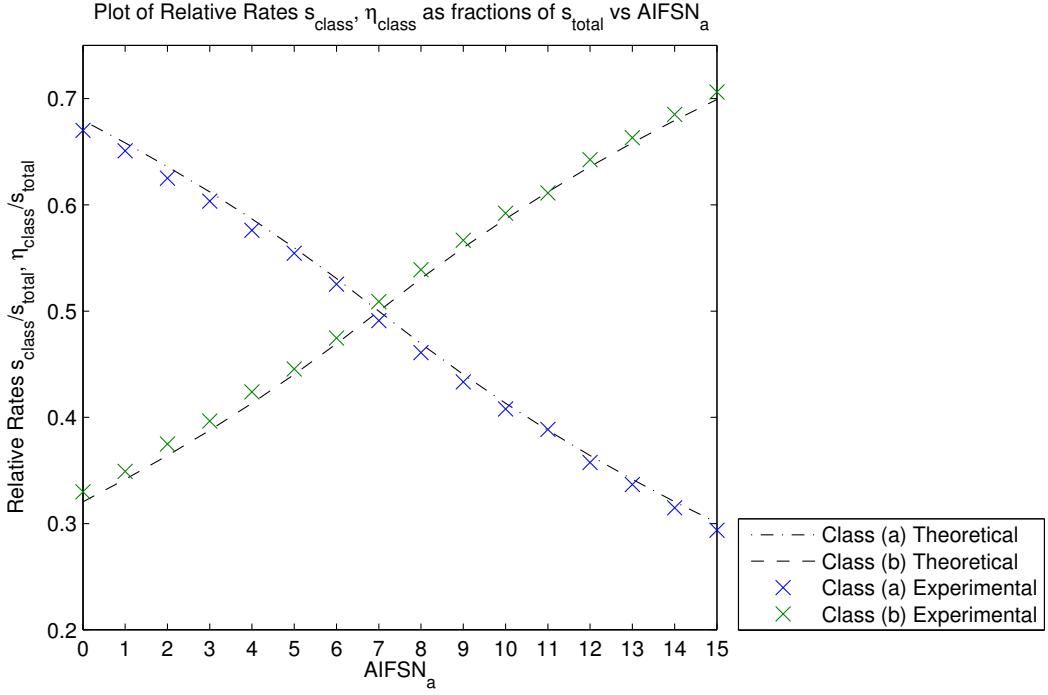
Πείραμα 4.7

Στο πείραμα 4.7, και τελευταίο μας πείραμα που αφορά τη επίδραση της παραμέτρου $AIFS$ στη διαφοροποίηση της ρυθμαπόδοσης θα εργαστούμε διαφορετικά. Σε αυτό το πείραμα, θα έχουμε και πάλι δύο κλάσεις μετάδοσης με βάση το $AIFS$. Αρχικά, και οι δύο κλάσεις μας, θα περιλαμβάνουν έναν κόμβο η κάθε μία ($N_a = N_b = 1$). Θα προσπαθήσουμε να παρέχουμε διαφοροποίηση της ρυθμαπόδοσης, ανάμεσα στις δύο κλάσεις, θέτοντας διαφορετικές παραμέτρους $AIFS$ στους δύο κόμβους. Πιο συγκεκριμένα, θα θέσουμε σταθερό $AIFSN_b = 7$, καιώνας μεταβάλουμε το $AIFSN_a =$ στο διάστημα 0 ως 15, ενώ θα διατηρήσουμε σταθερό Παράθυρο Ανταγωνισμού και στις δύο κλάσεις ίσο με $CW_a = CW_b = 63$. Στη συνέχεια, θα προσπαθήσουμε να κάνουμε ακριβώς το ίδιο, με δύο κόμβους ανά κλάση όμως αυτή τη φορά ($N_a = N_b = 2$), συγχρίνοντας παράλληλα και τις αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις για τις δύο κλάσεις. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων φαίνονται στα ακόλουθα διαγράμματα.



Σχήμα 4.16: Διάγραμμα του λόγου s_j/s_{total} συναρτήσει της παραμέτρου $AIFSN_1$ του κόμβου 1 για $N_a = N_b = 1$, $CW_{a,b} = 63$, $AIFSN_b = 7$.

Παρατηρώντας τα διαγράμματα 4.16 και 4.17, μπορούμε εύκολα να διαχρίνουμε ότι, για την ίδια μεταβολή του $AIFS$ και ίδιο Παράθυρο Ανταγωνισμού, η διαφοροποίηση στην περίπτωση των δύο κόμβων



Σχήμα 4.17: Διάγραμμα του λόγου s_j/s_{total} συναρτήσει της παραμέτρου $AIFS_{N_a}$ των κόμβων της κλάσης (a) για $N_a = N_b = 2$, $CW_{a,b} = 63$, $AIFS_{N_b} = 7$.

ανά κλάση είναι σαφώς ισχυρότερη από ότι όταν έχουμε έναν κόμβο ανά κλάση. Αυτό το συμπέρασμα, είναι εξαιρετικά σημαντικό, και αποτελεί μεγάλη ειδοποιό διαφορά σε σχέση με την παράμετρο CW . Σε αντίθεση με αυτή λοιπόν, η παράμετρος $AIFS$, η οποία χρησιμοποιείτε για την διαφοροποίηση δύο κλάσεων δεδομένων, σε περίπτωση αυξημένου φορτίου (περισσότερων κόμβων), δεν διατηρεί τον λόγο της συνολικής ρυθμαπόδοσης των κλάσεων, όπως θα έκανε η παράμετρος CW , αλλά δίνει περισσότερο ποσοστό από το διαθέσιμο εύρος ζώνης στην κλάση με προτεραιότητα. Με αυτόν τον τρόπο, η παράμετρος $AIFS$ μπορεί να προστατεύει καλύτερα την κίνηση δεδομένων μίας κλάσης με προτεραιότητα, σε περιπτώσεις υψηλού φόρτου.

4.3 Συμπεράσματα

Όπως γίνεται αντιληπτό από τα πειράματα, η παράμετρος CW μπορεί να μας παρέχει τη δυνατότητα αξιόπιστης αναλογικής διαφοροποίησης στη ρυθμαπόδοση στις περισσότερες περιπτώσεις. Επίσης παρατηρούμε ότι πειραματικά, υπάρχει μία αντιστάθμιση ανάμεσα στην δικαιοσύνη που παρέχεται ανάμεσα στους κόμβους ανάλογα με τις αντίστοιχες απαιτήσεις, και στον βαθμό χρησιμοποίησης του καναλιού (με αντίστοιχη ρυθμαπόδοση). Αυτό είναι ένα πολύ σημαντικό συμπέρασμα, το οποίο θα χρησιμοποιήσουμε στο επόμενο κεφάλαιο στην προσπάθεια για βελτιστοποίηση της συνολικής απόδοσης του καναλιού.

Όσον αφορά την παράμετρο $AIFS$, παρατηρούμε ότι η επίδραση και η λειτουργία της, είναι κάπως πιο πολύπλοκη από αυτή της παραμέτρου CW . Αυτό συμβαίνει διότι δεν υπάρχει κάποιος απλός αναλογικός τύπος που να χαρακτηρίζει την συμπεριφορά της, όπως ο τύπος (4.6) για το CW , αλλά παρατηρούμε ότι η σχετική διαφοροποίηση ανάμεσα στις κλάσεις εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον φόρτο των κλάσεων με προτεραιότητα. Υψηλός φόρτος σε κάποια κλάση όπως είδαμε στα αντίστοιχα πειράματα μπορεί να οφείλεται παράλληλα είτε σε μικρές τιμές των παραμέτρων CW για την κλάση αυτή είτε σε αντίστοιχο υψηλό αριθμό κόμβων που ανταγωνίζονται. Το γεγονός αυτό διαφοροποιεί σημαντικά την παράμετρο $AIFS$ σε σχέση με την πιο απλή, το Παράνθυρο Ανταγωνισμού, παρέχοντας έναν επιπλέον τρόπο για παροχή QoS με διαφορετικές δυνατότητες, κάνοντας την ιδανικότερη για την παροχή προτεραιότητας σε κλάσεις με κρίσιμο φορτίο ανελαστικής κίνησης, έναντι κλάσεων ελαστικής κίνησης.

5 Επιλογή κατάλληλου CW για βέλτιστη χρησιμοποίηση του καναλιού και Έλεγχος Αποδοχής (Admission Control).

Σε αυτό το κεφάλαιο θα μελετήσουμε θεωρητικά και πειραματικά στην πλατφόρμα δοκιμών, ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης για την μέγιστη χρησιμοποίηση ενός IEEE 802.11 καναλιού με διαφοροποίηση της ρυθμαπόδοσης κάνοντας χρήση της παραμέτρου CW, καθώς επίσης και την παροχή εγγυήσεων QoS μέσω ενός μηχανισμού Ελέγχου Αποδοχής (admission control).

5.1 Διατύπωση του προβλήματος

Σε αυτή την παράγραφο παρουσιάζουμε την μοντελοποίηση του προβλήματος εύρεσης της βέλτιστης παραμέτρου CW για τους κόμβους εκπομπής, έτσι ώστε να έχουμε την μέγιστη συνολική χρησιμοποίηση του διαύλου επικοινωνίας, δεδομένου ενός συνόλου προδιαγραφών Ποιότητας της Υπηρεσίας για τη ρυθμαπόδοση των κόμβων.

