

Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου

Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών

Μεταπτυχιακή Διατριβή στα Πληροφοριακά Συστήματα



**Μαθηματική Μοντελοποίηση Ασύρματων IEEE 802.11 Τοπικών
Δικτύων που περιλαμβάνουν Σταθμούς Φωνής (VoIP) και
Σταθμούς Δεδομένων, που χρησιμοποιούν Βασική Πρόσβαση**

Νικόλαος Γ. Καλαθάς

**Επιβλέπων Καθηγητής
Βασίλειος Βίτσας**

Ιούνιος 2013

Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου

Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών

**Μαθηματική Μοντελοποίηση Ασύρματων IEEE 802.11 Τοπικών
Δικτύων που περιλαμβάνουν Σταθμούς Φωνής (VoIP) και
Σταθμούς Δεδομένων, που χρησιμοποιούν Βασική Πρόσβαση**

Νικόλαος Γ. Καλαθάς

**Επιβλέπων Καθηγητής
Βασίλειος Βίτσας**

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή υποβλήθηκε
προς μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων για απόκτηση

μεταπτυχιακού τίτλου σπουδών
στα Πληροφοριακά Συστήματα

από τη Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών
του Ανοικτού Πανεπιστημίου Κύπρου

Ιούνιος 2013

Περίληψη

Στην εποχή μας η ανάπτυξη των ασύρματων τοπικών δικτύων (Wireless LANs) είναι πάρα πολύ μεγάλη. Σε αυτό βοήθησε η πτώση των τιμών του ασύρματου εξοπλισμού και η υποστήριξη της ασύρματης δικτύωσης από τα κινητά τηλέφωνα, τα tablets και τους φορητούς υπολογιστές.

Παράλληλα πολύ μεγάλο είναι το ενδιαφέρον του κοινού και της επιστημονικής κοινότητας για την χρησιμοποίηση και ανάπτυξη εφαρμογών φωνής που χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο IP (Voice over Internet Protocol, VoIP). Ο συνδυασμός των τεχνολογιών της ασύρματης δικτύωσης και των εφαρμογών VoIP συγκεντρώνει το ενδιαφέρον της ερευνητικής κοινότητας.

Το πρότυπο που επικρατεί στα ασύρματα τοπικά δίκτυα είναι το IEEE 802.11. Βασικό στοιχείο του προτύπου αυτού είναι η λειτουργία κατανεμημένου συντονισμού (Distributed Coordination Function DCF). Στην εργασία του ο Bianchi [1] χρησιμοποιώντας το μαθηματικό μοντέλο της αλυσίδας Markov, μοντελοποίησε την λειτουργία της DCF και υπολόγισε την διεκπεραιωτική ικανότητα κορεσμού ενός συστήματος (Saturation Throughput). Στη συνέχεια ο Haitao Wu [2] επέκτεινε το μοντέλο του Bianchi [1] ώστε να συμπεριλαμβάνει το όριο αναμετάδοσης πακέτου. Ο Π. Ράπτης στην εργασία του [3] βασιζόμενος στα μοντέλα των Bianchi και Wu, ανέπτυξε ένα μαθηματικό μοντέλο για τον υπολογισμό της μέσης καθυστέρησης μετάδοσης πακέτου και της διακύμανσης καθυστέρησης πακέτου (Jitter).

Στη παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή, μελετήθηκαν τα παραπάνω αναλυτικά μαθηματικά μοντέλα και επικυρώθηκαν συγκρίνοντας τα αποτελέσματα τους με αποτελέσματα προσομοίωσης από προσομοιωτή που κατασκευάστηκε σε περιβάλλον Matlab.

Στη συνέχεια αναπτύχθηκε ένα μαθηματικό μοντέλο για την λειτουργία κατανεμημένου συντονισμού (DCF) του προτύπου 802.11, θεωρώντας ότι συνυπάρχουν ασύρματοι σταθμοί που μεταδίδουν μόνο πακέτα φωνής και ασύρματοι σταθμοί που μεταδίδουν μόνο πακέτα δεδομένων (υβριδικό μοντέλο). Οι δύο τύποι σταθμών χρησιμοποιούν την βασική πρόσβαση μέσου. Το μαθηματικό μας μοντέλο υπολογίζει την διεκπεραιωτική ικανότητα κορεσμού, την μέση καθυστέρηση πακέτου και την χωρητικότητα φωνής (ο μέγιστος αριθμός συνεδριών φωνής που μπορούν να εξυπηρετηθούν ταυτοχρόνως από το δίκτυο, λαμβάνοντας υπ' όψιν συγκεκριμένους περιορισμούς ποιότητας), ενός ασύρματου IEEE 802.11 υβριδικού δικτύου. Η μεθοδολογία υπολογισμού της χωρητικότητας φωνής, βασίζεται στον υπολογισμό της διεκπεραιωτικής ικανότητας κορεσμού ενός σταθμού του δικτύου. Το προτεινόμενο αναλυτικό μοντέλο επικυρώθηκε συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του με τα αποτελέσματα προσομοιωτή.

Τα συμπεράσματα της μεταπτυχιακής αυτής διατριβής είναι ότι η βασική πρόσβαση μέσου (για τους σταθμούς δεδομένων) χρησιμοποιεί αποδοτικότερα το μέσο και ότι για κάθε ένα σταθμό δεδομένων που εισέρχεται στο ασύρματο δίκτυο, χάνεται μια συνεδρία φωνής.

Summary

In recent years the growth of Wireless Local Area Networks (WLANs) is enormous. The growth is supported by the decline of prices of wireless equipment and by the support for wireless networking from mobile phones, tablets and laptops.

There is a great interest of the public and the scientific community for developing voice applications over the IP protocol (Voice over Internet Protocol, VoIP). Combining the technologies of wireless networking and VoIP applications attracts the attention of the research community.

The dominant standard for wireless LANs is the IEEE 802.11. The key element of this standard is the Distributed Coordination Function (DCF). Bianchi [1] using Markov chain models the operation of DCF and calculates the saturation throughput of a WLAN. Haitao Wu [2] extended the model of Bianchi [1] to include the retransmission limit of a packet. P. Raptis in his work [3], based on models of Bianchi and Wu, developed a mathematical model to calculate the average packet delay and packet delay variation (Jitter).

In this thesis, the above analytical mathematical models are studied and validated by comparing its results with simulation results from simulator built in Matlab environment.

Then a mathematical model is developed for the Distributed Coordination Function (DCF) of the 802.11 standard, assuming coexisting wireless stations that transmit only voice packets and wireless stations that transmit only data packets (hybrid model). The two types of stations use the basic access mechanism. The proposed mathematical model calculates the saturation throughput, the average packet delay and voice capacity (the maximum number of voice sessions that can be served simultaneously by the network, taking into account specific restrictions quality), of an IEEE 802.11 wireless hybrid network. Our methodology for calculating voice capacity is based on the calculation of the saturation throughput of a single wireless station. The proposed analytical model was validated by comparing its results with results of simulation.

The conclusions of this master thesis is that the basic access mechanism (for data stations), uses efficiently the medium and that for each data station entering the wireless network, a voice session is lost.

Μέρος της μεταπτυχιακής αυτής διατριβής εστάλη προς δημοσίευση στο International Workshop on Computer-Aided Modeling Analysis and Design of Communication Links and Networks (CAMAD), το οποίο θα διεξαχθεί στο Βερολίνο τον Σεπτέμβριο του 2013.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω με όλη μου την θέρμη τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Βασίλειο Βίτσα ο οποίος σε όλη αυτή την συναρπαστική πορεία εκπόνησης της μεταπτυχιακής διατριβής μου, υπήρξε ο εμπνευστής και ο καθοδηγητής μου. Οι εύστοχες παρατηρήσεις του σε όλη την διάρκεια εκπόνησης της μεταπτυχιακής διατριβής μου και η ουσιαστική του βοήθεια σε κρίσιμα σημεία, ήταν καθοριστικοί παράγοντες για την επιτυχή έκβαση της προσπάθειας μου. Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, η οποία με στήριξε θερμά σε αυτό το εγχείρημα. Η κατανόηση και η ενθάρρυνση της συζύγου και των δύο κοριτσιών μου έπαιξαν σημαντικό ρόλο στην ολοκλήρωση της μεταπτυχιακής αυτής διατριβής. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως την σύζυγό μου, Ράππη Μαρία φιλόλογο, η οποία με βοήθησε στην ορθή σύνταξη του κειμένου και διόρθωσε τα εκφραστικά και ορθογραφικά λάθη.

Περιεχόμενα

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Εισαγωγή | 1 |
| 2 | VoIP (Voice over Internet Protocol) | 5 |
| 2.1 | Μεταφορά δεδομένων – Μεταφορά φωνής | 5 |
| 2.2 | Λειτουργία του VoIP | 7 |
| 2.3 | Media Gateways | 8 |
| 2.4 | Media Gateway Controller | 9 |
| 2.5 | Πρωτόκολλα Σηματοδοσίας | 10 |
| 2.5.1 | H. 323 | 10 |
| 2.5.2 | SIP (Session Initiation Protocol) | 13 |
| 2.5.3 | Media Gateway Control Protocol (MGCP) | 17 |
| 2.5.4 | Megaco | 18 |
| 2.6 | Σύγκριση πρωτοκόλλων | 19 |
| 2.7 | Ποιότητα υπηρεσίας (QoS) | 21 |
| 2.8 | Χρήση του VoIP στη πράξη | 21 |
| 2.9 | Πάροχοι υπηρεσιών VoIP | 23 |
| 2.10 | Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα της τεχνολογίας VoIP | 23 |
| 3 | 802.11 DCF | 25 |
| 3.1 | Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα | 25 |
| 3.2 | Distributed Coordination Function | 27 |
| 3.3 | Διεκπεραιωτική ικανότητα κορεσμού | 31 |
| 3.4 | Διεκπεραιωτική ικανότητα: Ανάλυση | 32 |
| 3.4.1 | Πιθανότητα μετάδοσης πακέτου | 32 |
| 3.4.2 | Διεκπεραιωτική ικανότητα (Throughput) | 39 |
| 3.5 | Αποτελέσματα μαθηματικού μοντέλου – Επικύρωση | 42 |
| 3.6 | Υπολογισμός διεκπεραιωτικής ικανότητας με όριο αναμετάδοσης πακέτου | 46 |
| 3.6.1 | Αποτελέσματα μαθηματικού μοντέλου Wu – Επικύρωση | 47 |
| 4 | Μέση καθυστέρηση πακέτου | 51 |
| 4.1 | Μοντελοποίηση της DCF | 51 |
| 4.2 | Μέση καθυστέρηση ανά στάδιο υποχώρησης | 52 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4.3 | Μέση καθυστέρηση πακέτου..... | 54 |
| 4.4 | Αποτελέσματα μαθηματικού μοντέλου υπολογισμού Μέσης Καθυστέρησης Πακέτου Επικύρωση..... | 54 |
| 4.5 | Διακύμανση καθυστέρησης πακέτου (Jitter) | 57 |
| 4.6 | Αποτελέσματα μαθηματικού μοντέλου υπολογισμού Jitter – Επικύρωση..... | 60 |
| 5 | Μαθηματικό μοντέλο ασύρματου τοπικού δικτύου που περιλαμβάνει σταθμούς φωνής και σταθμούς δεδομένων που χρησιμοποιούν βασική πρόσβαση (hybrid model) | 63 |
| 5.1 | Περιγραφή δικτύου – Παραδοχές..... | 63 |
| 5.2 | Κωδικοποιητές φωνής | 64 |
| 5.3 | Επιβάρυνση πακέτων φωνής..... | 66 |
| 5.4 | Υβριδικό σύστημα | 67 |
| 5.5 | Χωρητικότητα φωνής..... | 70 |
| 5.6 | Συμπεράσματα..... | 71 |
| 6 | Επικύρωση των αποτελεσμάτων του μαθηματικού μοντέλου με χρήση προσομοιωτή | 73 |
| 6.1 | Παράμετροι – Προσομοίωση..... | 73 |
| 6.2 | Αποτελέσματα | 75 |
| 6.3 | Συμπεράσματα..... | 81 |
| 7 | Συμπεράσματα | 83 |
| | Βιβλιογραφία | 87 |

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

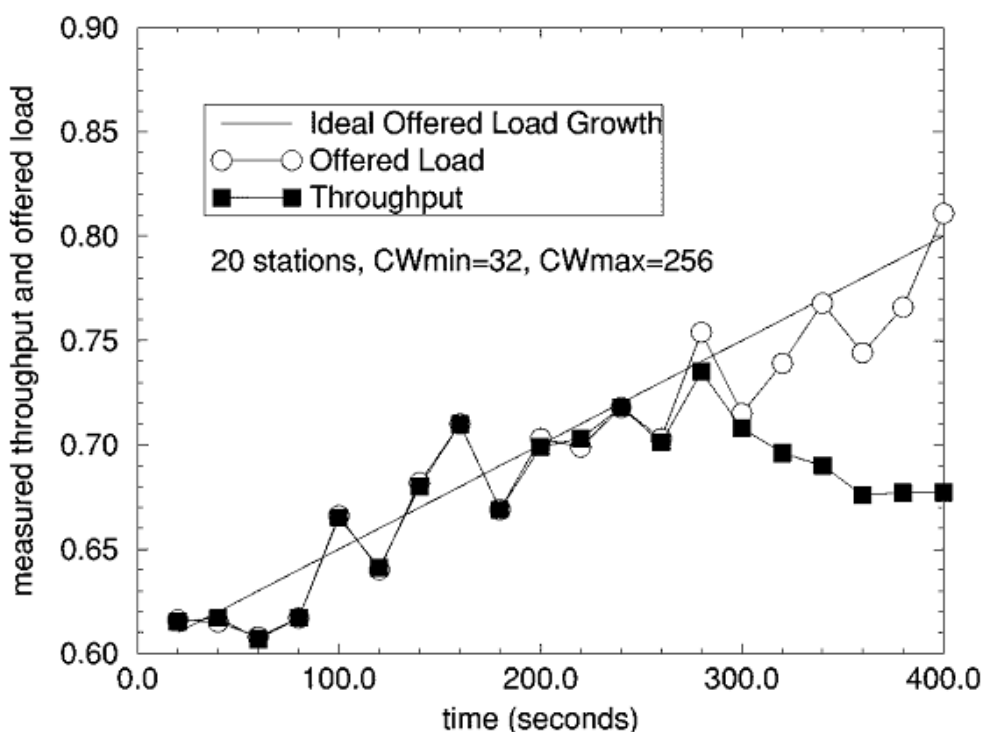
Τα ασύρματα τοπικά δίκτυα αναπτύσσονται ραγδαία τα τελευταία χρόνια. Στις μέρες μας η ασύρματη δικτύωση προσφέρει αξιοσημείωτη ταχύτητα, αξιοπιστία και χαμηλό κόστος εφαρμογής. Παράλληλα υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον για εφαρμογές φωνής μέσω ασυρμάτων δικτύων. Η τεχνολογία VoIP (Voice over IP) παρέχει τα σχετικά εργαλεία για την ανάπτυξη εφαρμογών φωνής μέσω του Internet Protocol (IP). Η αποδοτική λειτουργία της VoIP ασύρματης τεχνολογίας είναι ένα πεδίο μεγάλου ενδιαφέροντος.

