

ΑΝΟΙΧΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ & ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΣΤΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ



ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΦΩΝΗΣ (ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ VoIP)
ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΙΕΕΕ 802.11 ΤΟΠΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Β. ΒΟΥΡΚΑΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΒΙΤΣΑΣ

ΙΟΥΝΙΟΣ 2012

ΑΝΟΙΧΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ & ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΦΩΝΗΣ (ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ VoIP)
ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ IEEE 802.11 ΤΟΠΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Β. ΒΟΥΡΚΑΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΒΙΤΣΑΣ

Επιτροπή
ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΒΙΤΣΑΣ
ΙΩΑΝΝΗΣ ΡΕΦΑΝΙΔΗΣ
ΣΤΑΥΡΟΣ ΣΤΑΥΡΟΥ

Η ΠΑΡΟΥΣΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΥΠΟΒΛΗΘΗΚΕ ΠΡΟΣ ΜΕΡΙΚΗ ΕΚΠΛΗΡΩΣΗ ΤΩΝ
ΑΠΑΙΤΗΣΕΩΝ ΓΙΑ ΑΠΟΚΤΗΣΗ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟΥ ΤΙΤΛΟΥ ΣΠΟΥΔΩΝ ΣΤΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΑ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗ ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΤΟΥ ΑΝΟΙΚΤΟΥ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΚΥΠΡΟΥ

ΙΟΥΝΙΟΣ 2012

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Βίτσα Βασίλειο που με ενέπνευσε ως δάσκαλος και μου έδωσε τη δυνατότητα να ασχοληθώ με ένα θέμα εξαιρετικά ενδιαφέρον το οποίο με την δική του καθοδήγηση δημοσιεύθηκε σε διεθνές συνέδριο. Ιδιαίτερα τον ευχαριστώ για την ενθάρρυνση που μου πρόσφερε και για τις εύστοχες παρατηρήσεις του.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την πλήρη στήριξή τους. Τέλος θέλω να ευχαριστήσω την σύζυγό μου, για την υπομονή της και την συμπαράστασή της ώστε να καταφέρω να ολοκληρώσω την παρούσα εργασία.

Περίληψη

Το πρωτόκολλο IEEE 802.11 είναι το πιο διαδεδομένο πρωτόκολλο στα ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLAN) με πολυάριθμες εγκαταστάσεις σε χώρους εργασίας, οικίες, πανεπιστήμια, καφετέριες, αεροδρόμια κλπ. Οι εφαρμογές μετάδοσης φωνής με χρήση του IP (VoIP) είναι ευρέως διαδεδομένες, κυρίως λόγω του σχετικά χαμηλού κόστους με αποτέλεσμα την συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση για ποιοτικές υπηρεσίες VoIP. Η μετάδοση όμως φωνής μέσω ασύρματων δικτύων απαιτεί την δημιουργία πολλών μικρών πακέτων και την επιβάρυνση αυτών με πολλούς headers, με αποτέλεσμα την μη αποδοτική λειτουργία των ασύρματων τοπικών δικτύων και τις σημαντικές καθυστερήσεις των πακέτων φωνής λόγω σημαντικών καθυστερήσεων πρόσβασης στο μέσο. Τα προαναφερθέντα καταστούν επιτακτική την ανάγκη της μελέτης της απόδοσης των ασύρματων τοπικών δικτύων που εξυπηρετούν συνδέσεις φωνής μέσω της ανάπτυξης μοντέλων για τον γρήγορο υπολογισμό μετρικών υπολογισμού της χωρητικότητας και της απόδοσης. Έχουν αναπτυχθεί στην βιβλιογραφία μοντέλα για τον υπολογισμό της χωρητικότητας σταθμών φωνής, τα οποία βασίζονται κυρίως στην μέση καθυστέρηση των πακέτων και στο Jitter, χωρίς όμως να λαμβάνουν υπ' όψιν την πιθανή ύπαρξη στο ασύρματο δίκτυο και σταθμών δεδομένων εκτός των σταθμών φωνής. Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, αρχικά μελετήθηκαν και αναλύθηκαν οι παρακάτω εργασίες που ανέπτυξαν α) ένα μαθηματικό μοντέλο για τον υπολογισμό της απόδοσης που βασίζεται στις αλυσίδες Markov [6], β) ένα μαθηματικό μοντέλο που βασίζεται στην εργασία [6] για τον υπολογισμό της μέσης καθυστέρησης πακέτων [10], γ) ένα μαθηματικό μοντέλο για τον υπολογισμό του Jitter [11] και δ) μια μεθοδολογία για τον υπολογισμό της χωρητικότητας σταθμών φωνής σε ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο [12]. Στην συνέχεια, βασιζόμενοι στα παραπάνω αναπτύχθηκε ένα αναλυτικό μοντέλο για τον υπολογισμό της

χωρητικότητας σταθμών φωνής σε ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο IEEE 802.11 DCF, όπου υπάρχει ταυτόχρονη μετάδοση πακέτων φωνής και δεδομένων. Το προτεινόμενο μοντέλο επαληθεύτηκε συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του με τα αποτελέσματα προσομοιωτή, ο οποίος αναπτύχθηκε σε περιβάλλον MATLAB και προσομοιώνει πολύ γρήγορα και με ακρίβεια το υπό μελέτη ασύρματο δίκτυο. Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν ότι με την προσθήκη ενός σταθμού δεδομένων η χωρητικότητα μειώνεται κατά ένα έως δύο sessions φωνής.

Δημήτριος Β. Βούρκας

Καστοριά 2012.

Abstract

The IEEE 802.11 protocol is the most common protocol in Wireless Local Area Networks (WLAN) with numerous facilities in workplaces, homes, universities, cafes, airports, etc. The voice applications using IP (VoIP) are widespread, mainly because of relatively low cost resulting in growing demand for quality service VoIP. The transmission of voice, through wireless networks requires the creation of many small packets and overloading of them with multiple headers, with result the inefficient operation of the wireless LANs and the significant delays of the voice packets due to significant delays at the medium access. The above considerations make it imperative to study the performance of the wireless local area networks that serving voice connections through the development of the models for rapid calculation of the metric calculation capacity and the performance. They have developed in literature models that are calculate the capacity of voice channels based on average packet delay and Jitter, without calculating the probability that The existence of data stations with voice stations in the wireless network. Present thesis deals with, the study and analyze the following tasks that have developed a) a mathematical model that calculates the performance based on Markov chains [6], b) a mathematical model based on the work [6] that calculates the average delay package [10], c) a mathematical model that calculates the Jitter [11] and d) a methodology that calculates the capacity of voice stations in a wireless local area network [12]. Then, based on the above we have developed an analytical model that calculates the voice capacity of voice in a wireless LAN IEEE 802.11 DCF, where there is a simultaneous transmission of voice and packet data. The proposed model is validated by comparing analytical with simulation results , which simulator was developed in MATLAB environment and simulates very quickly and accurately the wireless network. The results showed that by adding

a data channel capacity is reduced by one to two sessions voice.

Dimitrios V. Vourkas

Kastoria 2012.

**Part of this work is published in 8th IEEE, IET Int.
Symposium on Communication Systems, Networks and
Digital Signal Processing**

Περιεχόμενα

Περίληψη vii

Abstract ix

I Voice over IP - Ασύρματα δίκτυα IEEE 802.11 1

1 Voice over IP 2

- 1.1 Ορισμός του VoIP 2
- 1.2 Το πρωτόκολλο H.323 3
- 1.3 SIP - Πρωτόκολλο έναρξης συνδιάλεξης 7
- 1.4 Σύγκριση των H.323 και SIP 10
- 1.5 Ελληνικοί τηλεφωνικοί αριθμοί για χρήση με VoIP 11
- 1.6 Χρήση συσκευών DECT 11
- 1.7 Τηλεφωνικά κέντρα VoIP 12
- 1.8 Άλλες Εφαρμογές VoIP 13
- 1.9 Μετρικά χαρακτηριστικά ποιότητας VoIP 13
- 1.10 Το μέλλον της τεχνολογίας VoIP 14

2 Ασύρματα Δίκτυα IEE 802.11 15

- 2.1 Εισαγωγή 15
- 2.2 Ιστορικό 16
- 2.3 Έλεγχος πρόσβασης 18

2.4	Πακέτο MAC	19
2.5	IFS	20
2.6	802.11 Distributed Coordination Function	20
2.6.1	Τεχνικές μετάδοσης πακέτων του DCF υποστρώματος	22
2.6.2	Basic Access	22
2.6.3	RTS/CTS Request To Send/Clear To Send	24
3	Ανάλυση της απόδοσης του IEEE 802.11 DCF	26
3.1	Markov Model	27
3.1.1	Πιθανότητα μετάδοσης πακέτου.	27
3.2	Διεκπεραιωτική Ικανότητα (Throughput)	31
3.2.1	Basic Access Mechanism-RTC/CTS Mechanism	33
3.3	Επικύρωση Μοντέλου	33
3.4	Συμπεράσματα	39
4	Καθυστέρηση Πακέτων - Όριο Επαναμετάδοσης Πακέτου - Διακύμανση Καθυστέρησης (Jitter)	40
4.1	Εισαγωγή.	40
4.1.1	Αναλυτικό Μοντέλο	40
4.1.2	Πιθανότητα απόρριψης πακέτου	42
4.1.3	Μέσος χρόνος απόρριψης πακέτου	43
4.1.4	Μέσος χρόνος καθυστέρησης	43
4.2	Αποτελέσματα Ανάλυσης	44
4.3	Διακύμανση Καθυστέρησης (Jitter)	49
4.4	Αποτελέσματα Ανάλυσης Jitter	51
4.5	Συμπεράσματα	53
II	Ανάπτυξη μοντέλου υπολογισμού χωρητικότητας σταθμών φωνής τοπικού δικτύου IEEE 802.11 με συνύπαρξη σταθμών δεδο-	

μένων 54

5 Περιγραφή συστήματος και ανάπτυξη μαθηματικού μοντέλου 55

5.1 Βασική περιγραφή δικτύου 56

5.2 Μαθηματικό μοντέλο 56

5.3 Χωρητικότητα φωνής 59

5.4 Συμπεράσματα 61

6 Επικύρωση αποτελεσμάτων αναλυτικού μοντέλου με προσομοιωτή, χωρητικότητά 62

6.1 Παράμετροι συστήματος 62

6.1.1 Επιβάρυνση πακέτων φωνής 63

6.2 Αποτελέσματα αναλυτικού και προσομοίωσης 65

6.3 Συμπεράσματα 70

Συμπεράσματα διατριβής 71

Βιβλιογραφία 72

Μέρος Ι

Voice over IP - Ασύρματα

δίκτυα IEEE 802.11

Κεφάλαιο 1

Voice over IP

1.1 Ορισμός του VoIP

Το Voice over IP ή VoIP ή τηλεφωνία μέσω διαδικτύου, αποτελείται από μια ομάδα πρωτοκόλλων-τεχνολογιών όπως το Session Initiation Protocol (SIP) και το H.323 (το SIP και το H.323 είναι πρωτόκολλα μεταφοράς πολυμεσικών πληροφοριών). Τα δύο αυτά πρωτόκολλα προσφέρουν φωνητική συνομιλία σε πραγματικό χρόνο με χαμηλό κόστος και με σχετικά καλή ποιότητα. Στις αρχές εμφάνισης των πρωτοκόλλων οι συνομιλίες αυτές γίνονταν αποκλειστικά μέσω ενός υπολογιστή που ήταν συνδεδεμένος με το διαδίκτυο μέσω ενός συνδεδεμένου μικροφώνου, ακουστικών και το κατάλληλο λογισμικό. Η κλήση κατέληγε σε ένα άλλο υπολογιστή, στον οποίο υπήρχε ανάλογος εξοπλισμός χωρίς κάποια επιπλέον χρέωση, εκτός την χρέωση του παρόχου για την πρόσβαση στο διαδίκτυο. Τα τελευταία χρόνια έχουν εμφανιστεί διάφοροι εναλλακτικοί τηλεπικοινωνιακοί φορείς, οι οποίοι εκτός από την κλασική επικοινωνία μέσω VoIP προσφέρουν και προώθηση αυτών των κλήσεων με χαμηλό κόστος, σε παραδοσιακά τηλεπικοινωνιακά δίκτυα. Έχουν επίσης κυκλοφορήσει τηλεφωνικές συσκευές, οι οποίες συνδέονται στον ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω κάποιας θύρας USB, καθιστώντας έτσι τις κλήσεις μέσω Διαδικτύου πιο λειτουργικές, και ποιό κοντά στον παραδοσιακό τρόπο τηλεπικοινωνιών (τηλεφωνική συσκευή και όχι μικρόφωνο και ακουστικά). Υπάρχουν για παράδειγμα, το δικτυακό τηλέφωνο Yealink USB-P1K, το Crypto Skype S100 και εταιρείες προώθησης κλήσεων όπως η Free World Dialup (FWD), η EDC VoIP, και η MyDivert. Για να επικοινωνή-

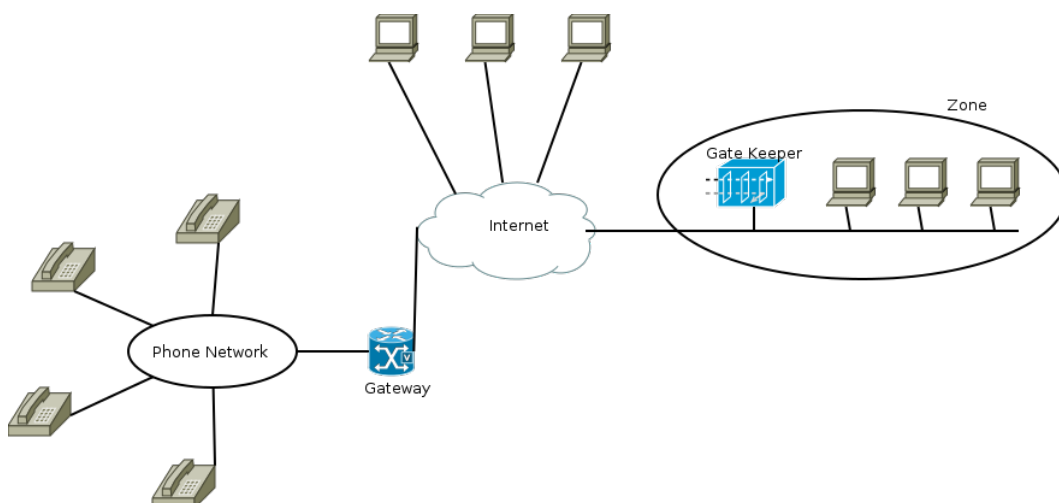
σει κάποιος χρήστης μέσω αυτών των εταιρειών θα πρέπει πρώτα να αγοράσει χρόνο μέσω πιστωτικής κάρτας, και στην συνέχεια μπορεί να διαθέσει τον χρόνο αυτόν κατά βούληση.

Από το 2009 εμφανίστηκαν και κάποιες ελληνικές εταιρείες, οι οποίες διαθέτουν συνδέσεις με ελληνικά νούμερα για χρήση με VoIP υπηρεσίες, οι οποίες συνδέσεις έχουν την δυνατότητα να πραγματοποιούν και να δέχονται κλήσεις από όλους σχεδόν τους τηλεπικοινωνιακούς παρόχους. Παραδείγματα τέτοιων εταιρειών είναι Omnivoice, η Viva, η Modulus και η Hell@sfone.

1.2 Το πρωτόκολλο H.323

Το 1996 η International Telecommunication Union (ITU) εξέδωσε την οδηγία H.323 με τίτλο "Συστήματα και εξοπλισμός οπτικής τηλεφωνίας για δίκτυα τοπικής περιοχής που παρέχουν μη εγγυημένη ποιότητα πληροφοριών". Η οδηγία αυτή ανανεώθηκε το 1998 και έγινε η βάση για τα πρώτα ευρέως διαδεδομένα συστήματα τηλεφωνίας μέσω διαδικτύου.

Το H.323 αναφέρεται σε μεγάλο πλήθος συγκεκριμένων πρωτοκόλλων που αφορούν την κωδικοποίηση φωνής, εγκαθίδρυση κλήσεων, σηματοδότηση, μεταφορά δεδομένων, και άλλα θέματα. Το γενικό μοντέλο απεικονίζεται στο Σχήμα 1.1 όπου υπάρχει μια πύλη (Gateway) η οποία είναι υπεύθυνη για την σύνδεση του διαδικτύου με το τηλεφωνικό δίκτυο.



Σχήμα 1.1: Το αρχιτεκτονικό μοντέλο του H.323



Η πύλη αυτή επικοινωνεί με το πρωτόκολλο H.323 από την πλευρά του Internet και μέσω του πρωτοκόλλου PSTN από την πλευρά της τηλεφωνίας. Οι συσκευές που επικοινωνούν μεταξύ τους ονομάζονται τερματικά (terminals) τα οποία ελέγχονται από έναν ελεγκτή πύλης (gatekeeper) ο οποίος είναι υπεύθυνος για τον έλεγχο των τερματικών που βρίσκονται μέσα στην δικαιοδοσία του (zone).

Για να μπορέσουμε να μεταδώσουμε φωνή μέσα από ένα τηλεφωνικό δίκτυο θα πρέπει αρχικά να μπορούμε να κωδικοποιήσουμε και στην συνέχεια να αποκωδικοποιήσουμε την ομιλία μέσω κάποιου αλγορίθμου συμπίεσης. Οι G.711, G.729 και G.723.1 είναι τρεις κωδικοποιητές οι οποίοι χρησιμοποιούν διαφορετικό αλγόριθμο συμπίεσης, και επομένως χρειάζεται ένα πρωτόκολλο που να επιτρέπει τα τερματικά να διαπραγματεύονται τον αλγόριθμο που θα χρησιμοποιήσουν. Ένα τέτοιο πρωτόκολλο είναι το H.245 το οποίο εκτός από το από τον αλγόριθμο συμπίεσης διαπραγματεύεται και άλλα θέματα όπως τον ρυθμό μετάδοσης bit. Για τον έλεγχο των καναλιών απαιτείται το RTP Control Protocol (RTCP), ενώ για εγκαθίδρυση αποδέσμευση συνδέσεων, παροχή τόνων επιλογής, παραγωγή κουδουνίσματος και για τα άλλα χαρακτηριστικά της τυπικής τηλεφωνίας χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο Q.931. Για την επικοινωνία των τερματικών με τον ελεγκτή πύλης χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο H.225. Τέλος για την πραγματική μετάδοση δεδομένων χρησιμοποιείται Real-time Transport Protocol (RTP). Οι σχετικές θέσεις όλων των πρωτοκόλλων απεικονίζονται στον Πίνακα 1.1.

Πίνακας 1.1: Στοιβά πρωτοκόλλων H.323

Ομιλία	Έλεγχος			
G.7xx	RTCP	H.225	Q.931	H245
RTP				
UDP			TCP	
IP				
Πρωτόκολλο συνδέσμου μετάδοσης δεδομένων				
Πρωτόκολλο φυσικού επιπέδου				

Θα περιγραφεί η λειτουργία ενός προσωπικού υπολογιστή σε ένα LAN (με ελεγκτή πύλης) ως τερματικού H.323 το οποίο καλεί ένα απομακρυσμένο τηλεφωνο. Τα βήματα τα οποία ακολουθούνται είναι:

- (i) Αποστολή πακέτου UDP (User Datagram Protocol) από τον προσωπικό

υπολογιστή για εύρεση του ελεγκτή πύλης στην θύρα 1718.

- (ii) Απάντηση του ελεγκτή πύλης, με την Internet Protocol (IP) διεύθυνση του.
- (iii) Εγγραφή του υπολογιστή στον ελεγκτή πύλης, στέλνοντάς του ένα μήνυμα Registration, Admission and Status (RAS) μέσα σε ένα πακέτο UDP.
- (iv) Αποδοχή του προσωπικού υπολογιστή και αποστολή στον ελεγκτή πύλης ένα μήνυμα εισόδου RAS, ζητώντας εύρος ζώνης.

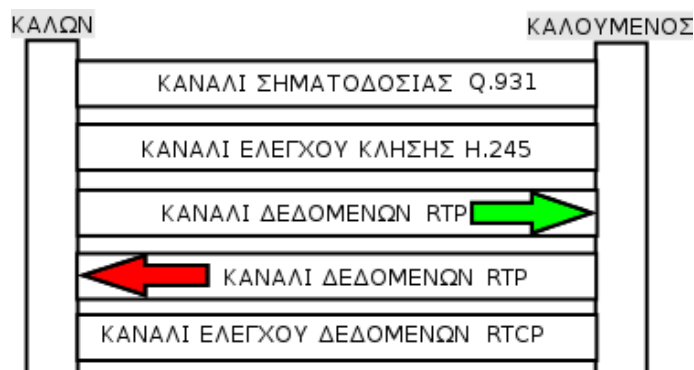
Αφού εκχωρηθεί το εύρος ζώνης τότε μόνο μπορεί να ξεκινήσει η εγκαθίδρυση της κλήσης. Η εκ των προτέρων αίτηση για εύρος ζώνης γίνεται, για να μπορεί ο ελεγκτής πύλης να περιορίζει το πλήθος των κλήσεων, έτσι ώστε να μπορεί να παρέχεται η απαιτούμενη ποιότητα υπηρεσιών, αποφεύγοντας την υπερφόρτωση της εξερχόμενης γραμμής. Αμέσως μετά εγκαθίσταται μια σύνδεση Transmission Control Program (TCP) με τον ελεγκτή πύλης, ώστε να ξεκινήσει η διευθέτηση της κλήσης, και να χρησιμοποιηθούν υπάρχοντα πρωτόκολλα του τηλεφωνικού δικτύου, τα οποία απαιτούν την χρήση του πρωτοκόλλου TCP. Το τηλεφωνικό σύστημα όμως δεν έχει τίποτα παρόμοιο με το RAS, ώστε να επιτρέπει στα τηλέφωνα να ανακοινώνουν την παρουσία τους και έτσι οι σχεδιαστές του H.323 μπορούσαν να χρησιμοποιήσουν για το RAS είτε το UDP είτε το TCP. Λόγω της χαμηλότερης επιβάρυνσης επιλέχθηκε τελικά το UDP.

Μόλις γίνει η παραχώρηση του εύρους ζώνης, ο προσωπικός υπολογιστής μέσω της σύνδεσης TCP στέλνει ένα μήνυμα (**Setup**) του πρωτοκόλλου Q.931. Μέσω του μηνύματος αυτού προσδιορίζεται ο αριθμός του τηλεφώνου που καλείται (ή προσδιορίζεται η διεύθυνση IP και η θύρα, στην περίπτωση που καλείται ένας υπολογιστής). Στην συνέχεια ο ελεγκτής πύλης απαντά με ένα μήνυμα (**Call Proceeding**) του πρωτοκόλλου Q.931, ώστε να επιβεβαιωθεί η ορθή λήψη της αίτησης και στην συνέχεια προωθείται το μήνυμα (**Setup**) στην πύλη δικτύου. Στην συνέχεια η πύλη δικτύου η οποία λειτουργεί κατά το ήμισυ σαν υπολογιστής και κατά το ήμισυ σαν τηλεφωνικός μεταγωγέας, κάνει μια απλή τηλεφωνική κλήση στο επιθυμητό τηλέφωνο. Το τερματικό κέντρο στο οποίο συνδέεται το τηλέφωνο στέλνει κατάλληλο σήμα στο καλούμενο τηλέφωνο ώστε να κουδουνίσει και επιστρέφει ένα μήνυμα (**Alert**) του πρωτοκόλλου Q.931, για να ενημερωθεί ο καλών υπολογιστής ότι το κουδούνισμα ξεκίνησε. Τέλος αν υπάρξει απάντηση

από το άλλο άκρο, τότε το τερματικό κέντρο επιστρέφει ένα μήνυμα (**Connect**) του πρωτοκόλλου Q.931 για να ενημερώσει τον προσωπικό υπολογιστή ότι έχει γίνει εγκαθίδρυση μιας σύνδεσης.

Μετά την εγκαθίδρυση της σύνδεσης ο ελεγκτής πύλης είναι εκτός βρόχου και έτσι τα επόμενα πακέτα παρακάμπτουν τον ελεγκτή πύλης και πηγαίνουν κατευθείαν στη διεύθυνση IP της πύλης δικτύου. Σε αυτό το σημείο υπάρχει απλώς μια σύνδεση φυσικού επιπέδου για μετακίνηση bit, και τίποτα παραπάνω.

Στην συνέχεια για την διαπραγμάτευση των παραμέτρων της κλήσης χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο H.245, στο οποίο το κανάλι ελέγχου είναι πάντοτε ανοιχτό. Κάθε άκρο του ξεκινά ανακοινώνοντας τις δυνατότητές του, όπως για παράδειγμα, το αν μπορεί να χειριστεί βίντεο (το H.323 έχει την δυνατότητα να χειριστεί βίντεο) ή κλήσεις διάσκεψης, ποιους κωδικοποιητές/αποκωδικοποιητές υποστηρίζει, κ.λπ. Αφού κάθε άκρο μάθει για τις δυνατότητες υποστήριξης του άλλου, γίνεται εγκατάσταση δύο μονόδρομων καναλιών δεδομένων και αντιστοιχίζεται ένας κωδικοποιητής/αποκωδικοποιητής στο καθένα από αυτά. Μόλις ολοκληρωθούν όλες οι διαπραγματεύσεις, μπορεί να αρχίσει η ροή δεδομένων με χρήση του RTP. Ο έλεγχος της ροής γίνεται μέσω του RTCP, το οποίο έχει ρόλο και στον έλεγχο συμφόρησης. Σε περίπτωση που μεταδίδεται και βίντεο, τότε υπεύθυνο για τον συγχρονισμό ήχου/βίντεο είναι το RTCP. Τα διάφορα κανάλια μεταξύ του καλούντα και του καλούμενου φαίνονται στο Σχήμα 1.2. Αν κάποιος άκρο κλείσει το τηλέφωνο, τότε γίνεται χρήση του καναλιού σηματοδότησης κλήσης Q.931 για να τερματιστεί η σύνδεση.