Για τη διατύπωση του προβλήματος, θεωρούμε ότι έχουμε ένα σύνολο M κόμβων, οι οποίοι ανταγωνίζονται για την αποστολή δεδομένων στο κανάλι. Για τους κόμβους αυτούς, μπορούμε να καθορίσουμε ένα σύνολο απαιτήσεων οι οποίες αφορούν τη ρυθμαπόδοση. Αρχικά θα μελετήσουμε το πρόβλημα όσον αφορά την παροχή σχετικών απαιτήσεων ως προς τη ρυθμαπόδοση, και σε επόμενη παράγραφο, θα συμπληρώσουμε την επίλυση όσον αφορά τα απόλυτα μεγέθη.

Έτσι, θεωρούμε ότι έχουμε ένα σύνολο επιθυμητών τιμών σχετικής ρυθμαπόδοσης

$$r_j = \frac{\eta_j}{\eta_1}, \quad j = 2, \dots, M \quad (5.1)$$

εκφρασμένες αναφορικά με την απόλυτη ρυθμαπόδοση του κόμβου j , η_j . Για να ικανοποιήσουμε τις συγκεκριμένες προδιαγραφές, μπορούμε να βρούμε ένα σύνολο παραμέτρων $\{CW_1, CW_2, \dots, CW_M\}$ για τους κόμβους, οι οποίες θα μας παρέχουν το επιθυμητό αποτέλεσμα. Σύμφωνα με τον τύπο (4.6) ο οποίος ισχύει για μεγάλα CW, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι εκτός από το προαναφερθέν σύνολο, κάθε σύνολο της μορφής $\{a \cdot CW_1, a \cdot CW_2, \dots, a \cdot CW_M\}$, όπου το a είναι μια αυστηρώς θετική σταθερά, ικανοποιεί τις προαναφερθείσες απαιτήσεις σχετικής ρυθμαπόδοσης. Ωστόσο, για πολύ μικρές τιμές της παραμέτρου CW αυξάνεται υπερβολικά ο αριθμός των συγκρούσεων στο κανάλι, ενώ για πολύ μεγάλες τιμές του CW ο χρόνος αναμονής ή αδράνειας στο κανάλι αυξάνεται, με αποτέλεσμα και στις δύο περιπτώσεις την ελάττωση της χρησιμοποίησης του καναλιού και κατά συνέπεια της συνολικής απόλυτης ρυθμαπόδοσης.

Στη συνέχεια λοιπόν, θα αναζητήσουμε το σύνολο των ιδανικών παραμέτρων $\{CW_1^*, CW_2^*, \dots, CW_M^*\}$ το οποίο αφενός θα ικανοποιεί τις προδιαγραφές σχετικής ρυθμαπόδοσης (5.1), και αφετέρου θα μεγιστοποιεί την τιμή της απόλυτης συνολικής ρυθμαπόδοσης των κόμβων

$$\max(\eta_{total}) = \sum_{j=1}^M \eta_j = \eta_{total}(\{CW_1^*, CW_2^*, \dots, CW_M^*\}) \quad (5.2)$$

5.2 Επίλυση του προβλήματος εξεύρεσης βέλτιστων Παραθύρων Ανταγωνισμού

Όπως παρουσιάζεται και στην αντίστοιχη μελέτη [10], η επίλυση του προβλήματος γίνεται ως ακολουθεί. Έχοντας υπολογίσει τη μέση ρυθμαπόδοση του κόμβου j στον τύπο (4.2) ίση με

$$\eta_j = \frac{\bar{m}}{T_D} \frac{\frac{\tau_j}{1-\tau_j} A_M}{1 - A_M(1 - \frac{t_s}{T_D})}$$

θέτουμε τα εξής: $x = \frac{\tau_1}{1-\tau_1}$, $c = \frac{\bar{m}}{T_D}$, $\theta = 1 - \frac{t_s}{T_D}$, $A = A_M$

και η ρυθμαπόδοση η_j γράφεται:

$$\eta_j = c \frac{\frac{\tau_j}{1-\tau_j} A}{1 - \theta A}$$

Επίσης για την σχετική ρυθμαπόδοση r_j έχουμε $r_j = \frac{\eta_j}{\eta_1} = \frac{\tau_j}{1 - \tau_j} \frac{1}{x}$
το οποίο συνεπάγεται ότι $\tau_j = \frac{r_j x}{1 + r_j x}$

Ακολούθως βρίσκουμε τη συνολική, αθροιστική ρυθμαπόδοση

$$\eta_{total} = \sum_{j=1}^M \eta_j = (c \sum_{j=1}^M r_j) \frac{x}{A - \theta}$$

Δεδομένου ότι

$$A = \prod_{j=1}^M (1 - \tau_j) = \frac{1}{\prod_{j=1}^M (1 + r_j x)}$$

Αναπτύσσουμε το A^{-1} σε σειρά Taylor συναρτήσει του x με:

$$(A^{-1})(x) = 1 + \alpha x + \frac{\beta}{2!} x^2 + o(x^2)$$

$$\alpha = (A^{-1})'(0) = \sum_{j=1}^M r_j$$

$$\beta = (A^{-1})''(0) = (\sum_{j=1}^M r_j)^2 - \sum_{j=1}^M r_j^2$$

Έτσι, μπορούμε να εκφράσουμε τη συνολική ρυθμαπόδοση η ως προς x :

$$\eta_{total}(x) = c\alpha \frac{x}{1+\alpha x + \frac{1}{2}\beta x^2 - \theta} = \frac{c\alpha}{\frac{1-\theta}{x} + \alpha + \frac{1}{2}\beta x}$$

το οποίο μεγιστοποιείτε για $x^* = \sqrt{\frac{1-\theta}{\beta/2}} = \sqrt{\frac{2}{\beta T'_D}}$ με $T'_D = \frac{T_D}{t_s}$

$$\text{Με δεδομένα } \tau_1 = \frac{2}{CW_1+1} \text{ και } x = \frac{\tau_1}{1-\tau_1}$$

έχουμε για το παράθυρο ανταγωνισμού του κόμβου 1

$$CW_1 = \frac{2}{x} + 1$$

$$CW_1^* = \sqrt{2\beta T'_D} + 1$$

Και για τους υπόλοιπους κόμβους:

$$CW_j^* = \frac{\sqrt{2\beta T'_D}}{r_j} + 1 \quad (5.3)$$

$$\text{όπου } \beta = (\sum_{j=1}^M r_j)^2 - \sum_{j=1}^M r_j^2, \text{ και } T'_D = T_D/t_s$$

Τα CW που παίρνουμε από τη σχέση (5.3), επιλύουν τα προβλήματα της σχετικής ρυθμαπόδοσης ανάμεσα στους κόμβους, αλλά και της βέλτιστης χρησιμοποίησης του καναλιού, ικανοποιώντας τις απαιτήσεις (5.1) και (5.2).

5.3 Πειραματική ανάλυση της επιλογής βέλτιστου συνόλου παραμέτρων CW για την διαφοροποίηση στην ρυθμαπόδοση.

Στη συνέχεια, θα πραγματοποιήσουμε μία σειρά πειραμάτων για την αξιολόγηση της θεωρητικής μελέτης σε πρακτικό επίπεδο.

Πείραμα 5.1

Στο παρόν πείραμα, θα χρησιμοποιήσουμε πέντε κόμβους αποστολής δεδομένων, οι οποίοι διαχωρίζονται σε δύο κλάσεις προτεραιοτήτων. Ειδικότερα, οι επιψυμητές αναλογίες ρυθμαπόδοσης για κάθε κόμβο, σε σχέση με αυτή του κόμβου 1 είναι $r_j = \{1, 1, 1, 2, 2\}$. Έτσι, θέλουμε οι κόμβοι της δεύτερης κλάσης (4,5) να επιτυγχάνουν την διπλάσια ρυθμαπόδοση από αυτούς της πρώτης κλάσης (1,2,3). Σύμφωνα με τον τύπο (4.6) μπορούμε εύκολα να συμπεράνουμε ότι οι κόμβοι (4,5) θα πρέπει να έχουν το μισό CW από αυτό των κόμβων (1,2,3). Επίσης, από τον τύπο (5.3) μπορούμε να υπολογίσουμε το σύνολο των

ιδανικών παραμέτρων CW για κάθε κόμβο, με βάση την προηγούμενη ανάλυσή μας. Οι ιδανικές τιμές που προκύπτουν για τα παράθυρα ανταγωνισμού από τον τύπο (5.3) είναι $CW_j^* = \{70, 70, 70, 35, 35\}$. Εδώ, να επαναλάβουμε ότι οι τιμές που μπορεί να πάρει το CW στο πειραματικό μας δίκτυο είναι της μορφής $CW = 2^n - 1$ όπου n θετικός ακέραιος. Οι κοντινότερες λοιπόν στις ιδανικές τιμές που μπορούμε να εισάγουμε στο σύστημα είναι οι $CW_{j_{exp}}^* = \{63, 63, 63, 31, 31\}$.

Για να δούμε αν όντως οι συγκεκριμένες τιμές μας δίνουν την βέλτιστη χρησιμοποίηση του καναλιού, συγκρατώντας τον ίδιο λόγο ανάμεσα στις παραμέτρους CW των κόμβων, θα μεταβάλουμε τις τιμές τους σε όλο το δυνατό εύρος που μας παρέχει η πλατφόρμα δοκιμών. Έτσι, ενώ η παράμετρος $CW_{1,2,3} = CW_a$ θα κινείται στο διάστημα από 3 έως 1023, η παράμετρος $CW_{4,5} = CW_b$ θα κινείται αντίστοιχα στο διάστημα από 1 έως 511.