Το κύριο πρωτόκολλο το οποίο χρησιμοποιείται από τα ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLANs) είναι το IEEE 802.11 [11]. Με το πρωτόκολλο αυτό καθορίζονται προδιαγραφές φυσικού επιπέδου (Physical layer) καθώς και προδιαγραφές ελέγχου πρόσβασης μέσου (Medium Access Control MAC). Σύμφωνα με το 802.11 MAC, υπάρχουν δύο τρόποι λειτουργίας: η λειτουργία σημειακού συντονισμού (Point Coordination Function PCF) και η λειτουργία κατανεμημένου συντονισμού (Distributed Coordination Function DCF). Η PCF είναι μια μέθοδος πρόσβασης η οποία χρησιμοποιεί το σημείο πρόσβασης (Access Point AP) ως συντονιστή του ποιος σταθμός θα αποκτήσει πρόσβαση στο μέσο. Η DCF είναι ένα σχήμα τυχαίας προσπέλασης μέσου που βασίζεται στο Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA) χαρακτηριστικό του 802.11 πρωτοκόλλου. Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή βασίζεται στην DCF.

Η λειτουργία κατανεμημένου συντονισμού χρησιμοποιεί δύο τεχνικές για την μεταφορά των πακέτων: την Βασική πρόσβαση μέσου και την Request To Send / Clear To Send (RTS/CTS) πρόσβαση μέσου. Η βασική πρόσβαση μέσου είναι ο εξ' ορισμού μηχανισμός πρόσβασης. Σύμφωνα με την βασική πρόσβαση, ένας ασύρματος σταθμός σε ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο μεταδίδει ένα πακέτο εάν το μέσο ανιχνευθεί ελεύθερο και οπισθοχωρεί εάν το μέσο ανιχνευθεί απασχολημένο. Σύμφωνα με την RTS/CTS πρόσβαση μέσου δύο μικρά σε μέγεθος πακέτα ανταλλάσσονται μεταξύ του αποστολέα (ο οποίος αποστέλλει ένα RTS πακέτο) και του παραλήπτη (ο οποίος ανταποκρίνεται με

ένα CTS πακέτο) για να δεσμευτεί το μέσο και στη συνέχεια να αποσταλεί το πακέτο δεδομένων.

Στην εργασία του ο G Bianchi [1] πρότεινε ένα αναλυτικό μαθηματικό μοντέλο, βασισμένο στην αλυσίδα Markov, για τον υπολογισμό της διεκπεραιωτικής ικανότητας κορεσμού (Saturation Throughput). Η Saturation Throughput υπολογίζεται σε συνθήκες δικτύου κατά τις οποίες κάθε ασύρματος σταθμός διαθέτει πάντα ένα πακέτο προς αποστολή. Η διεκπεραιωτική ικανότητα κορεσμού είναι το όριο στο οποίο συγκλίνει η διεκπεραιωτική ικανότητα ενός συστήματος καθώς το προσφερόμενο φορτίο αυξάνεται. Η διεκπεραιωτική ικανότητα κορεσμού παριστάνει το μέγιστο φορτίο που μπορεί ένα σύστημα να μεταφέρει σε σταθερές συνθήκες.



Σχήμα 1.1

Διεκπεραιωτική ικανότητα με σταδιακή αύξηση του προσφερόμενου φορτίου

Είναι γνωστό ότι το πρωτόκολλο 802.11 παρουσιάζει κάποιου τύπου αστάθεια. Για την απεικόνιση της ασταθούς αυτής συμπεριφοράς, ο Bianchi στην εργασία του [1] παρουσίασε το διάγραμμα του σχήματος 1.1 το οποίο κατασκευάστηκε με δεδομένα από προσομοιώσεις που έτρεξε, κατά τις οποίες το προσφερόμενο φορτίο αυξάνει γραμμικά ως προς τον χρόνο. Στο σχήμα 1.1 η ευθεία γραμμή παριστά το ιδεατό προσφερόμενο φορτίο κανονικοποιημένο ως προς την χωρητικότητα του ασύρματος καναλιού. Το προσφερόμενο φορτίο της προσομοίωσης δημιουργείται σύμφωνα με μια

διαδικασία Poisson άφιξης πακέτων σταθερού μεγέθους (8184 bits). Στο διάγραμμα καταγράφονται το προσφερόμενο φορτίο και η διεκπεραιωτική ικανότητα του συστήματος μετρημένα ανά 20 s και κανονικοποιημένα ως προς τον ρυθμό μετάδοσης του ασύρματου καναλιού.

Από το σχήμα παρατηρείται ότι η διεκπεραιωτική ικανότητα που μετρήθηκε ακολουθεί στενά το μετρημένο προσφερόμενο φορτίο για τα πρώτα 260 s της προσομοίωσης. Στη συνέχεια η διεκπεραιωτική ικανότητα μειώνεται μέχρι την τιμή 0.68 και διατηρείται στη συνέχεια σε αυτή την τιμή, αν και το προσφερόμενο φορτίο αυξάνει. Η τιμή αυτή είναι η διεκπεραιωτική ικανότητα κορεσμού και αποτελεί την διεκπεραιωτική ικανότητα του συστήματος σε συνθήκες υπερφόρτωσης.

Η βασική παραδοχή του μοντέλου του Bianchi [1] είναι ότι ένα πακέτο συγκρούεται με σταθερή πιθανότητα σε κάθε προσπάθεια μετάδοσης του, ανεξάρτητα από τον αριθμό των αναμεταδόσεων του.

Το μοντέλο του Bianchi [1] επεκτάθηκε από τον H Wu [2] έτσι ώστε να λαμβάνεται υπ' όψιν η απόρριψη του πακέτου όταν έχει επιτευχθεί το όριο αναμετάδοσης του. Με βάση το αναλυτικό μοντέλο του Bianchi [1] και την επέκταση του από τον Wu [2], ένα αναλυτικό μοντέλο αναπτύχθηκε από τον Ράπτη [3] για τον υπολογισμό της μέσης καθυστέρησης πακέτου (average packet delay) και της διακύμανσης καθυστέρησης πακέτου (jitter).

Σε αυτή την μεταπτυχιακή διατριβή και θεωρώντας τις εργασίες των Bianchi [1], Wu [2] και Ράπτη [3], αναπτύχθηκε ένα μαθηματικό μοντέλο το οποίο υπολογίζει την διεκπεραιωτική ικανότητα κορεσμού, την μέση καθυστέρηση πακέτου και την χωρητικότητα φωνής σε ένα υβριδικό ασύρματο τοπικό δίκτυο στο οποίο σταθμοί φωνής και σταθμοί δεδομένων εκπέμπουν ταυτόχρονα. Ως χωρητικότητα φωνής ορίζεται ο μέγιστος αριθμός συνεδριών φωνής που μπορούν να εξυπηρετηθούν ταυτοχρόνως από το δίκτυο, λαμβάνοντας υπ' όψιν συγκεκριμένους περιορισμούς ποιότητας [6], [7].

Με βάση την διεκπεραιωτική ικανότητα κορεσμού ενός σταθμού, αναπτύχθηκε μια μεθοδολογία για τον υπολογισμό της χωρητικότητας φωνής. Η χωρητικότητα φωνής υπολογίστηκε για τρεις δημοφιλείς κωδικοποιητές φωνής: G.711, G.729 και G.723.1. Επιπρόσθετα μελετήθηκε η επίδραση της μεταφοράς πακέτων δεδομένων (από σταθμούς δεδομένων) στην χωρητικότητα φωνής.

Το μαθηματικό μοντέλο που αναπτύχθηκε, επικυρώθηκε συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του με αποτελέσματα που προήλθαν από προσομοίωση. Το πρόγραμμα

που προσομοιώνει την λειτουργία ενός ασύρματου τοπικού υβριδικού δικτύου, δημιουργήθηκε στο περιβάλλον Matlab. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συμπίπτουν με αυτά του αναλυτικού μοντέλου.

Τα πλεονεκτήματα του μαθηματικού μοντέλου που αναπτύχθηκε στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή είναι η απλότητα, η ταχύτητα στην έκδοση αποτελεσμάτων και η εύκολη υλοποίηση σε προγραμματιστικό περιβάλλον.

Κεφάλαιο 2

VoIP (Voice over Internet Protocol)

Ο όρος VoIP είναι ακρωνύμιο του “Voice over IP” και πολύ απλά θα μπορούσαμε να πούμε ότι αναφέρεται στις τηλεφωνικές υπηρεσίες μέσω του διαδικτύου – Internet. Εάν η σύνδεση που διαθέτει κάποιος χρήστης έχει μια εύλογη ταχύτητα, τότε θα μπορούσε να την χρησιμοποιήσει έτσι ώστε να λαμβάνει τηλεφωνικές υπηρεσίες μέσω του διαδικτύου χωρίς την μεσολάβηση των παραδοσιακών τηλεφωνικών εταιρειών.

Η τεχνολογία VoIP είναι ανερχόμενη σήμερα και με την βελτίωση της ποιότητας του Internet από πλευράς των παρόχων (ISP’s) καθώς και με την θεαματική αύξηση της ταχύτητας που προσφέρεται, γίνεται πλέον πολύ δελεαστική για ιδιώτες και εταιρείες. Το πιο σημαντικό όφελος που προσφέρει η τεχνολογία VoIP είναι το οικονομικό. Το τηλεφωνικό κόστος μπορεί να μειωθεί δραματικά μέχρι και σε μερικές περιπτώσεις, να μηδενισθεί. Υπάρχουν βέβαια και άλλα πλεονεκτήματα αλλά και μειονεκτήματα για τα οποία θα γίνει αναφορά στην παράγραφο 2.10.

2.1 Μεταφορά δεδομένων – Μεταφορά φωνής (Data transferring - Voice transferring)

Η φωνή, σε ένα συμβατικό τηλεφωνικό δίκτυο, μεταδίδεται με την διαδικασία της πλήρως αμφίδρομης λειτουργίας (full duplex mode). Με τον όρο full duplex εννοούμε ότι μεταξύ του καλούντος και του καλούμενου, αποκαθίστανται δύο κυκλώματα (circuits), ένα για αποστολή και ένα για λήψη. Ένα κύκλωμα φωνής (voice circuit) αποκαθίσταται, όταν ένας συνδρομητής επιθυμεί να συνομιλήσει μέσω τηλεφώνου με κάποιον άλλο συνδρομητή. Τα κύκλωμα μεταξύ των δύο αποκαθίσταται από μια διαδικασία σηματοδότησης. Ο καλούμενος συνδρομητής διαθέτει μια «τηλεφωνική διεύθυνση» ένα τηλεφωνικό αριθμό δηλαδή (αποτελούμενο από 10 ψηφία για την

Ελλάδα). Με βάση την ακολουθία ψηφίων που σχηματίζει ο καλών, δημιουργείται το κύκλωμα μεταξύ του καλούντος και του καλουμένου (circuit switching). Το κύκλωμα αυτό διατηρείται όσο διαρκεί και η συνομιλία. Όταν η συνομιλία τερματισθεί, τότε διακόπτεται και το κύκλωμα (με το «κρέμασμα» του ακουστικού από έναν από τους δύο συνομιλητές). Είναι χρήσιμο να προσθέσουμε εδώ ότι η ακολουθία των ψηφίων (τηλεφωνικός αριθμός) αποστέλλεται μια φορά κατά την έναρξη της σύνδεσης. Η όλη διαδικασία εγκαθίδρυσης κυκλώματος, διατήρησης της συνδεσιμότητας και τέλος διακοπής του κυκλώματος ονομάζεται σηματοδότηση (signaling).

Τα σημερινά τηλεφωνικά δίκτυα είναι ψηφιακά. Αυτό σημαίνει ότι η φωνή δεν μεταφέρεται ως αναλογικό σήμα, αλλά ως ψηφιακό. Πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι για να μπορέσει να μεταφερθεί η φωνή από τον ψηφιακό εξοπλισμό του τηλεφωνικού δικτύου, θα πρέπει να μετατραπεί με κάποιο τρόπο σε ψηφιακό σήμα. Αυτό επιτυγχάνεται με τους κωδικοποιητές (encoders), από τους οποίους ο πιο δημοφιλής είναι ο G.711.

Προηγουμένως παρουσιάστηκε εν συντομία, η διαδικασία σηματοδότησης σε ένα κύκλωμα φωνής. Η σηματοδότηση όσον αφορά στη μεταφορά των δεδομένων είναι αρκετά διαφορετική. Η μεταφορά δεδομένων επιτυγχάνεται με την χρήση πακέτων δεδομένων. Ένα πακέτο αποτελείται από μια επικεφαλίδα και το φορτίο δεδομένων (payload) που μεταφέρει. Η επικεφαλίδα συνήθως περιλαμβάνει την διεύθυνση του παραλήπτη όπως και την διεύθυνση του αποστολέα του πακέτου. Επίσης περιέχονται στην επικεφαλίδα πληροφορίες ελέγχου όπως η CRC ακολουθία για τον εντοπισμό λαθών κατά την μεταφορά, πληροφορίες για την προτεραιότητα του πακέτου κλπ. Κάθε πακέτο δεδομένων αποστέλλεται προς τον προορισμό του ανεξάρτητα από τα άλλα (packet switching). Κάθε πακέτο δηλαδή θα πρέπει να βρει την δική του διαδρομή προς τον προορισμό.

Τα ψηφιακά κυκλώματα φωνής του τηλεφωνικού δικτύου (PSTN) διαθέτουν πλαίσια 24 οκτάδων (T1 DS1) ή 32 οκτάδων (E1). Κάθε οκτάδα (8-bit octet) αντιπροσωπεύει ένα κύκλωμα φωνής. Το κύκλωμα αποκαθίσταται χρησιμοποιώντας το Initial Address System του CCITT Signaling System N. 7 ή μια ακολουθία DTMF τόνων στην οποία ακολουθία κάθε τόνος αντιπροσωπεύει ένα ψηφίο από το 0 έως το 9. Μετά την αποκατάσταση του κυκλώματος δεν απαιτούνται περαιτέρω μηνύματα διεύθυνσης ή τόνοι DTMF [12].