Σχήμα 1.2: Λογικά κανάλια ανάμεσα στον καλούντα και στον καλούμενο κατά την διάρκεια μιας κλήσης.

• • •

Μετά τον τερματισμό της κλήσης, ο καλών προσωπικός υπολογιστής έρχεται ξανά σε επαφή με το ελεγκτή πύλης, στέλνοντας ένα μήνυμα RAS για να απελευθερωθεί το παραχωρηθέν εύρος ζώνης. Εναλλακτικά μπορεί να κρατήσει το εύρος ζώνης, πραγματοποιώντας μια καινούρια κλήση.

1.3 SIP - Πρωτόκολλο έναρξης συνδιάλεξης

Όταν το H.323 σχεδιάστηκε από την ITU, η κοινότητα του διαδικτύου το δέχτηκε ως ένα τυπικό προϊόν των τηλεφωνικών εταιρειών, δηλαδή μεγάλο, περίπλοκο, και άκαμπτο. Για τον λόγο αυτό, η Internet Engineering Task Force (IETF) αποφάσισε να υλοποιήσει έναν απλούστερο τρόπο ώστε να είναι δυνατή η μετάδοση φωνής μέσω του IP. Έτσι σύστησε μια επιτροπή, αποτέλεσμα της οποίας είναι το Πρωτόκολλο Έναρξης Συνδιάλεξης / Session Initiation Protocol (SIP), το οποίο είναι ένα πρωτόκολλο επιπέδου εφαρμογών, που μπορεί να εκτελεστεί πάνω από το UDP ή το TCP και περιγράφεται στο RFC 3261. Στο πρωτόκολλο αυτό περιγράφεται ο τρόπος εγκαθίδρυσης τηλεφωνικών κλήσεων, βιντεοδιασκέψεων, και άλλων συνδέσεων πολυμέσων μέσω Internet.

Ενώ το H.323 είναι ένα πλήρες πακέτο πρωτοκόλλων, το SIP είναι μία μόνο υπομονάδα, και σχεδιάστηκε για να παρέχει καλή διαλειτουργικότητα με τις υπάρχουσες εφαρμογές του διαδικτύου. Στο SIP οι τηλεφωνικοί αριθμοί ορίζονται με τη μορφή Uniform Resource Locator (URL), για να είναι δυνατή η ενσωμάτωσή τους σε ιστοσελίδες, επιτρέποντας έτσι στους χρήστες να ξεκινούν μια τηλεφωνική κλήση επιλέγοντας ένα σύνδεσμο

Το SIP μπορεί να εγκαθιδρύει:

- (i) συνδιαλέξεις δύο μερών
- (ii) συνδιαλέξεις πολλών μερών (όπου όλοι μπορούν να ακούνε και να μιλάνε ταυτόχρονα)
- (iii) συνδιαλέξεις πολυδιανομής (ένας αποστολέας, πολλοί παραλήπτες).

Μέσα στις συνδιαλέξεις μπορεί να ενσωματωθεί ήχος, βίντεο, ή και δεδομένα με τα τελευταία να είναι χρήσιμα, για παράδειγμα, στα παιχνίδια πραγματικού χρόνου όπου συμμετέχουν πολλοί παίχτες.

Για την εγκαθίδρυση, την διαχείριση, και τον τερματισμό των συνδιαλέξεων είναι υπεύθυνο το SIP, ενώ για την μεταφορά δεδομένων χρησιμοποιούνται άλλα πρωτόκολλα, όπως τα RTP/RTCP. Υπάρχουν ποικίλες υπηρεσίες που υποστηρίζονται από το SIP, όπως είναι ο εντοπισμός του καλούμενου, αν αυτός δεν βρίσκεται στον χώρο του, ο προσδιορισμός των δυνατοτήτων που έχει ο καλούμενος, καθώς και η διαχείριση του μηχανισμού διευθέτησης και τερματισμού κλήσεων. Θα εξεταστεί η απλούστερη περίπτωση, όπου το SIP εγκαθιδρύει μια σύνδεση από τον υπολογιστή του καλούντα στον υπολογιστή του καλούμενου.

Η αναπαράσταση των τηλεφωνικών αριθμών στο SIP γίνεται με μορφή URL χρησιμοποιώντας τη μέθοδο sip - για παράδειγμα, sip:Dimitris@st.ouc.ac.cy για ένα χρήστη με όνομα Dimitris στον υπολογιστή υπηρεσίας που προσδιορίζεται από το όνομα Domain Name System (DNS) st.ouc.ac.cy. Εκτός από την παραπάνω μορφή οι διευθύνσεις URL του SIP μπορεί να περιέχουν επίσης πραγματικούς τηλεφωνικούς αριθμούς, διευθύνσεις IPv4 ή διευθύνσεις IPv6.

Το πρωτόκολλο SIP έχει ως μοντέλο το Hypertext Transfer Protocol (HTTP) και βασίζεται σε κείμενο. Για την επικοινωνία μεταξύ δύο άκρων στέλνονται μηνύματα κειμένου ASCII, τα οποία αποτελούνται από το όνομα της μεθόδου στην πρώτη γραμμή και στην συνέχεια ακολουθούν πρόσθετες γραμμές, οι οποίες περιέχουν κεφαλίδες για την μεταβίβαση παραμέτρων. Για να διευκολυνθεί η διαλειτουργικότητα του SIP με τις υπάρχουσες εφαρμογές του διαδικτύου, πολλές από τις κεφαλίδες προέρχονται από το Multipurpose Internet Mail Extensions (MIME)¹. Στον Πίνακα 1.2 παρουσιάζονται οι έξι μέθοδοι που ορίζονται στις προδιαγραφές πυρήνα.

Για να μπορέσει να εγκαθιδρυθεί μια συνδιάλεξη, ο καλών στέλνει το μήνυμα INVITE είτε μέσω TCP είτε μέσω πακέτων UDP. Όποια μέθοδος και να επιλεγεί, οι κεφαλίδες στη δεύτερη και τις επόμενες γραμμές περιγράφουν τη δομή του σώματος του μηνύματος, το οποίο περιέχει τις δυνατότητες του καλούμενου, τους τύπους μέσων, και τις μορφές τους. Σε περίπτωση που ο καλούμενος αποδεχτεί την κλήση, στέλνει έναν κωδικό απάντησης τύπου HTTP (Ο κωδικός

¹Το MIME καθορίζει τους μηχανισμούς για να στέλνονται και άλλα είδη πληροφοριών σε ένα ηλεκτρονικό μήνυμα, συμπεριλαμβανομένου και κείμενο σε άλλες γλώσσες (πέρα από τα αγγλικά), χρησιμοποιώντας και άλλη κωδικοποίηση χαρακτήρων, εκτός από τον ASCII, καθώς επίσης και 8-bit δυαδικό περιεχόμενο όπως τα αρχεία που περιέχουν εικόνες, ήχους, ταινίες και προγράμματα υπολογιστών.

Πίνακας 1.2: Οι μέθοδοι SIP που ορίζονται στις προδιαγραφές πυρήνα

Μέθοδος	Περιγραφή
INVITE	Αίτημα για την έναρξη μιας συνδιάλεξης
ACK	Επιβεβαίωσης εκκίνησης της συνδιάλεξης
BYE	Αίτημα για τον τερματισμό μιας συνδιάλεξης
OPTIONS	Ερώτημα σε έναν υπολογιστή υπηρεσίας για τις δυνατότητές του
CANCEL	Ακύρωση μια εκκρεμούς αίτησης
REGISTER	Πληροφόρηση ενός διακομιστή ανακατεύθυνσης σχετικά με την τρέχουσα θέση του χρήστη

200 σημαίνει αποδοχή). Μετά τη γραμμή που περιέχει τον κωδικό ανάγνωσης, ο καλούμενος μπορεί επίσης να ενσωματώσει πληροφορίες για τις δυνατότητές του, τους τύπους μέσων, και τις μορφές τους.

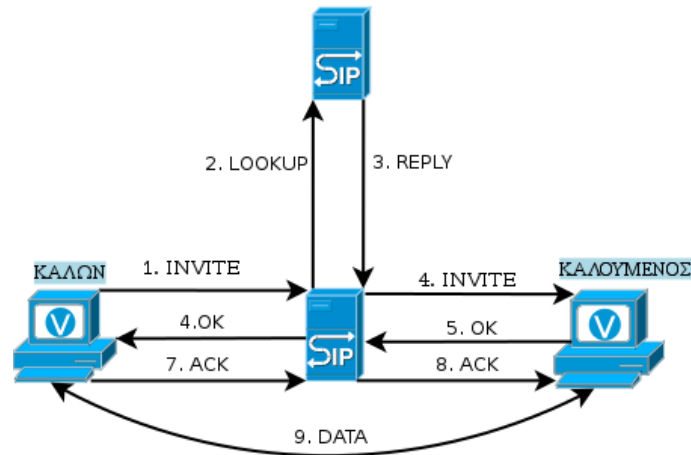
Για να ολοκληρωθεί σύνδεση ο καλούμενος απαντά με ένα μήνυμα ACK (επιβεβαίωση) ώστε να ολοκληρωθεί το πρωτόκολλο και να επιβεβαιώσει τη λήψη του μηνύματος με τον κωδικό 200. Τα παραπάνω περιγράφουν την πραγματοποίηση της σύνδεσης μέσω της τριπλής χειραψίας.

Οποιοδήποτε από τα άκρα μπορεί να αιτηθεί τον τερματισμό μιας συνδιάλεξης στέλνοντας ένα μήνυμα το οποίο περιέχει τη μέθοδο BYE (αντίο). Η συνδιάλεξη τερματίζεται όταν το άλλο άκρο επιβεβαιώσει το μήνυμα αυτό.

Όταν κάποιος άκρο θέλει να ενημερωθεί για τις δυνατότητες κάποιου άλλου άκρου, χρησιμοποιεί την μέθοδο OPTIONS (επιλογές). Η μέθοδος αυτή συνήθως χρησιμοποιείται πριν την έναρξη μιας σύνδεσης, ώστε να είναι δυνατόν να εξεταστεί το κατά πόσο το άλλο άκρο μπορεί να δεχτεί φωνή μέσω IP ή όποιον άλλο τύπο συνδιάλεξης θέλει να ξεκινήσει ο καλόν.

Το SIP για να μπορεί να εντοπίζει και να συνδέεται με ένα χρήστη που δεν βρίσκεται στην οικιακή του θέση χρησιμοποιεί την μέθοδο REGISTER (εγγραφή). Το μήνυμα αυτό στέλνεται σε ένα διακομιστή εντοπισμού του SIP, ο οποίος μπορεί να παρακολουθεί τις θέσεις των χρηστών ή να εντοπίζει την θέση κάποιου χρήστη. Στο Σχήμα 1.3 παρουσιάζεται η λειτουργία της ανακατεύθυνσης. Στην εικόνα αυτή ο καλόν στέλνει αρχικά το μήνυμα INVITE σε ένα διακομιστή μεσολάβησης και στην συνέχεια ο διακομιστής μεσολάβησης αναζητεί την θέση του χρήστη και στέλνει εκεί το μήνυμα INVITE. Μετά από την αποστολή του μηνύματος INVITE ο διακομιστής λειτουργεί ως αναμεταδότης για όλα τα επόμενα

μηνύματα της τριπλής χειραψίας. Ανάλογα του διακομιστή εντοπισμού που χρησιμοποιείται, μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιοδήποτε πρωτόκολλο βολεύει για τα μηνύματα LOOKUP (αναζήτηση) και REPLY (απάντηση), μιας και δεν αποτελούν μέρος του SIP.



Σχήμα 1.3: Διακομιστής μεσολάβησης και ανακατεύθυνσης στο SIP.

• • •

Στο SIP υπάρχουν και άλλα χαρακτηριστικά όπως η αναμονή κλήσης, η επιλογή κλήσεων, η κρυπτογράφηση, και η πιστοποίηση ταυτότητας. Επίσης υπάρχει και η δυνατότητα να πραγματοποιούνται κλήσεις από έναν υπολογιστή σε ένα απλό τηλέφωνο, αν είναι διαθέσιμη μια κατάλληλη πύλη δικτύου ανάμεσα στο διαδίκτυο και στο τηλεφωνικό σύστημα.

1.4 Σύγκριση των H.323 και SIP

Τα H.323 και SIP έχουν πολλές ομοιότητες, όπως η πραγματοποίηση κλήσεων με δύο ή περισσότερους συμμετέχοντες, υποστηρίζοντας τόσο τους υπολογιστές όσο και τα απλά τηλέφωνα ως τερματικά σημεία. Και τα δύο πρωτόκολλα υποστηρίζουν τα πρωτόκολλα RTP/RTCP, την διαπραγμάτευση παραμέτρων και την κρυπτογράφηση.

Ενώ στο σύνολο των χαρακτηριστικών τους τα δύο πρωτόκολλα είναι παρόμοια, διαφέρουν σημαντικά στη φιλοσοφία τους. Το H.323 όπως αναφέρθηκε και στην αρχή, είναι ένα τυπικό βαρύ πρότυπο της τηλεφωνικής βιομηχανίας, το οποίο προδιαγράφει την πλήρη στοίβα πρωτοκόλλων και καθορίζει επακριβώς τι επιτρέπεται και τι απαγορεύεται. Η προσέγγιση αυτή παρόλου που οδηγεί σε

πολύ καλά ορισμένα πρωτόκολλα για το κάθε επίπεδο, διευκολύνοντας έτσι την διαλειτουργικότητα μεταξύ τους, τελικά καταλήγει σε ένα μεγάλο, περίπλοκο, και άκαμπτο πρότυπο το οποίο είναι δύσκολο να προσαρμοστεί σε μελλοντικές εφαρμογές.

Αντίθετα το SIP είναι ένα τυπικό πρωτόκολλο του διαδικτύου το οποίο βασίζει την λειτουργία του στην ανταλλαγή σύντομων γραμμών κειμένου ASCII. Στα πλεονεκτήματα του αναφέρουμε ότι είναι μια ελαφριά υπομονάδα με καλή διαλειτουργικότητα με τα υπόλοιπα πρωτόκολλα του διαδικτύου, είναι ιδιαίτερα αρθρωτό, ευέλικτο και μπορεί να προσαρμοστεί εύκολα σε νέες εφαρμογές. Το μειονέκτημα είναι τα πιθανά προβλήματα που δημιουργούνται λόγω της όχι και τόσο καλής διαλειτουργικότητας με τα υπάρχοντα πρωτόκολλα σηματοδοσίας του τηλεφωνικού συστήματος, αν και αυτά αντιμετωπίζονται με συχνές συναντήσεις των διαφόρων κατασκευαστών ώστε να δοκιμαστούν τα συστήματά τους σε συνδυασμό. Ο Πίνακας 1.3 παρουσιάζει μια σύνοψη των ομοιοτήτων και των διαφορών στα δύο πρωτόκολλα.

1.5 Ελληνικοί τηλεφωνικοί αριθμοί για χρήση με VoIP

Υπάρχουν τηλεφωνικοί αριθμοί για την Ελλάδα, οι οποίοι ξεκινούν από 70 και προορίζονται για αποκλειστική χρήση μόνο μέσω της τεχνολογίας VoIP. Οι συγκεκριμένοι τηλεφωνικοί αριθμοί δεν έχουν γεωγραφικούς περιορισμούς, δηλαδή μπορούν να κληθούν από οποιοδήποτε μέρος του κόσμου, και διατίθεντο από αντίστοιχους τηλεπικοινωνιακούς παρόχους στην Ελλάδα.

1.6 Χρήση συσκευών DECT

Επειδή η χρήση της τεχνολογίας VoIP περιοριζόταν από την χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή, οι εταιρείες άρχισαν να αναζητούν τρόπους ώστε η χρήση της υπηρεσίας να μπορεί να γίνει από τους χρήστες εύκολα, με συμβατές τηλεφωνικές συσκευές και χωρίς την χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Δημιουργήθηκαν έτσι συσκευές οι οποίες απαιτούσαν την ύπαρξη γραμμής DSL, συνδέονταν απευθείας επάνω στον router και μπορούσε πλέον να γίνει η χρήση της τεχνολογίας VoIP μέσω συσκευών τύπου Digital Enhanced Cordless

Πίνακας 1.3: Οι μέθοδοι SIP που ορίζονται στις προδιαγραφές πυρήνα

Χαρακτηριστικό	H.323	SIP
Σχεδιάστηκε από	ITU	IETF
Συμβατότητα με PSTN	Ναι	Σε μεγάλο βαθμό
Συμβατότητα με Internet	Όχι	Ναι
Αρχιτεκτονική	Μονολιθική	Αρθρωτή
Πληρότητα	Πλήρης στοίβα πρωτοκόλλων	Το SIP ασχολείται μόνο με τη διευθέτηση
Διαπραγμάτευση παραμέτρων	Ναι	Ναι
Σηματοδοσία κλήσεων	Q.931 μέσω TCP	SIP μέσω TCP ή UDP
Μορφή μηνυμάτων	Δυαδική	ASCII
Μεταφορά μέσω	RTP/RTCP	RTP/RTCP
Κλήσεις πολλών συμμετοχόντων	Ναι	Ναι
Διασκέψεις πολυμέσων	Ναι	Όχι
Διευθυνσιοδότηση	Υπολογισμός υπηρεσίας ή αριθμός τηλεφώνου	URL URL
Τερματισμός κλήσεων	Ρητός ή αποδέσμευση TCP	Ρητός ή λήξη χρόνου αναμονής
Άμεση ανταλλαγή μηνυμάτων	Όχι	Ναι
Κρυπτογραφία	Ναι	Ναι
Μέγεθος προτύπου	1400 σελίδες	250 σελίδες
Υλοποίηση	Μεγάλη και περίπλοκη	Μέτρια
Κατάσταση	Ευρέως διαδεδομένο	Ανερχόμενο

Telecommunications (DECT) όπως Siemens Gigaset C470IP, A580IP, Snom M3, Snom M9 κλπ. Στην αγορά διατίθενται πλέον και routers οι οποίοι ενσωματώνουν τις συσκευές αυτές και πλέον οι σύνδεση απλών τηλεφωνικών συσκευών, μπορεί να γίνει απευθείας επάνω στον router.

Η διαχείριση των συσκευών αυτών μπορεί να γίνει μέσω web interface κάνοντας έτσι την τεχνολογία VoIP αρκετά δημοφιλή ακόμη και σε εταιρικό επίπεδο.

1.7 Τηλεφωνικά κέντρα VoIP

Η τεχνολογία VoIP υποστηρίζει τηλεφωνικά κέντρα μέσω του πρωτοκόλλου SIP, το οποίο έχει εκδόσεις από διάφορους κατασκευαστές τηλεπικοινωνιακών συσκευών. Δημοφιλή τηλεφωνικά κέντρα όπως το Asterisk μαζί με το IAX2 (Inter Asterisk Exchange) χρησιμοποιούν το συγκεκριμένο πρωτόκολλο. Με το Asterix μπορούμε να υλοποιήσουμε τηλεφωνικά κέντρα τύπου (PBX - Private

Box eXchange) . Με αυτόν τον τρόπο μπορεί μια εταιρεία να διαχειρίζεται τις κλήσεις της σε τοπικά δίκτυα, μειώνοντας έτσι σημαντικά το κόστος των κλήσεων ή ακόμη και να το μηδενίσουν, σε περίπτωση που τα κέντρα μπορούν να επικοινωνήσουν μεταξύ τους και είναι απαραίτητα η μεσολάβηση κάποιου παρόχου.

1.8 Άλλες Εφαρμογές VoIP

Οι τεχνολογία VoIP μπορεί να εφαρμοστεί ακόμη και χωρίς την ύπαρξη κάποιου αντίστοιχου φορέα. Σε αυτήν την περίπτωση οι κλήσεις γίνονται κατευθείαν από υπολογιστή σε υπολογιστή, και τον ρόλο του εξυπηρετητή (server) αναλαμβάνει ένας υπολογιστής, και όλοι οι υπόλοιποι επικοινωνούν με αυτόν σαν πελάτες (clients). Οι κλήσεις αυτές είναι χωρίς κόστος, περιορίζονται όμως στο τοπικό δίκτυο που είναι συνδεδεμένοι οι υπολογιστές. Εφαρμογές για τέτοιες περιπτώσεις είναι το RogerWilco, το TeamSpeak, το Mohawk Voice, το Mumble, το Ventrilo και αρκετές άλλες.

1.9 Μετρικά χαρακτηριστικά ποιότητας VoIP

Για να μεταδώσουμε φωνή μέσω IP θα πρέπει το αναλογικό σήμα να μετατραπεί σε ψηφιακό, και στην συνέχεια να μεταδωθεί με πακέτα μέσα στο δίκτυο. Επειδή το ανθρώπινο αυτί είναι ευαίσθητο σε καθυστερήσεις ήχου πάνω από 200ms, αν κάποιο πακέτο καθυστερήσει να μεταδοθεί για περισσότερο από 200ms θα πρέπει να σημανθεί σαν χαμένο πακέτο.

Ο Caputo [14] ορίζει τις τιμές που απαιτούνται για καλή ποιότητα φωνής VoIP Quality of Service (QoS) και οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.4. Η μέση καθυστέρηση, το jitter και τα χαμένα πακέτα είναι τα κλειδιά πάνω στα οποία δημιουργήθηκαν οι κανόνες που ορίζουν την καλή ποιότητα φωνής για την τεχνολογία VoIP.

Πίνακας 1.4: VoIP QoS Requirements

Quality	Delay (ms)	Jitter (ms)	Loss
Good	0-150	0-75	<3%
Medium	150-400	0-125	<7%
Poor	>400	0-225	>7%

1.10 Το μέλλον της τεχνολογίας VoIP

Η τεχνολογία VoIP τα τελευταία χρόνια βρίσκεται σε γρήγορη ανάπτυξη όσον αφορά την ασφάλεια και την ποιότητα των δεδομένων. Υπάρχει μια αυξητική τάση για χρήση της συγκεκριμένης τεχνολογίας από πολλές τηλεπικοινωνιακές εταιρείες, που εισέρχονται τα τελευταία χρόνια στην αγορά των τηλεπικοινωνιών. Παρατηρείται τα τελευταία χρόνια μια τάση για ενοποίηση των δικτύων τηλεπικοινωνιών με τα δίκτυα δεδομένων, η οποία θα δώσει την δυνατότητα για υπηρεσίες στις τηλεπικοινωνίες όπως αποστολή email, βιντεοκλήσεις και άλλες, που μέχρι τώρα μονοπωλούσαν τα δίκτυα δεδομένων. Επίσης μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει η χρήσης της συγκεκριμένης τεχνολογίας πάνω από ασύρματα ευρωζωνικά δίκτυα. Τα τελευταία άρχισαν να κάνουν την εμφάνισή τους και εφαρμογές, οι οποίες κάνουν δυνατή την χρήση της τεχνολογίας VoIP, από κινητά τηλέφωνα.

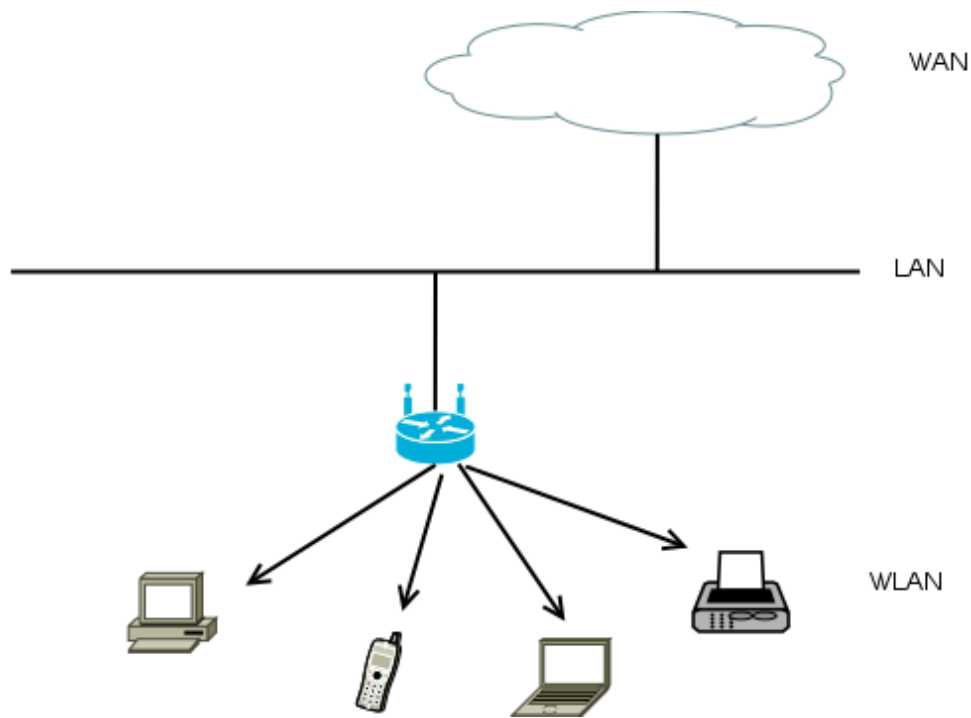
Στην Ελλάδα λόγω της αύξησης των εταιρειών που προσφέρουν την τεχνολογία VoIP αλλά και της σημαντικής διαφοράς στο κόστος σε σχέση τις συμβατικές τηλεπικοινωνίες, παρατηρείται μια σημαντική στροφή των χρηστών στην τεχνολογία VoIP. Για όλους αυτούς τους λόγους η τεχνολογία VoIP παρουσιάζει αυξανόμενο επιχειρηματικό ενδιαφέρον, κερδίζοντας μεγάλο μερίδιο στην αγορά των νέων τεχνολογιών.