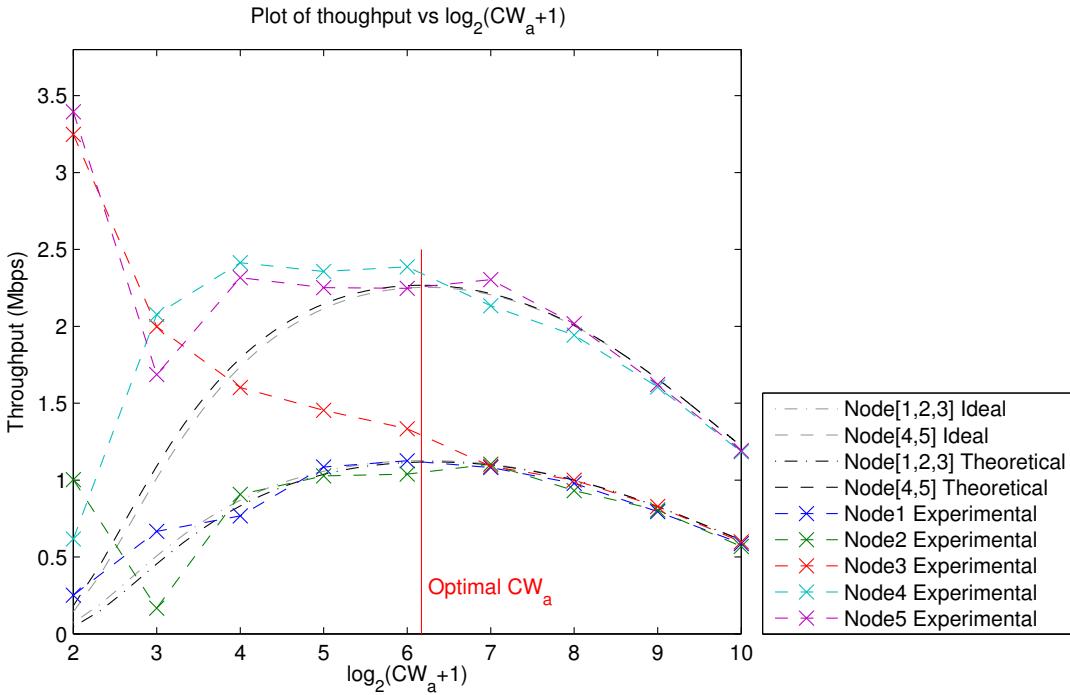
Παρόλα αυτά, όπως δείξαμε και στο κεφάλαιο 4, ο τύπος (4.6) με βάση τον οποίον προκύπτουν οι αναλογίες για τα παράθυρα ισχύει προσεγγιστικά για σχετικά μεγάλες τιμές παραθύρων. Έτσι, για μικρότερα CW αναμένουμε μία απόκλιση από τους ακριβείς θεωρητικούς τύπους (4.2) και (4.3). Για να μελετήσουμε και αυτές τις αποκλίσεις, στο αντίστοιχο διάγραμμα 5.1, θα συμπεριλάβουμε και μία σειρά ενδεικτικών καμπυλών οι οποίες αναφέρονται στην “ίδανική θεωρητική συμπεριφορά”, κατά την οποία ακόμη και για μικρότερες τιμές των παραμέτρων CW θα ισχύουν ακριβώς οι επιθυμητές αναλογίες όπως μας τις δίνει ο προσεγγιστικός τύπος (4.6).

Αντίστοιχα, με χρήση του δείκτη αναλογικής δικαιοσύνης, θα συγχρίνουμε αυτή την φορά την θεωρητική αλλά και την πειραματική ρυθμαπόδοση στους κόμβους με την ιδανική επιθυμητή ρυθμαπόδοση, η οποία ορίζεται με βάση τις επιθυμητές αναλογίες r_j ; ανάμεσα στις τιμές ρυθμαπόδοσης των κόμβων. Έτσι, το σχετικό διάγραμμα 5.2 θα περιλαμβάνει τους εξής δείκτες:

$$\Psi_{theoretical} = \frac{(\sum_{j=1}^M \eta_j/r_j)^2}{M \sum_{j=1}^M (\eta_j/r_j)^2} \quad \text{και} \quad \Psi_{experimental} = \frac{(\sum_{j=1}^M s_j/r_j)^2}{M \sum_{j=1}^M (s_j/r_j)^2}$$

Στα παρακάτω διαγράμματα 5.1 και 5.3, φαίνονται τα αποτελέσματα του πειράματος καθώς και οι αντίστοιχες θεωρητικώς αναμενόμενες καμπύλες.

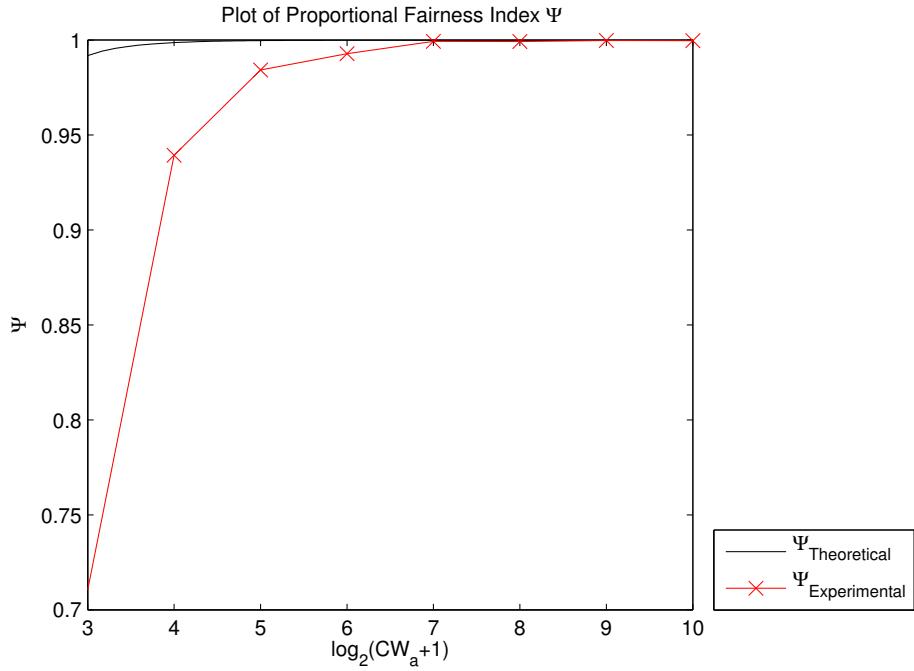
Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε στο διάγραμμα 5.1, για τιμές του CW_a μεγαλύτερες από την τιμή CW_a θεωρητικώς βέλτιστης απόδοσης οι θεωρητικές αλλά και οι πρακτικές καμπύλες προσεγγίζουν εξαιρετικά τις ιδανικές τιμές. Αντιθέτως, για τιμές του CW_a μικρότερες από αυτήν της θεωρητικώς βέλτιστης απόδοσης, παρατηρούμε μικρές διαφορές ανάμεσα στην ιδανική και την θεωρητικώς αναμενόμενη συμπεριφορά. Επίσης βλέπουμε ότι για μικρά CW οι τιμές της πειραματικής ρυθμαπόδοσης όχι μόνο αποκλίνουν σημαντικά από τις θεωρητικώς αναμενόμενες αλλά και διαφοροποιούνται με έναν τέτοιον



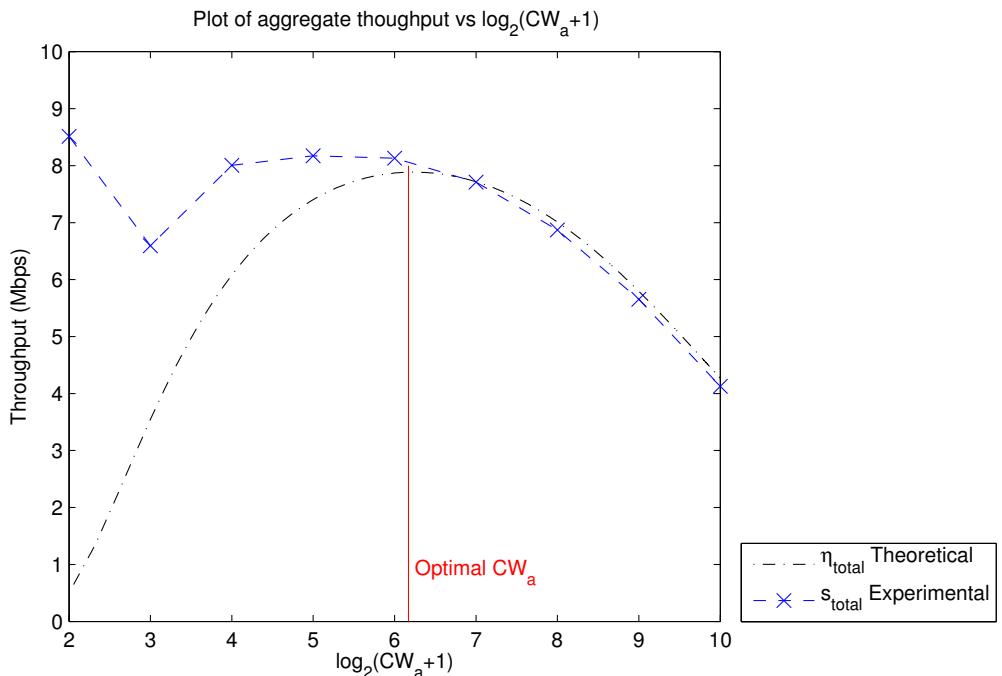
Σχήμα 5.1: Διάγραμμα της αναμενόμενης αλλά και πειραματικής ρυθμαπόδοσης των κόμβων συναρτήσει της παραμέτρου CW_a της κλάσης (a).