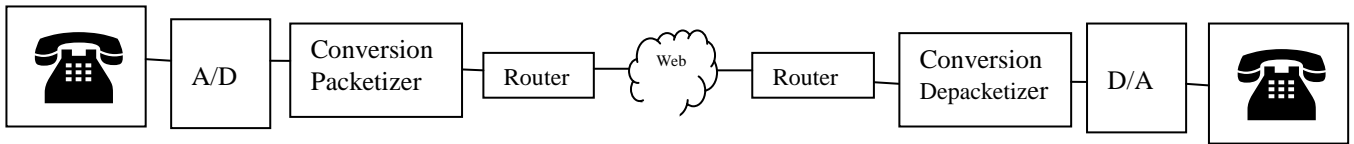
Στην περίπτωση της μεταφοράς δεδομένων χρησιμοποιούνται επίσης πλαίσια αλλά κάθε πλαίσιο έχει μια επικεφαλίδα. Η δομή του πλαισίου και ο τρόπος χρήσης των διάφορων bytes καθορίζονται από μια διαδικασία που ονομάζεται **πρωτόκολλο**.

Από την παραπάνω ανάλυση διαφαίνεται ότι υπάρχουν δύο διαφορετικές τεχνολογίες όσον αφορά στη μεταφορά πληροφοριών. Μια για την μεταφορά δεδομένων (Data Communication) και μια για την μεταφορά φωνής (Digital Voice Communication). Η δυνατότητα να συνδυαστούν οι δύο αυτές διαφορετικές τεχνολογίες σε μία προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα.

2.2 Λειτουργία του VoIP

Στο παρακάτω σχήμα 2.1 παρουσιάζεται ένα απλοποιημένο διάγραμμα με βάση το οποίο θα εξηγηθεί η λειτουργία του VoIP. Συγκεκριμένα κινούμενοι από αριστερά προς τα δεξιά, η τηλεφωνική συσκευή παράγει ένα αναλογικό σήμα το οποίο μετατρέπεται σε ψηφιακό χρησιμοποιώντας έναν από τους διαθέσιμους κωδικοποιητές. Ο κωδικοποιητής που θα χρησιμοποιηθεί είναι επιλογή του σχεδιαστή του δικτύου. Στον πίνακα 2.1 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά δημοφιλών κωδικοποιητών. Στη συνέχεια η δυαδική έξοδος του κωδικοποιητή εφαρμόζεται σε μια συσκευή μετατροπής (conversion device – packetizer) η οποία με την σειρά της δημιουργεί το φορτίο (payload) ή αλλιώς την πληροφορία που θα μεταφερθεί με το IP πακέτο. Η έξοδος του μετατροπέα αυτού είναι IP πακέτα τα οποία θα μεταφερθούν μέσω του διαδικτύου προς τον απομακρυσμένο παραλήπτη. Τα IP πακέτα εφαρμόζονται σαν είσοδος σε ένα router ο οποίος είναι υπεύθυνος για την αποστολή τους στο διαδίκτυο.

Στην δεξιά πλευρά του σχήματος 2.1 ο router παραλαμβάνει τα IP πακέτα και τα οδηγεί στην συσκευή μετατροπής η οποία αφαιρεί τις επικεφαλίδες, αποθηκεύει το φορτίο του πακέτου και στην συνέχεια το οδηγεί ως είσοδο στον αποκωδικοποιητή ο οποίος μετατρέπει το ψηφιακό σήμα σε αναλογικό. Το αναλογικό σήμα εφαρμόζεται σε μια τηλεφωνική συσκευή. Σημειώνεται εδώ ότι ο αποκωδικοποιητής θα πρέπει να είναι συμβατός με τον κωδικοποιητή του αποστολέα.



Σχήμα 2.1
Απλοποιημένη λειτουργία VoIP

Πίνακας 2.1
Χαρακτηριστικά δημοφιλών κωδικοποιητών

| Codec | Voice bit rate (Kbps) | Voice frame size (bytes) | Packets per second | Packet bit rate (Kbps) |
|---------|-----------------------|--------------------------|--------------------|------------------------|
| G.711 | 64 | 80 | 100 | 96 |
| G.723.1 | 6,3 | 30 | 26 | 14,6 |
| G.726 | 32 | 40 | 100 | 64 |
| G.728 | 16 | 20 | 100 | 48 |
| G.729a | 8 | 10 | 100 | 40 |

2.3 Media Gateways

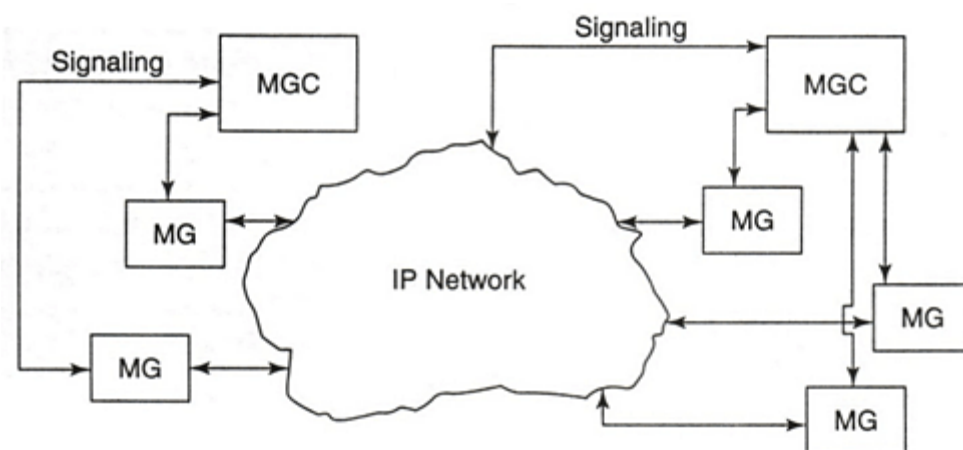
Η παραπάνω επεξήγηση της λειτουργίας του VoIP είναι αρκετά απλοποιημένη μια και δεν αναφέρθηκε καθόλου η ύπαρξη των gateways (θυρών – Media Gateways). Η Media Gateway είναι ένας εξυπηρετητής (server), η θέση του οποίου συνήθως είναι στα όρια του δικτύου και διενεργεί βασικές διεργασίες μεταγωγής. Είναι μέρος του physical layer. Η gateway ρυθμίζεται από μια συνάρτηση ελέγχου η οποία τοποθετείται σε ένα ελεγκτή (gateway controller). Η Media Gateway μαζί με τον ελεγκτή της είναι απαραίτητα στοιχεία για την μεταφορά των πακέτων φωνής από τα δίκτυα δεδομένων [12, [13]. Κύρια χαρακτηριστικά της είναι:

- Πραγματοποιεί την A/D μετατροπή.
- Μετατρέπει ένα DS0 ή E0 σήμα σε ψηφιακό σήμα συμβατό με IP δίκτυα ή ATM δίκτυα.
- Υποστηρίζει διαφόρων τύπων δίκτυα (δίκτυα χαλκού, οπτικών ινών, ασύρματα, CATV).
- Υποστηρίζει διάφορα πρωτόκολλα δεδομένων και φωνής.

- Παρέχει διαπροσωπεία (interface) ανάμεσα στον εαυτό της και τον ελεγκτή (gateway controller). Εδώ εμπλέκονται τα πρωτόκολλα SIP, H.323, MGCP, Megaco (H.248).
- Μπορεί να χειρισθεί μεταγωγή και επεξεργασία μέσου σε PCM, ATM και IP δίκτυα.
- Κατά την μεταφορά φωνής μπορεί να εμπλέκεται μια από τις παρακάτω 4 κατηγορίες:
 1. Standard PCM (E0/E1 ή DS0/DS1)
 2. ATM over AAL1/AAL2
 3. IP-based RTP/RTCP
 4. Frame Relay

2.4 Media Gateway Controller

Ο ελεγκτής της gateway ή αλλιώς MGC (Media Gateway Controller) πραγματοποιεί την λειτουργία σηματοδότησης στα δίκτυα VoIP. Στην βιβλιογραφία αναφέρεται ως *softswitch* αν και στην ουσία δεν υπάρχουν μεταγωγείς αλλά διακομιστές οι οποίοι ελέγχουν τις gateways. Η λειτουργία ενός MGC διευκρινίζεται στο σχήμα 2.2 [14].



Σχήμα 2.2
Media Gateway Controller

Ο MGC μπορεί να ελέγχει αρκετές gateways. Συνήθως οι ελεγκτές τοποθετούνται με τέτοιο τρόπο στο δίκτυο, έτσι ώστε αν κάποιος δυσλειτουργεί να αναλάβει κάποιος εφεδρικός του. Ο MGC εκτελεί εργασίες σηματοδοσίας, δηλαδή:

- Εγκαθίδρυση τηλεφωνικής σύνδεσης
- Διατήρηση αυτής της σύνδεσης
- Διακοπή της σύνδεσης όταν οι συνομιλούντες ολοκληρώσουν την συνομιλία τους.

Υπάρχουν τέσσερα πιθανά πρωτόκολλα σηματοδοσίας μεταξύ των MGC και gateway:

- H.323, εφαρμόζεται στην περίπτωση που όλα τα στοιχεία του δικτύου (Network Elements NEs) διαθέτουν software intelligence.
- SIP, εφαρμόζεται στην περίπτωση που τα ακραία στοιχεία του δικτύου διαθέτουν software intelligence, ενώ το ίδιο το δίκτυο όχι.
- MGCP, είναι ένα εναλλακτικό πρωτόκολλο.
- MEGACO (H.248), εφαρμόζεται όταν τα ακραία στοιχεία του δικτύου δεν διαθέτουν software intelligence ενώ το ίδιο το δίκτυο διαθέτει.

2.5 Πρωτόκολλα σηματοδοσίας

Τα βασικά πρωτόκολλα σηματοδοσίας είναι τα :

- H.323
- SIP (Session Initiation Protocol)
- Media Gateway Control Protocol (MGCP)
- Megaco (ITU-T Rec. H.248 Ref. 13)

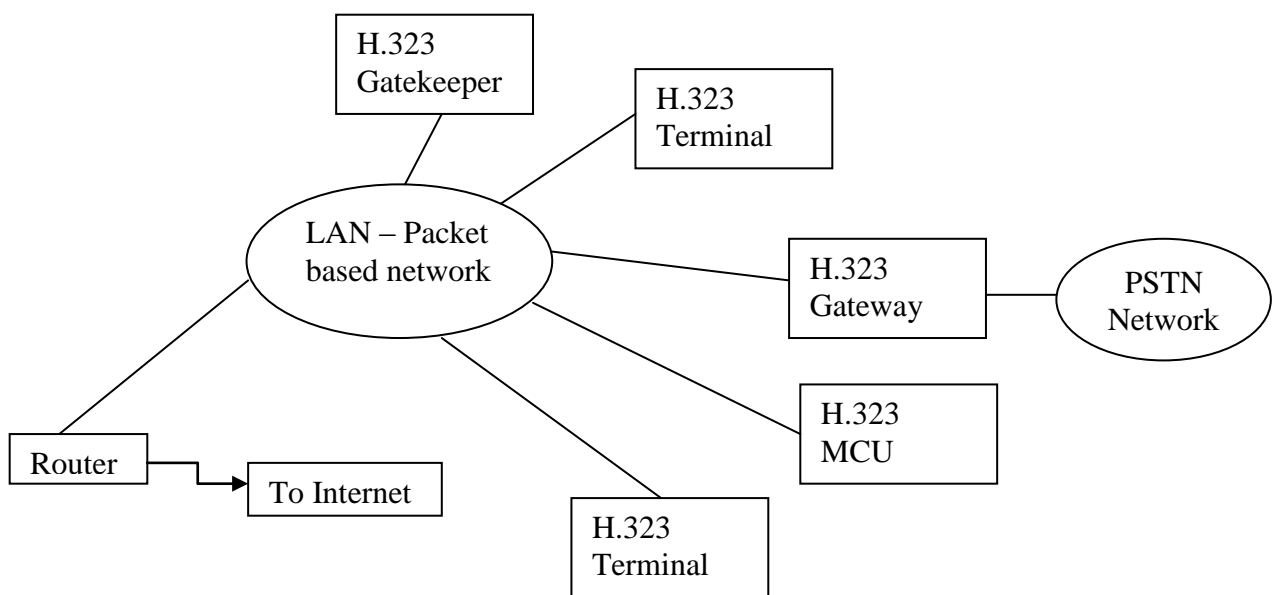
2.5.1 H.323

Τον Μάιο του 1996 η ITU επικύρωσε την προδιαγραφή H.323 η οποία καθορίζει με ποιον τρόπο είναι δυνατόν να μεταφερθούν φωνή, βίντεο και δεδομένα σε IP δίκτυα. Η προδιαγραφή H.323 είναι βασισμένη στα πρωτόκολλα RTP/RTCP (Real Time Protocol/Real Time Control Protocol) τα οποία χρησιμοποιούνται για την διαχείριση σημάτων ήχου και εικόνας. Το H.323 είναι μια «ομπρέλα» η οποία περιλαμβάνει πολλά πρωτόκολλα: H.225 (RAS), H.245 (Control), H.261 (Video), H.263 (Video).

Στην ορολογία του H.323 προτιμάται ο όρος gatekeeper από τον Media Gateway Controller. Μερικές από τις λειτουργίες για τις οποίες είναι υπεύθυνος ένας gatekeeper είναι:

- Πραγματοποιεί την μετάφραση διευθύνσεων μεταξύ διευθύνσεων Internet και διευθύνσεων ITU-T Rec. E.164 Ref. 18 (The International Public Telecommunication Numbering Plan).
- Διενεργεί έλεγχο ταυτότητας των χρηστών.
- Διαχειρίζεται την χωρητικότητα του δικτύου, ελέγχει δηλαδή κατά πόσο το δίκτυο είναι δυνατόν να υποστηρίξει μια κλήση.
- Διαχειρίζεται την δρομολόγηση των κλήσεων, αν δηλαδή μια κλήση πρέπει να δρομολογηθεί μέσω κάποιας θύρας ή να αποσταλεί κατ' ευθείαν στον παραλήπτη.
- Προωθεί αναπάντητες κλήσεις.
- Παρέχει υπηρεσίες ελέγχου σε πιστοποιημένες απομακρυσμένες τερματικές συσκευές.

Στο σχήμα 2.3 παρουσιάζεται ένα H.323 σύστημα.



Σχήμα 2.3
H.323 Σύστημα

Σε ένα H.323 σύστημα υπάρχουν οι ακόλουθες οντότητες (entities όπως ονομάζονται στην ορολογία του H.323).

- **Terminals:** Μέσω των οποίων πραγματοποιείται η επικοινωνία φωνής/εικόνας/δεδομένων.
- **Gatekeepers:** Παρέχουν μεταξύ των άλλων, υπηρεσίες ελέγχου πρόσβασης και μετάφρασης διευθύνσεων.