Κεφάλαιο 2

Ασύρματα Δίκτυα IEE 802.11

2.1 Εισαγωγή

Το IEEE 802.11 είναι μια ομάδα προτύπων της IEEE για τα ασύρματα τοπικά δίκτυα Wireless Local Area Network (WLAN), που ως σκοπό είχαν να επεκτείνουν το 802.3 (Ethernet, το πιο διαδεδομένο πρωτόκολλο ενσύρματης δικτύωσης υπολογιστών) στην ασύρματη περιοχή. Το IEEE 802.11 χρησιμοποιεί έλεγχο πολλαπλής πρόσβασης στο μέσο *Media Access Control* (MAC) με την χρήση μηχανισμού αποφυγής συμφόρησης *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance* (CSMA/CA). Τα προϊόντα που πληρούν τις προδιαγραφές του 802.11b/g/n πιστοποιούνται από την WiFi Alliance, που είναι ένας οργανισμός ανεξάρτητος της IEEE. Για τον λόγο αυτό τα πρότυπα 802.11 είναι περισσότερο γνωστά σαν "WiFi" και αποτελούν το καθιερωμένο πρότυπο στον χώρο των ασύρματων τοπικών δικτύων. Μέσω του WiFi μπορούμε να έχουμε πρόσβαση στο διαδίκτυο, να διασυνδέσουμε ηλεκτρονικούς υπολογιστές, ηλεκτρονικές συσκευές όπως τηλεοράσεις, DVD Players, ψηφιακές κάμερες, και έξυπνα κινητά τηλέφωνα (smart phones) Σχήμα 2.1 . Το πρότυπο 802.11 στις φορητές ηλεκτρονικές συσκευές βρίσκει εφαρμογές στην ασύρματη μετάδοσης όπως π.χ. στη μεταφορά φωτογραφιών από ψηφιακές κάμερες σε υπολογιστές για περαιτέρω επεξεργασία και εκτύπωση, ή στην μεταφορά αρχείων από ηλεκτρονικό υπολογιστή, σε κάποιο εξωτερικό σκληρό δίσκο για την λήψη BackUP. Έτσι η χρήση της τεχνολογίας WiFi επιτρέπει τη διασύνδεση συσκευών, ή υπολογιστών μέσω ενός τοπικού δικτύου με άλλους υπολογιστές ή συσκευές και στη συνέχεια, μέσω



Σχήμα 2.1: *Wireless Local Area Network*



αυτών στο διαδίκτυο. Οπουδήποτε υπάρχει κάποιο σημείο πρόσβασης όπως σε πάρκα ή πλατείες πόλεων, αεροδρόμια, επιβατικούς σταθμούς, καφετέριες, βιβλιοθήκες κλπ, θα μπορούσε να συνδεθεί κάποιος ηλεκτρονικός υπολογιστής ή κάποια συσκευή smart phone.

2.2 Ιστορικό

Το 1997 εισήχθει η πρώτη έκδοση του WiFi η οποία περιελάμβανε δύο μεθόδους διασποράς φάσματος στο φυσικό επίπεδο, για μετάδοση στη ζώνη συχνοτήτων 2.4GHz. Σημειώνεται ότι για εκπομπή στην συγκεκριμένη ζώνη συχνοτήτων δεν απαιτείται κάποια άδεια. Η πρώτη μέθοδος λειτουργούσε με Frequency Hopping (FHSS) και μπορούσε να υποστηρίξει ρυθμούς μετάδοσης 1 Mbps, ενώ η δεύτερη λειτουργούσε με Direct Sequence (DSSS) και μπορούσε να υποστηρίξει ρυθμούς μετάδοσης από 1 μέχρι 2 Mbps. Επίσης περιλαμβανόταν και μία υπέρυθη εκδοχή Infrared(IR). Πριν από την εμφάνιση του 802.11 η τεχνολογία της ασύρματης δικτύωσης δεν ήταν αρκετά ώριμη και δεν υπήρχε κάποιο ευρέως αποδεκτό πρότυπο για τα ασύρματα τοπικά δίκτυα υπολογιστών, αλλά

ούτε και ανάλογες εμπορικές εφαρμογές. Έτσι η προτυποποίηση της ασύρματης δικτύωσης είρθε να καλύψει αυτό το κενό και τα διάφορα πρότυπα IEEE 802.11 τα οποία έχουν εμφανιστεί στην αγορά είναι τα παρακάτω:

IEEE 802.11a το οποίο λόγω του υψηλού ρυθμού μετάδοσης έχει μεγάλη εμπορική επιτυχία. Το συγκεκριμένο πρότυπο υποστηρίζει ταχύτητες μέχρι 54 Mbps, και λειτουργεί στην μπάντα συχνοτήτων των 5 GHz. Στην πράξη όμως και οι ρυθμοί μετάδοσης που μπορούν να επιτευχθούν είναι από 20 μέχρι 24 Mbps.

IEEE 802.11b το οποίο επειδή χρησιμοποιεί την ίδια μπάντα συχνοτήτων στα 2.4 GHz με τις συσκευές Bluetooth και τα ασύρματα τηλέφωνα, έχει κακή απόδοση. Οι ταχύτητες που επιτυγχάνονται με το συγκεκριμένο πρότυπο είναι μέχρι 11 Mbps αλλά στην πραγματικότητα οι ταχύτητες που επιτυγχάνονται είναι από 4 έως 6 Mbps.

IEEE 802.11g το οποίο είναι ο συνδυασμός του 802.11a και του 802.11b. Το συγκεκριμένο πρότυπο χρησιμοποιεί την μπάντα συχνοτήτων των 2.4 GHz και μπορεί να υποστηρίξει ταχύτητες μέχρι 54 Mbps. Στην πράξη όμως μπορούν να επιτευχθούν ρυθμοί μετάδοσης από 20 μέχρι 24 Mbps. Στο συγκεκριμένο πρότυπο χρησιμοποιείται πολυπλεξία με ορθογώνια διαίρεση συχνότητας *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM)

Έχουν προταθεί και κάποιες επεκτάσεις των προτύπων αυτών, οι οποίες όμως δεν έχουν υλοποιηθεί σε εμπορικά προϊόντα και έχουν περισσότερο ακαδημαϊκό ενδιαφέρον. Θα αναφερθούν οι σπουδαιότερες από αυτές όπως:

802.11f ή **Inter-Access Point Protocol (IAPP)**, το οποίο επιτρέπει άμεση επικοινωνία μεταξύ διαφορετικών Access Pointss (AP) ώστε με αυτόν τον τρόπο να εξαλείφεται η απώλεια πλαισίων κατά τη μεταγωγή. Ο σχετικός μηχανισμός ενεργοποιείται μετά από ένα αίτημα επανασυσχέτισης.

802.11e ή **Quality of Service (QoS)** το οποίο ελαχιστοποιώντας ή μεγιστοποιώντας ένα από τα παρακάτω κριτήρια: **α)** την μέση καθυστέρηση από άκρο σε άκρο, **β)** την μέση μεταβολή της καθυστέρησης ή το μέσο ποσοστό επιτυχούς παράδοσης πλαισίων, προσπαθεί να διασφαλίσει ποιότητα υπηρεσιών για εφαρμογές πραγματικού χρόνου που εκτελούνται πάνω σε ένα WLAN. Αυτό επιτυγχάνεται βελτιώνοντας τους μηχανισμούς Coordination Function (DCF), Point Coordination Function (PCF) με τον Enhanced DCF (EDCF) και τον Hybrid

Coordinator Function (HCF). Ο μηχανισμός EDCA αναθέτει τις προτεραιότητες στα πλαίσια δεδομένων ανάλογα με την χρονική κρισιμότητα της παράδοσής τους. Έτσι τα μεγαλύτερης προτεραιότητας πλαίσια έχουν περισσότερες πιθανότητες να κερδίσουν στον ανταγωνισμό για την πρόσβαση στο κοινό μέσο. Ο μηχανισμός HCF περιορίζοντας το μέγιστο χρόνο δέσμευσης του καναλιού από ένα τερματικό, βελτιώνει τους προαναφερθέντες μηχανισμούς.

802.11n, το οποίο χρησιμοποιεί πολλαπλές κεραιές *Multiple Inputs Multiple Outputs* (MIMO) και παρέχει ονομαστικό ρυθμό μετάδοσης τουλάχιστον 108 Mbps.

Wi-Fi 802.11-2012 το οποίο υπόσχεται ακόμη γρηγορότερες ασύρματες συνδέσεις. Βασίζεται στα πρωτόκολλα 802.11ac και Wireless-N. Στην ουσία η IEEE Standards Association με το Wi-Fi 802.11-2012 ανανεώνει το πρότυπο πάνω στο οποίο βασίζεται η ασύρματη δικτύωση. Το νέο πρότυπο θα μπορεί να φτάσει σε ρυθμούς μετάδοσης μέχρι και τα 600 Mbps. Το νέο αυτό πρότυπο δίνει την δυνατότητα αποφυγής των παρεμβολών μιας και θα λειτουργεί στις συχνότητες μεταξύ 2.65GHz και 3.7GHz. Υπάρχουν είδη στην αγορά συσκευές που μπορούν να υποστηρίξουν το νέο πρότυπο ασύρματης δικτύωσης, με την Buffalo Technologies να παρουσιάζει ένα ανάλογο router και συγκεκριμένα το μοντέλο AirStation WZR-D1800H Wireless Router.

2.3 Έλεγχος πρόσβασης

Η ομάδα εργασίας 802.11 μελέτησε δύο τύπους προτάσεων για τον αλγόριθμο MAC:

- (i) τα πρωτόκολλα κατακεντρωμένης πρόσβασης, τα οποία, όπως το Ethernet, κατανέμουν την απόφαση για εκπομπή σε όλους τους κόμβους χρησιμοποιώντας ένα μηχανισμό ανίχνευσης φέροντος,
- (ii) τα πρωτόκολλα κεντρικής πρόσβασης που περιλαμβάνουν ρύθμιση της εκπομπής από έναν κεντρικό επιλογέα.

Ένα πρωτόκολλο κατακεντρωμένης πρόσβασης έχει νόημα για ένα ad hoc¹ δίκτυο ομότιμων σταθμών εργασίας ενώ επίσης μπορεί να είναι χρήσιμο σε άλλες

¹Ένα ad hoc δίκτυο είναι ένα δίκτυο peer-to-peer (ομότιμο χωρίς κεντρικό εξυπηρετητή) που στήνεται προσωρινά για να ικανοποιήσει κάποια άμεση ανάγκη

διατάξεις ασυρμάτων LAN που λειτουργούν κυρίως με κίνηση καταιγισμού. Ένα πρωτόκολλο κεντρικής πρόσβασης είναι φυσικό για διατάξεις στις οποίες πολλοί ασύρματοι σταθμοί συνδέονται μεταξύ τους και με κάποιο είδος σταθμού βάσης που συνδέεται σε ένα κεντρικό ενσύρματο LAN. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμο στην περίπτωση που κάποια από τα δεδομένα είναι ευαίσθητα χρονικά ή είναι υψηλής προτεραιότητας.

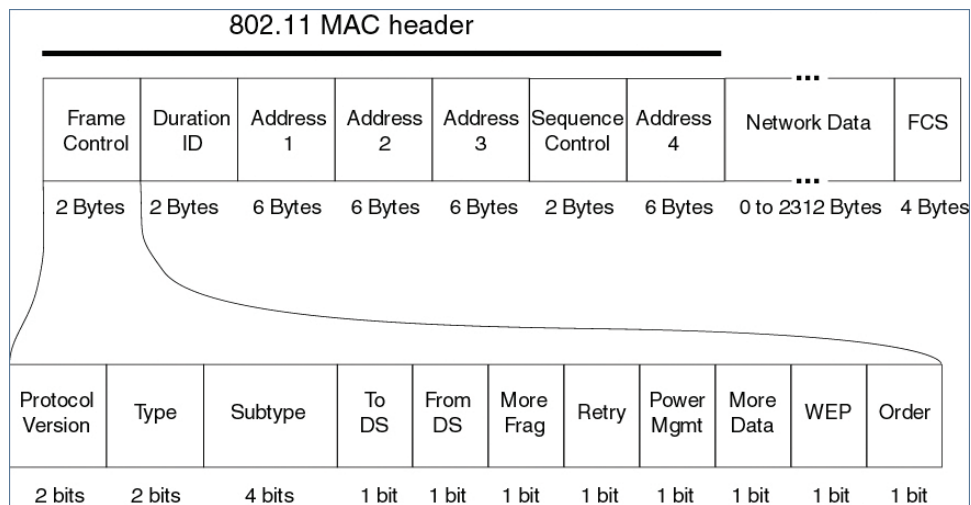
Το τελικό αποτέλεσμα του 802.11 είναι ένας αλγόριθμος MAC που λέγεται ασύρματο MAC κατανεμημένης αρχής (distributed foundation wireless MAC) DFWMAC που παρέχει ένα μηχανισμό ελέγχου κατανεμημένης πρόσβασης με δυνατότητα επιλογής και προαιρετικού κεντρικού ελέγχου. Το χαμηλότερο υπόστρωμα του στρώματος MAC είναι η λειτουργία κατανεμημένου συντονισμού (Distributed Coordination Function, DCF). Η DCF χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο ανταγωνισμού για την παροχή πρόσβασης σε όλη την κίνηση. Η συνηθισμένη ασύγχρονη κίνηση χρησιμοποιεί κατευθείαν DCF. Η λειτουργία σημειακού συντονισμού (Point Coordination Function, PCF) είναι ένας αλγόριθμος κεντρικού ελέγχου MAC που χρησιμοποιείται για να παρέχει υπηρεσία χωρίς ανταγωνισμό. Η PCF βασίζεται πάνω στην DCF και εκμεταλλεύεται χαρακτηριστικά της DCF για να εξασφαλίσει πρόσβαση για τους χρήστες της.

2.4 Πακέτο MAC

Το επίπεδο MAC υποστηρίζει τρεις τύπους πακέτων, διαχείρισης δεδομένων και ελέγχου. Στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζεται η δομή ενός πακέτου MAC.

Οι τρεις διαφορετικοί τύποι πακέτων που αναφέρθηκαν παραπάνω χρησιμοποιούνται ως εξής:

- (i) Τα πακέτα δεδομένων για μετάδοση δεδομένων
- (ii) Τα πακέτα ελέγχου για έλεγχο της σωστής λήψης δεδομένων
- (iii) Τα πακέτα διαχείρισης για λειτουργίες σύνδεσης ή αποσύνδεσης από το δίκτυο.



Σχήμα 2.2: Το πακέτο MAC



2.5 IFS

Το πρότυπο 802.11 χρησιμοποιεί χρόνους Inter Frame Space (IFS), οι οποίοι ανάλογα την διάρκεια ορίζουν και την προτεραιότητα πρόσβασης των σταθμών. Η επόμενη λίστα παρουσιάζει όλα τα IFS Times:

- (i) **Short Time Interframe Space (SIFS)** είναι η πιο μικρή διάρκεια σε χρόνο και οι σταθμοί που αναμένουν για χρονικό διάστημα ίσο με ένα SIFS έχουν υψηλότερη προτεραιότητα πρόσβασης στο μέσο.
- (ii) **PCF Time Inter Frame Space (PIFS)** είναι ο χρόνος στην λειτουργία PCF, που ένας σταθμός περιμένει προτού αποκτήσει πρόσβαση στο μέσο.
- (iii) **DCF Interval Frame Space (DIFS)** είναι ο χρόνος που πρέπει να παραμείνει το μέσο ανενεργό στην λειτουργία DCF, πριν προσπαθήσει να μεταδώσει κάποιος σταθμός.

2.6 802.11 Distributed Coordination Function

Η λειτουργία DCF χρησιμοποιεί έναν απλό αλγόριθμο πολλαπλής πρόσβασης ανίχνευσης φέροντος (Carrier Sense Multiple Access, CSMA) και το πρωτόκολλο αποφυγής συγκρούσεων CSMA/CA. Αν ο σταθμός έχει ένα πλαίσιο MAC για εκπομπή, "ακούει" το μέσο. Αν το μέσο είναι αδρανές για ένα DFS, τότε ο

σταθμός μπορεί να εκπέμψει, διαφορετικά ο σταθμός πρέπει να περιμένει μέχρι να ολοκληρωθεί η τρέχουσα εκπομπή πριν αρχίσει να εκπέμψει.

Για να εξασφαλίσει την ομαλή και επαρκή λειτουργία αυτού του αλγορίθμου, η DCF περιλαμβάνει ένα σύνολο καθυστερήσεων που αποτελούν ένα σχήμα προτεραιότητας. Ας αρχίσουμε, λοιπόν, θεωρώντας μία απλή καθυστέρηση που είναι γνωστή ως χρονικό διάστημα μεταξύ πλαισίων ή διαπλαισιακό διάστημα (distributed interframe space, DIFS). Στην πραγματικότητα, υπάρχουν τρεις διαφορετικές τιμές ενδοπλαισιακών διαστημάτων. Χρησιμοποιώντας ένα IFS, οι κανόνες για πρόσβαση CSMA έχουν ως εξής :

- 1 Ένας σταθμός με ένα πλαίσιο για εκπομπή ανιχνεύει το μέσο. Αν το μέσο είναι αδρανές, τότε περιμένει να δει αν παραμένει αδρανές για χρόνο ίσο με DIFS. Αν συμβαίνει αυτό, τότε ο σταθμός μπορεί να εκπέμψει αμέσως.
- 2 Αν το μέσο είναι απασχολημένο (είτε επειδή) ο σταθμός αρχικά βρίσκει το μέσο απασχολημένο είτε επειδή το μέσο καταλαμβάνεται κατά την διάρκεια του χρόνου αδράνειας DIFS), τότε ο σταθμός αναβάλλει την εκπομπή και συνεχίζει να παρακολουθεί το μέσο μέχρι να τελειώσει η τρέχουσα εκπομπή.
- 3 Μόλις τελειώσει η τρέχουσα εκπομπή, ο σταθμός καθυστερεί για άλλο ένα DIFS. Αν το μέσο παραμείνει αδρανές για αυτήν την περίοδο, τότε ο σταθμός υποχωρεί για ένα τυχαίο χρονικό διάστημα μειώνει τον χρονομετρητή και ανιχνεύει ξανά το μέσο. Αν το μέσο εξακολουθεί να είναι αδρανές, τότε ο σταθμός μπορεί να εκπέμψει. Κατά το χρόνο της υποχώρησης, αν το μέσο καταστεί απασχολημένο, ο χρονομετρητής υποχώρησης ακινητοποιείται και επανέρχεται όταν το μέσο γίνει και πάλι αδρανές για περισσότερο από ένα DIFS.

Για να εξασφαλιστεί η σταθερότητα της υποχώρησης χρησιμοποιείται μία τεχνική που είναι γνωστή ως δυαδική εκθετική υποχώρηση (binary exponential backoff) η οποία περιγράφεται στην επόμενη ενότητα.

SLOT TIME, MINIMUM, AND MAXIMUM CONTENTION WINDOW VALUES FOR THE THREE PHY SPECIFIED BY THE 802.11STANDARD: FREQUENCY HOPPING SPREAD SPECTRUM (FHSS) DIRECT SEQUENCE SPREAD SPECTRUM (DSSS), AND INFRARED (IR)			
PHY	Slot Time (σ)	$CWin_{min}$	$CWin_{max}$
FHSS	50 μ s	16	1024
DSSS	20 μ s	32	1024
IR	8 μ s	64	1024

Πίνακας 2.1: PHY IEEE 802.11

2.6.1 Τεχνικές μετάδοσης πακέτων του DCF υποστρώματος

2.6.2 Basic Access

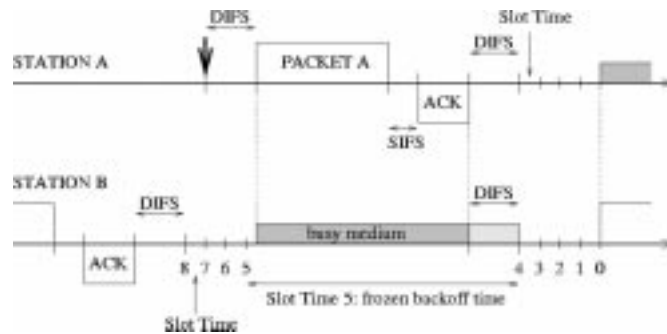
Για λόγους αποδοτικότητας, το DCF χρησιμοποιεί μια διακριτού χρόνου κλίμακα υποχώρησης (backoff). Το χρονικό διάστημα που ακολουθεί αμέσως μετά από τον χρόνο αδράνειας DIFS είναι χωρισμένο σε σχισμές (slot) και κάθε σταθμός μπορεί να εκπέμψει στην αρχή κάθε σχισμής. Κάθε χρονική σχισμή μεγέθους σ είναι ίση με τον χρόνο που χρειάζεται κάθε σταθμός για να ανιχνεύσει την μετάδοση ενός πακέτου από κάποιον άλλο σταθμό.

Σε κάθε μετάδοση πακέτου, η τιμή του μετρητή backoff μπορεί να επιλεγεί στην περιοχή $[0, W-1]$. Η τιμή W ονομάζεται παράθυρο ανταγωνισμού (contention window), και εξαρτάται από τον αποτυχημένο αριθμό μεταδόσεων για το πακέτο. Στην πρώτη προσπάθεια μετάδοσης το παράθυρο παίρνει αρχική τιμή ίση με CW_{min} (minimum contention window). Μετά από κάθε αποτυχημένη μετάδοση, το παράθυρο W διπλασιάζεται, μέχρι μια ανώτατη τιμή, η οποία είναι ίση με $CW_{max} = 2^m CW_{min}$ (maximum contention window). Οι τιμές CW_{min} και CW_{max} όπως αναφέρονται στην τελική έκδοση από το standard[7] προδιαγράφονται από το PHY και φαίνονται στον Πίνακα 2.1

Ο μετρητής backoff μειώνεται όσο το κανάλι είναι αδρανές, παγώνει όταν μια μετάδοση ανιχνεύεται στο κανάλι και επανενεργοποιείται όταν το κανάλι είναι σε αδράνεια και πάλι για περισσότερο από ένα DIFS. Ο σταθμός μεταδίδει όταν ο χρόνος backoff φτάσει στο μηδέν.

Το Σχήμα 2.3 παρουσιάζει την παρακάτω λειτουργία:

Δύο σταθμοί A και B μοιράζονται το ίδιο κανάλι και στο τέλος της μετάδοσης του πακέτου, ο σταθμός B περιμένει για DIFS και μετά επιλέγει backoff χρόνο



Σχήμα 2.3: Παράδειγμα μηχανισμού βασικής πρόσβασης.

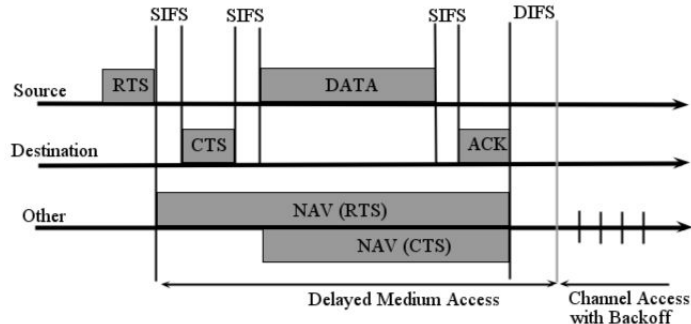
• • •

ίσο με 8, πριν μεταδώσει το επόμενο πακέτο. Υποθέτουμε ότι το πρώτο πακέτο του σταθμού A φτάνει την χρονική στιγμή που δείχνει το βέλος στο Σχήμα 2.3. Μετά από ένα DIFS το πακέτο μεταδίδεται. Σημειώνεται εδώ ότι η μετάδοση του πακέτου του πακέτου A συμβαίνει στην μέση της χρονικής στιγμής που αντιστοιχεί στην τιμή 5 του backoff μετρητή του σταθμού B. Ώς επακόλουθο του γεγονότος ότι το κανάλι ανιχνεύεται απασχολημένο ο backoff μετρητής του σταθμού B παγώνει και συνεχίζει να μειώνεται ξανά, μόνο όταν το κανάλι ανιχνευθεί ανενεργό μετά από ένα DIFS.

Στο πρωτόκολλο CSMA/CA δεν είναι δυνατή η ανίχνευση σύγκρουσης από τον σταθμό που μεταδίδει. Γι' αυτόν τον λόγο ο σταθμός προορισμού μεταδίδει ένα μήνυμα ACK το οποίο σηματοδοτεί την επιτυχή λήψη του πακέτου. Η επιβεβαίωση ACK μεταδίδεται αμέσως μετά την επιτυχή λήψη του πακέτου, μετά από ένα χρονικό διάστημα που ονομάζεται sort interframe space (SIFS). Καθώς το SIFS (συν την καθυστέρηση διάδοσης) είναι μικρότερη του ενός DIFS, κανένας άλλος σταθμός είναι σε θέση να ανιχνεύσει το κανάλι αδρανές για ένα DIFS μέχρι το τέλος του ACK. Εάν ο σταθμός που μεταδίδει δεν λάβει το ACK εντός ορισμένης ACK_ Timeout, ή ανιχνεύσει τη μετάδοση ενός διαφορετικού πακέτου στο κανάλι, τότε προγραμματίζει την επαναμετάδοση σύμφωνα με τους δεδομένους backoff κανόνες. Όλα τα προηγούμενα περιγράφουν την της διπλής χειραφίας (two-way handshaking) η οποία ονομάζεται μηχανισμός Βασικής Πρόσβασης.