τρόπο, όπου κόμβοι οι οποίοι θα έπρεπε να έχουν την ίδια ρυθμαπόδοση, να έχουν τελείως διαφορετική, όπως π.χ. οι κόμβοι 2, και 3 οι οποίοι βρίσκονται στην ίδια κλάση κίνησης. Το γεγονός αυτό, επιβεβαιώνεται από τις αντίστοιχες τιμές του δείκτη αναλογικής δικαιοσύνης στο σχήμα 5.2. Παρόμοια συμπεριφορά έχουμε παρατηρήσει ήδη στο προηγούμενο κεφάλαιο στο πείραμα 4.3, και όπως αναφέραμε σχετίζεται με την αυξημένο ανταγωνισμό στο κανάλι, και πιθανόν να οφείλεται σε λόγους που έχουν να κάνουν με την υλοποίηση του πρωτοκόλλου στο υλικό των κόμβων.

Στη συνέχεια, στο διάγραμμα 5.3 μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι στην πράξη, για τιμές του CW_a μικρότερες της θεωρητικώς υπολογισμένης ως βέλτιστης, η πραγματική συνολική ρυθμαπόδοση των κόμβων εμφανίζεται αρκετά υψηλότερη από την αναμενόμενη, με αποτέλεσμα το σημείο μέγιστης ρυθμαπόδοσης να εντοπίζεται αριστερότερα στον άξονα για τα πειραματικά δεδομένα. Τέτοια συμπεριφορά επίσης έχουμε παρατηρήσει στο πείραμα 4.3 για την παράμετρο CW , και την ερμηνεύσαμε με βάση το φαινόμενο του post-busy slot, το οποίο για μικρές τιμές του CW μπορεί να συμβάλει στην αύξηση της συνολικής ρυθμαπόδοσης, με την μερική κατάληψη του καναλιού από κάποιον κόμβο.



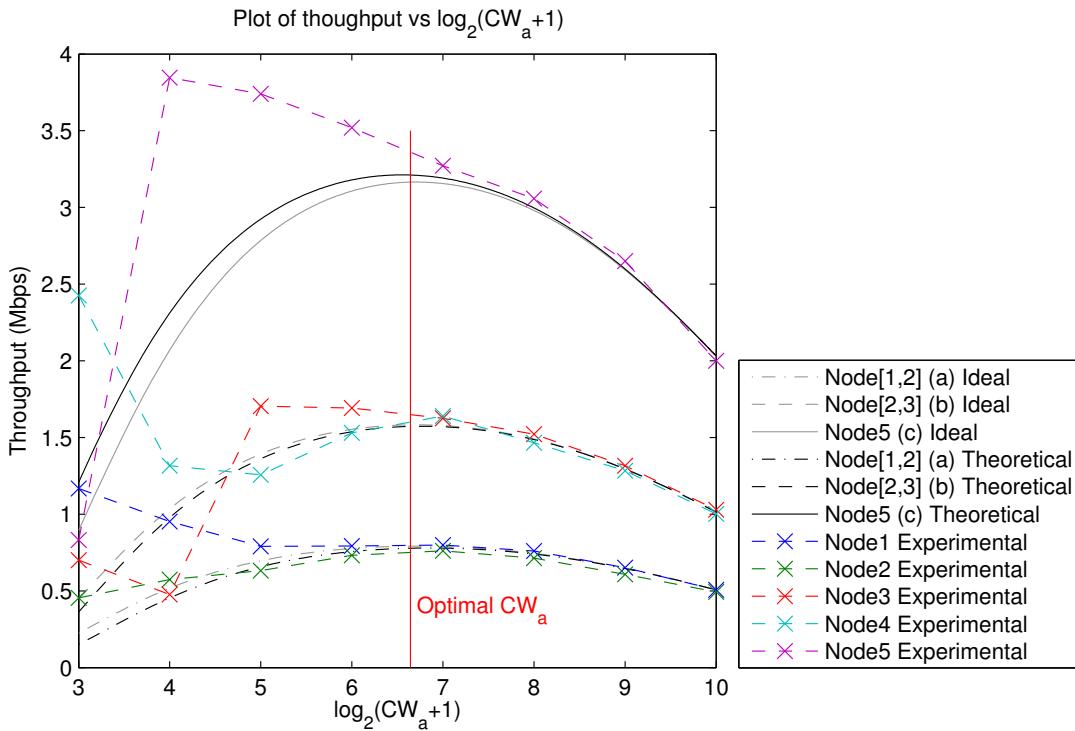
Σχήμα 5.2: Διάγραμμα του δείκτη αναλογικής δικαιοσύνης Ψ , συναρτήσει της παραμέτρου CW_a της κλάσης (a).



Σχήμα 5.3: Διάγραμμα της συνολικής ρυθμαπόδοσης των κόμβων, συναρτήσει της παραμέτρου CW_a της κλάσης (a).

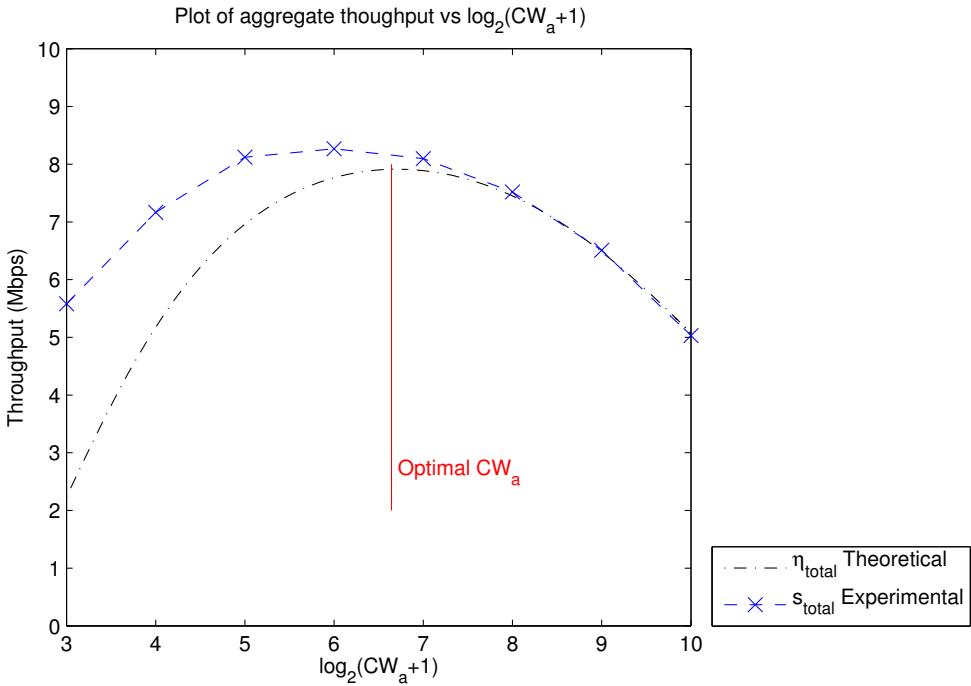
Πείραμα 5.2

Στη συνέχεια θα εξετάσουμε ακόμη μία περίπτωση, πραγματοποιώντας άλλο ένα πείραμα, αντίστοιχο με το πείραμα 5.1, όμως αυτή τη φορά θα χρησιμοποιήσουμε τρεις κλάσεις κίνησης αντί των δύο που είχαμε στο προηγούμενο πείραμα. Έτσι, τώρα οι επιθυμητές αναλογίες ρυθμαπόδοσης για κάθε κόμβο, σε σχέση με αυτή του κόμβου 1 θα είναι $r_j = \{1, 1, 2, 2, 4\}$. Οι ιδανικές τιμές που προκύπτουν αυτή τη φορά με βάση τον τύπο (5.3) για τα παραθύρα ανταγωνισμού είναι $CW_j^* = \{99, 99, 50, 50, 25\}$. Οι κοντινότερες τιμές στις ιδανικές που μπορούμε να εισάγουμε στο σύστημα είναι οι $CW_{j_{exp}}^* = \{127, 127, 63, 63, 31\}$. Στα σχήματα 5.4, 5.5 και 5.6 μπορούμε να δούμε τα αντίστοιχα αποτελέσματα του πειράματος.