- **Gateways:** Χρησιμοποιούνται για την διασύνδεση δικτύων με διαφορετικά πρωτόκολλα σηματοδοσίας όπως τερματικά PSTN, τερματικά SIP κλπ.
- **Multipoint Controllers, Multipoint Processors, Multipoint Control Units:** Παρέχουν υποστήριξη για τηλεδιασκέψεις.

Βασικό στοιχείο του H.323 είναι αυτό που ονομάζεται «κλήση H.323» (H.323 call). Ορίζεται ως η επικοινωνία με χρήση πολυμέσων, μεταξύ δύο τερματικών H.323. Εάν ένα H.323 τερματικό επικοινωνεί με ένα τερματικό το οποίο χρησιμοποιεί διαφορετικό πρωτόκολλο σηματοδοσίας, τότε η επικοινωνία αυτή ορίζεται ως το τμήμα εκείνο μεταξύ του H.323 τερματικού και της θύρας η οποία είναι υπεύθυνη για την διασύνδεση με το άλλου τύπου δίκτυο.

Περιληπτικά θα μπορούσε να περιγραφεί η διαδικασία μιας κλήσης με χρήση του H.323 ως εξής:

- Αρχικά το τερματικό H.323 μεταβιβάζει πληροφορίες καταχώρισης προς τον gatekeeper δια μέσου του καναλιού RAS στο οποίο ανταλλάσσονται μηνύματα του πρωτοκόλλου H.225. Η καταχώριση (registration) πραγματοποιείται είτε μόνο μια φορά είτε περιοδικά, ανάλογα με την πολιτική του gatekeeper. Στη συνέχεια το τερματικό ζητεί άδεια από τον gatekeeper για την διενέργεια της κλήσης. Εφόσον η άδεια δοθεί το τερματικό ανιχνεύει την διεύθυνση μεταφοράς του καναλιού σηματοδοσίας του τερματικού με το οποίο επιθυμεί να συνομιλήσει. Στη συνέχεια επιχειρεί να εγκαθιδρύσει μια σύννοδο μέσω αυτού του καναλιού, το οποίο χρησιμοποιεί H.225 μηνύματα.
- Εφόσον το κανάλι σηματοδοσίας εγκαθιδρυθεί, τα δύο τερματικά εγκαθιδρύουν και ένα κανάλι ελέγχου χρησιμοποιώντας μηνύματα πρωτοκόλλου H.245. Αυτό το κανάλι αναλαμβάνει πλήρως και όλα τα μηνύματα σηματοδότησης μεταφέρονται μέσω αυτού. Το κανάλι πρωτοκόλλου H.225 μπορεί τώρα να κλείσει.
- Στη συνέχεια τα δύο τερματικά ρυθμίζουν τα κανάλια πολυμέσων με βάση τα οποία ανταλλάσσουν πληροφορίες. Συνήθως τρία κανάλια (media channels) εγκαθιδρύονται: ένα για φωνή, ένα για εικόνα και ένα για δεδομένα (RTP channels). Τα δύο τερματικά μπορούν τώρα να ανταλλάσσουν πληροφορίες μέσω των τριών καναλιών. Το H.245 κανάλι δεν χρησιμοποιείται πια, παρά μόνο αν αλλάξουν τα δεδομένα της σύνδεσης, για παράδειγμα προσθήκη και άλλου τερματικού στην επικοινωνία.

- Όταν η επικοινωνία τερματισθεί, τα τερματικά κλείνουν όλα τα κανάλια πολυμέσων που είχαν εγκαθιδρύσει και ένα από τα τερματικά εκκινεί την διαδικασία τερματισμού της κλήσης χρησιμοποιώντας το κανάλι ελέγχου H.245. Αν το κανάλι H.225 είναι ενεργό, τότε κλείνει και αυτό επίσης.

2.5.2 SIP (Session Initiation Protocol)

Το πρωτόκολλο SIP είναι βασισμένο στην RFC 2543 (Ref 3) και είναι ένα πρωτόκολλο του στρώματος εφαρμογής (application layer). Υποστηρίζει διαδραστική πολυμεσική επικοινωνία μεταξύ τερματικών (καλούνται και user agents). Με βάση το πρωτόκολλο SIP καθορίζεται η έναρξη, η τροποποίηση και ο τερματισμός της επικοινωνίας. Η επικοινωνία δια του SIP είναι δυνατόν να γίνει απ' ευθείας από τερματικό σε τερματικό (terminal to terminal) ή μέσω εξυπηρετητή. Εάν στην επικοινωνία εμπλέκεται εξυπηρετητής, αυτός απαιτείται μόνο για τον εντοπισμό του καλούμενου χρήστη. Για επικοινωνία με non IP δίκτυα τότε απαιτείται η συνεργασία με το πρωτόκολλο H.323 ή Megaco.

Το SIP χρησιμοποιεί το «συντακτικό» και την σηματοδότηση του δημοφιλούς HTTP πρωτοκόλλου. Ένα SIP μήνυμα ομοιάζει με ένα HTTP μήνυμα. Επίσης χρησιμοποιεί διευθύνσεις που είναι όμοιες με URL ή με διευθύνσεις email.

Το SIP βασίζεται στο μοντέλο πελάτη – εξυπηρετητή και αποτελείται από τις παρακάτω οντότητες [16]:

- **User agent:** Είναι μια εφαρμογή η οποία ενεργεί για λογαριασμό του χρήστη. Η εφαρμογή τρέχει σαν πελάτης (client) και σαν εξυπηρετητής (server). Σαν πελάτης εκκινεί αιτήσεις SIP και σαν εξυπηρετητής αποδέχεται κλήσεις και ανταποκρίνεται σε SIP αιτήσεις άλλων οντοτήτων του δικτύου.
- **Registrar Server:** Είναι ένας εξυπηρετητής SIP ο οποίος δέχεται μόνο αιτήσεις από user agents. Οι αιτήσεις προς ένα registrar server δεν προωθούνται περαιτέρω από τον ίδιο, αλλά εξυπηρετούνται από αυτόν.
- **Location Server:** Είναι ένας εξυπηρετητής SIP ο οποίος παρέχει πληροφορίες σε εξυπηρετητές διαμεσολάβησης/ανακατεύθυνσης (proxy/redirect).
- **Redirect Server:** Είναι ένας εξυπηρετητής SIP ο οποίος παρέχει υπηρεσίες εντοπισμού διευθύνσεων των user agents. Ανταποκρίνεται σε μια αίτηση

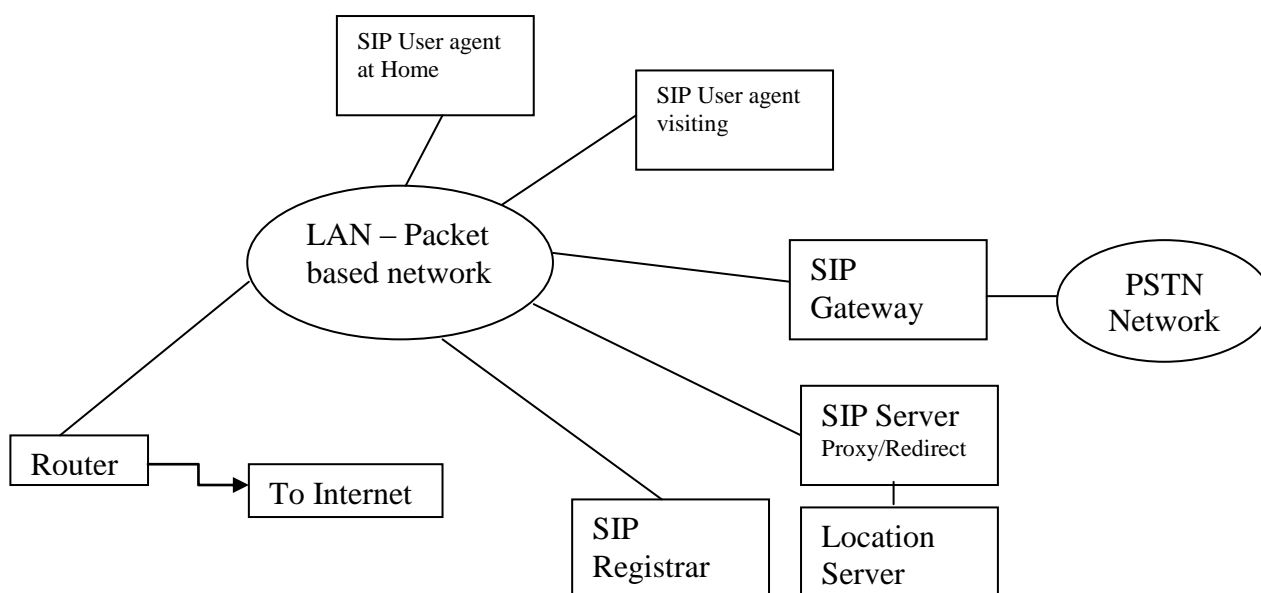
SIP η οποία προορίζεται για μια συγκεκριμένη διεύθυνση, με μια λίστα από νέες διευθύνσεις.

- **Proxy Server:** Είναι ένας εξυπηρετητής SIP ο οποίος δρα ως εξυπηρετητής σε σχέση με τους user agents, προωθώντας τις αιτήσεις τους και σαν πελάτης σε σχέση με άλλους εξυπηρετητές υποβάλλοντας προωθημένες αιτήσεις σε αυτούς, εξ' ονόματος user agents ή άλλων proxy servers.

Εξαιρώντας τους user agents που συνήθως είναι τμήμα ενός τερματικού (multimedia terminal), όλες οι υπόλοιπες λογικές οντότητες (registrar, redirect, proxy servers) μπορούν να συνδυαστούν σε μια και μόνο εφαρμογή. Συνεπώς μια λογική οντότητα μπορεί να συμπεριφερθεί ως redirect server ή ως proxy server αναλόγως με την αίτηση SIP που λαμβάνει. Ακόμη την ίδια στιγμή μπορεί να αποδέχεται αιτήματα registration. Μια SIP κλήση ορίζεται ως η πολυμεσική συνδιάσκεψη στην οποία συμμετέχουν όσοι user agents εκλήθησαν.

Ένα σύστημα SIP μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από περιοχές (domains) οι οποίες εξυπηρετούνται από ένα proxy/redirect server και ένα registrar. Ένας user agent συνήθως διαθέτει ένα home domain το οποίο καθορίζεται από την διεύθυνσή του, αλλά είναι δυνατόν να χρησιμοποιεί περιαγωγή και υπηρεσίες σε άλλα domain. Σε αυτή την περίπτωση ο user agent θεωρείται επισκεπτόμενος (visiting) αλλιώς θεωρείται στην έδρα του (at home).

Στο σχήμα 2.4 παρουσιάζεται ένα SIP σύστημα.

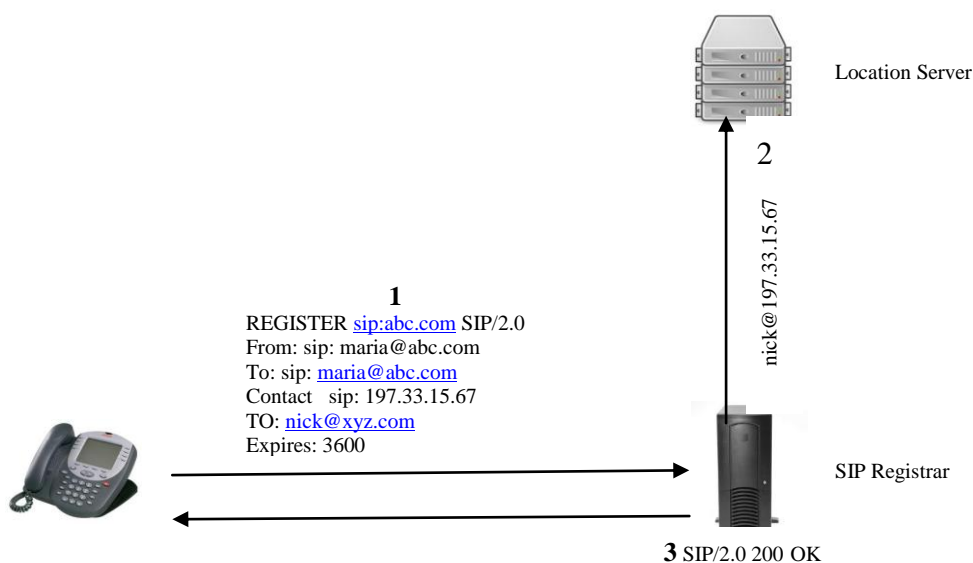


Σχήμα 2.4
SIP Σύστημα

Στη συνέχεια θα εξηγηθεί η λειτουργία ενός VoIP συστήματος που χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο SIP [15], [17]. Βασική διαδικασία στην λειτουργία του SIP είναι η καταχώρηση (registration). Κατά την διαδικασία του registration λαμβάνουν χώρα δύο ενέργειες:

1. Σε κάθε user agent αντιστοιχείται μια μοναδική διεύθυνση (π.χ. nick@sch.gr).
2. Η διεύθυνση αυτή συνδέεται με την τρέχουσα τοποθεσία στην οποία βρίσκεται την δεδομένη στιγμή ο χρήστης (π.χ. 197.33.15.67).

Στο σχήμα 2.5 διευκρινίζεται η λειτουργία της καταχώρισης (registration).