2.6.3 RTS/CTS Request To Send/Clear To Send

Στον RTS/CTS μηχανισμό έχουμε μια επιπλέον τεσσάρων κατευθύνσεων τεχνική χειραφίας (four-way handshaking) ο οποίος μηχανισμός περιγράφεται στο Σχήμα 2.4



Σχήμα 2.4: Μηχανισμός πρόσβασης RTC/CTS.



Ένας σταθμός που θέλει να μεταδώσει ένα πακέτο ακολουθεί τους κανόνες backoff όπως εξηγήθηκαν παραπάνω, και στη συνέχεια, αντί να μεταδώσει το πακέτο μεταδίδει σύντομο χρονικά πλαίσιο (Request To Send - RTS). Όταν ο λαμβάνων σταθμός ανιχνεύσει ένα πλαίσιο RTS, ανταποκρίνεται, μετά από χρόνο ίσο με SIFS, με ένα πλαίσιο (Clear To Send - CTS). Η μετάδοση του data πακέτου από τον πομπό μπορεί να ξεκινήσει μόνο αν το πλαίσιο CTS έχει ληφθεί σωστά.

Τα πλαίσια RTS και CTS μεταφέρουν πληροφορία σχετικά με το μήκος του πακέτου που θα μεταδοθεί. Αυτές οι πληροφορίες μπορούν να διαβαστούν από κάθε σταθμό που παρακολουθεί το κανάλι, ο οποίος σταθμός στην συνέχεια ενημερώνει το (Network Allocation Vector - NAV) για την χρονική διάρκεια στην οποία το κανάλι θα παραμείνει απασχολημένο. Ο NAV είναι ένας μετρητής που ενημερώνεται από το πεδίο Duration κάθε λαμβανομένου πλαισίου. Ο σταθμός δεν επιχειρεί εκπομπή εκτός εάν το NAV=0 Ως εκ τούτου, όταν ένας σταθμός είναι κρυμμένος είτε από τον σταθμό που μεταδίδει είτε από τον σταθμό που λαμβάνει, με την ανίχνευση ενός πλαισίου RTS ή CTS, μπορεί να καθυστερήσει κατάλληλα την μετάδοση, και έτσι να αποφευχθεί η σύγκρουση.

Ο μηχανισμός RTS / CTS είναι πολύ αποτελεσματικός από την άποψη της απόδοσης του συστήματος ιδίως όταν έχουμε να κάνουμε με μεγάλα πακέτα και κρυφούς σταθμούς, γιατί μειώνεται το μήκος των πλαισίων που περιλαμβάνονται

στην σύγκρουση αλλά και γιατί ενημερώνονται και οι κρυφοί σταθμοί κατά την μετάδοση ενός πλαισίου RTS ή CTS. Στην πραγματικότητα, αν υποθέσουμε ότι έχουμε το τέλειο κανάλι, το οποίο ανιχνεύεται από κάθε σταθμό, η σύγκρουση μπορεί να συμβεί μόνο όταν δύο (ή περισσότερα) πακέτα μεταδίδονται εντός της ίδιας χρονικής σχισμής (slot time). Όταν δύο σταθμοί κάνουν χρήση του μηχανισμού RTC-CTS, σύγκρουση μπορεί να συμβεί μόνο στα πλαίσια RTS, η οποία θα ανιχνευθεί αρκετά νωρίς από τον σταθμό αποστολέα, γιατί δεν θα υπάρξει μετάδοση πλαισίου CTS από τον σταθμό λήψης.

Κεφάλαιο 3

Ανάλυση της απόδοσης του IEEE 802.11 DCF

Ο Giuseppe Bianchi στην εργασία [6] επικεντρώνεται στην μέγιστη απόδοση που μπορεί να πετύχει το σύστημα σε συνθήκες κορεσμού. Όλα όσα αναφέρονται σε αυτό το κεφάλαιο έχουν αναπτυχθεί από τον Bianchi στην εργασία [6]. Επειδή η παρούσα εργασία βασίζεται στην εργασία αυτή, το παρόν κεφάλαιο παρουσιάζει τα σημεία εκείνα από την εργασία του Bianchi, τα οποία αναφέρονται στην ανάλυση την απόδοσης σταθμών που μεταδίδουν πακέτα σταθερού μεγέθους. Είναι γνωστό ότι αρκετές φορές τα συστήματα τυχαίας πρόσβασης παρουσιάζουν μια ασταθή συμπεριφορά. Ειδικότερα, όσο το προσφερόμενο φορτίο αυξάνει, η απόδοση αυξάνεται μέχρι μια ανώτατη τιμή, που αναφέρεται ως “μέγιστη απόδοση”. Αν αυξήσουμε το φορτίο πέρα από αυτήν την τιμή οδηγούμαστε τελικά σε μια μείωση της απόδοσης του συστήματος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αδυναμία λειτουργίας του συστήματος στη μέγιστη απόδοση, για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Για την μελέτη ανάλυσης της απόδοσης γίνονται οι παρακάτω παραδοχές:

- i. Δεν υπάρχουν κρυφοί σταθμοί και φαινόμενα κατάληψης σήματος.(capture)⁴.
- ii. Υπάρχει συγκεκριμένος αριθμός σταθμών και κάθε σταθμός έχει πάντοτε

⁴Capture είναι το φαινόμενο να εκπέμπουν δύο σταθμοί (π.χ ο Α στον Β και ο Γ στον Δ) αλλά να μην υπάρχει σύγκρουση στην λήψη, δηλαδή ούτε στον Β ούτε στον Δ γιατί ο Β είναι πολύ κοντά στον Α και μακριά από τον Δ και ο Δ είναι πολύ κοντά στον Γ και μακριά από τον Α οι σταθμοί λήψης κατανοούν το μήνυμα γιατί η παρεμβολή είναι ασθενική λόγω μεγάλης απόστασης

πακέτο προς μετάδοση. Δηλαδή το σύστημα λειτουργεί σε συνθήκες κορεσμού (η ουρά κάθε σταθμού με τα προς μετάδοση πακέτα δεν θα είναι ποτέ άδεια).

3.1 Markov Model

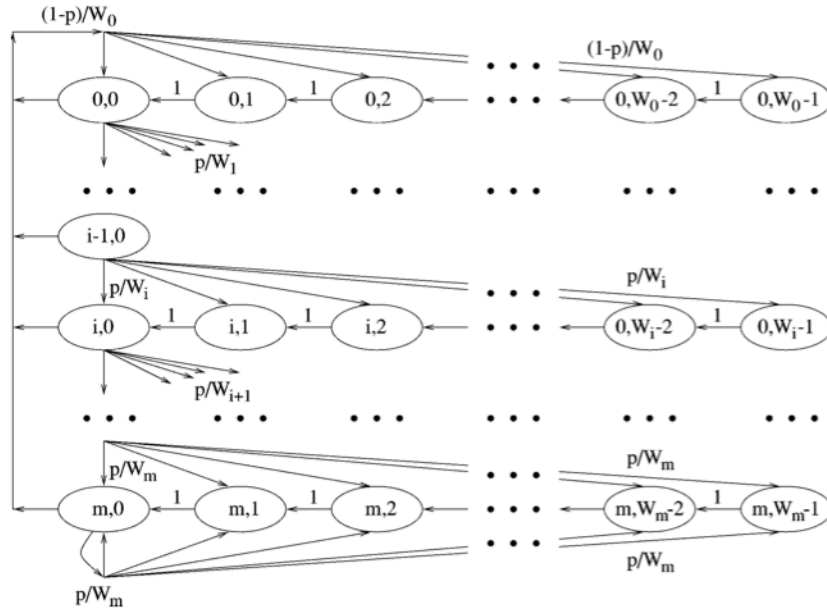
Θα μελετήσουμε αρχικά την συμπεριφορά ενός σταθμού με χρήση Μαρκοβιανής αλυσίδας. Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, υπάρχουν δύο μηχανισμοί πρόσβασης στο κανάλι (Basic ή RTS/CTS Access). Η πιθανότητα μετάδοσης είναι ανεξάρτητη και δεν επηρεάζεται από τον μηχανισμό πρόσβασης.

3.1.1 Πιθανότητα μετάδοσης πακέτου.

Έστω τ η πιθανότητα ένας σταθμός να μεταδώσει σε μια τυχαία χρονική σχισμή. Θα εξεταστεί η περίπτωση n σταθμών, όπου κάθε σταθμός λειτουργεί σε συνθήκες κορεσμού. Δεδομένου ότι υπάρχει πάντα πακέτο προς μετάδοση, κάθε πακέτο θα πρέπει να περιμένει για ένα τυχαίο backoff χρόνο πριν από τη μετάδοση, ώστε να αποφεύγεται όσο είναι δυνατόν η ταυτόχρονη μετάδοση πακέτου από πολλούς σταθμούς. Υποθέτουμε ότι η τιμή $\mathbf{b}(t)$ αντιπροσωπεύει τον μετρητή backoff χρόνου για το παράθυρο οπισθοχώρησης (backoff).

Ορίζουμε τις ακέραιες και διακριτές τιμές t και $t+1$ ως τον χρόνο που αντιστοιχεί στην αρχή δύο συνεχόμενων χρονικών σχισμών, το διάστημα των οποίων μπορεί να είναι κενό, να περιέχει μια μετάδοση, ή να περιέχει μια σύγκρουση. Όταν το διάστημα μεταξύ χρονικών σχισμών είναι κενό τότε το standard ορίζει το μέγεθος αυτό στα $50\mu\text{s}$, ενώ αν υπάρχει μετάδοση ή σύγκρουση το μέγεθος αυτό αυξάνεται και εξαρτάται από τον μηχανισμό πρόσβασης. Επίσης διακριτές τιμές t και $t+1$ αντιστοιχούν σε δύο διαδοχικές μειώσεις του backoff counter.

Η βασική προσέγγιση στο μοντέλο είναι ότι, ανεξάρτητα από τον αριθμό των αναμεταδόσεων που υπέστη κάθε πακέτο, σε κάθε νέα προσπάθεια μετάδοσης του πακέτου υπάρχει μια σταθερή και ανεξάρτητη πιθανότητα σύγκρουσης p . Θα αναφερόμαστε στην πιθανότητα p ως την υπό συνθήκη πιθανότητα σύγκρουσης (*conditional collision probability*) και είναι η πιθανότητα να συμβεί σύγκρουση κατά την μετάδοση ενός πακέτου. Αφού η πιθανότητα p είναι σταθερή και ανεξάρτητη από τις αναμεταδόσεις που έχουν γίνει στο πακέτο, είναι δυνατόν να



Σχήμα 3.1: Αλυσίδα Markov για το μέγεθος του παραθύρου backoff

εφαρμόσουμε τις διακριτού χρόνου αλυσίδες Markov στο μοντέλο δύο διαστάσεων $s(t), b(t)$ (Σχήμα 3.1), όπου η τιμή $s(t)$ αναφέρεται στη κατάσταση backoff $(0..m)$, που είναι οι αναμεταδόσεις που έχει υποστεί ένα πακέτο την χρονική στιγμή t , ενώ $b(t)$ είναι η τιμή που έχει ο backoff μετρητής. Σε αυτή την αλυσίδα Markov, κάθε βήμα είναι μια άδεια χρονική στιγμή, ή μια επιτυχημένη μετάδοση ή μια σύγκρουση. Η δισδιάστατη αλυσίδα Markov $(s(t), b(t))$ μοντελοποιείται με τις εξισώσεις:²(3.1)

$$\begin{cases} P\{i, k|i, k+1\} = 1 & k \in (0, W_i - 2) & i \in (0, m) \\ P\{0, k|i, 0\} = (1-p)/W_0 & k \in (0, W_0 - 1) & i \in (0, m) \\ P\{i, k|i-1, 0\} = p/W_i & k \in (0, W_i - 1) & i \in (1, m) \\ P\{m, k|m, 0\} = p/W_m & k \in (0, W_m - 1) \end{cases} \quad (3.1)$$

Στην αρχή κάθε slot ο μετρητής backoff μειώνεται (εξίσωση 3.1/α). Η δεύτερη εξίσωση (εξίσωση 3.1/β) περιγράφει το γεγονός μιας επιτυχούς μετάδοσης ενός πακέτου στο στάδιο 0, στο οποίο ο μετρητής backoff παίρνει τιμή στο διάστημα $(0, W_0 - 1)$. Η τρίτη και τέταρτη (εξίσωση 3.1/γ,β) περιγράφουν μια αποτυχημένη μετάδοση. Όταν λάβει χώρα μια αποτυχημένη μετάδοση στην κατάσταση $(i-$

²Ισχύει ότι $P\{i_1, k_1|i_0, k_0\} = P\{s(t+1) = i_1, b_{(t+1)} = k_1 | s(t) = i_0, b_{(t)} = k_0\}$

1), τότε η κατάσταση αυξάνεται, και η νέα αρχική τιμή για τον μετρητή backoff επιλέγεται στο διάστημα $(0, W_i)$. Τέλος στην περίπτωση που η κατάσταση φθάσει στην μέγιστη τιμή m , τότε παραμένει εκεί και σταματά να αυξάνεται.

Υποθέτουμε ότι : $b_{i,k} = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{s(t) = i, b(t) = k, i \in (0, m), k \in (0, W_{i-1})\}$ είναι η σταθερή κατανομή των πιθανοτήτων της αλυσίδας Markov.

Ένα πακέτο μπορεί να βρεθεί από την κατάσταση $i - 1$ στην κατάσταση i αν υπάρξει απόπειρα μετάδοσης (μετρητής backoff=0 και σύγκρουση), δηλαδή $b_{i,0} = p \cdot b_{i-1,0}$. Θα αποδείξουμε ότι πιθανότητα εκπομπής ενός πακέτου που βρίσκεται σε οποιαδήποτε από τις καταστάσεις 0 έως $m - 1$ είναι:

$$b_{i-1,0} \cdot p = b_{i,0} \rightarrow b_{i,0} = p^i b_{0,0} \quad 0 < i < m \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} b_{i,0} &= b_{i-1,0} \cdot \frac{p}{W_i} + b_{i,1} \\ &= b_{i-1,0} \cdot \frac{p}{W_i} + b_{i-1,0} \cdot \frac{p}{W_i} + b_{i,2} \\ &= b_{i-1,0} \cdot \frac{p}{W_i} + b_{i-1,0} \cdot \frac{p}{W_i} + \dots + b_{i,W_i-1} \\ &= b_{i-1,0} \cdot \frac{p}{W_i} + b_{i-1,0} \cdot \frac{p}{W_i} \cdot (W - 1) \\ &= b_{i-1,0} \cdot \frac{p}{W_i} \cdot (1 + W_i - 1) \\ &= b_{i-1,0} \cdot p \\ &= b_{i-2,0} \cdot p \cdot p \\ &= b_{i-3,0} \cdot p \cdot p \cdot p \\ &\quad \cdot \\ &\quad \cdot \\ &= b_{0,0} \cdot p^i \end{aligned}$$

Επίσης η πιθανότητα εκπομπής ενός πακέτου όταν έχει φτάσει στην κατάσταση m είναι :

$$b_{m-1,0} \cdot p = (1 - p)b_{m,0} \quad (3.3)$$

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (3.2) η (3.3) μπορεί τελικά να γραφεί:

$$b_{m,0} = \frac{p^m}{1-p} b_{0,0} \quad (3.4)$$

Σύμφωνα με τις κανονικότητες τις αλυσίδας Markov για κάθε $k \in (1, W_i - 1)$, ισχύει:

$$b_{i,k} = \frac{W_i - k}{W_i} \cdot \begin{cases} (1-p) \sum_{j=0}^m b_{j,0} & i = 0 \\ p \cdot b_{i-1,0} & 0 < i < m \\ p \cdot (b_{m-1,0} + b_{m,0}) & i = m \end{cases} \quad (3.5)$$

Έτσι από τις (3.2), (3.4) και από το άθροισμα $\sum_{i=0}^m b_{i,0} = b_{0,0}/(1-p)$ η (3.5) ξαναγράφεται ως εξής:

$$b_{i,k} = \frac{W_i - k}{W_i} b_{i,0} \quad (3.6)$$

Τελικά χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (3.2) και (3.6) όλες οι πιθανές τιμές των $b_{i,k}$ μπορούν να γραφούν σε συνάρτηση με την $b_{0,0}$ και την υπό συνθήκη πιθανότητα σύγκρουσης p .

$$1 = \sum_{i=0}^m \sum_{k=0}^{W_i-1} b_{i,k} = \sum_{i=0}^m b_{i,0} \sum_{k=0}^{W_i-1} \frac{W_i - k}{W_i} = \sum_{i=0}^m \frac{W_i + 1}{2} = \frac{b_{0,0}}{2} \left[W \left(\sum_{i=0}^{m-1} (2p)^i \right) + \frac{(2p)^m}{1-p} + \frac{1}{1-p} \right] \quad (3.7)$$

από όπου τελικά υπολογίζουμε το $b_{0,0}$ από την παρακάτω σχέση:

$$b_{0,0} = \frac{2(1-2p)(1-p)}{(1-2p)(W+1) + pW(1-(2p)^m)} \quad (3.8)$$

Η πιθανότητα τ κατά την οποία ένας σταθμός μεταδίδει σε ένα τυχαίο slot time μπορεί να εκφραστεί από την εξίσωση (3.9). Επίσης γνωρίζουμε ότι κάθε πακέτο ανεξάρτητα από το backoff στάδιο στο οποίο βρίσκεται μπορεί να μεταδοθεί μόνο όταν ο μετρητής backoff φτάσει στο 0.

$$\tau = \sum_{i=0}^m b_{i,0} = \frac{b_{0,0}}{1-p} = \frac{2(1-2p)}{(1-2p)(W+1) + pW(1-(2p)^m)} \quad (3.9)$$

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να κάνουμε μια ενδιαφέρουσα παρατήρηση. Όταν το $m = 0$ η πιθανότητα εκπομπής τ είναι ανεξάρτητη από την πιθανότητα σύ-

γκρουσης p μιας και το πακέτο θα μεταδοθεί όταν ο μετρητής backoff φτάσει στο μηδέν και έτσι μπορούμε να απλοποιήσουμε την προηγούμενη εξίσωση ως εξής:

$$\tau = \frac{2}{W + 1} \quad (3.10)$$

Ωστόσο σε γενικές γραμμές, η τ εξαρτάται από την πιθανότητα σύγκρουσης p , η οποία είναι ακόμα άγνωστη. Για να βρούμε την τιμή της πιθανότητας p θα πρέπει να σημειώσουμε ότι ένα πακέτο μπορεί να εμπλακεί σε σύγκρουση όταν ένας τουλάχιστον σταθμός από τους υπόλοιπους $n - 1$ σταθμούς εκπέμψει την ίδια χρονική στιγμή. Κάθε σταθμός βλέπει το σύστημα στην ίδια κατάσταση (π.χ μια σταθερή κατάσταση). Στην σταθερή αυτήν κατάσταση κάθε σταθμός από τους υπόλοιπους μπορεί να μεταδώσει ένα πακέτο με πιθανότητα τ . Έτσι μπορούμε τελικά να εκφράσουμε την p σε σχέση με την τ από την επόμενη εξίσωση:

$$p = 1 - (1 - \tau)^{n-1} \quad (3.11)$$

Οι εξισώσεις (3.10) και (3.11) αποτελούν ένα μη γραμμικό σύστημα με δύο αγνώστους τ και p , το οποίο λύνεται με αριθμητικές τεχνικές.

3.2 Διεκπεραιωτική Ικανότητα (Throughput)

Ορίζουμε ως διεκπεραιωτική ικανότητα S τον χρόνο που το κανάλι απασχολείται για να μεταδώσει επιτυχώς το ωφέλιμο φορτίο (payload bits). Πριν υπολογίσουμε το S θα πρέπει πρώτα από όλα να δούμε τι μπορεί να συμβεί σε ένα τυχαίο slot time.

Έστω P_{tr} η πιθανότητα μετάδοσης από τουλάχιστον έναν σταθμό σε ένα slot time. Γνωρίζουμε ότι ανταγωνίζονται για την χρήση του καναλιού n σταθμοί και κάθε ένας από αυτούς μπορεί να μεταδώσει πακέτο με πιθανότητα τ , τότε μπορούμε να εκφράσουμε την πιθανότητα μετάδοσης P_{tr} από την επόμενη εξίσωση:

$$P_{tr} = 1 - (1 - \tau)^n \quad (3.12)$$

Η πιθανότητα P_s είναι η πιθανότητα επιτυχίας μιας μετάδοσης όταν μεταδίδει

μόνο ένας σταθμός, μπορεί να υπολογιστεί από την επόμενη εξίσωση:

$$P_s = \frac{n\tau(1-\tau)^{n-1}}{P_{tr}} = \frac{n\tau(1-\tau)^{n-1}}{1-(1-\tau)^n} \quad (3.13)$$

Τελικά το S μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω εξίσωση:

$$S = \frac{E[\text{payload information transmitted in a slot time}]}{[\text{Elength of a slot time}]} \quad (3.14)$$

Γνωρίζουμε ότι:

- $E[P]$ είναι το μέσο μέγεθος του ωφέλιμου φορτίου.
- $P_{tr}P_s$ είναι η πιθανότητα μια πετυχημένη μετάδοση να συμβεί σε ένα slot time.
- $P_{tr}P_sE[P]$ είναι η μέση ποσότητα ωφέλιμης πληροφορίας που μεταδίδεται επιτυχημένα σε ένα slot time. Επίσης το μέσο μήκος ενός slot time μπορεί:
 - με πιθανότητα $1 - P_{tr}$ να είναι κενό.
 - με πιθανότητα $P_{tr}P_s$ να περιλαμβάνει μια επιτυχημένη μετάδοση.
 - με πιθανότητα $P_{tr}(1 - P_s)$ να περιλαμβάνει μια σύγκρουση.

Επομένως η εξίσωση (3.14) μπορεί να μετασχηματιστεί στην:

$$S = \frac{P_s P_{tr} E[P]}{(1 - P_{tr})\sigma + P_{tr} P_s T_s + P_{tr}(1 - P_s)T_c} \quad (3.15)$$

Όπου:

- T_s είναι ο χρόνος που απασχολεί το κανάλι μια επιτυχημένη μετάδοση.
- T_c είναι ο χρόνος που απασχολεί το κανάλι μια σύγκρουση.
- σ είναι η χρονική διάρκεια ενός slot time.

Όλες οι παραπάνω τιμές θα πρέπει να είναι στην ίδια μονάδα μέτρησης.

Στον ορισμό της εξίσωσης (3.15) δεν έχει ληφθεί υπ' όψιν ο μηχανισμός πρόσβασης. Αν υπολογίσουμε σωστά τα T_s και T_c τότε μπορούμε να εξειδικεύσουμε τον υπολογισμό της δικεκπεραιωτικής ικανότητας σε σχέση με τον μηχανισμό πρόσβασης.

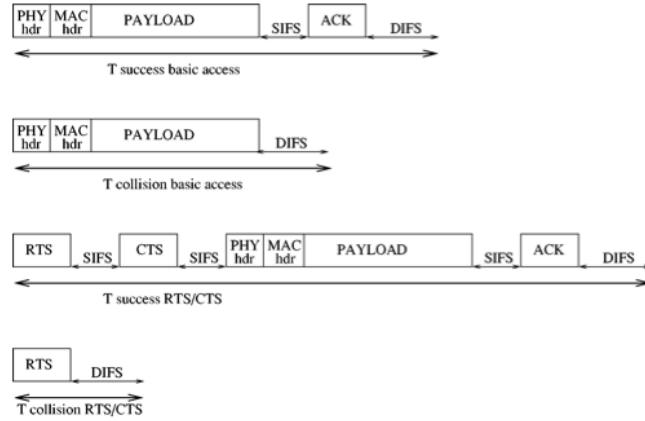
3.2.1 Basic Access Mechanism-RTS/CTS Mechanism

Ας ορίσουμε ως επικεφαλίδα πακέτου την $H = PHY_{hdr} + MAC_{hdr}$ που είναι το άθροισμα των επικεφαλίδων σε PHY και MAC επίπεδο και δ τον χρόνο διάδοσης. Τότε μπορούμε να υπολογίσουμε τους χρόνους T_c και T_s από τις επόμενες εξισώσεις:

$$\begin{cases} T_s^{bas} = H + E[P] + SIFS + \delta + ACK + DIFS + \delta \\ T_c^{bas} = H + E[P^*] + DIFS + \delta \end{cases} \quad (3.16)$$

όπου $E[P^*]$ είναι το μέσο μήκος ωφέλιμου φορτίου του μεγαλύτερου πακέτου που εμπλέκεται σε μια σύγκρουση.