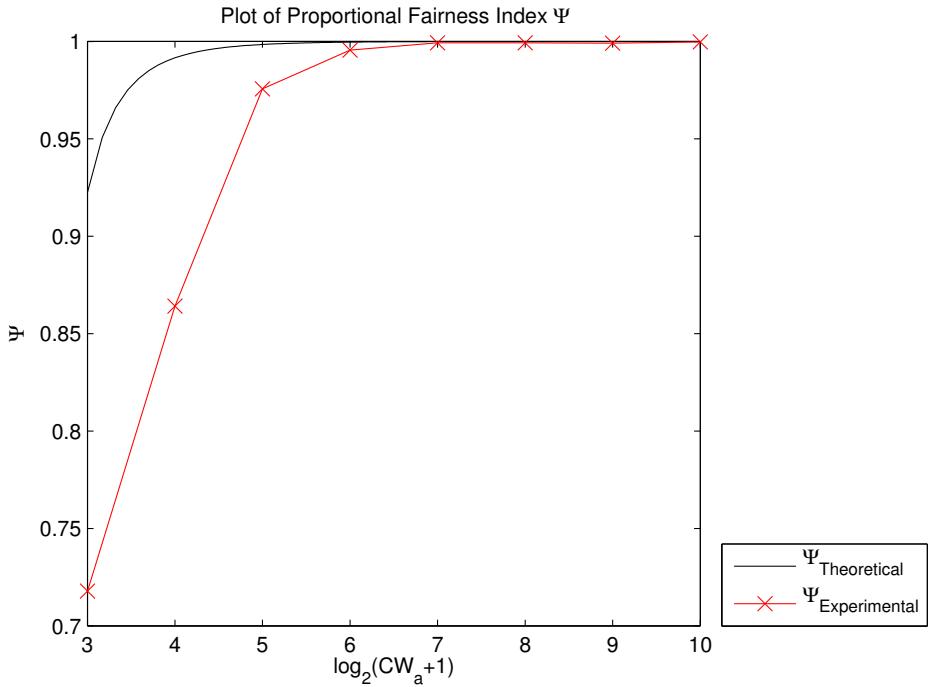
Σχήμα 5.4: Διάγραμμα της αναμενόμενης αλλά και πειραματικής ρυθμαπόδοσης των κόμβων συναρτήσει της παραμέτρου CW_a της κλάσης (a).

Όπως δείχνουν τα διαγράμματα, και για την περίπτωση αυτή των τριών κλάσεων κίνησης, παρά τις διαφορές στις αντίστοιχες τιμές ρυθμαπόδοσης και παραθύρων, παρατηρούμε μία αντίστοιχη συμπεριφορά με αυτή που περιγράψαμε για το προηγούμενο πείραμα 5.1. Συγχρίνοντας τα πειραματικά δεδομένα με το θεωρητικό μοντέλο, βλέπουμε ότι αυτό, μας παρέχει μία πολύ καλή περιγραφή της συμπεριφοράς του



Σχήμα 5.5: Διάγραμμα της συνολικής ρυθμαπόδοσης των κόμβων, συναρτήσει της παραμέτρου CW_a της κλάσης (a).

συστήματος για τιμές της παραμέτρου CW μεγαλύτερες των βέλτιστων, όπως αυτές υπολογίζονται από τον τύπο (5.3), με τις πειραματικές τιμές να βρίσκονται όλο και πιό κοντά στη θεωρητική περιγραφή για μεγαλύτερες τιμές του CW . Για τιμές του CW στην “περιοχή συμφόρησης”, δηλαδή για τιμές μικρότερες από αυτές που μας δίνει ο τύπος (5.3), παρατηρούμε την πραγματική συμπεριφορά του συστήματος να αποκλίνει σημαντικά από την θεωρητικώς προβλεπόμενη, έχοντας την τάση να γίνεται περισσότερο “άπρόβλεπτη”. Επίσης, παρατηρούμε ότι το σημείο στο οποίο εντοπίζεται πειραματικά η υψηλότερη συνολική ρυθμαπόδοση του συστήματος, βρίσκεται αριστερότερα από το θεωρητικώς προβλεπόμενο, κάτι που πιθανότατα δικαιολογείτε με βάση το φαινόμενο του ”post-busy slot”. Παρόλα αυτά, για μικρότερες τιμές του CW από αυτές που υπολογίσαμε από τον τύπο (5.3) παρατηρείται απότομη πτώση της αναλογικής δικαιοσύνης ανάμεσα στους κόμβους. Έτσι, μπορούμε να πούμε ότι οι τιμές που υπολογίζουμε με βάση τον τύπο (5.3) μας παρέχουν μία σχετική ισορροπία ανάμεσα στην συνολική χρησιμοποίηση του καναλιού, και το μέτρο της αναλογικής δικαιοσύνης ανάμεσα στους κόμβους. Στην περίπτωση που θέλουμε να πετύχουμε ακριβέστερη αναλογική δικαιοσύνη μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μεγαλύτερες παραμέτρους CW , ενώ στην περίπτωση που μας ενδιαφέρει περισσότερο η συνολική ρυθμαπόδοση, μικρότερες.



Σχήμα 5.6: Διάγραμμα του δείκτη αναλογικής δικαιοσύνης Ψ , συναρτήσει της παραμέτρου CW_a της κλάσης (a).

5.4 Παροχή αυστηρών εγγυήσεων Ποιότητας της Υπηρεσίας μέσω μηχανισμών Ελέγχου Αποδοχής.

Μέχρι στιγμής έχουμε μελετήσει τρόπους για την παροχή διαφοροποίησης της ρυθμαπόδοσης σε δίκτυα 802.11, η οποία διαφοροποίηση, αφορά μόνο τις αναλογίες ανάμεσα στη ρυθμαπόδοση για την κάθε ροή δεδομένων. Αυτό σημαίνει ότι παρότι οι συγκεκριμένοι μηχανισμοί μπορούν να παρέχουν αναλογική δικαιοσύνη ανάμεσα στους κόμβους, δεν μπορούν να παρέχουν καμία αυστηρή εγγύηση ως προς τα απόλυτα μεγέθη ρυθμαπόδοσης που κάθε κόμβος θα επιτύχει. Ένας τρόπος που θα μπορούσε ωστόσο να πραγματοποιήσει την αυστήση παροχής εγγυήσεων Ποιότητας της Υπηρεσίας είναι η υιοθέτηση ενός μηχανισμού Ελέγχου Αποδοχής ικανού να επιλέγει το κατάλληλο σύνολο χρηστών που μεγιστοποιούν την συνολική ρυθμοαπόδοση του δικτύου ικανοποιώντας παράλληλα τις απαιτήσεις των χρηστών.

5.4.1 Μηχανισμοί Ελέγχου Αποδοχής για την παροχή εγγυήσεων ποιότητας ως προς την ρυθμαπόδοση.

Επιλέγοντας ένα μηχανισμό Ελέγχου της Αποδοχής, μπορούμε να ελέγξουμε τον αριθμό των αποδεκτών κόμβων προς εξυπηρέτηση στο δίκτυο, με στόχο οι απαιτήσεις τους, να μην υπερβαίνουν την μέγιστη δυνατή χωρητικότητα του καναλιού. Η πολιτική με βάση την την οποία κόμβοι θα γίνονται αποδεκτοί ή θα απορρίπτονται μπορεί να ποικίλει ανάλογα με τις απαιτήσεις διαχείρισης του εκάστοτε δικτύου. Μερικές τέτοιες περιπτώσεις πολιτικών περιγράφονται στη συνέχεια.

- Ελεγχος Αποδοχής με προτεραιότητα στους ενεργούς κόμβους

Υποθέτουμε ότι έχουμε ένα σύνολο M κόμβων σε λειτουργία, με ένα σύνολο παραμέτρων $\{CW_1, CW_2, \dots, CW_M\}$ το οποίο έχουμε υπολογίσει μέσω του τύπου (5.3), καθώς και ότι το σύνολο των κόμβων με αυτές τις παραμέτρους πληρεί τις απαιτήσεις των κόμβων ως προς την ρυθμαπόδοση, δηλαδή

$$\eta_j \geq R_j, \forall j \in \{1, \dots, M\} \quad (5.4)$$

όπου η_j η θεωρητικά υπολογιζόμενη ρυθμαπόδοση για τον κόμβο j μέσω του τύπου (4.2) και R_j είναι η απαίτηση ως προς την απόλυτη ρυθμαπόδοση για τον κόμβο j . Έστω επίσης ότι ένας καινούριος κόμβος $j = M + 1$, με απαίτηση ρυθμαπόδοσης R_{M+1} επιθυμεί να αποκτήσει πρόσβαση στο κανάλι. Σε αυτή την περίπτωση, ο κεντρικός σταθμός πρόσβασης, πρώτα θα υπολογίσει μέσω του τύπου (5.3) ένα καινούριο σύνολο παραμέτρων $\{CW'_1, CW'_2, \dots, CW'_M, CW'_{M+1}\}$. Στη συνέχεια, μέσω του τύπου (4.2) και με βάση το τελευταίο σύνολο παραμέτρων, θα υπολογίσει την απόλυτη ρυθμαπόδοση η'_j για κάθε έναν από τους $1..M+1$ κόμβους. Αν και εφόσον πληρούνται και αυτή την φορά οι απαιτήσεις $\eta'_j \geq R_j, \forall j \in \{1, \dots, M, M+1\}$ τότε ο νέος κόμβος γίνεται αποδεκτός στο δίκτυο, κάνοντας πλέον οι κόμβοι χρήση του νέου συνόλου παραμέτρων. Σε διαφορετική περίπτωση η είσοδος του κόμβου στο δίκτυο απορρίπτεται. Με αυτόν τον τρόπο, στην περίπτωση που το σύστημα μπορεί να εξυπηρετήσει έναν χρήστη, τον αποδέχεται, με αποτέλεσμα οι απαιτήσεις όλων των χρηστών να καλύπτονται πλήρως. Στην περίπτωση όπου η αποδοχή του κόμβου θα σημαίνει αδυναμία πλήρους κάλυψης των απαιτήσεων, του συνόλου των εξυπηρετούμενων κόμβων, το σύστημα τον απορρίπτει. Ο παραπάνω αλγόριθμος έχει ως αποτέλεσμα, το εκάστοτε σύνολο εξυπηρετούμενων κόμβων καλύπτει πλήρως τις απαιτήσεις του ως προς την επίτευξη συγκεκριμένης τιμής ρυθμαπόδοσης καθώς επίσης και το γεγονός ότι δίνεται προτεραιότητα στους ήδη ενεργούς κόμβους έναντι των νέων. Έτσι δεν πρόκειται ποτέ να απορριφθεί ένας ενεργός κόμβος με στόχο την εξυπηρέτηση ενός νέου [15].