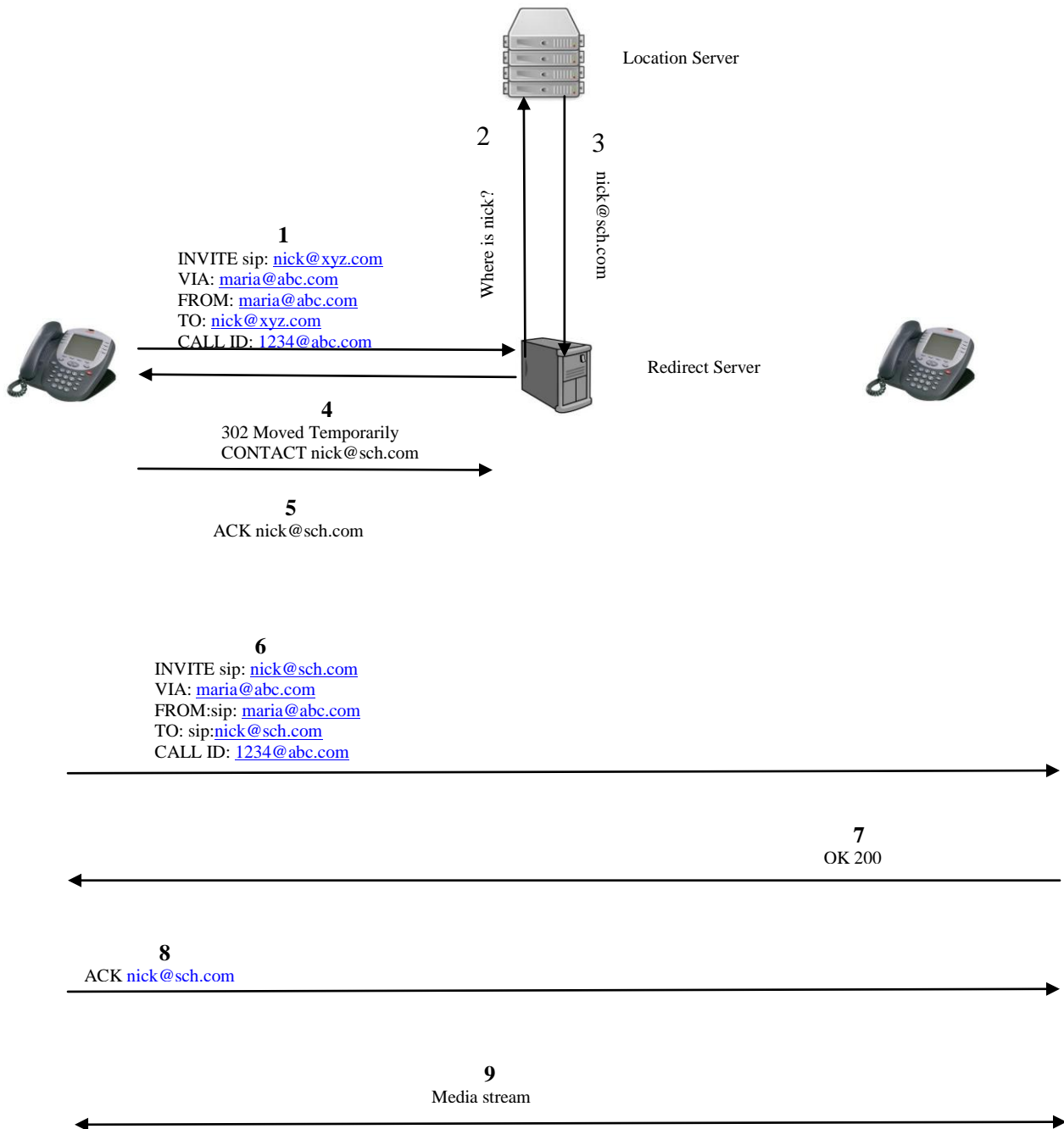
Σχήμα 2.5
SIP Registration

Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται εξυπηρετητής για την επικοινωνία, υπάρχουν δύο τρόποι λειτουργίας του SIP:

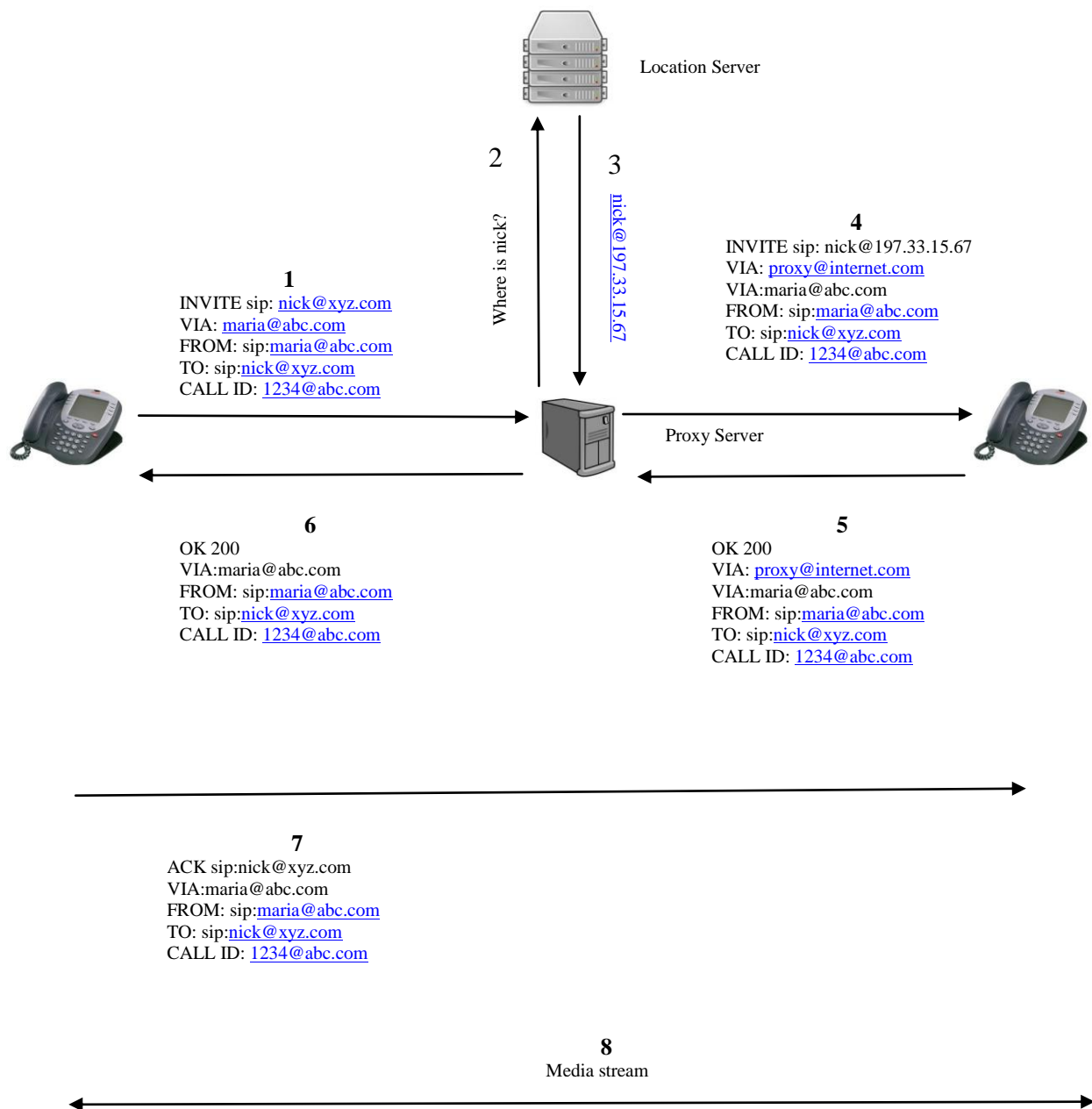
1. **Redirect:** Στην περίπτωση αυτή ο πρώτος user agent αποστέλλει ένα μήνυμα invite στον δεύτερο user agent για να συμμετάσχει σε μια τηλεφωνική επικοινωνία – κλήση. Ο redirect server χρησιμοποιείται για να προμηθεύσει τον πρώτο user agent με την URL διεύθυνση στην οποία έχει μεταφερθεί προσωρινά ο δεύτερος user agent. Στη συνέχεια ο πρώτος user agent αποστέλλει μήνυμα invite στη νέα URL διεύθυνση του δεύτερου χρήστη (user agent).
2. **Proxy:** Εδώ χρησιμοποιείται ένας διακομιστής μεσολάβησης ο οποίος παραλαμβάνει την αίτηση invite του πρώτου χρήστη και εντοπίζει την URL διεύθυνση του καλούμενου χρήστη. Ο διακομιστής μεσολάβησης απευθύνει ένα invite μήνυμα στον καλούμενο και αν ο καλούμενος ανταποκριθεί με ένα μήνυμα

OK (200), οι δύο user agents ανταλλάσσουν πληροφορίες (media streams) άμεσα μεταξύ τους.

Στα παρακάτω σχήματα 2.6 και 2.7 διευκρινίζονται οι λειτουργίες redirect και proxy.



Σχήμα 2.6
Λειτουργία SIP με redirect server



Σχήμα 2.7
Λειτουργία SIP με proxy server

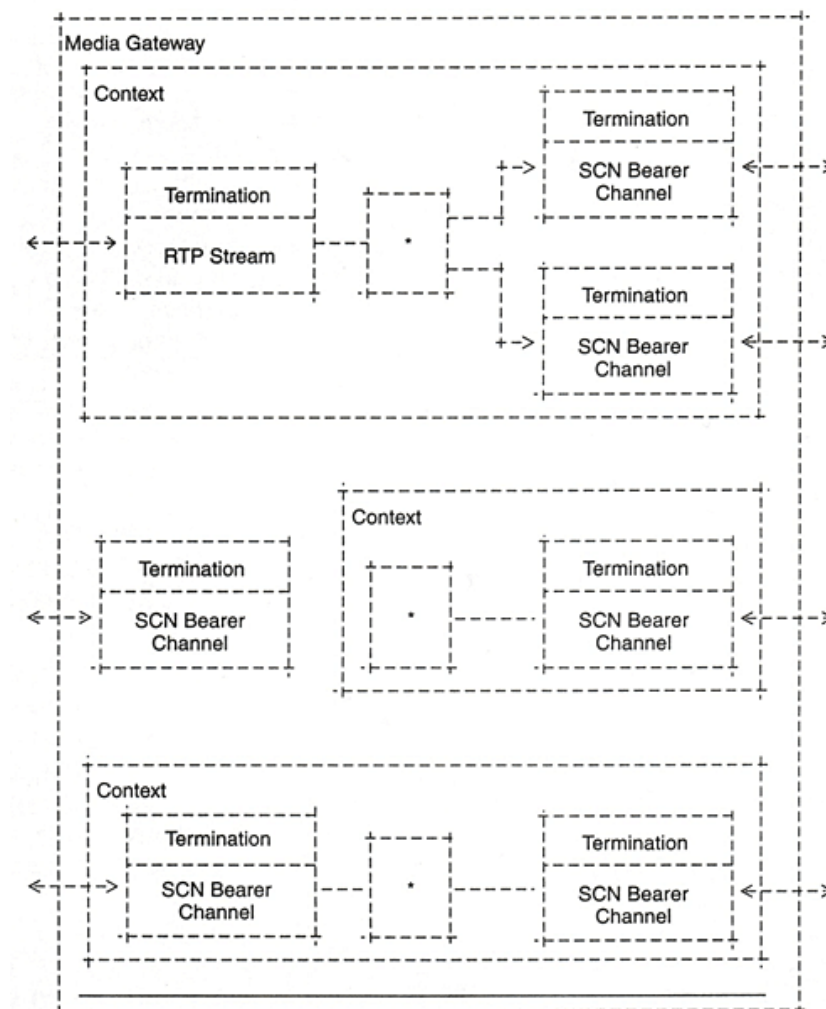
2.5.3 Media Gateway Control Protocol (MGCP)

Το πρωτόκολλο MGCP είναι πρόγονος του πρωτοκόλλου Megaco. Η θεωρία στην οποία στηρίζεται η λειτουργία του είναι ότι ο έλεγχος της κλήσης είναι εκτός των δυνατοτήτων των gateways και επιτυγχάνεται από εξωτερικά στοιχεία ελέγχου κλήσης.

Κατά συνέπεια το MGCP θεωρεί ότι αυτά τα στοιχεία ελέγχου κλήσης (ή αλλιώς call agents) συγχρονίζονται μεταξύ τους για να αποστείλουν συνεκτικές εντολές στις πύλες, οι οποίες τελούν υπό τον έλεγχό τους. Δεν καθορίζεται μηχανισμός από το πρωτόκολλο για τον συγχρονισμό των call agents. Συνεπώς η όλη διαδικασία είναι ένα πρωτόκολλο master/slave σύμφωνα με το οποίο οι θύρες εκτελούν εντολές οι οποίες αποστέλλονται από τους call agents.

2.5.4 Megaco (ITU-T Rec. H.248 Ref. 13)

Πρόκειται για ένα πρωτόκολλο ελέγχου κλήσης, υπεύθυνου για την επικοινωνία μεταξύ ενός ελεγκτή θύρας και μιας θύρας. Το πρωτόκολλο Megaco/H.248 είναι μια εξέλιξη του SGCP (Simple Gateway Control Protocol) και του MGCP. Στην ορολογία του Megaco ένας ελεγκτής θύρας (MGC) καλείται *softswitch* ή *call agent*.



Σχήμα 2.8

Μοντέλο Megaco/H.248 (SCN Switched Circuit Network)

Στο σχήμα 2.8 παρουσιάζεται ένα μοντέλο επικοινωνίας που χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο Megaco. Δύο βασικοί όροι χρησιμοποιούνται εδώ:

- Termination: Σε μια πολυμεσική συνδιάσκεψη, termination μπορεί να είναι πηγή εκπομπής multimedia πληροφορίας ή προορισμός μιας ροής multimedia. Οι διάφορες παράμετροι της ροής ενσωματώνονται στην termination.
- Context: Είναι μια συσχέτιση ανάμεσα σε terminations. Υπάρχουν τρία είδη contexts:
 1. Μια context με μόνο μία termination στην ουσία είναι μια κλήση σε αναμονή.
 2. Μια context με δύο terminations είναι μια κανονική κλήση.
 3. Αν υπάρχουν σε μια context περισσότερες από δύο terminations, τότε έχουμε τηλεφωνική συνδιάσκεψη.

Ο μέγιστος αριθμός terminations που μπορεί να διαθέτει μια context είναι στην αρμοδιότητα της θύρας (Media Gateway). Αν μια θύρα επιτρέπει μόνο δύο terminations ανά context, τότε έχουμε επικοινωνία σημείου προς σημείο. Αν επιτρέπει περισσότερες από δύο terminations ανά context, τότε έχουμε τηλεφωνική συνδιάσκεψη.

Επίσης στο παραπάνω σχήμα 2.8 ο αστερίσκος εντός του context χρησιμοποιείται για την αναπαράσταση της σύνδεσης μεταξύ των terminations.

2.6 Σύγκριση Πρωτοκόλλων

Από τα τέσσερα πρωτόκολλα που παρουσιάστηκαν, ευρέως χρησιμοποιούμενα για υπηρεσίες VoIP είναι τα H.323 και SIP. Όσον αφορά στο πρωτόκολλο H.323, αυτό είναι πιο κοντά στα παραδοσιακά επικοινωνιακά συστήματα μεταγωγής κυκλώματος (circuit switched). Η σηματοδότηση που παρέχει (βασισμένη στο πρωτόκολλο ISDN Q.931) έχει το μειονέκτημα της πολυπλοκότητας. Για παράδειγμα για μια κλήση χρησιμοποιούνται με την σειρά τα ακόλουθα πρωτόκολλα:

- H.225, για την εγκαθίδρυση της κλήσης (ρύθμιση του καναλιού ελέγχου).
- H.245, για την έναρξη και την διακοπή των λογικών καναλιών που μεταφέρουν την πολυμεσική πληροφορία.
- H.332, για μεγάλης κλίμακας συνδιασκέψεις.
- H.450, για συμπληρωματικές υπηρεσίες.
- H.235, για ασφάλεια.