Τώρα εάν θεωρήσουμε ένα σύστημα στο οποίο τα πακέτα μεταδίδονται χρησιμοποιώντας τον μηχανισμό *Request To Send - Clear To Send (RTS/CTS)*, τότε μια σύγκρουση μπορεί να συμβεί μόνο στο *RTS* πλαίσιο (Σχήμα 3.2). Οι χρόνοι T_c



Σχήμα 3.2: T_c και T_s για μηχανισμό πρόσβασης Basic και RTS/CTS

και T_s υπολογίζονται από τις επόμενες εξισώσεις:

$$\begin{cases} T_s^{rts} = RTS + SIFS + \delta + CTS + SIFS + \delta + H + E[P] + SIFS + \delta \\ \quad + ACK + DIFS + \delta \\ T_c^{rts} = RTS + DIFS + \delta \end{cases} \quad (3.17)$$

3.3 Επικύρωση Μοντέλου

Το πρόγραμμα προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκε στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία έχει αναπτυχθεί σε Matlab. Ο προσομοιωτής λαμβάνει υπόψη τις παραμέτρους του Πίνακα 3.1, προσομοιώνει με ακρίβεια τις κινήσεις του κάθε

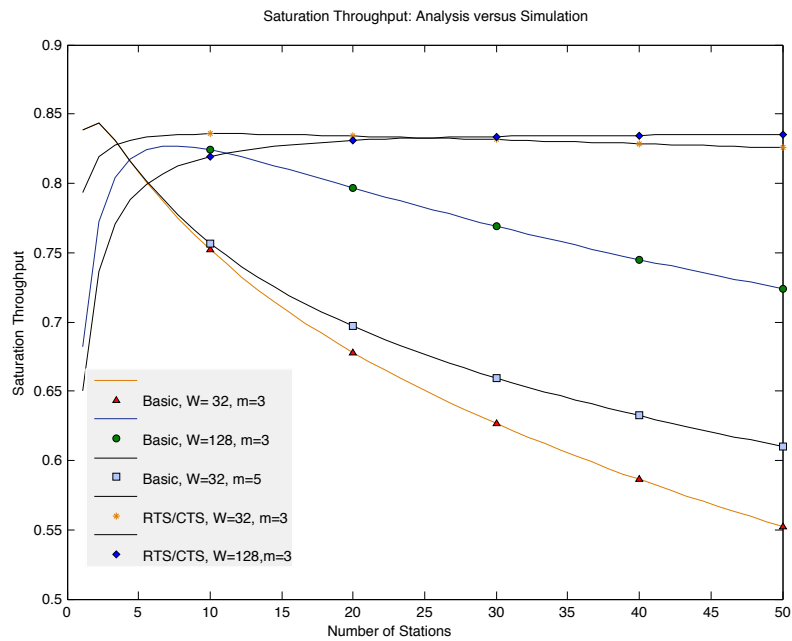
σταθμού και τα αποτελέσματα του συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα προσομοιωτή σε Ornet. Τα αποτελέσματα του δικού μας προσομοιωτή ταυτίστηκαν με τα αποτελέσματα του προσομοιωτή σε Ornet πράγμα που επικυρώνει την αξιοπιστία του προσομοιωτή.

Πίνακας 3.1: *FHSS System Parameters And Additional Parameters Used To Obtain Numerical Results*

packet payload	8184 bits
MAC header	272 bits
PHY header	128 bits
ACK	112 bits + PHY header
RTS	160 bits + PHY header
CTS	112 bits + PHY header
Channel Bit Rate	1 Mbit/sec
Propagation Delay	1 μ s
Slot Time	50 μ s
SIFS	28 μ s
DIFS	128 μ s
ACK_Timeout	300 μ s
CTS_Timeout	300 μ s

Οι τιμές του πίνακα 3.1 είναι αυτές που ισχύουν στο φυσικό επίπεδο για την μεταπήδηση συχνότητας με διασπορά φάσματος *Frequency Hopping Spread Spectrume* (FHSS) PHY επίπεδο [7]. Ο ρυθμός μετάδοσης του καναλιού είναι 1 Mbit/sec ενώ το μέγεθος των πλαισίων ορίζεται από το 802.11 πρωτόκολλο και το PHY header ορίζεται από το FHSS PHY. Οι χρόνοι για το ACK_Timeout και το CTS_Timeout που αναφέρονται στον πίνακα 3.1 χρησιμοποιούνται μόνο στην προσομοίωση (η ανάλυση αγνοεί την επίδραση αυτών των χρονικών ορίων) δεν ορίζεται στο πρότυπο, και έχουν τεθεί ίσα με 300 μ s και στα δύο. Η αριθμητική αυτή τιμή έχει επιλεγεί καθώς είναι αρκετά μεγάλη για να περιέχει ένα SIFS, ACK και την καθυστέρηση αποστολής και λήψης. Τέλος έχει οριστεί σταθερό μέγεθος πακέτου 8184 bits.

Στο Σχήμα 3.3 φαίνονται τα αποτελέσματα του αναλυτικού και της προσομοίωσης χρησιμοποιώντας τον προσομοιωτή που αναπτύχθηκε σε Matlab. Παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης (marks) συμπίπτουν με τα αποτελέσματα του αναλυτικού (γραμμές), πράγμα που αποδεικνύει την αξιοπιστία του αναλυτικού μοντέλου.

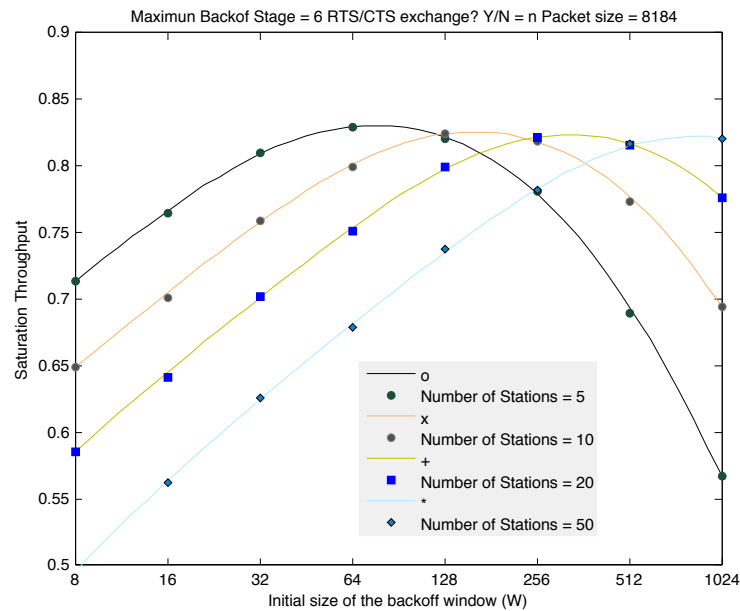


Σχήμα 3.3: Υπολογισμός διεκπεραιωτικής ικανότητας

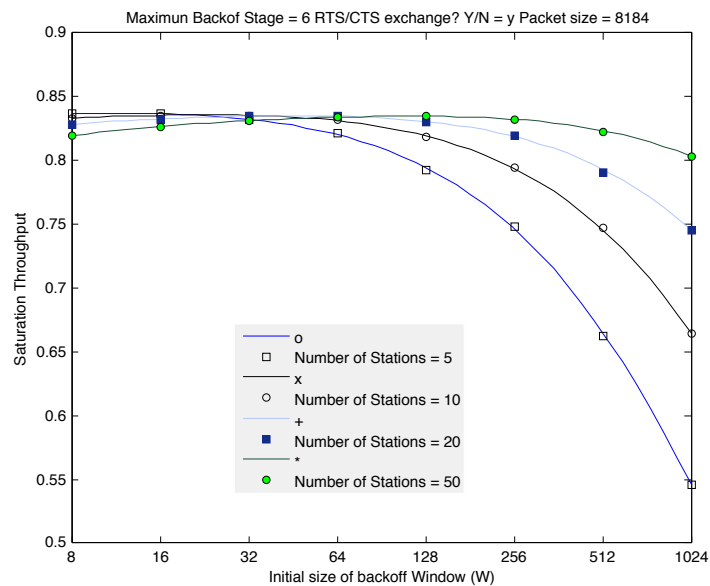
Από το Σχήμα 3.3 συμπεραίνουμε ότι η διεκπεραιωτική ικανότητα του ασύρματου δικτύου εξαρτάται άμεσα από τον αριθμό των σταθμών που υπάρχουν στο δίκτυο, μόνο στην περίπτωση που ο μηχανισμός πρόσβασης είναι ο *Basic*. Όταν ο μηχανισμός πρόσβασης είναι ο *RTS/CTS* τότε παρατηρούμε ότι η διεκπεραιωτική ικανότητα παραμένει σχεδόν σταθερή ανεξάρτητα από τον αριθμό των σταθμών.

Στα σχήματα 3.4 και 3.5 παρουσιάζεται η εξάρτηση της διεκπεραιωτικής ικανότητας από το μέγεθος παραθύρου W , για τους μηχανισμούς πρόσβασης *Basic* και *RTS/CTS*. Προκειμένου να διερευνηθεί η εξάρτηση της διεκπεραιωτικής ικανότητας από το αρχικό μέγεθος παραθύρου και για τους δύο μηχανισμούς πρόσβασης έχουμε υποθέσει στάδια backoff $m = 6$ όποτε μέγιστο μέγεθος παραθύρου $CW_{max} = 2^6 W$. Και τα δύο σχήματα οι υπολογισμοί έχουν γίνει για διαφορετικό αριθμό σταθμών (5, 10, 20, και 50).

Και για τους δύο μηχανισμούς πρόσβασης συμπεραίνουμε από τα αποτελέσματα ότι η διεκπεραιωτική ικανότητα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από από την τιμή του παραθύρου W , αλλά και ότι η βέλτιστη τιμή του παραθύρου W εξαρτάται άμεσα από τον αριθμό των σταθμών στο δίκτυο. Έτσι παράδειγμα για τιμή παραθύρου 1024 έχουμε άριστα αποτελέσματα για 50 σταθμούς, αλλά η



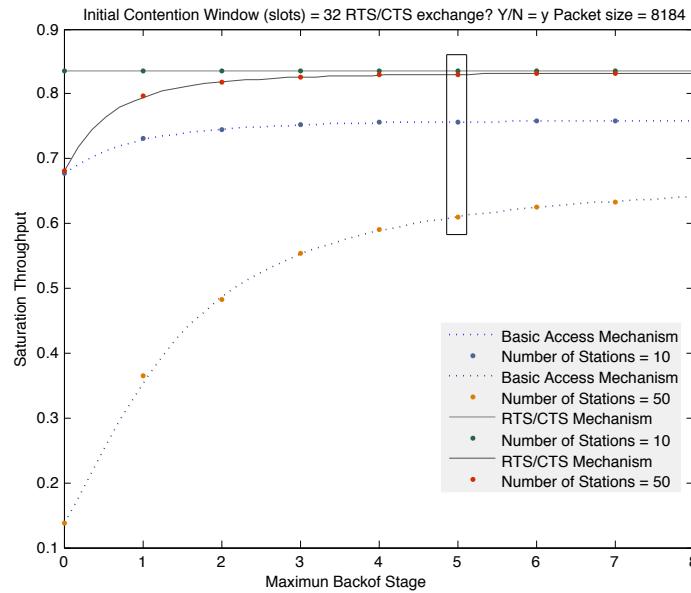
Σχήμα 3.4: Υπολογισμός διεκπεραιωτικής ικανότητας έναντι μεγέθους παραθύρου W - Μηχανισμός πρόσβασης Basic



Σχήμα 3.5: Υπολογισμός διεκπεραιωτικής ικανότητας έναντι μεγέθους παραθύρου W - Μηχανισμός πρόσβασης RTS/CTS

διεκπεραιωτική ικανότητα μειώνεται δραματικά για 5 σταθμούς. Μεγάλες τιμές του παραθύρου W μπορεί να επηρεάσουν την απόδοση όταν στο δίκτυο υπάρχει και εκπέμπει μόνο ένας σταθμός.

Θεωρώντας τώρα ότι στο δίκτυο υπάρχει μόνο ένας σταθμός (επομένως δεν



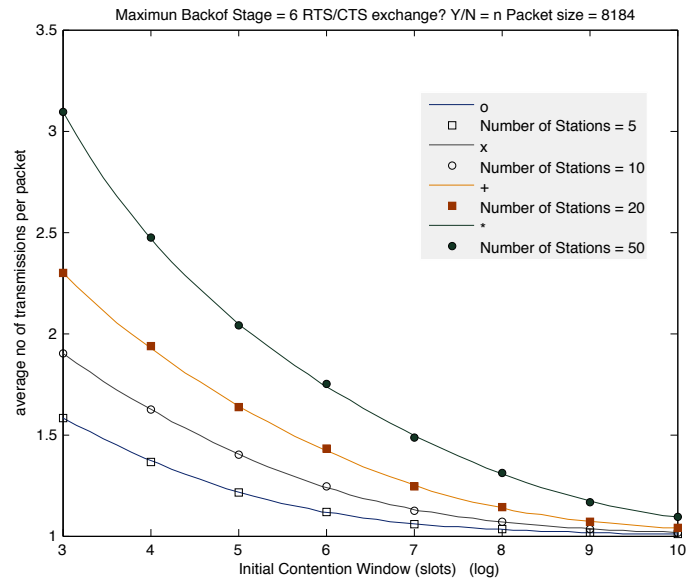
Σχήμα 3.6: Υπολογισμός διεκπεραιωτικής ικανότητας έναντι μέγιστου αριθμού backoff stages

υπάρχει περίπτωση σύγκρουσης) και επομένως η πιθανότητα επιτυχίας είναι ίση με 1, και η πιθανότητα να υπάρχει μετάδοση από έναν μόνο σταθμό P_{tr} , είναι ίση με την πιθανότητα μετάδοσης τ τότε η εξίσωση (3.14) γίνεται:

$$\frac{E[P]}{T_s + \sigma(W - 1)/2} \quad (3.18)$$

Στο Σχήμα 3.6 παρουσιάζεται η απόδοση των σταθμών σε σχέση με το μέγεθος της τιμής m από την οποία εξαρτάται η τιμή του μετρητή backoff, με μέγεθος παραθύρου $W = 32$ και αριθμό σταθμών $n = 10$ και $n = 50$. Τα σημεία μέσα στο ορθογώνιο δείχνουν ότι μετά από την τιμή $m = 5$, η οποία προτείνεται από το standard του DSSS PHY (Πίνακας 2.1) η απόδοση σταματάει να αυξάνεται. Από το σχήμα επίσης παρατηρούμε ότι ακόμη και μετά την τιμή $m = 4$ η απόδοση σταματά να αυξάνεται εκτός από μια μικρή αύξηση που υπάρχει για τον μηχανισμό πρόσβασης Basic για μεγάλο αριθμό σταθμών $n=50$.

Στο Σχήμα 3.7 παρουσιάζεται ο αριθμός των μεταδόσεων ανά πακέτο. Από το σχήμα συμπερνουμε ότι ο αριθμός των μεταδόσεων για ένα πακέτο μειώνεται σημαντικά καθώς μειώνεται το μέγεθος του παραθύρου W και αυξάνεται το μέγεθος του δικτύου n .



Σχήμα 3.7: Υπολογισμός μέσω των μεταδόσεων ανά πακέτο

3.4 Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο, παρουσιάστηκε ένα απλό αναλυτικό μοντέλο που ανέπτυξε ο Bianchi για τον υπολογισμό της διεκπεραιωτικής ικανότητας στο πρωτόκολλο 802.11 DCF. Η σύγκριση με αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν ότι το μοντέλο είναι εξαιρετικά ακριβές στην πρόβλεψη της διεκπεραιωτικής ικανότητας του ασύρματου δικτύου. Έχειδειχτεί ότι η απόδοση του βασικού μηχανισμού πρόσβασης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από παραμέτρους όπως το αρχικό μέγεθος του παραθύρου και τον αριθμό των σταθμών στο ασύρματο δίκτυο.

Αντίθετα αυτές οι παράμετροι επηρεάζουν οριακά το δίκτυο όταν επιλεγεί *RTS/CTS* μηχανισμός πρόσβασης. Ο μηχανισμός *RTS/CTS* έχει επιδείξει υπεροχή έναντι του βασικού μηχανισμού πρόσβασης στις περισσότερες των περιπτώσεων που εξετάσαμε γεγονός που εξηγείται από τους μικρούς χρόνους σύγκρουσης.

Κεφάλαιο 4

Καθυστέρηση Πακέτων - Όριο Επαναμετάδοσης Πακέτου - Διακύμανση Καθυστέρησης (Jitter)

4.1 Εισαγωγή.

Σε αυτήν την ενότητα θα γίνει η μελέτη του αναλυτικού μοντέλου που ανέπτυξε ο Χατζημίσιος [10], βασιζόμενος στην εργασία του Bianchi και στην προέκταση αυτής από τον Haitao Wu [9] και υπολογίζει την μέση καθυστέρηση των πακέτων. Θεωρούμε το ίδιο μοντέλο και παραδοχές με αυτό του Bianchi στο προηγούμενο κεφάλαιο, με την προσθήκη του περιορισμού των επαναμεταδόσεων ενός πακέτου, που προτείνεται από το IEEE 802.11 και ανέλυσε στην εργασία του ο Haitao Wu.

4.1.1 Αναλυτικό Μοντέλο

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο η τιμή του παραθύρου οπισθοχώρησης επιλέγεται τυχαία στο διάστημα $[0, W-1]$. Στην πρώτη προσπάθεια το παράθυρο ανταγωνισμού θα λάβει τιμή ίση με $W = CW_{min}$, που είναι το μικρότερο παράθυρο ανταγωνισμού. Μετά από κάθε αποτυχημένη μετάδοση το

παράθυρο διπλασιάζεται μέχρι μια μέγιστη τιμή $W_{m'} = CW_{max} = 2^{m'} \cdot CW_{min}$ όπου $W_{m'}$ είναι το μεγαλύτερο παράθυρο ανταγωνισμού.¹ Όταν το CW γίνει ίσο με το CW_{max} θα σταματήσει να διπλασιάζεται και θα παραμείνει εκεί μέχρι να μηδενιστεί, είτε λόγω απόρριψης του πακέτου, είτε λόγω τελικά της επιτυχούς μετάδοσης. Έτσι έχουμε:

$$\begin{cases} W_i = 2^i \cdot W & 0 \leq i \leq m' \\ W_i = 2^{m'} \cdot W & i > m' \end{cases} \quad (4.1)$$

όπου i είναι η τρέχουσα κατάσταση σταθμού, $i \in [0, m]$ και m είναι το όριο των επαναμεταδόσεων ενός σταθμού. Το m εδώ είναι και η μεγαλύτερη τρέχουσα κατάσταση. Στο συγκεκριμένο μοντέλο η m μπορεί να έχει τιμή μεγαλύτερη ή μικρότερη από την m' . Στο standard 802.11b [15] προτείνεται τιμή $m = 6$ σαν όριο επαναμεταδόσεων.

Σύμφωνα με τα παραπάνω μπορούμε να επαναπροσδιορίσουμε την εξίσωση (3.8) για τον υπολογισμό της $b_{0,0}$ ώστε να λαμβάνει υπόψιν της τις τιμές m και m' :

$$b_{0,0} = \begin{cases} \frac{2 \cdot (1-2p) \cdot (1-p)}{W \cdot (1-(2p)^{m+1}) \cdot (1-p) + (1-2p) \cdot (1-p^{m+1})} & , m \leq m' \\ \frac{2 \cdot (1-2p) \cdot (1-p)}{W \cdot (1-(2p)^{m'+1}) \cdot (1-p) + (1-2p) \cdot (1-p^{m+1}) + W \cdot 2^{m'} \cdot p^{m'+1} \cdot (1-2p) \cdot (1-p^{m-m'})} & , m > m' \end{cases} \quad (4.2)$$

Στο κεφάλαιο 3 αποδείχθηκε ότι η πιθανότητα να μεταδώσει ένας σταθμός σε κάποια από τις καταστάσεις 0 έως $m-1$ μπορεί να γραφεί σε συνάρτηση της $b_{0,0}$ που είναι η πιθανότητα ο σταθμός να μεταδώσει από την κατάσταση 0. Έτσι η πιθανότητα τ κατά την οποία ένας σταθμός μεταδίδει τυχαία σε ένα χρονικό διάστημα, δίνεται από την επόμενη εξίσωση:

$$\tau = \sum_{i=0}^m b_{i,0} = \sum_{i=0}^m p^i \cdot b_{0,0} = b_{0,0} \cdot \frac{1-p^{m+1}}{(1-p)} \quad (4.3)$$

¹Σημειώνεται ότι στο κεφάλαιο 2 το ανώτερο στάδιο στο οποίο μπορεί να φτάσει ένα πακέτο συμβολίζονταν με m , ενώ σε αυτό το κεφάλαιο m είναι το ανώτερο όριο επαναμεταδόσεων, και m' είναι το ανώτερο στάδιο στο οποίο μπορεί να φτάσει ένα πακέτο.

Η πιθανότητα p είναι η πιθανότητα ένα μεταδιδόμενο πακέτο να εμπλακεί σε κάποια σύγκρουση και δίνεται από:

$$p = 1 - (1 - \tau)^{n-1} \quad (4.4)$$

Οι εξισώσεις (4.3) και (4.4) είναι ένα γραμμικό σύστημα με δύο αγνώστους τ και p το οποίο μπορεί να λυθεί χρησιμοποιώντας αριθμητικές τεχνικές και έχει μια λύση.

Επειδή ο χρόνος διάδοσης είναι πάρα πολύ μικρός μπορεί να αγνοηθεί και έτσι οι εξισώσεις 3.16 και 3.17 μπορούν να επαναυπολογιστούν όπως παρακάτω:

Basic

$$\begin{cases} T_s^{bas} = DIFS + H + l + SIFS + ACK \\ T_c^{bas} = DIFS + H + l + SIFS + ACK \end{cases} \quad (4.5)$$

RTS/CTS

$$\begin{cases} T_s^{RTS} = DIFS + RTS + SIFS + CTS + SIFS + H + l + SIFS + ACK \\ T_c^{RTS} = DIFS + RTS + SIFS + CTS \end{cases} \quad (4.6)$$

όπου $H = MAC_{hdr} + PHY_{hdr}$ και είναι το άθροισμα των μεγεθών της επικεφαλίδας σε επίπεδο MAC και της επικεφαλίδας σε επίπεδο PHY.

4.1.2 Πιθανότητα απόρριψης πακέτου

Ένα πακέτο όταν φτάσει το όριο επαναμεταδόσεων και συγκρουστεί ξανά τότε απορρίπτεται. Η πιθανότητα ένα πακέτο να απορριφθεί όταν εμπλακεί σε $m + 1$ συγκρούσεις δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$p_{drop} = p^{m+1} \quad (4.7)$$

4.1.3 Μέσος χρόνος απόρριψης πακέτου

Ο μέσος χρόνος που απαιτείται για ένα πακέτο να εμπλακεί σε $m + 1$ συγκρούσεις σε όλα τα $(0, 1, \dots, m)$ στάδια δίνεται από [10]:

$$E[T_{drop}] = \sum_{i=0}^m \frac{W_i + 1}{2} = \begin{cases} \frac{W \cdot (2^{m+1} - 1) + (m+1)}{2} & m \leq m' \\ \frac{W \cdot (2^{m+1} - 1) + W \cdot 2^{m'} \cdot (m - m') + (m+1)}{2} & m > m' \end{cases} \quad (4.8)$$

4.1.4 Μέσος χρόνος καθυστέρησης

Ορίζουμε σαν καθυστέρηση D ενός επιτυχώς μεταδιδόμενου πακέτου το χρονικό διάστημα από την στιγμή που το πακέτο βρίσκεται στην αρχή της ουράς των προς μετάδοση πακέτων, μέχρι να ληφθεί για το πακέτο αυτό αποδεικτικό λήψης ACK. Εάν το πακέτο έχει απορριφθεί γιατί έχει ξεπεράσει το όριο των επαναμεταδόσεων, τότε ο χρόνος του συγκεκριμένου πακέτου δεν συμμετέχει στον υπολογισμό της μέσης καθυστέρησης. Η μέση καθυστέρηση πακέτου $E[D]$ δίνεται από την παρακάτω εξίσωση [10]:

$$E[D] = E[X] * E[slot] \quad (4.9)$$

όπου $E[slot]$ είναι η μέση χρονική διάρκεια ενός slot και δίνεται από:

$$E[slot] = (1 - P_{tr}) \cdot \sigma + P_{tr} \cdot P_s \cdot T_s + P_{tr} \cdot (1 - P_s) \cdot T_c \quad (4.10)$$

και $E[X]$ είναι ο μέσος αριθμός από slot times που χρειάζονται για μια επιτυχή μετάδοση και δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$E[X] = \sum_{i=0}^m \frac{(p^i - p^{m+1}) \cdot \frac{W_i + 1}{2}}{1 - p^{m+1}} \quad (4.11)$$

όπου $(1 - p^{m+1})$ είναι η πιθανότητα το πακέτο να μην απορριφθεί και $(p^i - p^{m+1}) / (1 - p^{m+1})$ είναι η πιθανότητα το πακέτο που δεν θα έχει απορριφθεί τελικά να εκπε-

φθεί από το i στάδιο. Μετά από κάποιες αλγεβρικές πράξεις η (4.11) γίνεται:

$$E[X] = \begin{cases} \frac{W \cdot (1-2p)^{m+1} \cdot (1-p) + (1-2p) \cdot (1-p^{m+1})}{2 \cdot (1-2p) \cdot (1-p)} - p^{m+1} \cdot E[T_{drop}] & , m \leq m' \\ \frac{W \cdot (1-2p)^{m'+1} \cdot (1-p) + W \cdot 2^{m'} \cdot p^{m'+1} \cdot (1-p^{m-m'}) \cdot (1-2p) + (1-2p) \cdot (1-p^{m+1})}{2 \cdot (1-2p) \cdot (1-p)} - p^{m+1} \cdot E[T_{drop}] & , m > m' \end{cases} \quad (4.12)$$

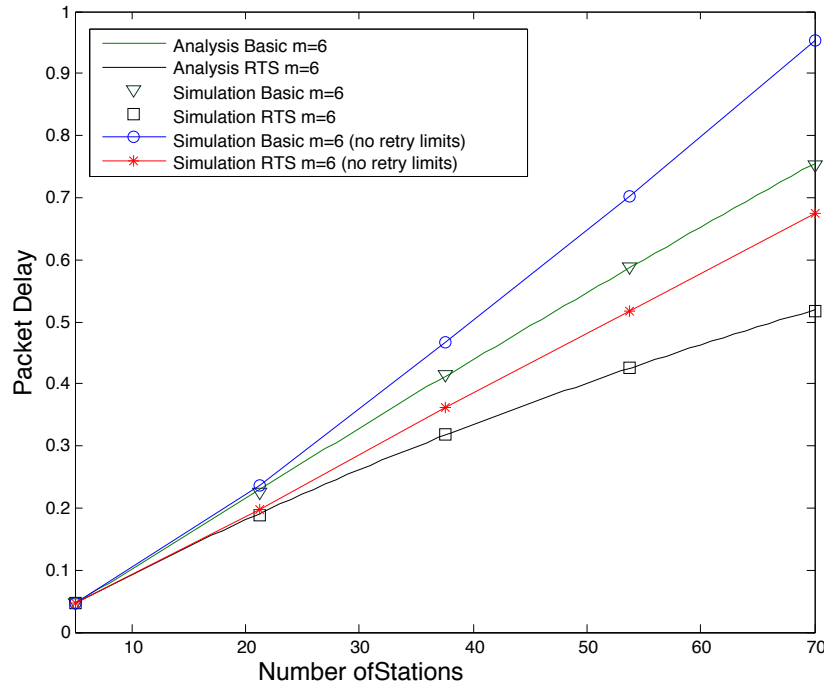
4.2 Αποτελέσματα Ανάλυσης

Όλες οι τιμές που θα παρουσιαστούν στα διαγράμματα που θα ακολουθήσουν έχουν ληφθεί χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους του Πίνακα 4.1 και βασίζονται στο φυσικό επίπεδο Direct Spread Sequence Spectrume (DSSS) του πρωτοκόλλου 802.11b.