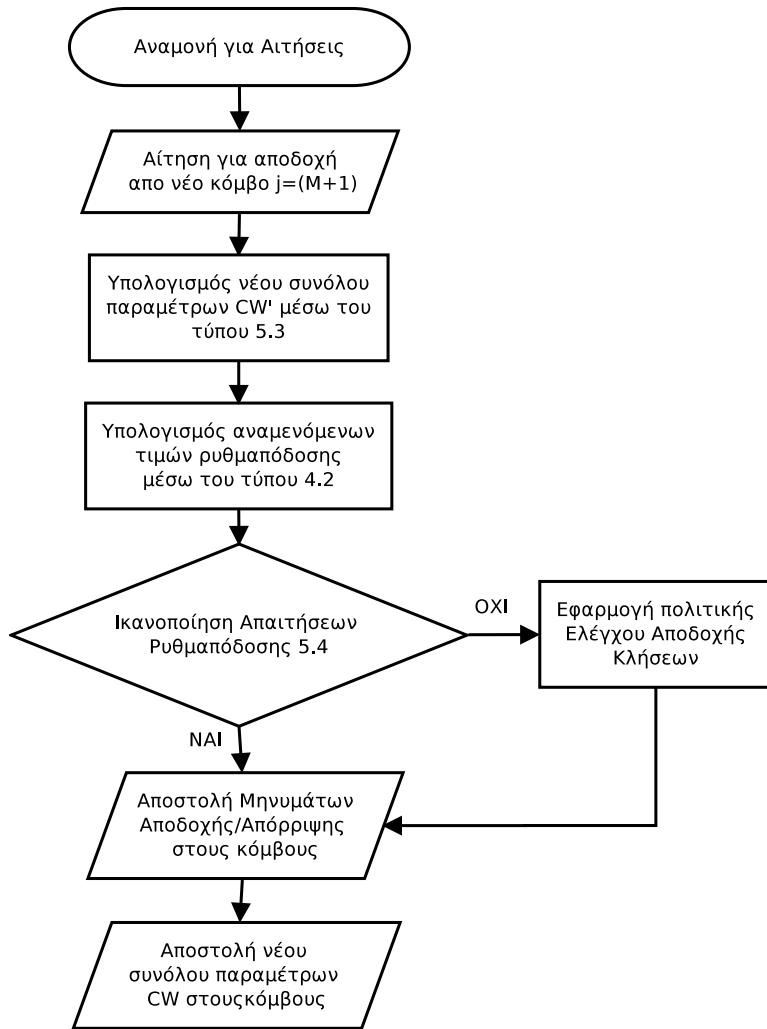
- Έλεγχος Αποδοχής για την μεγιστοποίηση του αριθμού εξυπηρετούμενων κόμβων

Τυποθέτουμε ότι δεν δίνουμε προτεραιότητα στους ήδη ενεργούς κόμβους, αλλά επιθυμούμε σε κάθε στιγμή την εξυπηρέτηση του μέγιστου δυνατού συνόλου κόμβων. Έστω ότι N νέοι κόμβοι $j = M+1 \dots M+N$, με απαιτήσεις ρυθμαπόδοσης R_{M+1}, \dots, R_{M+N} αντίστοιχα, κάνουν αίτηση αποδοχής στο δίκτυο. Στην περίπτωση αυτή, αρχικά υπολογίζουμε μέσω του τύπου (5.3) ένα νέο σύνολο παραμέτρων CW για όλους τους κόμβους, συμπεριλαμβανομένων και των νέων, και στη συνέχεια μέσω του τύπου (4.2) και με βάση το υπολογισμένο σύνολο παραμέτρων, υπολογίζουμε την απόλυτη ρυθμαπόδοση η'_j για κάθε έναν από τους $1..M+N$ κόμβους. Αν και εφόσον πληρούνται και αυτή την φορά οι απαιτήσεις $\eta'_j \geq R_j, \forall j \in \{1, \dots, M, M+N\}$ τότε οι νέοι κόμβοι γίνονται αποδεκτοί στο δίκτυο. Αν δεν πληρούνται οι απαιτήσεις, από το σύνολο όλων των διαθέσιμων κόμβων $A = \{A_1, A_2 \dots A_j\}$ με $j = 1..M+N$ θα πρέπει να υπολογίζουμε για κάθε δυνατό υποσύνολο κόμβων $B \subseteq A$ μέσω του τύπου (5.3) το αντίστοιχο σύνολο βέλτιστων παραμέτρων CW για το κανάλι και στη συνέχεια μέσω του τύπου (4.2) τις αντίστοιχες αναμενόμενες τιμές ρυθμαπόδοσης για κάθε κόμβο εντός του συνόλου B . Συγκρατώντας και συγκρίνοντας τα αποτελέσματα από την παραπάνω διαδικασία, μπορούμε να επιλέξουμε ως σύνολο αποδεκτών κόμβων προς εξυπηρέτηση, το υποσύνολο B , το οποίο ενώ ικανοποιεί τις απαιτήσεις των κόμβων του ως προς την ρυθμαπόδοση, παράλληλα εξυπηρετεί τον μέγιστο αριθμό κόμβων σε σχέση με κάθε άλλο δυνατό υποσύνολο B' .

- Έλεγχος Αποδοχής με προτεραιότητα της κλάσης των υπηρεσιών

Επίσης, μία επιπλέον ενδεικτική περίπτωση ελέγχου αποδοχής μπορεί να λειτουργεί με βάση ένα σύνολο κλάσεων προτεραιοτήτων ανάμεσα στους κόμβους ή/και στις υπηρεσίες. Κάθε κόμβος ή υπηρεσία λοιπόν αντιστοιχίζεται σε μία κλάση στην οποία και ανατίθεται και ένας βαθμός προτεραιότητας, υπονοώντας την άμεση διασύνδεση της αποδοχής των κόμβων ή/και των υπηρεσιών με την ιεράρχηση των των κλάσεων. Συνεπώς, κατόπιν αίτησης ενός νέου κόμβου, σε περίπτωση που δεν επαρκεί το εύρος ζώνης για την άμεση αποδοχή του, να συγκρίνουμε τον βαθμό προτεραιότητας του κόμβου με αυτούς των ήδη εξυπηρετούμενων έτσι ώστε αν υπάρχουν εξυπηρετούμενοι κόμβοι με μικρότερο βαθμό προτεραιότητας, να αποσυνδέουμε αυτούς με στόχο την αποδοχή του αυτούντα κόμβου. Σε αυτήν την περίπτωση οι κόμβοι με υψηλότερη προτεραιότητα προηγούνται σε εξυπηρέτηση, έναντι κόμβων με μικρότερη προτεραιότητα.

Ένα συνοπτικό διάγραμμα ροής της συνδυασμένης λειτουργίας των αλγορίθμων Ελέγχου Αποδοχής και Βέλιστης Επιλογής Παραθύρων Ανταγωνισμού παρουσιάζεται στο σχήμα 5.7.



Σχήμα 5.7: Διάγραμμα ροής συνδυαστικού μηχανισμού Ελέγχου Αποδοχής και επιλογής βέλτιστων Παραθύρων Ανταγωνισμού.

Στο σημείο αυτό, να αναφέρουμε ότι οι προαναφερθείσες πολιτικές, είναι μερικές μόνο από τους πιθανές πολιτικές ενός μηχανισμού Ελέγχου Αποδοχής, καθώς τα χριτήρια ως προς τα οποία θα πραγματοποιείται ο έλεγχος, όπως και το ποιος σταθμός θα γίνεται αποδεκτός ή θα απορρίπτεται μπορούν να διαφοροποιούνται ανάλογα με τις εκάστοτε απαιτήσεις της διαχείρισης.

5.4.2 Διαδικασία σηματοδοσίας του συνδυαστικού μηχανισμού Ελέγχου Αποδοχής και Βέλιστης Επιλογής Παραθύρων Ανταγωνισμού.