- H.246, για διαλειτουργικότητα με τις παραδοσιακές υπηρεσίες μεταγωγής κυκλώματος.

Η τακτική αυτή της συνύπαρξης και διαλειτουργικότητας πολλαπλών πρωτοκόλλων είναι τυπική για τα περισσότερα τηλεπικοινωνιακά πρωτόκολλα.

Από την άλλη μεριά, το πρωτόκολλο SIP ακολουθεί μια πιο απλή προσέγγιση επαναχρησιμοποιώντας πεδία επικεφαλίδων, κανόνες κωδικοποίησης, κώδικες ανίχνευσης λαθών, και μηχανισμούς πιστοποίησης του πρωτοκόλλου HTTP. Γενικά η απλότητα είναι το κύριο χαρακτηριστικό σε ένα δίκτυο μεταγωγής πακέτων.

Ένα ακόμη βασικό σημείο και για τα δύο πρωτόκολλα είναι ότι περιορίζονται μόνο στην εγκαθίδρυση, διαχείριση και τερματισμό μιας κλήσης. Η πραγματική διαχείριση και μεταφορά της πολυμεσικής πληροφορίας γίνεται από το πρωτόκολλο RTP, συνεπώς η επιλογή ενός εκ των δύο πρωτοκόλλων για χρήση δεν επηρεάζει τα χαρακτηριστικά ποιότητας (QoS) της τηλεφωνίας μέσω Internet.

Γενικά θα μπορούσε να λεχθεί εδώ ότι το πρωτόκολλο SIP παρέχει παρόμοιες υπηρεσίες με το H.323 αλλά έχει τα πλεονεκτήματα της χαμηλής πολυπλοκότητας, της επεκτασιμότητας και της κλιμάκωσης. Στον Πίνακα 2.2 παρουσιάζεται η σύγκριση των δύο πρωτοκόλλων.

Πίνακας 2.2

H.323 vs SIP

| <u>H.323</u> | <u>SIP</u> |
|---|---------------------------------|
| Πολύπλοκο | Απλό |
| Μεγάλη τεκμηρίωση | Μικρή τεκμηρίωση |
| Εκατοντάδες στοιχεία | Επικεφαλίδες λιγότερες από 40 |
| Μεγάλος χρόνος για εφαρμογή του | Μικρός χρόνος εφαρμογής |
| Διαδική αναπαράσταση ASN.1 | Κείμενο, όμοιο με HTTP |
| Δύσκολη αποσφαλμάτωση | Απλή αποσφαλμάτωση |
| Δύσκολα επαναχρησιμοποιούμενος κώδικας | Υψηλή επαναχρησιμοποίηση κώδικα |
| Αρκετά συστατικά πρωτοκόλλου | Ένα απλό συστατικό πρωτοκόλλου |
| Επικαλυπτόμενες υπηρεσίες, απαιτούνται αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους. | |
| 3 καταστάσεις λειτουργίας | 1 κατάσταση λειτουργίας |

2.7 Ποιότητα Υπηρεσίας (QoS)

Η Ποιότητα Υπηρεσίας είναι ύψιστης σημασίας για τις εφαρμογές VoIP. Το ζήτημα εδώ είναι το πώς θα εγγυηθεί κανείς ότι τα πακέτα φωνής ή πακέτα πολυμεσικής πληροφορίας (video κλπ), δεν θα καθυστερήσουν υπερβολικά ή δεν θα απορριφθούν. Η καθυστέρηση ή η απόρριψη μπορεί να είναι αποτέλεσμα του ανταγωνισμού με άλλα πακέτα χαμηλότερης προτεραιότητας.

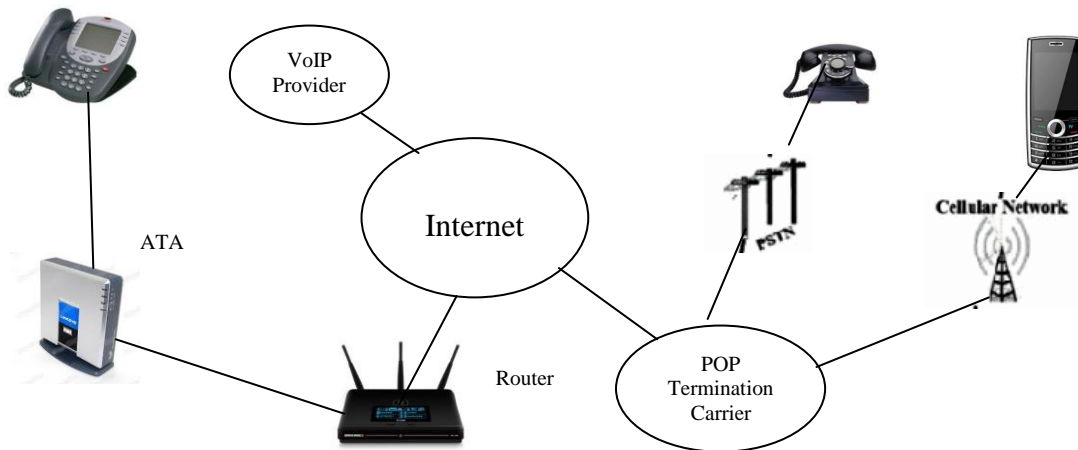
Η ποιότητα υπηρεσίας επηρεάζεται από:

- Καθυστέρηση (Latency). Καθυστερήσεις μετ' επιστροφής, μεγαλύτερες από 250 ms γίνονται συνήθως αντιληπτές από τον χρήστη. Η ITU-T G.114 προτείνει καθυστερήσεις απλής μετάβασης 150 ms.
- Διακύμανση της καθυστέρησης (Jitter). Το Jitter προκαλεί παράξενα ηχητικά εφέ αν η τιμή του ξεπεράσει ένα συγκεκριμένο όριο (που συνήθως είναι τα 100 ms).
- Απώλειες πακέτων (Packet loss). Λόγω της μεγάλης κίνησης πακέτων στο δίκτυο, μπορεί να υπάρξουν απορρίψεις πακέτων, πράγμα που προκαλεί διακοπές στην ομιλία. Η απώλεια πακέτων πρέπει να είναι μικρότερη από 3% για να μην επηρεάζεται η ποιότητα υπηρεσίας.

2.8 Χρήση του VoIP στην πράξη

Υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τρόποι για να πραγματοποιηθεί μια κλήση με χρήση της τεχνολογίας VoIP:

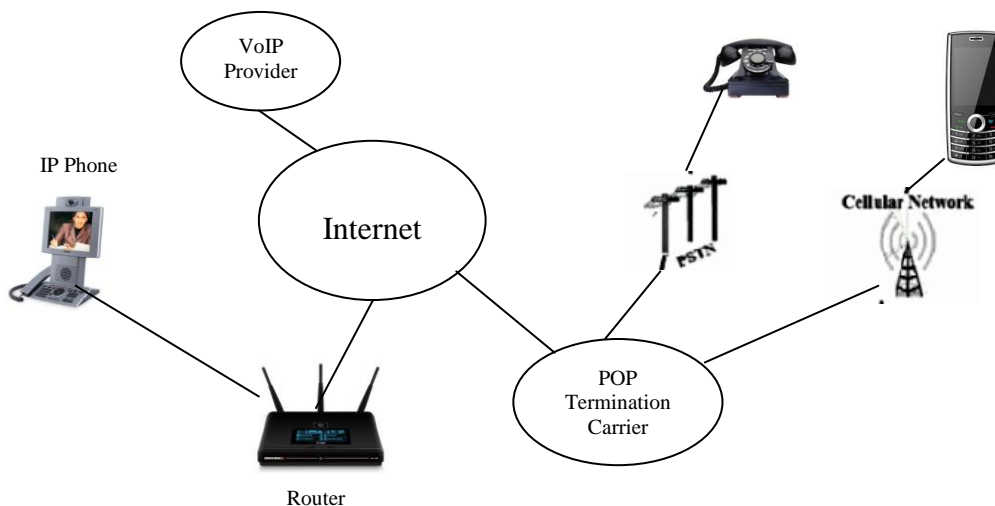
1. **ATA (Analog Telephone Adapter):** Χρησιμοποιώντας μια συσκευή ATA είναι δυνατόν να συνδεθεί μια κανονική τηλεφωνική συσκευή στον Η/Υ του χρήστη ή κατ' ευθείαν στον router. Η συσκευή μπορεί πλέον να χρησιμοποιηθεί ως VoIP συσκευή. Η ATA είναι μια συσκευή μετατροπής του αναλογικού σήματος της κανονικής τηλεφωνικής συσκευής σε ψηφιακό, έτσι ώστε το σήμα να μπορεί να μεταφερθεί μέσω του διαδικτύου. Οι συσκευές ATA παρέχονται συνήθως από τους παρόχους υπηρεσιών VoIP.



Σχήμα 2.9

VoIP κλήση χρησιμοποιώντας ATA

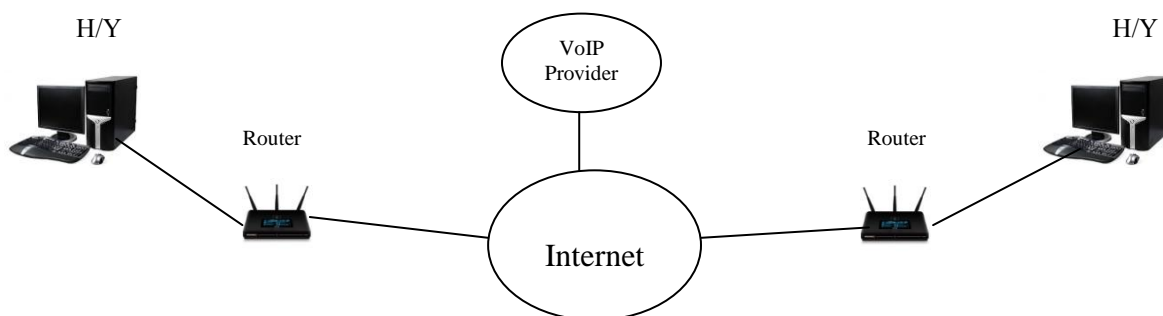
2. **Χρήση IP Τηλεφώνων:** Αυτές οι συσκευές διαθέτουν RJ-45 Ethernet συνδετήρες, αντί για RJ-11. Συνδέονται απ' ευθείας στον router του δικτύου LAN και διαθέτουν όλο τον απαραίτητο hardware και software εξοπλισμό για να διαχειρισθούν IP κλήσεις. Υπάρχουν ακόμη και τα Wi-Fi τηλέφωνα τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για VoIP κλήσεις με χρήση βέβαια ενός ασύρματου access point που είναι συνδεδεμένο στο διαδίκτυο.



Σχήμα 2.10

VoIP κλήση χρησιμοποιώντας IP Τηλέφωνο

3. **Από Η/Υ σε Η/Υ:** Είναι ο πιο απλός τρόπος για να χρησιμοποιήσει κανείς την τεχνολογία VoIP. Υπάρχουν εταιρίες που προσφέρουν δωρεάν λογισμικό και υπηρεσίες για τέτοιου είδους κλήσεις (Skype, Yahoo κλπ).



Σχήμα 2.11

VoIP κλήση χρησιμοποιώντας από Η/Υ σε Η/Υ

2.9 Πάροχοι υπηρεσιών VoIP

Τα τελευταία χρόνια στο χώρο της VoIP τηλεφωνίας δραστηριοποιούνται αρκετές εταιρίες στην Ελλάδα. Με την υπογραφή του συμβολαίου μεταξύ της εταιρείας και του χρήστη, συνήθως παρέχεται και ο απαιτούμενος εξοπλισμός (συσκευές IP, τηλεφωνικά κέντρα κλπ) για την εύρυθμη λειτουργία. Οι τηλεφωνικοί αριθμοί που παρέχουν ξεκινούν από 70 και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για οποιεσδήποτε κλήσεις χωρίς περιορισμούς. Κατάλογος των παρόχων υπηρεσιών VoIP στην Ελλάδα υπάρχει εδώ: <http://www.voipproviderslist.com/country/voip-greece/voip-providers-greece/>

Επίσης μπορεί κάποιος να χρησιμοποιήσει τις δωρεάν υπηρεσίες VoIP που παρέχονται στο διαδίκτυο από διάφορες εταιρίες (Skype, Yahoo κλπ) κυρίως για κλήσεις από Η/Υ σε Η/Υ.

2.10 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα της τεχνολογίας VoIP

Πλεονεκτήματα

Η τεχνολογία VoIP (μεταγωγή πακέτου) σε σχέση με την μεταγωγή κυκλώματος έχει αρκετά πλεονεκτήματα:

- Χαμηλότερο κόστος

- Φορητότητα (portability). Οι κλήσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν από οπουδήποτε αρκεί να υπάρχει μια DSL σύνδεση στο διαδίκτυο. Το μόνο που απαιτείται είναι η σύνδεση στον λογαριασμό VoIP.
- Υποστηρίζονται υπηρεσίες (video κλήσεις, video conference κλπ) χωρίς επιπλέον κόστος. Οι ίδιες υπηρεσίες στην μεταγωγή κυκλώματος χρεώνονται επιπλέον.
- Με το ίδιο bandwidth μπορούν να εξυπηρετηθούν περισσότερες κλήσεις απ' ότι στην μεταγωγή κυκλώματος.

Μειονεκτήματα

- Απαραίτητη η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας για την λειτουργία του VoIP τηλεφώνου, ενώ τα παραδοσιακά τηλέφωνα συνήθως λειτουργούν ακόμη και σε blackout.
- Δεν είναι εύκολος ο εντοπισμός της κλήσης σε περίπτωση ανάγκης (πχ κλήση του 100).
- Η αξιοπιστία της κλήσης VoIP έχει να κάνει με την αξιοπιστία της σύνδεσης internet που διατίθεται ή ακόμη και με την αξιοπιστία του υλικού (PC's, Router's κλπ).
- Όχι τόσο καλή ποιότητα κλήσεων.
- Θέματα ασφάλειας των κλήσεων, μια και αυτές διενεργούνται μέσω του διαδικτύου με τα γνωστά προβλήματα ασφαλείας (viruses, malwares, κλπ).

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί ότι τα προβλήματα της VoIP τηλεφωνίας θα ξεπεραστούν με την πάροδο του χρόνου, μια και γίνεται τεράστια προσπάθεια διεθνώς, από επιστήμονες και τεχνικούς για την βελτίωση της ποιότητας.