Πίνακας 4.1: FHSS DSSS System Parameters in 802.11b

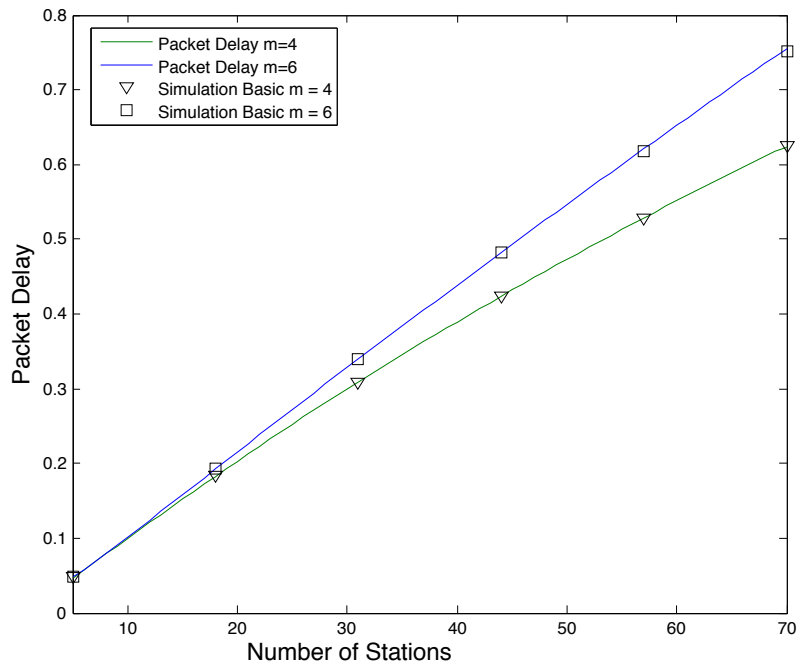
Parameter	Value
Packet payload, l	8184 bits
Slot time, σ	20 μ s
MAC header	224 bits
PHY header	192 bits
RTS packet	160 bits + PHY header
ACK packet	112 bits + PHY header
CTS packet	112 bits + PHY header
DIFS	50 μ s
SIFS	10 μ s
Channel bit rate	1 Mbps
Minimum CW, W_0	32
Number of CW sizes, m'	5
Short retry limits	6

Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται η καθυστέρηση πακέτων σε σχέση με τον αριθμό των σταθμών. Παρατηρούμε ταύτιση των αποτελεσμάτων του αναλυτικού (γραμμές) και του προσομοιωτή (marks). Επίσης παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που ελήφθησαν από τον προσομοιωτή για τους μηχανισμούς Basic και RTS/CTS, χωρίς όριο επαναμεταδόσεων πακέτου. Και στους δύο μηχανισμούς πρόσβασης παρατηρούμε αύξηση της καθυστέρησης όταν δεν υπάρχει όριο επαναμεταδόσεων. Αυτό είναι λογικό γιατί ένα πακέτο θα επαναμεταδίδεται μέχρι τελικώς να υπάρξει επιτυχής μετάδοση, αυξάνοντας όμως έτσι την καθυστέρηση.



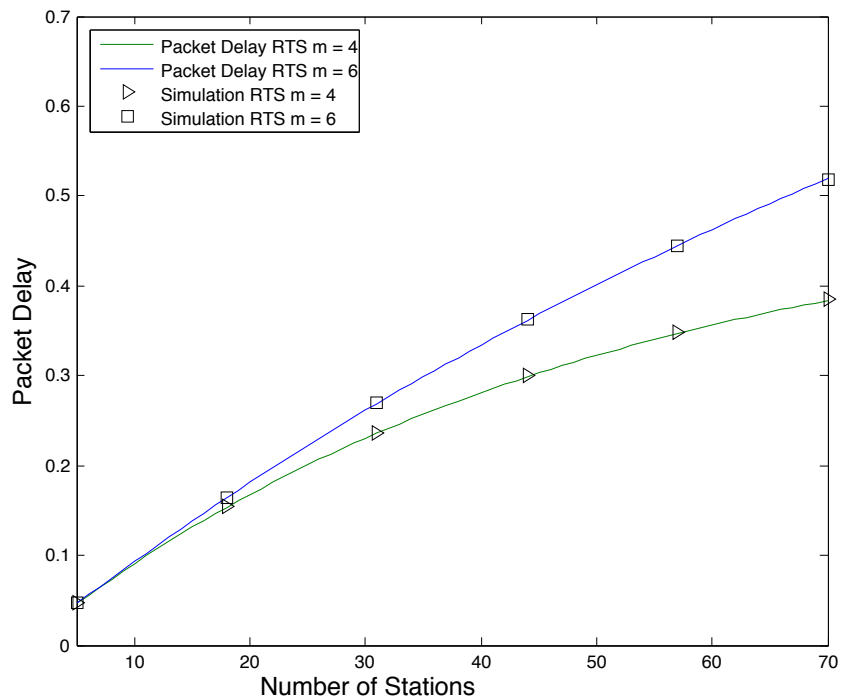
Σχήμα 4.1: Packet delay versus n for Basic access and RTS/CTS

Η μέση καθυστέρηση πακέτου έχει άμεση εξάρτηση από τον αριθμό των σταθμών και το όριο των επαναμεταδόσεων πακέτου και στους δύο μηχανισμούς πρόσβασης *Basic* και *RTS/CTS* όπως φαίνεται και από τα Σχήματα 4.2 και 4.3, όπου θέσαμε σαν όριο επαναμεταδόσεων $m = 4$ και $m = 6$. Από τα δύο σχήματα παρατηρούμε ότι η μέση καθυστέρηση πακέτου αυξάνεται όσο αυξάνεται και ο αριθμός των σταθμών. Αυτό συμβαίνει επειδή (i) ο σταθμός πρέπει να περιμένει περισσότερο λόγω του ότι υπήρξαν μια σειρά επιτυχής μεταδόσεις άλλων σταθμών και (ii) μεγαλύτερος αριθμός σταθμών αυξάνει την πιθανότητα συγκρούσεων και επαναμεταδόσεων και επομένως την σημαντική αύξηση του χρόνου μιας επιτυχούς μετάδοσης. Ο μηχανισμός *RTS/CTS* σχήμα 4.3 δίνει χαμηλότερες τιμές από τον μηχανισμό βασικής πρόσβασης λόγω της μικρότερης χρονικής διάρκειας των συγκρούσεων. Και τα δύο σχήματα δείχνουν ότι η μέση καθυστέρηση πακέτων αυξάνεται όσο αυξάνεται το όριο επαναμεταδόσεων και ότι η καθυστέρηση πακέτων μειώνεται εάν ένα μικρότερο όριο επαναμεταδόσεων επιλεγεί από την προτεινόμενη τιμή, τόσο στον μηχανισμό βασικής πρόσβασης, όσο και στον *RTS/CTS* μηχανισμό πρόσβασης. Ειδικά στην περίπτωση μεσαίου



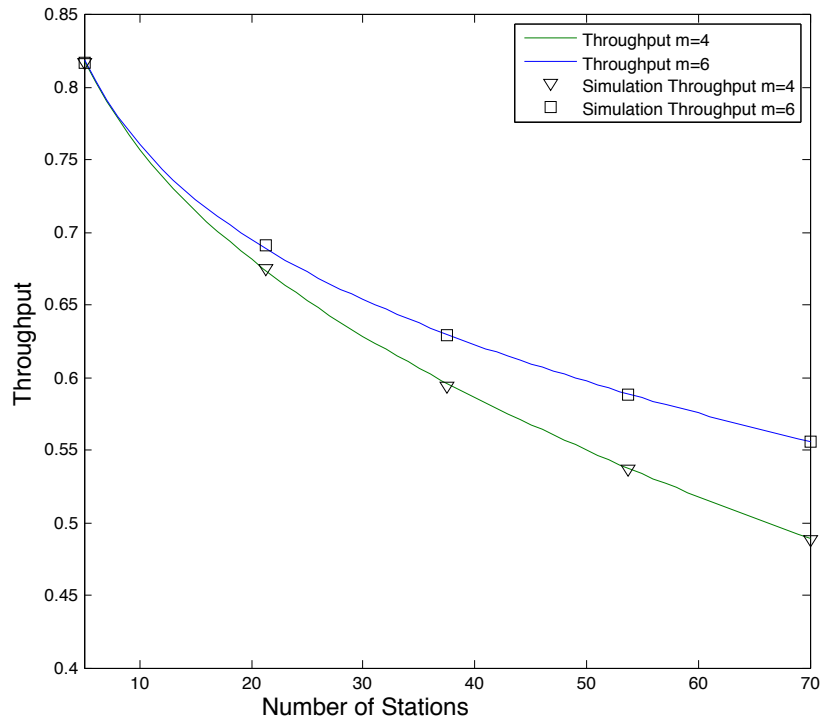
Σχήμα 4.2: Packet delay for Basic access

ή μεγάλου μεγέθους του δικτύου ($n > 15$) μπορούμε να επιτύχουμε χαμηλότερες τιμές καθυστέρησης πακέτου εάν επιλέξουμε ένα μικρό όριο επαναμεταδόσεων, αλλά σε βάρος του αριθμού πακέτων που θα απορριφθούν.



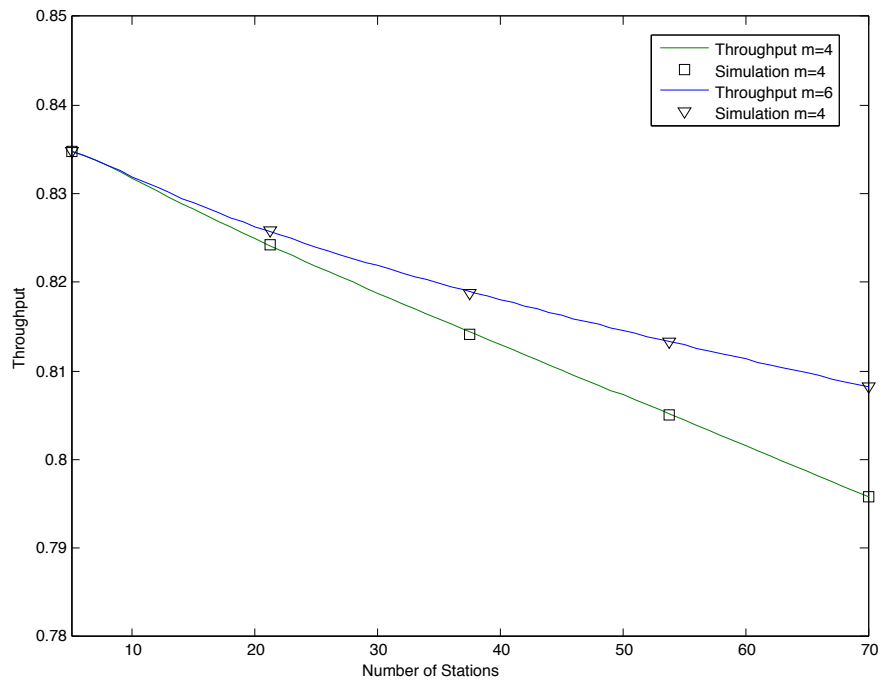
Σχήμα 4.3: Packet delay for RTS/CTS

Στα σχήματα 4.4 και 4.5 παρουσιάζεται η διεκπαιρευτική ικανότητα των σταθμών για μηχανισμούς Basic και RTS/CTS αντίστοιχα λαμβάνοντας υπόψιν το όριο επαναμεταδόσεων ενός πακέτου. Παρατηρούμε ότι η διεκπαιρευτική ικανότητα των σταθμών επηρεάζεται σημαντικά από το όριο επαναμεταδόσεων ενός σταθμού.

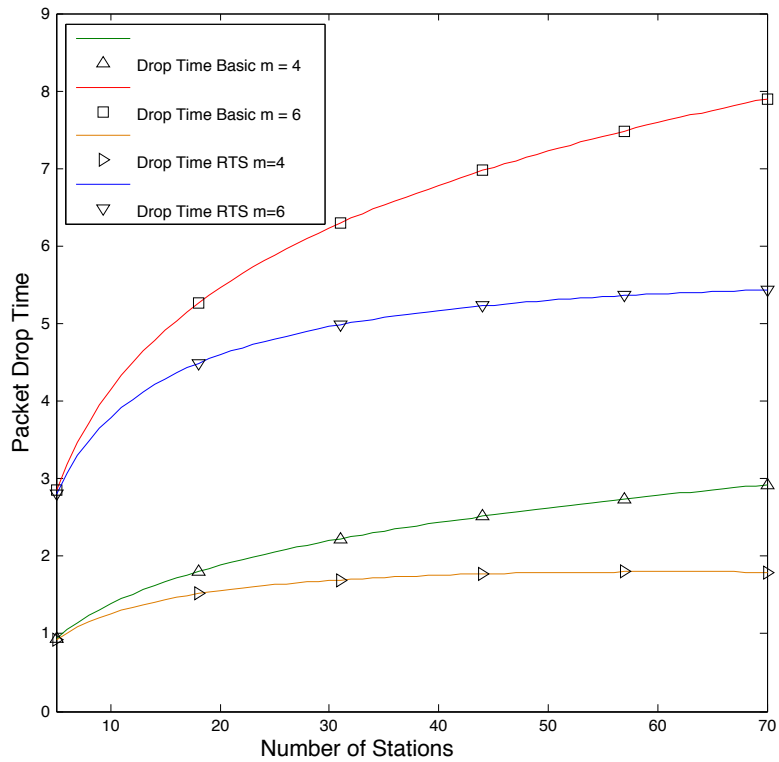


Σχήμα 4.4: Throughput for Basic access

Στο Σχήμα 4.6 παρουσιάζεται ο χρόνος απόρριψης ενός πακέτου που έχει ξεπεράσει το όριο επαναμεταδόσεων. Σε όλες τις περιπτώσεις, ο μηχανισμός RTS/CTS επιτυγχάνει μια χαμηλότερη τιμή για το μέσο χρόνο απόρριψης, σε σχέση με τον βασικό μηχανισμό πρόσβασης. Η μείωση αυτή παρατηρείται κυρίως όταν το μέγεθος δικτύου n οδηγεί σε υψηλότερη πιθανότητα σύγκρουσης μέγεθος δικτύου ($n = 70$). Επιπλέον, στο ίδιο σχήμα παρατηρούμε τον μέσο χρόνο απόρριψης σε σχέση με το όριο επαναμεταδόσεων. Επιλογή μικρού ορίου επαναμεταδόσεων ($m = 4$), έχει ως αποτέλεσμα χαμηλό χρόνο απόρριψης κατά μέσο όρο. Αντίστοιχα υψηλότερη τιμή ορίου επαναμεταδόσεων, ($m = 6$) αντιστοιχεί στο υψηλότερο μέσο χρόνο απόρριψης.

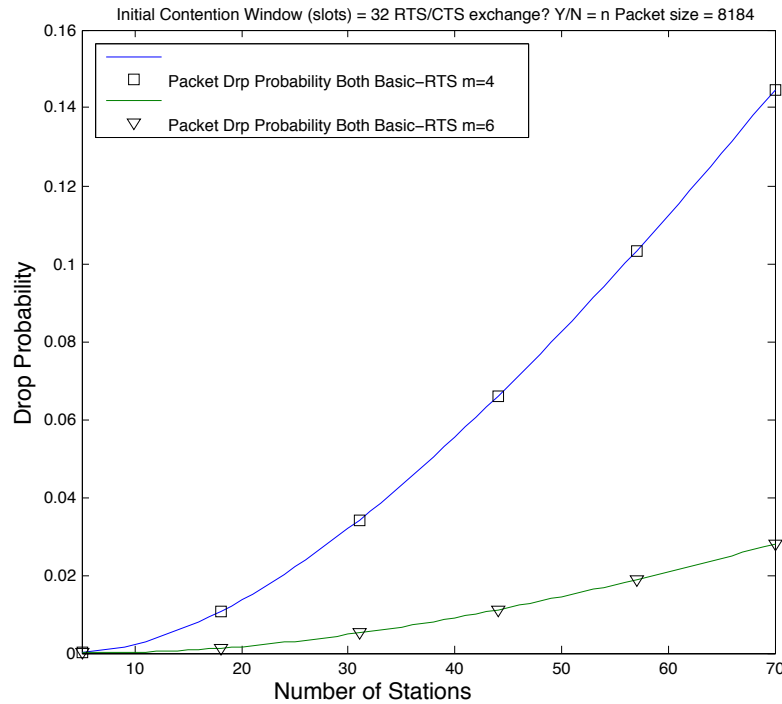


Σχήμα 4.5: Throughput for RTS/CTS



Σχήμα 4.6: Drop Time versus n

Τέλος στο Σχήμα 4.7 παρουσιάζεται η πιθανότητα απόρριψης πακέτου η



Σχήμα 4.7: Drop Probability versus n

οποία διαπιστώνουμε ότι επηρεάζεται από τον αριθμό των προσπαθειών επαναμετάδοσης και είναι ανεξάρτητη από τον μηχανισμό πρόσβασης.

4.3 Διακύμανση Καθυστέρησης (Jitter)

Στην εργασία [11] προτείνεται ένα αναλυτικό μοντέλο για την μέτρηση της διακύμανση καθυστέρησης. Διακύμανση καθυστέρησης είναι η πιθανή απόκλιση της τιμής της καθυστέρησης ενός πακέτου από την μέση τιμή καθυστέρησης.

Η βασική παραδοχή της προτεινόμενης ανάλυσης είναι ότι η μεταβολή στην καθυστέρηση προέρχεται κυρίως από τις διαφορετικές τιμές του μετρητή οπισθοχώρησης που επιλέγεται στα διαφορετικά στάδια και όχι από τις διαφορετικές τιμές της καθυστέρησης κάθε χρονικής σχισμής. Έχοντας ορίσει την μέση χρονική διάρκεια μιας χρονικής σχισμής στην εξίσωση (4.10) μπορούμε να υπολογίσουμε την μέση καθυστέρηση $E[D_{0,i}]$ των πακέτων που μεταδίδονται επιτυχώς από το στάδιο 0, με τιμή backoff counter ίσο με i από την εξίσωση (4.13):

$$E[D_{0,i}] = T_s + i \cdot E[slot] \quad (4.13)$$

Η μέση καθυστέρηση των πακέτων που εκπέμπονται ανεπιτυχώς από το στάδιο 0 με τιμή backoff ίση με i υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τη επόμενη εξίσωση:

$$E[U_{0,i}] = T_c + i \cdot E[slot] \text{ για } 0 \leq i \leq W_0 - 1 \quad (4.14)$$

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (4.14) υπολογίζεται η μέση καθυστέρηση $E[U_0]$ των πακέτων που μεταδίδονται ανεπιτυχώς στο στάδιο 0 :

$$E[U_0] = \frac{1}{W} \cdot \sum_{i=0}^{W-1} E[U_{0,i}] = T_c + E[slot] \cdot \frac{W-1}{2} \quad (4.15)$$

έτσι η μέση καθυστέρηση $E[U_j]$ των πακέτων που μεταδόθηκαν ανεπιτυχώς στο στάδιο j δίνεται από την επόμενη εξίσωση:

$$E[U_j] = (j+1) \cdot T_c + E[slot] \cdot \sum_{i=0}^j \left(\frac{W_i - 1}{2} \right) \text{ for } 0 \leq j \leq m \quad (4.16)$$

Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (4.13) και (4.15) μπορούμε να υπολογίσουμε την μέση καθυστέρηση $E[D_{1,i}]$ των επιτυχώς μεταδιδόμενων πακέτων από το στάδιο 1 (επομένως υπήρξε σύγκρουση στο στάδιο 0) από την επόμενη εξίσωση:

$$E[D_{1,i}] = T_s + i \cdot E[slot] + E[U_0] \text{ for } 0 \leq i \leq W_1 - 1 \quad (4.17)$$

Τελικά η μέση καθυστέρηση $E[D_{j,i}]$ για τα πακέτα που μεταδίδονται επιτυχώς από το στάδιο j με τιμή backoff i στο στάδιο j δίνεται από την επόμενη εξίσωση:

$$E[D_{j,i}] = T_s + i \cdot E[slot] + E[U_{j-1}] \text{ for } 0 \leq j \leq m, 0 \leq i \leq W_j - 1 \quad (4.18)$$

όπου $E[U_{-1}] = 0$

Επειδή η τιμή του μετρητή backoff επιλέγεται από το διάστημα $[0, W_j - 1]$, η πιθανότητα να επιλεγεί για κάποιον σταθμό τιμή backoff ίση με i στο στάδιο j είναι ίση με $1/W_j$. Έτσι η πιθανότητα P_j ένα πακέτο να μεταδοθεί επιτυχώς (υπό την προϋπόθεση το πακέτο να μην έχει απορριφθεί) από το στάδιο j με τιμή

backoff i είναι:

$$P_j = \frac{(1-p)p^j}{1-p^{m+1}} \frac{1}{W_j} \text{ for } 0 \leq j \leq m \quad (4.19)$$

Τώρα μπορούμε να υπολογίσουμε την μέση τιμή των τετραγώνων των καθυστερήσεων από την επόμενη εξίσωση:

$$E[D^2] = \sum_{j=0}^m \left(\sum_{i=0}^{W_j-1} (E[D_{j,i}])^2 \cdot P_j \right) \quad (4.20)$$

Αντικαθιστώντας την (4.18) και (4.19) στην (4.20) παίρνουμε την επόμενη εξίσωση:

$$E[D^2] = \sum_{j=0}^m \frac{(1-p)p^j}{1-p^{m+1}} \frac{1}{W_j} \sum_{i=0}^{W_j-1} (T_s + i \cdot E[slot] + E[U_{j-1}])^2 \quad (4.21)$$

όπου $E[U_{-1}] = 0$

Χρησιμοποιώντας τώρα τις εξισώσεις (4.9) και (4.21) μπορούμε να υπολογίσουμε την διακύμανση καθυστέρησης από την επόμενη εξίσωση:

$$J = \sqrt{E[D^2] - (E[D])^2} \quad (4.22)$$

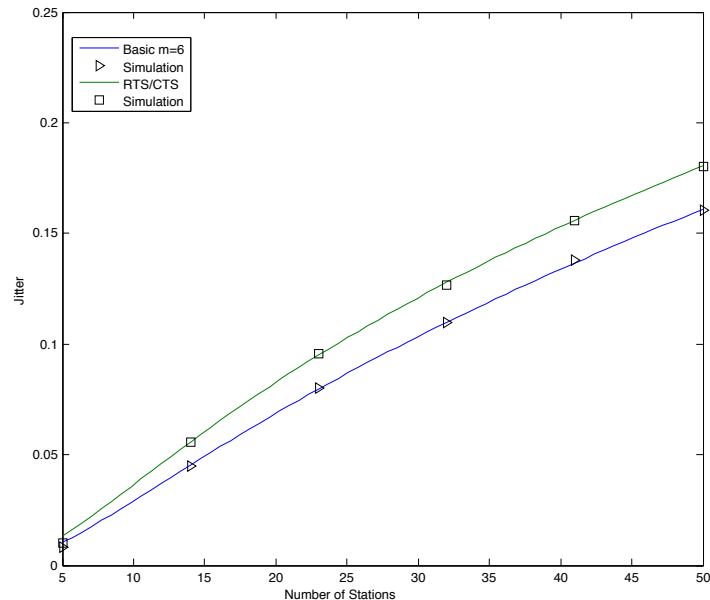
4.4 Αποτελέσματα Ανάλυσης Jitter

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης για το Jitter έχουν ληφθεί χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους του Πίνακα 4.2.