Η ορθή υιοθέτηση του συνδυαστικού μηχανισμού Ελέγχου Αποδοχής και Βέλιστης Επιλογής Παραθύρων Ανταγωνισμού σε ένα πραγματικό ασύρματο δίκτυο 802.11 απαιτεί την αδιάλειπτη επικοινωνία

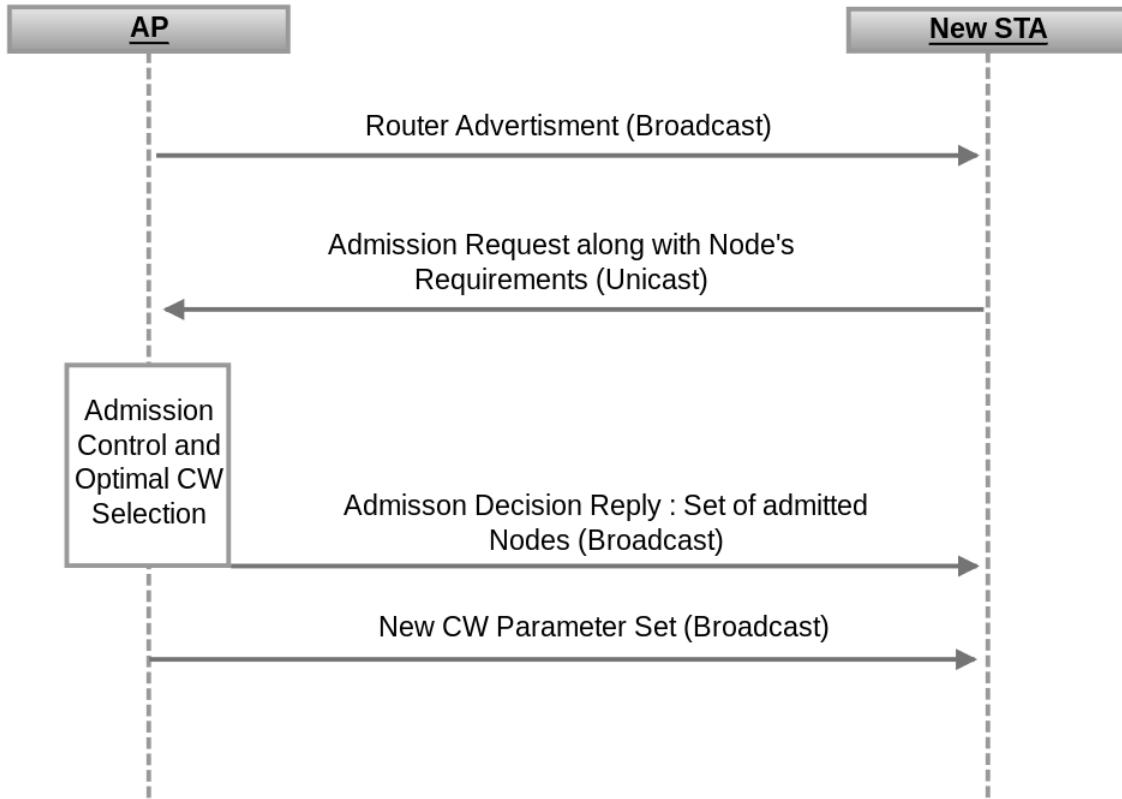
μεταξύ των κινητών κόμβων και του σημείου πρόσβασης. Για αυτόν το λόγο στη συνέχεια παραθέτουμε διαγράμματα σηματοδοσίας ικανά να περιγράψουν την ανταλλασσόμενη επικοινωνία μεταξύ των κόμβων καθώς και να καλύψουν όλες τις απαραίτητες διαδικασίες μεταβολής της κατάστασης τους σύμφωνα με το διάγραμμα ροής 5.7 που περιγράφηκε παραπάνω.

Στο διάγραμμα 5.8 παρουσιάζεται ένα τυπικό σύνολο ανταλλαγής μηνυμάτων ανάμεσα στο σημείο πρόσβασης (AP) και σε έναν νέο ασύρματο κόμβο που επιθυμεί να εισέλθει στο δίκτυο. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε στο διάγραμμα, ο νέος κόμβος αρχικά αντιλαμβάνεται την ύπαρξη ενός νέου δικτύου στην περιοχή κάλυψης του διαμέσου του μηνύματος *Router Advertisement* που το AP περιοδικά εκπέμπει σηματοδοτώντας την παρουσία του. Στην συνέχεια, ένας κόμβος ο οποίος επιθυμεί να μεταδώσει δεδομένα, αποστέλλει ασύγχρονα στο σημείο πρόσβασης ένα μήνυμα αίτησης για αποδοχή, στο οποίο συμπεριλαμβάνονται και οι απαιτήσεις του κόμβου για την μετάδοση.

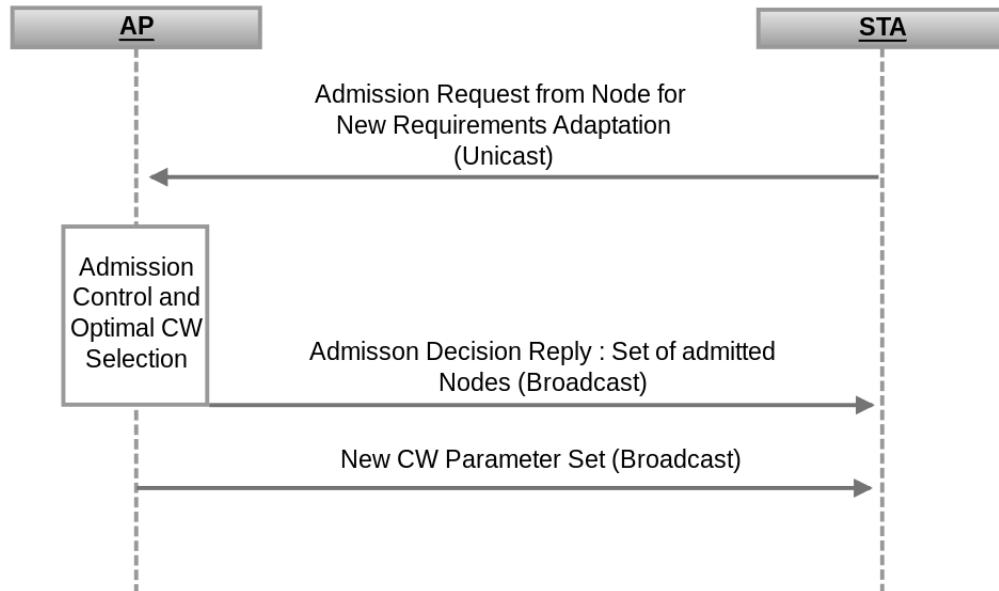
Με την λήψη του μηνύματος αίτησης αποδοχής και των απαιτήσεων του κόμβου, ξεκινάει στο σημείο πρόσβασης η διαδικασία αποδοχής και εξεύρεσης βέλτιστου παραθύρου ανταγωνισμού όπως περιγράφηκε στο διάγραμμα 5.7. Στη συνέχεια και αναλόγως με το αποτέλεσμα της διαδικασίας αποστέλλονται με χρήση εκπομπής τα κατάλληλα μηνύματα αποδοχής του συνόλου των κόμβων που έγιναν αποδεκτοί από το σύστημα, καθώς και το σύνολο των νέων παραθύρων ανταγωνισμού που οι κόμβοι πρέπει να εφαρμόσουν, στοχεύοντας στην ικανοποίηση των χριτηρίων Ποιότητας της Υπηρεσίας τους, αλλά και την μεγιστοποίηση της χωρητικότητας του δικτύου. Αξίζει να τονίσουμε πάλι, πως η εκάστοτε εφαρμοζόμενη πολιτική αποδοχής χρηστών διαφέρει ανάλογα με τα κίνητρα και τους στόχους του διαχειριστή του δικτύου.

Στα διαγράμματα 5.9 και 5.10 παρουσιάζονται τα διαγράμματα σηματοδοσίας ανάμεσα στο σημείο πρόσβασης και στους κόμβους προς εξυπηρέτηση κατά την διαδικασία μεταβολής των απαιτήσεων κάποιου κόμβου και την διαδικασία αποχώρησης ενός κόμβου από το σύστημα αντίστοιχα.

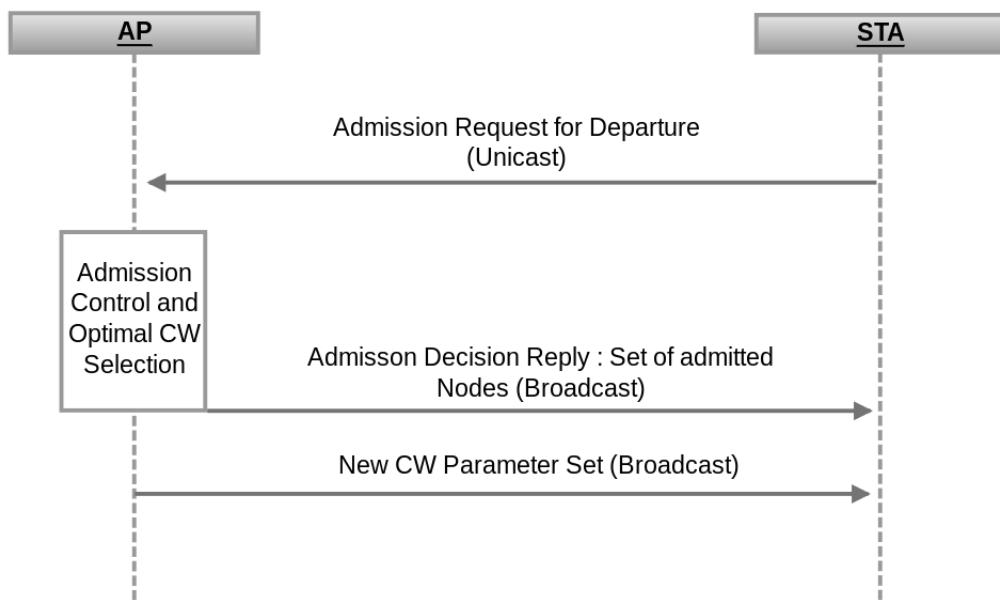
Τέλος να σημειώσουμε πως οι διαδικασίες που περιγράφηκαν υπογραμμίζουν την ασύγχρονη φύση της λειτουργίας του συνδυαστικού μηχανισμού Ελέγχου Αποδοχής και επιλογής βέλτιστων Παραθύρων Ανταγωνισμού. Σύμφωνα με αυτό κάθε χρήστης ενημερώνει ασύγχρονα το σημείο πρόσβασης για τις επιλογές του πυροδοτώντας την επανεκτέλεση του συνδυαστικού μηχανισμού το οποίο θα εξασφαλίσει την βέλτιστη και εύρυυθμη λειτουργία του δικτύου.