Κεφάλαιο 3

802.11 DCF (Distributed Coordination Function)

Το επικρατών πρότυπο στο οποίο βασίζονται τα ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLANs) είναι το IEEE 802.11. Βασικό στοιχείο του προτύπου αυτού είναι η λειτουργία καταναμεμημένου συντονισμού (Distributed Coordination Function DCF). Στην εργασία του ο Bianchi [1] δημιούργησε ένα μαθηματικό αναλυτικό μοντέλο το οποίο βασίζεται στην Μαρκοβιανή αλυσίδα, μοντελοποιεί την λειτουργία DCF και υπολογίζει την «διεκπεραιωτική ικανότητα κορεσμού» (Saturation Throughput) ενός IEEE 802.11 LAN. Ο Bianchi [1] θεωρεί ότι το δίκτυο λειτουργεί σε συνθήκες κορεσμού, δηλαδή κάθε ασύρματος σταθμός διαθέτει πάντα ένα πακέτο έτοιμο προς μετάδοση.

Ο Haitao Wu στην εργασία του [2] επέκτεινε το μοντέλο του Bianchi [1] έτσι ώστε να λαμβάνεται υπ' όψιν το όριο αναμετάδοσης πακέτου, όπως ορίζεται στο πρότυπο IEEE 802.11.

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιασθούν τα δύο αυτά αναλυτικά μοντέλα. Τα αποτελέσματα των αναλυτικών μοντέλων θα συγκριθούν με αποτελέσματα προσομοίωσης προκειμένου τα μαθηματικά μοντέλα να επικυρωθούν. Το πρόγραμμα που προσομοιώνει την λειτουργία ενός ασύρματος IEEE 802.11 τοπικού δικτύου κατασκευάστηκε στο περιβάλλον MATLAB.

3.1 Ασύρματα τοπικά δίκτυα (Wireless LAN's – WiFi)

Στην εποχή μας τα ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLAN's) γνωρίζουν μεγάλη άνθηση. Υπάρχουν πολλοί λόγοι για τους οποίους η ασύρματη δικτύωση είναι πολύ δημοφιλής. Μερικοί από αυτούς είναι η ευελιξία, η μετεγκατάσταση, η ad hoc δικτύωση, η κάλυψη τοποθεσιών που είναι δύσκολο να καλυφθούν ενσύρματα. Δεν πρέπει βέβαια να παραληφθεί η σχετική πτώση τιμών του εξοπλισμού ενός ασύρματος δικτύου, η ανάπτυξη μεγάλων ταχυτήτων μετάδοσης και η ενδυνάμωση της ασφάλειας του

ασύρματου δικτύου. Επίσης αποφασιστικά συνέβαλε το γεγονός ότι υπάρχει στις μέρες μας τεράστια ανάπτυξη των έξυπνων τηλεφώνων και των tablets τα οποία υποστηρίζουν ασύρματη δικτύωση και δίνουν την δυνατότητα ασύρματης πρόσβασης στο Internet.

Οι τεχνολογίες και τα πρότυπα που αναπτύχθηκαν για τα ασύρματα τοπικά δίκτυα ήταν πολλές, όμως μια από αυτές θεωρείται στις μέρες μας επικρατούσα. Πρόκειται για το πρότυπο IEEE 802.11 wireless LAN που είναι γνωστό και ως WiFi. Ο όρος WiFi (Wireless Fidelity, κατά την ορολογία High Fidelity η οποία αφορά την εγγραφή ήχου) χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει τις συσκευές που βασίζονται στην προδιαγραφή IEEE 802.11 b/g/n και εκπέμπουν σε συχνότητες 2.4GHz.

Το IEEE 802.11 στην ουσία είναι μια οικογένεια προτύπων που περιλαμβάνει μεταξύ άλλων τα πρότυπα 802.11a, 802.11b και 802.11g. Τα κύρια χαρακτηριστικά τους παρουσιάζονται στον πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1
Χαρακτηριστικά IEEE 802.11 προτύπων

| Πρότυπο (Standard) | Εύρος συχνοτήτων (Frequency range) | Ταχύτητα (Data rate) |
|-------------------------------|---|---------------------------------|
| 802.11b | 2,4 – 2,485 GHz | Έως 11 Mbps |
| 802.11a | 5,1 – 5,8 GHz | Έως 54 Mbps |
| 802.11g | 2,4 – 2,485 GHz | Έως 54 Mbps |

Οι κατασκευαστές υλικού (WiFi LAN cards, Access Points) υποστηρίζουν τα παραπάνω πρότυπα. Στις μέρες μας, τα προϊόντα ασύρματης δικτύωσης, υποστηρίζουν και τα τρία παραπάνω πρότυπα.

Το πιο πρόσφατο πρότυπο από την οικογένεια προτύπων 802.11 είναι το 802.11n, το οποίο χρησιμοποιεί πολλαπλές κεραίες (MIMO multiple-input multiple-output) και μπορεί να φθάσει μέχρι την ταχύτητα μετάδοσης των 300 Mbps.

Η αρχιτεκτονική του 802.11 χωρίζεται σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Στα infrastructure wireless LAN's και στα ad hoc wireless LAN's. Στην πρώτη περίπτωση πολλοί ασύρματοι σταθμοί συνδέονται με κάποιο κεντρικό σταθμό βάσης, που ονομάζεται σημείο πρόσβασης (access point) και είναι υπεύθυνο για την διαχείριση των συνδέσεων μεταξύ των ασύρματων σταθμών. Στη δεύτερη περίπτωση το ασύρματο

δίκτυο συγκροτείται από ομότιμους ασύρματους σταθμούς, συνήθως για να εξυπηρετηθούν προσωρινές ανάγκες επικοινωνίας.

Στην ασύρματη δικτύωση το μέσο μεταφοράς της πληροφορίας είναι το ασύρματο κανάλι το οποίο χρησιμοποιούν οι σταθμοί για να εκπέμψουν την πληροφορία προς άλλους ασύρματους σταθμούς ή προς τον σταθμό βάσης. Σε κάθε χρονική στιγμή μόνο ένας σταθμός είναι δυνατόν να εκπέμψει. Αν εκπέμψουν ταυτόχρονα δύο ή περισσότεροι σταθμοί τότε δημιουργείται σύγκρουση και καμιά πληροφορία δεν μεταφέρεται. Αν το ασύρματο κανάλι χρησιμοποιείται από κάποιον σταθμό, κανείς άλλος σταθμός δεν μπορεί να εκπέμψει. Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να οι σταθμοί να αναμείνουν μέχρι να ελευθερωθεί το κανάλι. Αν το κανάλι είναι ελεύθερο οι σταθμοί ανταγωνίζονται για το ποιος θα το καταλάβει για να εκπέμψει.

Από την παραπάνω γενική περιγραφή γίνεται φανερή η ανάγκη ενός πρωτοκόλλου πρόσβασης μέσου (Media Access Control, MAC). Οι σχεδιαστές του προτύπου 802.11 εμπνευσμένοι από την πολύ μεγάλη επιτυχία του πρωτοκόλλου τυχαίας προσπέλασης Ethernet, επέλεξαν επίσης ένα πρωτόκολλο τυχαίας προσπέλασης. Το πρωτόκολλο αυτό ονομάζεται 802.11 MAC και είναι ένα πρωτόκολλο CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance). Η βασική διαδικασία του MAC είναι η λειτουργία κατανεμημένου συντονισμού (Distributed Coordination Function DCF). Η DCF χρησιμοποιεί ένα αλγόριθμο ανταγωνισμού για την πρόσβαση στο μέσο. Στο πρότυπο επίσης ορίζεται μια προαιρετική λειτουργία σημειακού συντονισμού (Point Coordination Function PCF) η οποία είναι ένας αλγόριθμος κεντρικού ελέγχου MAC που χρησιμοποιείται για να παρέχει πρόσβαση χωρίς ανταγωνισμό. Η PCF βασίζεται στην DCF για να εξασφαλίσει πρόσβαση στους χρήστες της. Σημειώνουμε εδώ ότι στην παρούσα πτυχιακή εργασία θα αναλυθεί μόνο η DCF.

3.2 Distributed Coordination Function

Η βασική διαδικασία προσπέλασης μέσου του προτύπου IEEE 802.11, είναι η DCF. Σύμφωνα με την DCF, όταν ένας σταθμός επιθυμεί να εκπέμψει ένα πακέτο, ανιχνεύει το κανάλι εκπομπής και προσπαθεί να εντοπίσει κάποια δραστηριότητα σε αυτό. Εάν διαπιστώσει ότι δεν υπάρχει δραστηριότητα στο κανάλι για ένα χρονικό διάστημα ίσο με DIFS (DCF Interval Frame Space) τότε εκπέμπει το πακέτο. Το χρονικό διάστημα DIFS ορίζεται από το πρότυπο 802.11 ως ο χρόνος που πρέπει να παραμείνει το μέσο

ανενεργό στην λειτουργία DCF, πριν προσπαθήσει κάποιος σταθμός να εκπέμψει ένα πακέτο.

Εάν το κανάλι διαπιστωθεί ότι είναι απασχολημένο είτε άμεσα είτε κατά την διάρκεια του χρόνου DIFS, τότε ο σταθμός δεν εκπέμπει αλλά συνεχίζει να ελέγχει το κανάλι μέχρις ότου αυτό να ανιχνευθεί ανενεργό για χρονικό διάστημα DIFS. Όταν συμβεί αυτό ο σταθμός επιλέγει ένα τυχαίο ακέραιο αριθμό, τοποθετεί τον τυχαίο ακέραιο σε ένα μετρητή και αρχίζει να μειώνει τον μετρητή με μια διακριτού χρόνου κλίμακα υποχώρησης (discrete-time backoff scale).

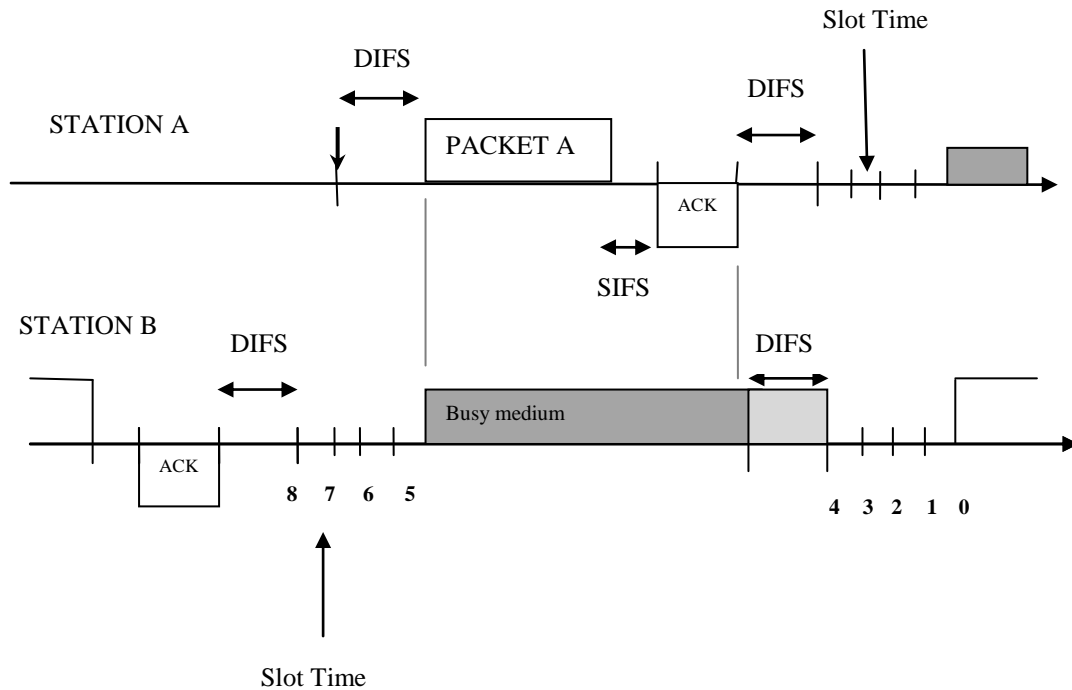
Με βάση αυτή τη διαδικασία, το χρονικό διάστημα αμέσως μετά από τον χρόνο DIFS κατά τον οποίο το μέσο είναι αδρανές, χωρίζεται σε σχισμές (slots). Το μέγεθος κάθε σχισμής εξαρτάται από το μέσο και συμβολίζεται με το σ . Κάθε σταθμός μπορεί να εκπέμψει μόνο στην αρχή κάθε σχισμής. Το μέγεθος της σχισμής εξαρτάται από το φυσικό επίπεδο και είναι ίσο με το χρόνο που χρειάζεται κάθε σταθμός για να ανιχνεύσει την μετάδοση ενός πακέτου από ένα άλλο σταθμό.

Η DCF χρησιμοποιεί ένα εκθετικό σχήμα υποχώρησης του μετρητή. Σε κάθε μετάδοση πακέτου από ένα σταθμό, ο σταθμός αυτός επιλέγει μια τιμή του μετρητή υποχώρησης (backoff counter) από το διάστημα $[0, w-1]$. Η τιμή w εξαρτάται από τον αριθμό των αποτυχημένων μεταδόσεων ενός πακέτου και ονομάζεται παράθυρο ανταγωνισμού. Συγκεκριμένα στην πρώτη προσπάθεια μετάδοσης του πακέτου, το w παίρνει την τιμή CW_{min} που ονομάζεται ελάχιστο παράθυρο ανταγωνισμού. Εάν η προσπάθεια μετάδοσης είναι αποτυχημένη, τότε το παράθυρο ανταγωνισμού διπλασιάζεται. Αυτό συνεχίζεται μέχρι το παράθυρο ανταγωνισμού να φθάσει την μέγιστη τιμή του CW_{max} , οπότε δεν αυξάνεται άλλο. Ισχύει η σχέση $CW_{max} = CW_{min} \cdot 2^m$. Στον πίνακα 3.2 παρουσιάζονται οι τιμές των σ , CW_{min} , CW_{max} για τρία διαφορετικά μέσα (φυσικά στρώματα PHY).

Πίνακας 3.2

Μέγεθος Σχισμής σ , CW_{min} , CW_{max}

| PHY | Slot Time (σ) | CW_{min} | CW_{max} |
|------|------------------------|------------|------------|
| FHSS | 50 μ s | 16 | 1024 |
| DSSS | 20 μ s | 32 | 1024 |
| IR | 8 μ s | 64 | 1024 |



Σχήμα 3.1
Βασικός Μηχανισμός Μετάδοσης

Η τιμή του μετρητή υποχώρησης ελαττώνεται για όσο χρονικό διάστημα ο σταθμός ανιχνεύει ότι το κανάλι μετάδοσης είναι ανενεργό. Η τιμή του μετρητή παγώνει όταν ανιχνευθεί μετάδοση πακέτου στο κανάλι και αρχίζει ξανά να υποχωρεί όταν το κανάλι ανιχνευθεί ότι είναι ανενεργό για χρονικό διάστημα μεγαλύτερο από DIFS. Όταν η τιμή του μετρητή μηδενισθεί τότε ο συγκεκριμένος σταθμός εκπέμπει ένα πακέτο.