Το Σχήμα 4.8 επικυρώνει το μοντέλο για τον υπολογισμό του jitter εξίσωση (4.22) μιας και συμπίπτουν τα αποτελέσματα του αναλυτικού (γραμμές) και τα αποτελέσματα του προσομοιωτή (marks) και για τους δύο μηχανισμούς πρόσβασης *Basic* και *RTS/CTS*. Παρατηρούμε ότι ο βασικός μηχανισμός πρόσβασης επιτυγχάνει καλύτερα αποτελέσματα για για το Jitter σε σχέση με τον μηχανισμό *RTS/CTS*. Αυτό εξηγείται γιατί η ανταλλαγή RTS και CTS πακέτων σε χαμηλότερο ρυθμό μετάδοσης, έχει σαν αποτέλεσμα την μεγαλύτερη μέση καθυστέρηση, που προκαλείται από την σύγκρουση μεγαλύτερων πακέτων δεδομένων στον μηχανισμό *Basic*. Επίσης από ίδιο σχήμα προκύπτει ότι όσο αυξάνεται ο αριθμός των σταθμών αυξάνεται και το Jitter και μπορεί το γεγονός αυτό να ερμηνευ-

Πίνακας 4.2: System Parameter Values

Parameter	Value
Packet payload, l	8184 bits at 11 Mbits/s
Slot time, σ	20 μ s
MAC header	224 bits at 11 Mbits/s
PHY header	192 bits at 1 Mbits/s
RTS packet	160 bits at 1 Mbits/s + PHY header
ACK packet	112 bits at 11 Mbits/s + PHY header
CTS packet	112 bits at 1 Mbits/s + PHY header
DIFS	50 μ s
SIFS	10 μ s
Channel bit rate	11 Mbits/s
Minimum CW, W_0	32
Number of CW sizes, m'	5
Short retry limits	6

Σχήμα 4.8: Jitter versus n

θεί από το ότι όσο αυξάνεται ο αριθμός των σταθμών αυξάνεται και ο αριθμός των συγκρούσεων και επομένως οι σταθμοί που έχουν εμπλακεί σε σύγκρουση χρησιμοποιούν μεγαλύτερα στάδια για backoff. Όταν τελικά κάποιο πακέτο μεταδοθεί επιτυχώς από υψηλότερο στάδιο αυτό σημαίνει αυξημένη καθυστέρηση αποστολής και επομένως και μεγαλύτερη μεταβλητότητα στην καθυστέρηση επιτυχημένης αποστολής.

4.5 Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο ο παρουσιάστηκε ένα αναλυτικό μοντέλο για τον υπολογισμό της μέσης καθυστέρησης πακέτων και ένα αναλυτικό μοντέλο για τον υπολογισμό του Jitter. Και τα δύο μοντέλα βασίστηκαν στο μοντέλο του Bianchi, λαμβάνοντας όμως υπόψιν την απόρριψη του πακέτου μετά από έναν αριθμό αποτυχημένων μεταδόσεων όπως προτείνεται από το 802.11 standard. Η απόρριψη πακέτου βελτιώνει την απόδοση του δικτύου ως προς την καθυστέρηση των πακέτων, και μάλιστα μπορούμε να πετύχουμε μικρότερες τιμές καθυστέρησης, μειώνοντας το όριο των επαναμεταδόσεων, σε βάρος όμως των αριθμών πακέτων που θα απορριφθούν.

Μέρος II

Ανάπτυξη μοντέλου
υπολογισμού χωρητικότητας
σταθμών φωνής τοπικού δικτύου
IEEE 802.11 με συνύπαρξη
σταθμών δεδομένων

Κεφάλαιο 5

Περιγραφή συστήματος και ανάπτυξη μαθηματικού μοντέλου

Για την μεταφορά φωνής στο δίκτυο η υπηρεσία VoIP κάνει χρήση του πρωτόκολλου IP μετατρέποντας την φωνή σε πακέτα δεδομένων. Τα ασύρματα τοπικά δίκτυα WLAN λόγω της ευκολίας που προσφέρουν στην μετακίνηση του χρήστη, καθώς και τις σχετικά υψηλές ταχύτητες που προσφέρει το πρότυπο 802.11, δημιουργούν το κατάλληλο περιβάλλον για να εφαρμοστεί η τεχνολογία VoIP.

Από ότι φαίνεται με τα μέχρι τώρα δεδομένα, ολοένα και περισσότεροι χρήστες στρέφονται στην τεχνολογία VoIP λόγω του χαμηλότερου κόστους και της αύξησης των εταιρειών που προσφέρουν υπηρεσίες VoIP. Η μετάδοση όμως φωνής μέσω ασύρματων δικτύων απαιτεί την δημιουργία πολλών μικρών πακέτων και την επιβάρυνση αυτών με πολλούς headers, με αποτέλεσμα την μη αποδοτική λειτουργία των ασύρματων τοπικών δικτύων και τις σημαντικές καθυστερήσεις των πακέτων φωνής λόγω σημαντικών καθυστερήσεων πρόσβασης στο μέσο. Τα προαναφερθέντα καταστούν επιτακτική την ανάγκη της μελέτης της απόδοσης των ασύρματων τοπικών δικτύων που εξυπηρετούν συνδέσεις φωνής μέσω της ανάπτυξης μοντέλων για τον γρήγορο υπολογισμό μετρικών υπολογισμού της χωρητικότητας και της απόδοσης.

Το επίκεντρο αυτής της μεταπτυχιακής διατριβής είναι η ανάπτυξη ενός αναλυτικού μοντέλου για τον υπολογισμό της χωρητικότητας σταθμών φωνής σε ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο 802.11, όπου υπάρχει ταυτόχρονη μετάδοση πακέτων

φωνής και δεδομένων.

5.1 Βασική περιγραφή δικτύου

Το ασύρματο δίκτυο το οποίο θα μελετηθεί λειτουργεί χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο DCF και τους μηχανισμούς πρόσβασης *Basic* και *RTS/CTS*.

Το ασύρματο δίκτυο λειτουργεί με τις παρακάτω παραδοχές:

- (i) οι συνθήκες στο κανάλι μετάδοσης είναι ιδεατές (δεν υπάρχουν σφάλματα μετάδοσης και δεν υπάρχουν κρυφοί σταθμοί)
- (ii) οι χρόνοι διάδοσης μπορούν να αγνοηθούν γιατί οι σταθμοί βρίσκονται πολύ κοντά ο ένας με τον άλλο.
- (iii) όλοι οι σταθμοί φωνής και σταθμοί δεδομένων βρίσκονται εντός εμβέλειας, δηλαδή δεν υπάρχουν κρυφοί σταθμοί.
- (iv) ο υπολογισμός της χωρητικότητας γίνεται σε συνθήκες κορεσμού, π.χ όλοι οι σταθμοί έχουν πάντα κάποιο πακέτο προς μετάδοση.
- (v) τα πακέτα δεδομένων l_{data} είναι σταθερού μήκους μεγέθους 8184 bits.
- (vi) και το μέγεθος των πακέτων φωνής l_{voice} εξαρτάται από ο είδος της κωδικοποίησης.

Στην ενότητα αυτήν θα υπολογιστεί το μέσο μήκος πακέτου l , η μέση χρονική διάρκεια αποστολής πακέτου T_s και η μέση χρονική διάρκεια σύγκρουσης T_c για ένα υβριδικό σύστημα με N_{data} σταθμούς μετάδοσης πακέτων δεδομένων και N_{voice} σταθμούς μετάδοσης πακέτων φωνής. Ο συνολικός αριθμός των σταθμών του δικτύου είναι $n = N = N_{data} + N_{voice}$. Επίσης έχουν γίνει οι εξής παραδοχές:

- α) τα πακέτα φωνής l_{voice} θα μεταδίδονται με τον βασικό μηχανισμό πρόσβασης,
- β) τα πακέτα δεδομένων l_{data} θα μεταδίδονται χρησιμοποιώντας τον RTS/CTS μηχανισμό πρόσβασης.

5.2 Μαθηματικό μοντέλο

Το μαθηματικό μοντέλο που αναπτύχθηκε σε αυτήν την εργασία είναι βασισμένο στις παρακάτω εργασίες:

- i. στο μαθηματικό μοντέλο για τον υπολογισμό της απόδοσης που βασίζεται στις αλυσίδες Markov [6] και στην προέκταση της εργασίας από τον H. Wu [9] ώστε να συμπεριληφθεί στην μέτρηση της απόδοσης και η απόρριψη του πακέτου.
- ii. στο μαθηματικό μοντέλο που βασίζεται στην εργασία [6] και [9] για τον υπολογισμό της μέσης καθυστέρησης πακέτων [10]
- iii. στο μαθηματικό μοντέλο για τον υπολογισμό του Jitter [11]
- iv. στο μεθοδολογία για τον υπολογισμό της χωρητικότητας σταθμών φωνής σε ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο [12]

Επειδή το μέγεθος των πακέτων φωνής είναι διαφορετικό από το μέγεθος των πακέτων δεδομένων, θα πρέπει αρχικά να υπολογιστεί η πιθανότητα το μεταδιδόμενο πακέτο που συμμετάσχει σε μια μετάδοση ή μια σύγκρουση, να είναι πακέτο φωνής ή πακέτο δεδομένων. Όταν υπάρχει σύγκρουση στο δίκτυο τότε ο ελάχιστος αριθμός σταθμών που συμμετέχουν στην σύγκρουση είναι δύο. Η πιθανότητα να συμμετέχουν στην σύγκρουση τρεις σταθμοί, είναι πάρα πολύ μικρή και αγνοείται. Αν βρούμε όλους τους ανά δύο δυνατούς συνδυασμούς σταθμών δεδομένων και τους ανά δύο δυνατούς συνδυασμούς όλων των σταθμών και διαιρέσουμε τους ανά δύο συνδυασμούς των σταθμών δεδομένων με τους ανά δύο συνδυασμούς όλων των σταθμών, μπορούμε να βρούμε την πιθανότητα στην σύγκρουση να συμμετέχουν δύο σταθμοί δεδομένων.

Μπορούμε να βρούμε τους ανά δύο δυνατούς συνδυασμούς σταθμών δεδομένων CM_{data} που μπορεί να εμπλακούν σε μια σύγκρουση από την επόμενη εξίσωση:

$$CM_{data} = \binom{N_{data}}{2} = \frac{N_{data}!}{2! \cdot (N_{data} - 2)!} \quad (5.1)$$

Επίσης μπορούμε να βρούμε τους ανά δύο δυνατούς συνδυασμούς από όλους τους σταθμούς CM , από την επόμενη εξίσωση :

$$CM = \binom{N}{2} = \frac{N!}{2! \cdot (N - 2)!} \quad (5.2)$$

Από τις εξισώσεις 5.1 και 5.2 μπορούμε να υπολογίσουμε την P_{data} που είναι η πιθανότητα η σύγκρουση να περιέχει δύο ή περισσότερους σταθμούς δεδομένων από την επόμενη εξίσωση :

$$P_{data} = CM_{data}/CM \quad (5.3)$$

Τα πακέτα δεδομένων μεταδίδονται με τον μηχανισμό RTS/CTS ενώ τα πακέτα φωνής μεταδίδονται με τον μηχανισμό Basic και επιβαρύνονται από πολλούς headers. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τα πακέτα φωνής να είναι μεγαλύτερα σε μέγεθος από τα πακέτα δεδομένων. Έτσι εάν σε μια σύγκρουση υπάρχει τουλάχιστον ένας σταθμός φωνής, τότε η χρονική διάρκεια της σύγκρουσης υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψιν το μέγεθος του πακέτου φωνής.

Επίσης μπορούμε να υπολογίσουμε την P_{voice} που είναι η πιθανότητα στην σύγκρουση να συμμετέχει τουλάχιστον ένας σταθμός φωνής και ένας σταθμός δεδομένων, ή τουλάχιστον δύο σταθμοί φωνής από την επόμενη εξίσωση :

$$P_{voice} = 1 - P_{data} \quad (5.4)$$

Υπό την προϋπόθεση ότι υπάρχει μια επιτυχημένη μετάδοση, η πιθανότητα η μετάδοση να έγινε από σταθμό δεδομένων PS_{data} μπορεί να υπολογιστεί από την επόμενη εξίσωση :

$$PS_{data} = N_{data}/N \quad (5.5)$$

Υπό την προϋπόθεση ότι υπάρχει μια επιτυχημένη μετάδοση, η πιθανότητα η μετάδοση να έγινε από σταθμό φωνής PS_{voice} μπορεί να υπολογιστεί από την επόμενη εξίσωση :

$$PS_{voice} = 1 - PS_{data} \quad (5.6)$$

Θα ορίσουμε ως $RTPUDPID$ την επιβάρυνση στα πακέτα φωνής από τις επικεφαλίδες, και δίνεται από :

$$RTPUDPID = RTP + UDP + IP \quad (5.7)$$

Οι τιμές των T_s και T_c που όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3 είναι οι χρόνοι επιτυχημένης μετάδοσης και σύγκρουσης αντίστοιχα, εξαρτώνται από τον μηχανισμό πρόσβασης στο μέσο. Ορίζουμε ως T_c^{voice} την χρονική διάρκεια μιας σύγκρουσης στην οποία εμπλέκεται τουλάχιστον ένας σταθμός φωνής και T_c^{data} την χρονική διάρκεια μιας σύγκρουσης στην οποία εμπλέκονται δύο σταθμοί δεδομένων. Όταν σε μια σύγκρουση εμπλέκονται σταθμοί φωνής και σταθμοί δεδομένων τότε για τους λόγους που αναφέρθηκαν προηγουμένως, ως χρονική διάρκεια υπολογίζεται η μεγαλύτερη και είναι η T_c^{voice} .

Οι τιμές των T_c^{data} και T_c^{voice} δίνονται από :

$$T_c^{data} = DIFS + RTS + SIFS + CTS \quad (5.8)$$

$$T_c^{voice} = DIFS + H + RTPUDPID + \frac{l_{voice}}{C} + SIFS + ACK \quad (5.9)$$

Στην συνέχεια θα πρέπει να υπολογίσουμε την τιμή της T_s^{data} που είναι η χρονική διάρκεια μιας επιτυχημένης μετάδοσης πακέτου δεδομένων και T_s^{voice} που είναι η χρονική διάρκεια μιας επιτυχημένης μετάδοσης πακέτου φωνής.

Οι τιμές των T_s^{data} και T_s^{voice} δίνονται από τις επόμενες εξισώσεις:

$$T_s^{data} = DIFS + RTS + SIFS + CTS + SIFS + H + \frac{l_{data}}{C} + SIFS + ACK \quad (5.10)$$

$$T_s^{voice} = DIFS + H + RTPUDPID + \frac{l_{voice}}{C} + SIFS + ACK \quad (5.11)$$

Τελικά από τις εξισώσεις (5.3),(5.4),(5.5),(5.6),(5.8),(5.9),(5.10),(5.11) μπορούμε να υπολογίσουμε τους όρους T_s , T_c και l της εξίσωσης (3.15) του κεφαλαίου 3 που υπολογίζει την διεκπεραιωτική ικανότητα από τις παρακάτω εξισώσεις :

$$T_s = PS_{data} * T_s^{data} + PS_{voice} * T_s^{voice} \quad (5.12)$$

$$T_c = P_{data} * T_c^{data} + P_{voice} * T_c^{voice} \quad (5.13)$$

$$l = PS_{voice} * l_{voice} + PS_{data} * l_{data} \quad (5.14)$$

5.3 Χωρητικότητα φωνής

Στην βιβλιογραφία[21] ως χωρητικότητα φωνής ορίζεται ο μέγιστος αριθμός των συνεδριών σταθμών φωνής, που μπορούν να εξυπηρετηθούν ταυτόχρονα

χωρίς να ξεπεραστούν κάποιοι ειδικοί περιορισμοί ποιότητας όπως αυτοί αναφέρονται στο πρώτο κεφάλαιο, παράγραφος 1.9 .

Οι κωδικοποιητές φωνής ανάλογα με το packetization interval δημιουργούν πακέτα ανά σταθερά χρονικά διαστήματα. Εάν η καθυστέρηση μιας επιτυχούς μετάδοσης είναι μεγαλύτερη από από το χρονικό διάστημα δημιουργίας πακέτων, τότε νέα πακέτα θα δημιουργούνται χωρίς να έχουν αποσταλεί τα προηγούμενα. Αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα την προσωρινή αποθήκευση των νέων πακέτων, και την καθυστέρηση μετάδοσης πιθανόν πάνω από το όριο που σηματοδοτεί την καλή ποιότητα φωνής, με αποτέλεσμα την υποβάθμιση της ποιότητας της ομιλίας.

Η χωρητικότητα ενός δικτύου υπολογίζεται στο σημείο εκείνο που υπερβάλλονται οι περιορισμοί ποιότητας όπως έχουν περιγραφεί νωρίτερα. Στην εργασία [12] προτείνεται μια μεθοδολογία για τον υπολογισμό χωρητικότητας φωνής σε ένα δίκτυο όπου υπάρχουν μόνο σταθμοί φωνής.

Ένα σταθμός φωνής για να μπορεί να λειτουργεί αποδοτικά και να μπορεί να παρέχει ικανοποιητικές υπηρεσίες φωνής, θα πρέπει η διεκπεραιωτική του ικανότητα S_{single} να είναι μεγαλύτερη ή ίση από την διεκπεραιωτική ικανότητα S_{limit} (όριο) που χρειάζεται ένας σταθμός για να δημιουργεί και να αποστέλλει ένα νέο πακέτο φωνής. Αν η διεκπεραιωτική ικανότητα του σταθμού πέσει κάτω από αυτό το όριο τότε θα δημιουργούνται νέα πακέτα χωρίς αυτά να μπορούν να εξυπηρετηθούν με αποτέλεσμα να έχουμε πάλι την προσωρινή αποθήκευσή τους και τελικά την υποβάθμιση της ομιλίας.

Έτσι από την εξίσωση (3.15) μπορούμε να υπολογίσουμε την συνολική διεκπεραιωτική ικανότητα S_{voice} των σταθμών φωνής:

$$S_{voice} = \frac{PS_{voice} \cdot P_{tr} \cdot P_s \cdot I_{voice}}{(1 - P_{tr}) \cdot \sigma + P_{tr} \cdot P_s \cdot T_s + P_{tr} \cdot (1 - P_s) \cdot T_c} \quad (5.15)$$

Η διεκπεραιωτική ικανότητα ενός και μόνο σταθμού φωνής S_{single} δίνεται εάν την συνολική διεκπεραιωτική ικανότητα S_{voice} με τον αριθμό των σταθμών φωνής N_{voice} :

$$S_{single} = \frac{S_{voice}}{N_{voice}} \quad (5.16)$$

Θεωρώντας T_{pck} ως τον χρόνο που χρειάζεται κάποιος σταθμός για να δημιουργήσει ένα πακέτο φωνής ο οποίος χρόνος εξαρτάται από τον κωδικοποιητή φωνής,

τότε η διεκπεραιωτική ικανότητα ενός σταθμού φωνής θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση από το S_{limit} . Αν διεκπεραιωτική ικανότητα ενός σταθμού φωνής δεν πέφτει κάτω από αυτό το σημείο τότε η ποιότητα της μεταδιδόμενη φωνής είναι αποδεκτή.

Η τιμή της S_{limit} δίνεται από την επόμενη εξίσωση :

$$S_{limit} = \frac{l_{voice}}{T_{pck}} \quad (5.17)$$

5.4 Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο αναπτύχθηκε ένα απλό αναλυτικό μοντέλο το οποίο, υπολογίζει με ακρίβεια την χωρητικότητα σε ένα υβριδικό WLAN 802.11, όπου συνυπάρχουν σταθμοί δεδομένων και σταθμοί φωνής, χρησιμοποιώντας σαν δείκτη ποιότητας την διεκπεραιωτική ικανότητα ενός σταθμού.

Κεφάλαιο 6

Επικύρωση αποτελεσμάτων αναλυτικού μοντέλου με προσομοιωτή, χωρητικότητά

Στο αναλυτικό μοντέλο που αναπτύχθηκε έγινε υπολογισμός της διεκπεραιωτικής ικανότητας ώστε να μπορέσουμε να υπολογίσουμε την χωρητικότητα σε σταθμούς φωνής, σε ένα δίκτυο όπου συνυπάρχουν σταθμοί φωνής και σταθμοί δεδομένων.

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα επικυρώσουμε το αναλυτικό μοντέλο, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του για τον υπολογισμό της χωρητικότητας, με τα αποτελέσματα προσομοιωτή σε ένα δίκτυο στο οποίο για την κωδικοποίηση χρησιμοποιείται ο κωδικοποιητής G.711. Στην συνέχεια χρησιμοποιώντας το αναλυτικό μοντέλο θα μετρήσουμε την χωρητικότητα για τους υπόλοιπους κωδικοποιητές, τον G.729 και τον G.723.1

6.1 Παράμετροι συστήματος

Το σήμα της φωνής είναι αναλογικό και θα πρέπει να μετατραπεί σε ψηφιακό πριν μεταδοθεί στο δίκτυο. Ο κωδικοποιητής που χρησιμοποιείται για αυτόν το σκοπό, εκτελεί τις ακόλουθες εργασίες: i) δειγματοληψία ii) κβαντοποίηση και iii) κωδικοποίηση. Ο κωδικοποιητής δέχεται σαν είσοδο ένα αναλογικό σήμα και δημιουργεί πλαίσια σταθερού ή μεταβλητού μεγέθους. Όπως αναφέρθηκε στην

παράγραφο(1.2) κάθε κλήση VoIP συνίσταται σε δύο ροές Real Time Protocol (RTP). Μια επικεφαλίδα μεγέθους 40 bytes προστίθεται σε κάθε πακέτο φωνής (12 bytes RTP, 8 bytes UDP and 20 bytes IP)[8]. Επίσης επισυνάπτεται στο επίπεδο MAC μια 34 bytes επικεφαλίδα και σε κάθε πλαίσιο MAC επισυνάπτεται μια επικεφαλίδα φυσικού επιπέδου (PHY-Physical header). Στον πίνακα 6.1 πα-

Πίνακας 6.1: *Parameters of Commonly Used Voice Codecs*

Voice Codec		G.711	G.729	G.723.1	
Codec bit rate (Kbits/s)		64	8	5.3	6.3
Interval	Packet/sec	Voice Payload (bytes)			
10ms	100	80	10		
20ms	50	160	20		
30ms	33.33	240	30	20	24
40ms	25	320	40		
50ms	20	400	50		
60ms	16.67	480	60	40	48

ρουσιάζονται οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται ευρέως στην κωδικοποίηση φωνής. Σε κάθε κωδικοποίηση χρησιμοποιείται διαφορετικός αλγόριθμος συμπίεσης και ρυθμός μεταφοράς πληροφορίας. Το διεθνές standard για κωδικοποίηση φωνής σε τηλεφωνικές συνδιαλέξεις είναι το G.711. Οι υπόλοιποι κωδικοποιητές G.729 και G.723.1 χρησιμοποιούν χαμηλότερο ρυθμό μεταφοράς πληροφορίας αλλά πολυπλοκότερη κωδικοποίηση.

6.1.1 Επιβάρυνση πακέτων φωνής

Η κωδικοποίηση G.711 δημιουργεί εξ ορισμού πακέτα φωνής στα 64 Kbits/sec, δημιουργώντας ένα νέο πακέτο κάθε 20ms και συνολικά 50 πακέτα κάθε δευτερόλεπτο με ωφέλιμο φορτίο 160 bytes. Τελικά το μέγεθος του πακέτου αυξάνεται στα 234 bytes μετά την προσθήκη όλων των επιβαρύνσεων.(12 bytes RTP, 8 bytes UDP, 20 bytes IP, 34 bytes MAC). Το εύρος ζώνης που χρησιμοποιείται ανά κλήση για κάθε κωδικοποιητή φωνής παρουσιάζεται στον πίνακα 6.2

Όλες οι επικεφαλίδες που παρουσιάζονται στον πίνακα 6.2 μεταδίδονται με ταχύτητα 11 Mb/s. Η PHY επικεφαλίδα μεταδίδεται με ταχύτητα 1 Mb/s και προστίθεται σε κάθε πακέτο αυξάνοντας το μέγεθος κατά 24 bytes.

Οι παράμετροι που παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.3 αφορούν στοιχεία πα-

Πίνακας 6.2: *Overheads Effect on Voice Codecs*

Voice Codec	G.711	G.729	G.723.1	
Codec bit rate (Kbits/s)	64	8	5.3	6.3
Default packetization interval	20ms	20ms	30ms	
Voice packet size (bytes)	160	20	20	24
Packets per sec (using default interval)	50	50	33.3	
Voice packet size+headers except PHY header(bytes)	234	94	94	98
Bandwith used per call (Kbits/sec)	93.6	37.6	24.9	25.7

Πίνακας 6.3: *TYPICAL OVERHEADS OF A SINGLE G.711 VOICE PACKET TRANSMISSION OVER 802.1b*

Transmission parameter	Size (bytes)	Time (μ s)	Fraction (%)
DIFS		50.0	5.71
Min average channel access		310.0	35.38
Physical Header & Preamble	24	192.0	21.91
MAC header+FCS	34	24.7	2.82
RTP/UDP/IP	40	29.1	3.32
Voice payload	160	116.4	6.64
SIFS		10	1.14
Physical Header & Preamble	24	192.0	21.91
ACK	14	10.2	1.16
Total	296	876.2	100.00

κέτου, σύμφωνα με το 802.11b DCF και ταχύτητα 11 Mbits/sec, χρησιμοποιώντας κωδικοποίηση G.711, και δημιουργώντας πακέτα ανά διαστήματα των 20ms.

Όλα τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην συγκεκριμένη διπλωματική διατριβή, έχουν υπολογιστεί σύμφωνα με τις παραμέτρους του φυσικού επιπέδου Direct Spread Sequence Spectrume (DSSS) και παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.4

Στον Πίνακα 6.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την χωρητικότητα φωνής, χωρίς την ύπαρξη σταθμών δεδομένων από τους τρεις δημοφιλέστερους κωδικοποιητές (PA). Ο ίδιος πίνακας παρουσιάζει επίσης παρουσιάζει επίσης τα αποτελέσματα για την χωρητικότητα φωνής από την εργασία [13].