Σχήμα 5.8: Ακολουθιακό διάγραμμα τυπικής σηματοδοσίας χατά την διαδικασία εισδοχής νέου κόμβου στο σύστημα.



Σχήμα 5.9: Ακολουθιακό διάγραμμα τυπικής σηματοδοσίας χατά την διαδικασία μεταβολής των απαιτήσεων Ποιότητας της Υπηρεσίας ενός κόμβου.



Σχήμα 5.10: Ακολουθιακό διάγραμμα τυπικής σηματοδοσίας χατά την διαδικασία ενός κόμβου από το σύστημα.

5.5 Συμπεράσματα

Από τα πειράματα τα οποία πραγματοποιήσαμε μπορούμε να συνάγουμε το συμπέρασμα ότι η μέθοδος που ακολουθήσαμε, μπορεί να μας παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα ως προς την βέλτιστη χρησιμοποίηση του καναλιού με παράλληλη αξιόπιστη διαφοροποίηση της ρυθμαπόδισης ανάμεσα σε ένα σύνολο κόμβων. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρήσαμε ότι για σχετικά μεγάλα CW , τέτοια ώστε στο σύστημα να μην υπάρχει υψηλή συμφόρηση, η αναλογία ανάμεσα στα επιλεχθέντα παράθυρα ανταγωνισμού των κόμβων, είναι πολύ κοντά στην αναλογία της την πειραματικής ρυθμαπόδισης την οποία αυτοί επιτυγχάνουν. Επίσης, βλέπουμε ότι το μαθηματικό μοντέλο που υιοθετήσαμε, μπορεί μας παρέχει ένα σύνολο τιμών παραμέτρων CW τέτοιων ώστε να επιτυγχάνεται μία κατά το δυνατόν βέλτιστη ισορροπία ανάμεσα στην συνολική ρυθμαπόδιση στο κανάλι, και την παροχή αναλογικής δικαιοσύνης ανάμεσα στους κόμβους, με βάση τα βάρη τα οποία έχουμε θέσει για αυτούς ως προς την επιθυμητή επί μέρους ρυθμαπόδιση. Τέλος μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι μας δίνεται η δυνατότητα να συνδυάσουμε τη συγκεκριμένη μέθοδο, με μία μέθοδο ελέγχου αποδοχής με σκοπό την παροχή αυστηρών εγγυήσεων Ποιότητας της Υπηρεσίας για ροές δεδομένων με απαιτήσεις οι οποίες αφορούν την ρυθμαπόδιση.

6 Επίλογος

Στην παρούσα εργασία, ασχοληθήκαμε με την μελέτη των μηχανισμών παροχής Ποιότητας της Υπηρεσίας (QoS) σε ασύρματα δίκτυα τύπου IEEE 802.11. Η μελέτη αυτή εστίασε στις δυνατότητες που μας παρέχουν οι διαθέσιμοι μηχανισμοί για την παροχή Ποιότητας της Υπηρεσίας χυρίως όσον αφορά την ρυθμαπόδοση, καθώς και επίσης και την δυνατότητα παροχής εγγυήσεων ποιότητας της υπηρεσίας σε ένα τέτοιο ασύρματο δίκτυο.

Αρχικά μελετήθηκε με χρήση ενός μαθηματικού μοντέλου περιγραφής του μηχανισμού ελέγχου πρόσβασης μέσου EDDA η επίδραση της μεταβολής των παραμέτρων *AIFS* και *CW* στην παρατηρούμενη ρυθμαπόδοση των κόμβων του ασύρματου δικτύου του συστήματος. Στη συνέχεια αναζητήσαμε τρόπους διαφοροποίησης της ρυθμαπόδοσης των κόμβων στοχεύοντας στην ικανοποίηση των εκάστοτε απαιτήσεων των χρηστών, ενώ παράλληλα εξετάστηκε η αντίστοιχη συμπεριφορά πραγματοποιώντας πειράματα σε μία πραγματική πλατφόρμα δοκιμών ασύρματων δικτύων 802.11 στο χώρο του εργαστηρίου Διαχείρισης Δικτύων και Βέλτιστου Σχεδιασμού του ΕΜΠ. Από την μελέτη αυτή, προέκυψε ένα σύνολο σημαντικών συμπερασμάτων για την συμπεριφορά του δικτύου σε σχέση με τις παραπάνω παραμέτρους καθώς και για τις δυνατότητες χρήσης τους στο σχεδιασμό μεθόδων παροχής QoS.

Έπειτα, χρησιμοποιώντας τα συμπεράσματα που εξάγουμε ως προς τη χρήση των παραμέτρων του μηχανισμού EDDA επιχειρήσαμε την επίλυση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης, με στόχο την επιλογή ενός βέλτιστου συνόλου παραμέτρων *CW* για την καλύτερη χρησιμοποίηση των πόρων του δικτύου, δεδομένου ενός συνόλου περιορισμών. Για την αξιολόγηση του θεωρητικού μας μοντέλου και των συμπερασμάτων μας έγινε ξανά χρήση της πειραματικής πλατφόρμας δοκιμών, με μία σειρά αντίστοιχων πειραμάτων.

Τέλος, με βάση τα προηγούμενα συμπεράσματα μας αναλύσαμε τη δυνατότητα διασύνδεσης του μηχανισμού Βέλτιστης Επιλογής Παραθύρων Ανταγωνισμού με μηχανισμούς Ελέγχου Αποδοχής επιτυγχάνοντας την παροχή άυστηρών εγγυήσεων Ποιότητας της Υπηρεσίας στους κόμβους, αλλά και την συνολικά μέγιστη ρυθμαπόδοση του συνολικού συστήματος.

Κλείνοντας, μπορούμε να προτείνουμε ως ενδιαφέροντα θέματα προς μελλοντική διερεύνηση την υλοποίηση ενός σύγχρονου συστήματος ελέγχου συμφόρησης σε συνδυασμό με τα συστήματα ελέγχου συμφόρησης και ελέγχου αποδοχής τα οποία περιγράψαμε καθώς επίσης και την υλοποίηση και αξιολόγηση αλγορίθμων κατανεμημένου αυτομάτου ελέγχου των παραμέτρων EDDA για την βέλτιστη χρησιμοποίηση του καναλιού, χωρίς κεντρική διαχείριση, όπως αυτός που αναφέρεται στην μελέτη [16].

Αναφορές

- [1] *IEEE Standard for Information technology Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks Specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications* 2007.
- [2] Andrew S. Tanenbaum *Computer Networks - 4th edition*, ISBN 960-209-689-6 2003
- [3] Alliance, W.F., *Wi-Fi CERTIFIEDTM for WMMTM-Support for Multimedia Applications with Quality of Service in Wi-Fi® Networks*
Austin, Wi-Fi Alliance, 2004.
- [4] Voyage Linux, <http://linux.voyage.hk/>, Online Link.
- [5] MadWifi driver, <http://madwifi-project.org/>, Online Link.
- [6] Iperf, <http://iperf.sourceforge.net/>, Online Link.
- [7] Bianchi, G. and Fratta, L. and Oliveri, M. *Performance evaluation and enhancement of the CSMA/CA MAC protocol for 802.11 wireless LANs*, Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. PIMRC'96., Seventh IEEE International Symposium on, volume 2, pages 392-396, 1996.
- [8] Yang Xiao, *Throughput and Delay Limits of IEEE 802.11*, IEEE COMMUNICATIONS LETTERS, VOL. 6, NO. 8, August 2002.
- [9] R. Jain, *The Art of Computer Systems Performance Analysis: Techniques for Experimental Design, Measurement, Simulation and Modeling*. Wiley- Interscience, New York, NY, April 1991, ISBN 0471503361.
- [10] Hu, Chunyu and Kim, Hwangnam and Hou, Jennifer C. and Chi, Dennis and Nandagopalan, Sai Shankar, *Provisioning Quality Controlled Medium Access in UltraWideBand (UWB) WPANs*. Technical report, Department of ECE, UIUC 2005.
- [11] G. Bianchi and I. Tinnirello, *Analysis of Priority Mechanisms Based on Differentiated Inter-Frame Spacing in CSMA/CA*. Vehicular Technology Conference, 2003. VTC 2003-Fall. 2003 IEEE 58th

- [12] Jun Zhao and Zihua Guo and Qian Zhang and Wenwu Zhu, *Performance Study of MAC for Service Differentiation in IEEE 802.11*. Global Telecommunications Conference, 2002. GLOBE-COM'02. IEEE
- [13] Inan, I. and Keceli, F. and Ayanoglu, E. *Saturation Throughput Analysis of IEEE 802.11e Enhanced Distributed Coordination Function*. Communications, 2007. ICC'07. IEEE International Conference.
- [14] Bing, B. *Emerging technologies in wireless LANs: theory, design, and deployment*. Cambridge, 2008. ISBN 978-0-521-89584-2.
- [15] Albert Banchs and Xavier Perez-Costa and Daji Qiao, *Providing Throughput Guarantees in IEEE 802.11e Wireless LANs*, 2003.
- [16] Yang, Y. and Wang, J. and Kravets, R., *Distributed optimal contention window control for elastic traffic in single-cell wireless LANs*. IEEE/ACM Transactions on Networking (TON) vol 15 num 6 2007.