Παρατηρούμε ότι το προτεινόμενο μοντέλο ανάλυσης (PA) υπολογίζει παρόμοια αποτελέσματα όπως εκείνα που παρουσιάζονται στην εργασία [13].

Πίνακας 6.4: *important 802.11b parametrs used*

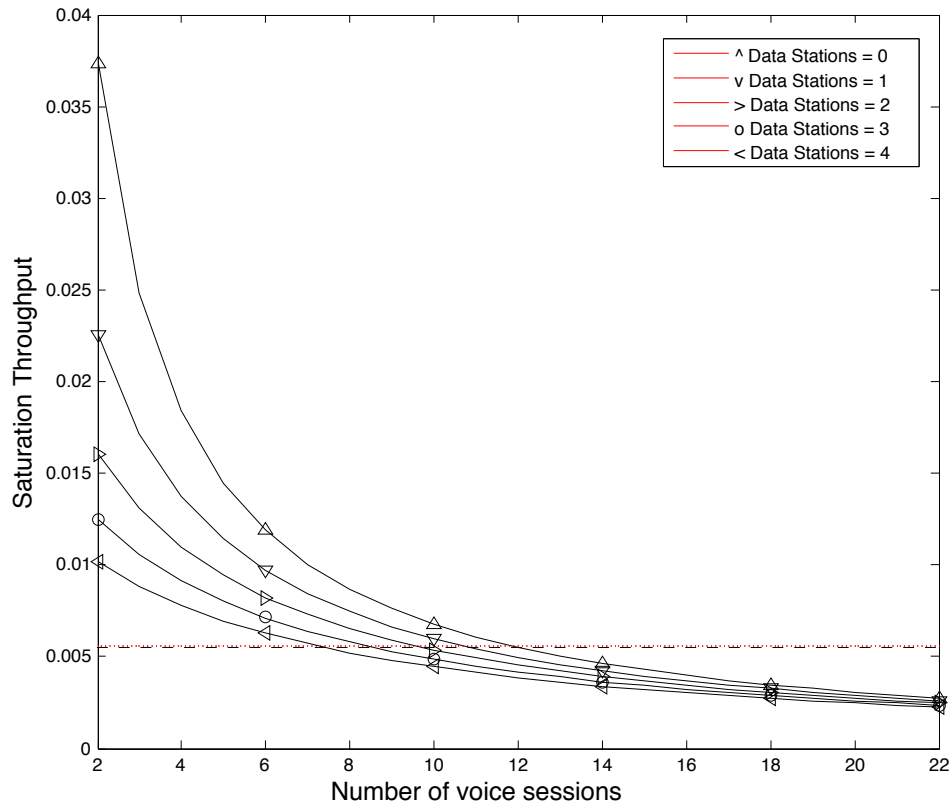
Parameter	Value
Slot	20 μ s
SIFS	10 μ s
DIFS=(2*slot+SIFS)	50 μ s
PHY layer header	112 bits (at 11 Mb/s)+PHY layer header
MAC layer header + FCS	272 bits (at 11 Mb/s)+PHY layer header
CW_{min}	32
CW_{max}	1024
Number of CW sizes, m'	5
Retry limit	6
Voice Codec	G.711
Interval	20ms
Packet payload	1280 bits
Voice Codec	G.729
Interval	20ms
Packet payload	1280 bits
Voice Codec	G.711
Interval	20ms
Packet payload	1280 bits
Channel bit rate	11 Mb/s

Πίνακας 6.5: *Comparison of maximum capacity of voice sessions*

Pkz	G.711		G.729		G.723.1	
	PA	[13]	PA	[13]	PA	[13]
10	7	6	7	7		
20	12	12	12	13		
30	15	15	19	19	19	19
40	19	18	24	23		
50	21	20	29	28		
60	23	22	33	32	34	33

6.2 Αποτελέσματα αναλυτικού και προσομοίωσης

Στο Σχήμα 6.1 παρουσιάζεται η διεκπεραιωτική ικανότητα για κάθε σταθμό φωνής με ή χωρίς σταθμούς δεδομένων και κωδικοποίηση G.711. Η χωρητικότητα φωνής παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.6 και ορίζεται ως το σημείο που η διεκπεραιωτική ικανότητα για το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα δημιουργίας πακέτων, διασταυρώνεται με την οριζόντια γραμμή της οποίας η τιμή S_{limit} είναι ίση με 0.00554.



Σχήμα 6.1: Voice Capacity Using G.711 Packetization Interval 20ms

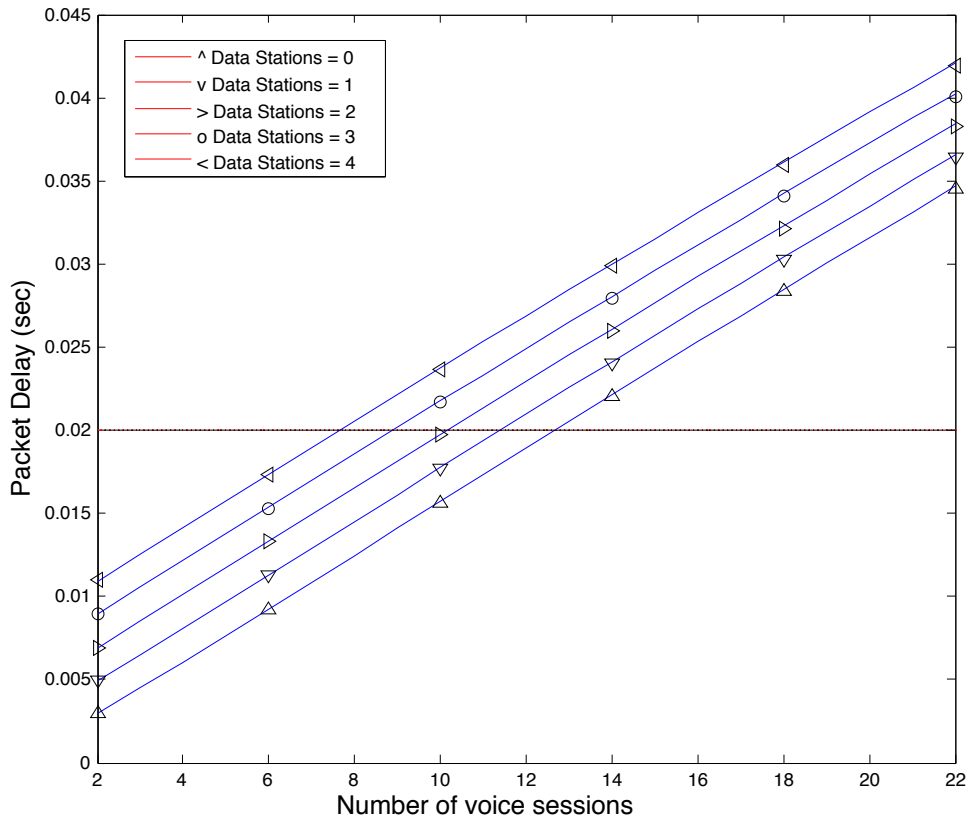
Πίνακας 6.6: voice capacity using G.711 packetization interval 20ms

Data Stations	Voice Sessions
0	12
1	10
2	9
3	8
4	7

Πίνακας 6.7: voice capacity using G.711 packetization interval 20ms

Data Stations	Voice Sessions
0	12
1	10
2	9
3	8
4	7

Επίσης στο Σχήμα 6.2 και στον Πίνακα 6.7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την χωρητικότητα φωνής σε σχέση με την μέση καθυστέρηση. Η χωρητικότητα φωνής είναι υπολογισμένη στο σημείο όπου η μέση καθυστέρηση για το



Σχήμα 6.2: Voice Capacity - Packet Delay Packetization Interval 20ms

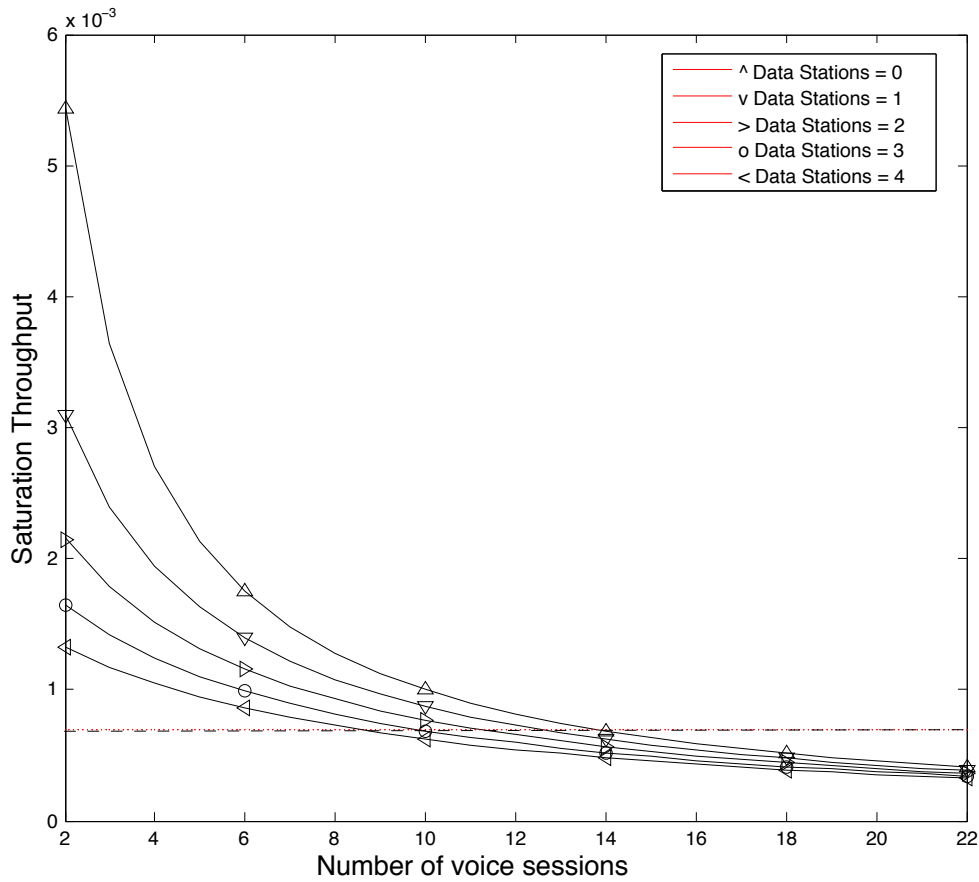
Πίνακας 6.8: voice capacity using G.729 packetization interval 20ms

Data Stations	Voice Sessions
0	13
1	12
2	11
3	9
4	8

συγκεκριμένο χρονικό διάστημα δημιουργίας πακέτων, διασταυρώνεται με την οριζόντια γραμμή της οποίας η τιμή είναι 20ms.

Από τα προηγούμενα μπορούμε να συμπεράνουμε ότι το προτεινόμενο αναλυτικό μοντέλο είναι αξιόπιστο γιατί παίρνουμε τα ίδια αποτελέσματα για την χωρητικότητα και από την μέτρηση για την μέση καθυστέρηση και από την μέτρηση για την διεκπεραιωτική ικανότητα.

Στο Σχήμα 6.3 παρουσιάζεται η διεκπεραιωτική ικανότητα για κάθε σταθμό φωνής με ή χωρίς σταθμούς δεδομένων και κωδικοποίηση G.729. Η χωρητικότητα φωνής παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.8 και ορίζεται ως το σημείο που η



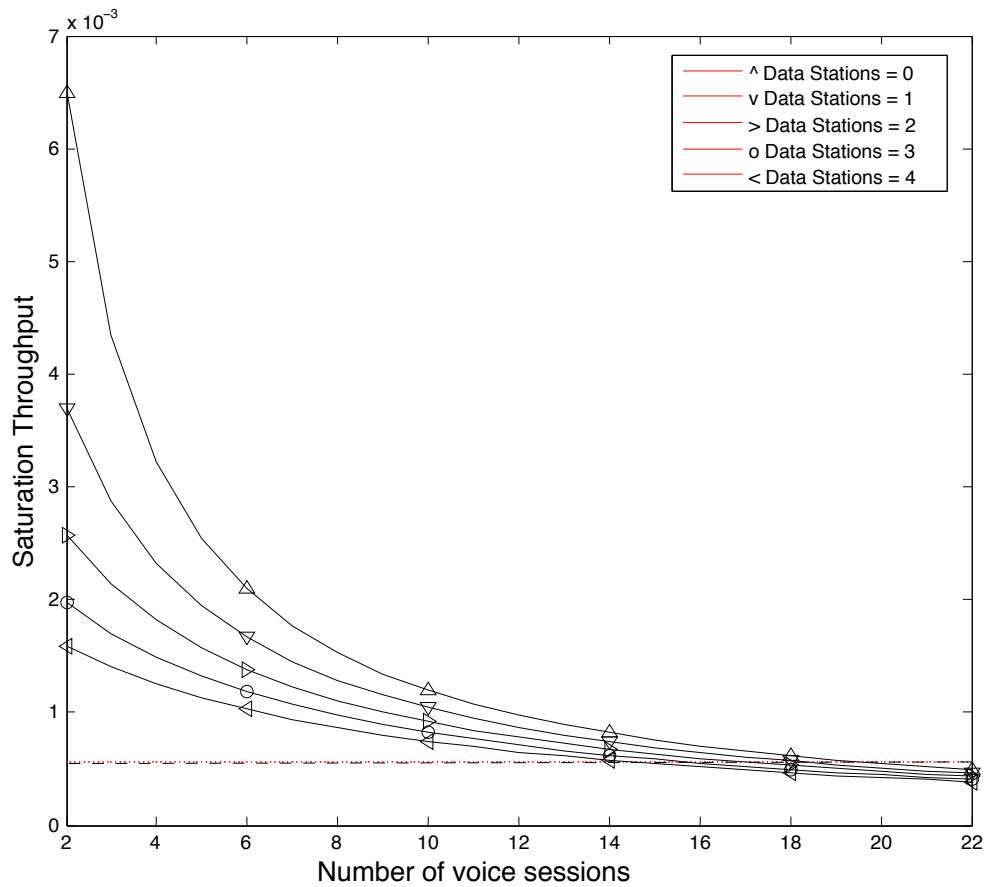
Σχήμα 6.3: Voice Capacity Using G.729 Packetization Interval 20ms

διεκπεραιωτική ικανότητα για το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα δημιουργίας πακέτων, διασταυρώνεται με την οριζόντια γραμμή της οποίας η τιμή S_{limit} είναι ίση με 0.0006935.

Πίνακας 6.9: voice capacity using G.723.1 packetization interval 30ms

Data Stations	Voice Sessions
0	19
1	18
2	17
3	15
4	14

Στο Σχήμα 6.4 παρουσιάζεται η διεκπεραιωτική ικανότητα για κάθε σταθμό φωνής με ή χωρίς σταθμούς δεδομένων και κωδικοποίηση G.723.1 και δημιουργία πακέτων κάθε 30ms. Η χωρητικότητα φωνής παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.9 και ορίζεται ως το σημείο που η διεκπεραιωτική ικανότητα για το συγκεκριμένο χρο-



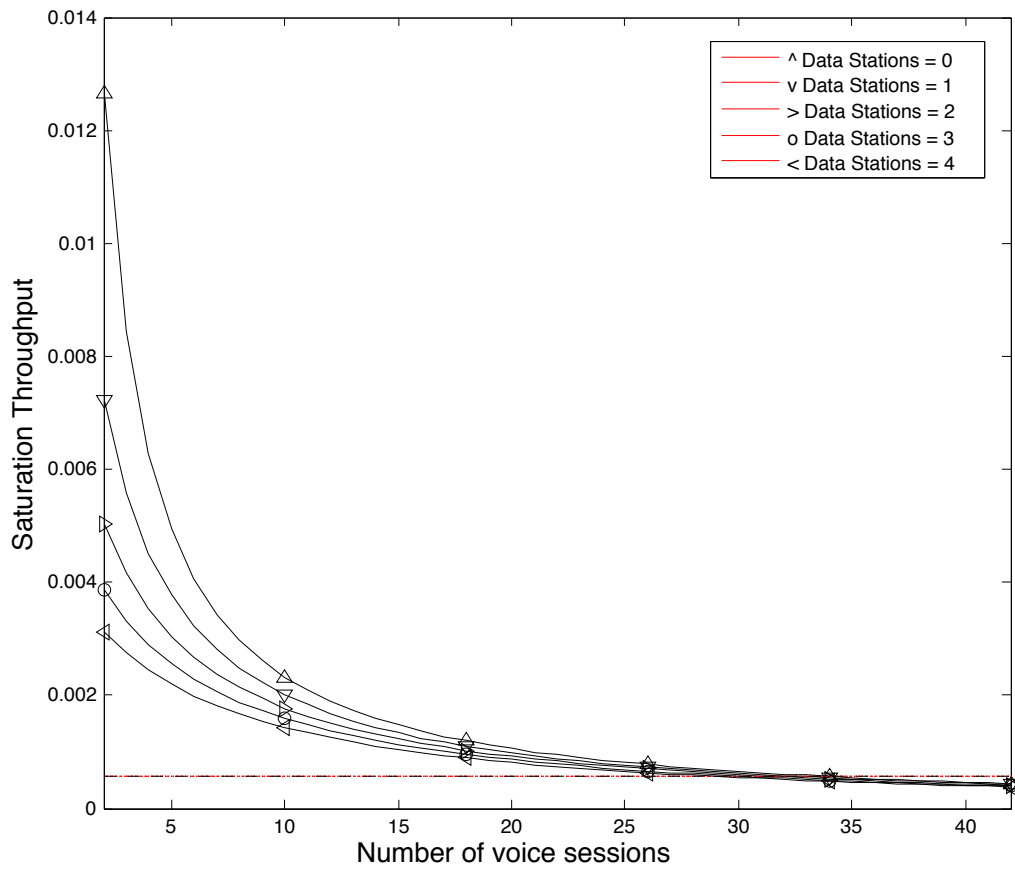
Σχήμα 6.4: Voice Capacity Using G.723.1 Packetization Interval 30ms

Πίνακας 6.10: voice capacity using g.723.1 packetization interval 60ms

Data Stations	Voice Sessions
0	34
1	33
2	32
3	30
4	29

νικό διάστημα δημιουργίας πακέτων, διασταυρώνεται με την οριζόντια γραμμή της οποίας η τιμή S_{limit} , είναι ίση με 0.0005548.

Στο Σχήμα 6.5 παρουσιάζεται η διεκπεραιωτική ικανότητα για κάθε σταθμό φωνής με ή χωρίς σταθμούς δεδομένων και κωδικοποίηση G.723.1 και δημιουργία πακέτων κάθε 60ms. Η χωρητικότητα φωνής παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.10 και ορίζεται ως το σημείο που η διεκπεραιωτική ικανότητα για το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα δημιουργίας πακέτων, διασταυρώνεται με την οριζόντια γραμμή της οποίας η τιμή S_{limit} , είναι ίση με 0.0005548.



Σχήμα 6.5: Voice Capacity Using G.723.1 Packetization Interval 60ms

6.3 Συμπεράσματα

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο αφού επικυρώσαμε τα αποτελέσματα του αναλυτικού με τα αποτελέσματα του προσομοιωτή, μετρήσαμε την χωρητικότητα των σταθμών φωνής για τους τρεις δημοφιλείς κωδικοποιητές G.711, G729, G723.1 σε ένα δίκτυο όπου συνυπάρχουν σταθμοί δεδομένων και φωνής. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι χάνουμε ένα έως δύο sessions φωνής για κάθε σταθμό δεδομένων που εισέρχεται στο δίκτυο.

Συμπεράσματα διατριβής

Σε αυτήν την διπλωματική διατριβή αρχικά αναφέρθηκαν οι βασικές αρχές λειτουργίας της τεχνολογίας VoIP και εξηγήθηκε η λειτουργία DCF των ασύρματων δικτύων, και των δύο μηχανισμών πρόσβασης Basic και RTC/CTS.

Στην συνέχεια παρουσιάστηκε ο τρόπος μέτρησης της διεκπεραιωτικής ικανότητας των σταθμών χρησιμοποιώντας τις αλυσίδες Markov, παρουσιάστηκε ο τρόπος μέτρησης της μέσης καθυστέρησης των πακέτων και του Jitter, και έγινε παρουσίαση μιας μεθοδολογίας για την μέτρηση της χωρητικότητας σταθμών φωνής σε ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο, σύμφωνα με αναλυτικά μοντέλα και μεθόδους που υπάρχουν στην διεθνή βιβλιογραφία.

Τελικά αναπτύχθηκε ένα αναλυτικό μοντέλο που υπολογίζει πάρα πολύ γρήγορα και απλούστερα σε σχέση με τα υπάρχοντα αναλυτικά μοντέλα που προτείνονται στην βιβλιογραφία, την χωρητικότητα σταθμών φωνής σε ένα υβριδικό WLAN όπου συνυπάρχουν σταθμοί φωνής και σταθμοί δεδομένων. Οι μαθηματικές σχέσεις που υπολογίζουν την χωρητικότητα σταθμών φωνής αναφέρονται και στους τρεις δημοφιλείς κωδικοποιητές G.711, G729, G723.1, και παρουσιάστηκαν οι απαιτήσεις για καλή ποιότητα φωνής από την άποψη της διεκπεραιωτικής ικανότητας.

Το αναλυτικό μοντέλο επαληθεύτηκε συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του με τα αποτελέσματα προσομοιωτή, ο οποίος αναπτύχθηκε σε περιβάλλον MATLAB και προσομοιώνει πολύ γρήγορα και με ακρίβεια το υπό μελέτη ασύρματο δίκτυο. Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν ότι με την προσθήκη ενός σταθμού δεδομένων η χωρητικότητα μειώνεται κατά ένα έως δυο sessions φωνής.

Βιβλιογραφία

- [1] Arlindo F. da Conceic, Jin Li, Dinei A. Florencio and Fabio Ko, ” *Is IEEE 802.11 ready for VoIP?*” *Department of Computer Science, Institute of Mathematics and Statistics, University of Sao Paulo Communication and Collaboration Systems, Microsoft Research,*
- [2] ITU-T Recommendation G.114. ”*One-way transmission time, may 2003.*”
- [3] M. Arranz, R. Aguθero, L. Munoz, and P. Mahonen. ”*Behavior of UDP-based applications over IEEE 802.11 wireless networks.*” *In 12th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), volume 2, pages F-72-F-77, San Diego, USA, september 2001.*
- [4] Y. J. Liang, N. Fa rber, and B. Girod. ”*Adaptive playout scheduling and loss concealment for voice communication over IP networks.*” *IEEETransactions on Multimedia, 5(4):532-543, December 2003.*
- [5] J. H. James, B. Chen, and L. Garrison.”*Implementing VoIP: a voice transmission performance progress report*” *IEEE Communication Magazine, pages 36-41, july 2004.*
- [6] G. Bianchi G (2000) ”*Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function*”, *IEEE Selected Areas In Communications VOL. 18, No. 3, MARCH 2000, pp. 535-547.*
- [7] *IEEE Standard for Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, Nov. 1997. P802.11.*
- [8] ”*Voice Capacity Analysis Of IEEE 802.11 Wireless Lans Supporting VoIP The Mediteranean Journal of Computers and Networks*”, *Vol 3, No 4, Oct 2007*

-
- [9] H. Wu, Y. Peng, K. Long, S. Cheng, J. Ma, "Performance of Reliable Transport Protocol over IEEE 802.11 Wireless LAN: Analysis And Enhancement", *IEEE INFOCOM'2002*.
- [10] P. Chatzimisios, A.C. Boucouvalas and V. Vitsas, "IEEE 802.11 packet delay – a finite retry limit analysis", *Proc. of the IEEE Global Telecommunications Conference (Globecom) 2003, Dec. 1-5, 2003, pp. 950-954*.
- [11] P. Raptis - V. Vitsas - K. Paparrizos, "Packet Delay Metrics for IEEE 802.11 Distributed Coordination Function", *Mobile Netw Appl, 05 December 2008*
- [12] D. Amanatiadis, V. Vitsas, A. Manitsaris, I. Mavridis, P. Chatzimisios and A. C. Boucouvalas, "Voice capacity analysis of IEEE 802.11 wireless lans supporting VoIP", *Mediterranean Journal of Computers and Networks, vol.3, no.4, pp.132-141, 102007*.
- [13] P. Chatzimisios, P. Raptis, V. Vitsas and K. Paparrizos, "Admission Control for VoIP and Data Traffic in IEEE 802.11 WLANs", *Invited Paper, in Proceedings of the First International Workshop on MODelling and DEsign of wireless mesh NETWORKS (MODENETs 2008), Athens, Greece, October 2008*.
- [14] R. Caputo, "Cisco Packetized Voice & Data integration". McGraw-Hill, 2000 ISBN: 0071347771.
- [15] *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification: High-Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band, IEEE 802.11b WG, Sept. 1999*.
- [16] *Ασύρματες Επικοινωνίες και Δίκτυα, Stallings William, Εκδ. Τζιόλα.*
- [17] *Δίκτυα υπολογιστών, Tanenbaum Andrew S., Εκδ. Κλειδάριθμος.*
- [18] *IEEE 802.11 WG, IEEE Std 802.11-2007 (Revision of IEEE Std 802.11-1999), International 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,*

- [19] http://el.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11
- [20] <http://el.wikipedia.org/wiki/VoIP>
- [21] M. Eiger, M Elaoud, D. Famolari, "*The effect of packetization on voice capacity in IEEE 802.11B networks*", *Proc 2nd IEEE Consumer Communications and Networking Conf. (CCNC 2005), Las Vegas, Nevada, USA, 3-6 Jan.*