Η παραπάνω λειτουργία εξηγείται με την βοήθεια του σχήματος 3.1

Έστω ότι οι σταθμοί A και B ανταγωνίζονται για το ίδιο κανάλι ασύρματης μετάδοσης. Μετά από μια επιτυχημένη μετάδοση ο σταθμός B αναμένει για χρονικό διάστημα DIFS και στη συνέχεια επιλέγει μια τιμή ίση με 8 για τον μετρητή υποχώρησης. Ο σταθμός B έχει μπει στη διαδικασία υποχώρησης του μετρητή.

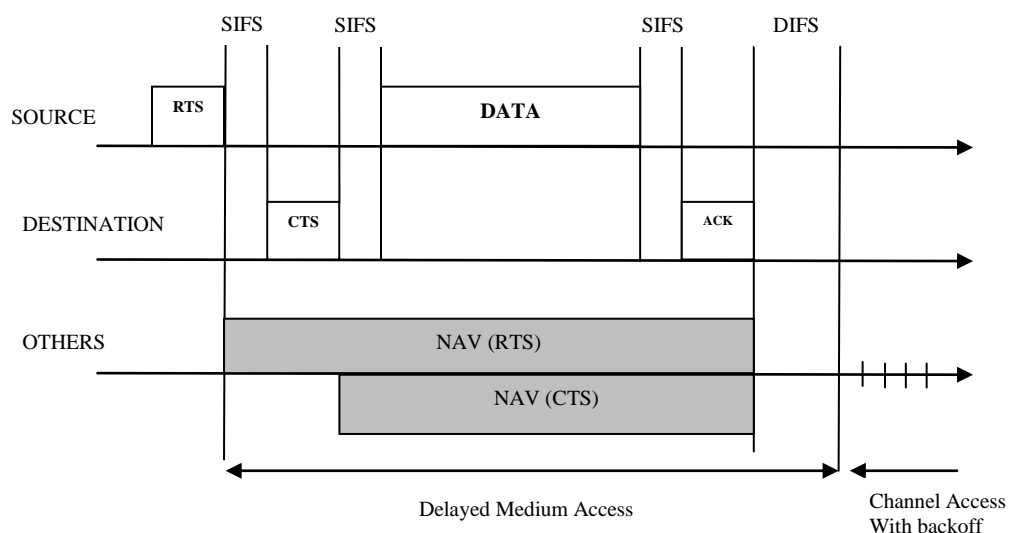
Στην κεφαλή της ουράς του σταθμού A καταφθάνει ένα πακέτο έτοιμο προς αποστολή, την χρονική στιγμή που σημειώνεται με το βέλος. Ο σταθμός A αναμένει για χρονικό διάστημα ίσο με DIFS και λόγω του ότι στο τέλος του χρονικού αυτού διαστήματος, ανιχνεύει ότι το κανάλι είναι αδρανές, αποστέλλει το πακέτο. Ο σταθμός B ανιχνεύει την δραστηριότητα στο κανάλι, ενώ ο μετρητής βρίσκεται στο νούμερο 5 (δηλαδή στην πέμπτη χρονική σχισμή) και αμέσως παγώνει τον μετρητή.

Ο παραλήπτης του πακέτου A, αμέσως μετά την παρέλευση χρονικού διαστήματος ίσου με SIFS (Short Time Inter Frame Space) αποστέλλει ένα πακέτο επιβεβαίωσης ACK προς τον σταθμό A (αυτό γίνεται επειδή στο πρωτόκολλο CSMA/CA δεν είναι δυνατή η ανίχνευση σύγκρουσης από το σταθμό που μεταδίδει, παρακολουθώντας το πακέτο που αποστέλλει). Το χρονικό διάστημα SIFS μαζί με την καθυστέρηση διάδοσης δ , είναι μικρότερο από το DIFS, συνεπώς κανένας άλλος σταθμός δεν μπορεί να ανιχνεύσει ανενεργό το κανάλι για χρονικό διάστημα ίσο με DIFS μέχρι το τέλος της μετάδοσης του ACK πακέτου.

Εάν ο σταθμός A δεν λάβει εντός ορισμένου χρονικού διαστήματος (ACK_Timeout) το πακέτο ACK, ή ανιχνεύσει άλλο πακέτο να μεταδίδεται στο κανάλι, τότε θεωρεί ότι υπήρξε σύγκρουση (collision), συνεπώς ότι το πακέτο δεν παραδόθηκε και οργανώνει την αποστολή του πακέτου ξανά, σύμφωνα με τους κανόνες υποχώρησης που περιγράφηκαν πιο πάνω (διπλασιασμό του παραθύρου ανταγωνισμού w , επιλογή τιμής για το μετρητή από το διάστημα $[0, w-1]$ κλπ).

Ο παραπάνω μηχανισμός μετάδοσης ονομάζεται βασικός μηχανισμός μετάδοσης (basic access mechanism) ή πιο απλά βασική πρόσβαση. Πρόκειται για ένα μηχανισμό διπλής χειραψίας (two way handshaking).

Η DCF καθορίζει και ένα δεύτερο μηχανισμό πρόσβασης μέσου που ονομάζεται RTS/CTS. Πρόκειται για ένα μηχανισμό τετραπλής χειραψίας (four way handshaking), η λειτουργία του οποίου εξηγείται με την βοήθεια του σχήματος 3.2:



Σχήμα 3.2
RTS/CTS Μηχανισμός Μετάδοσης

Όταν ένας σταθμός επιθυμεί να αποστείλει ένα πακέτο, ανιχνεύει το μέσο και όταν διαπιστώσει ότι αυτό είναι ανενεργό για χρονικό διάστημα ίσο με DIFS, ακολουθεί τους κανόνες υποχώρησης που αναφέρθηκαν παραπάνω. Στη συνέχεια και όταν ο μετρητής του μηδενισθεί, αντί να αποστείλει το πακέτο, αποστέλλει ένα ειδικό μικρού μεγέθους πλαίσιο το οποίο ονομάζεται RTS (Request To Send). Όταν ο παραλήπτης ανιχνεύσει το πλαίσιο RTS, ανταποκρίνεται μετά από χρονικό διάστημα ίσο με SIFS με ένα μικρό επίσης πλαίσιο που ονομάζεται CTS (Clear To Send). Όταν ο αποστέλλον σταθμός παραλάβει το CTS πλαίσιο, τότε αποστέλλει το πακέτο πληροφορίας.

Τα πακέτα RTS και CTS, μεταφέρουν πληροφορίες για το μέγεθος του κύριου πακέτου που πρόκειται να αποσταλεί. Οι πληροφορίες αυτές είναι δυνατόν να αναγνωσθούν από οιονδήποτε σταθμό του ασύρματου δικτύου. Με βάση αυτές τις πληροφορίες, οι σταθμοί ενημερώνουν ένα διάνυσμα, το Network Allocation Vector (NAV). Στο διάνυσμα αυτό περιέχονται πληροφορίες για το χρονικό διάστημα στο οποίο το κανάλι θα είναι απασχολημένο. Ένας σταθμός επιχειρεί εκπομπή πλαισίου μόνο όταν NAV=0. Συνεπώς αν ένας σταθμός είναι κρυμμένος (hidden station, δηλαδή εκτός εμβελείας), είτε από τον σταθμό που αποστέλλει είτε από τον σταθμό που λαμβάνει, με την ανίχνευση ενός πλαισίου RTS ή CTS καθυστερεί κατάλληλα την μετάδοση του, αποφεύγοντας έτσι την σύγκρουση.

3.3 Saturation Throughput (Διεκπεραιωτική Ικανότητα Κορεσμού)

Στην εργασία του ο Bianchi [1], επικεντρώνεται στην διεκπεραιωτική ικανότητα κορεσμού (Saturation Throughput) η οποία υπολογίζεται σε συνθήκες δικτύου κατά τις οποίες κάθε ασύρματος σταθμός διαθέτει πάντα ένα πακέτο προς αποστολή. Πρόκειται για την Διεκπεραιωτική Ικανότητα ενός συστήματος η οποία επιτυγχάνεται καθώς το φορτίο αυξάνει με την πάροδο του χρόνου. Δηλαδή όταν σε ένα σύστημα αυξάνεται το φορτίο που πρόκειται να μεταφερθεί μέσω της ασύρματης δικτύωσης, επιτυγχάνεται τελικά μια διεκπεραιωτική ικανότητα, η οποία είναι μικρότερη της μέγιστης διεκπεραιωτικής ικανότητας και η οποία δεν μεταβάλλεται αν συνεχίσει να αυξάνεται το φορτίο με την πάροδο του χρόνου. Η Saturation Throughput αναπαριστά το μέγιστο φορτίο που μπορεί να μεταφερθεί σε ένα ασύρματο σύστημα σε σταθερές συνθήκες.

3.4 Διεκπεραιωτική Ικανότητα: Ανάλυση

Για την μαθηματική ανάλυση της διεκπεραιωτικής ικανότητας κορεσμού, ο Bianchi στην εργασία του [1] θεωρεί ότι α) δεν υπάρχουν κρυφοί σταθμοί β) υπάρχει πάντα συγκεκριμένος αριθμός σταθμών οι οποίοι εκπέμπουν στο τοπικό δίκτυο γ) κάθε σταθμός έχει ανά πάσα χρονική στιγμή ένα πακέτο έτοιμο προς μετάδοση, δηλαδή το ασύρματο δίκτυο που μελετάται λειτουργεί σε συνθήκες κορεσμού δ) δεν υφίσταται το φαινόμενο capture (είναι το φαινόμενο κατά το οποίο εκπέμπουν δύο σταθμοί π.χ. ο 1 εκπέμπει στον 2 και ο 3 εκπέμπει στον 4, αλλά δεν έχουμε σύγκρουση στη λήψη, επειδή ο 2 είναι πολύ κοντά στον 1 αλλά μακριά από τον 3 και αντίστοιχα ο 4 είναι πολύ κοντά στον 3 αλλά μακριά από τον 1, με συνέπεια η παρεμβολή να είναι ασθενική και τελικά να είναι εφικτή η λήψη των πακέτων).

3.4.1 Πιθανότητα μετάδοσης πακέτου

Θεωρούμε ένα σύστημα με n σταθμούς το οποίο λειτουργεί σε συνθήκες κορεσμού. Θεωρούμε επίσης την στοχαστική διαδικασία $b(t)$ η οποία αντιπροσωπεύει τον μετρητή υποχώρησης (backoff) για ένα δεδομένο σταθμό. Ακόμη θεωρούμε μια ακέραιη και διακριτή χρονική κλίμακα t και $t + 1$ όπου οι δύο αυτές τιμές αντιστοιχούν στην αρχή δύο διαδοχικών χρονικών σχισμών. Αυτή η χρονική κλίμακα δεν είναι ίδια με το χρόνο του συστήματος μια και αν υπάρχει μετάδοση πακέτου (ή σύγκρουση), το χρονικό διάστημα μεταξύ των αρχών δύο συνεχόμενων χρονικών σχισμών μπορεί να είναι σημαντικά μεγαλύτερο από το μέγεθος μιας χρονικής σχισμής σ . Η τιμή αυτού του χρονικού διαστήματος εξαρτάται από τον μηχανισμό πρόσβασης (Basic ή RTS/CTS).

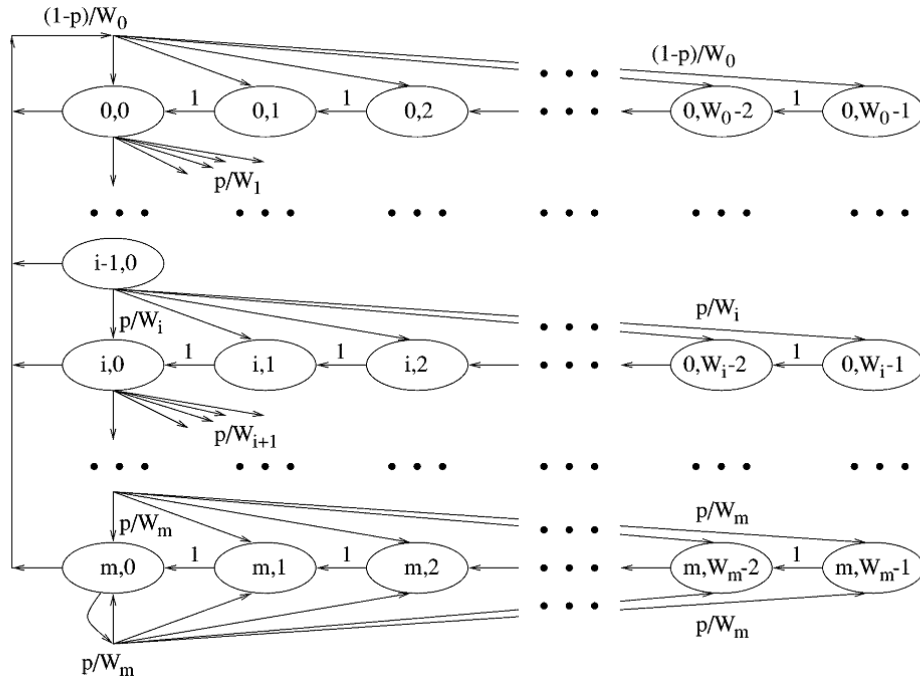
Έστω $W = CW_{min}$ το ελάχιστο παράθυρο ανταγωνισμού. Επίσης έστω m το μέγιστο στάδιο υποχώρησης (υπενθυμίζεται ότι ισχύει η σχέση $CW_{max} = 2^m \cdot W$). Χρησιμοποιείται εδώ ο συμβολισμός:

$W_i = 2^i \cdot W$ όπου $i \in [0, m]$. Το i καλείται στάδιο υποχώρησης (backoff stage).

Επίσης έστω $s(t)$ η στοχαστική διαδικασία η οποία αντιπροσωπεύει το στάδιο υποχώρησης στο οποίο βρίσκεται μια δεδομένη χρονική στιγμή t ένας σταθμός. Οι τιμές της $s(t)$ ανήκουν στο διάστημα $[0, m]$.

Η βασική προσέγγιση στο μοντέλο του Bianchi [1], είναι ότι ανεξάρτητα από το αριθμό των αναμεταδόσεων ενός πακέτου, κάθε νέα προσπάθεια μετάδοσης του

πακέτου αυτού υπόκειται σε μια σταθερή και ανεξάρτητη πιθανότητα σύγκρουσης p . Η πιθανότητα αυτή αναφέρεται στην εργασία του Bianchi [1] και ως υπό συνθήκη πιθανότητα σύγκρουσης και είναι η πιθανότητα σύγκρουσης ενός πακέτου το οποίο μεταδίδεται στο ασύρματο δίκτυο.



Σχήμα 3.3

Αλυσίδα Markov για το μέγεθος του παραθύρου υποχώρησης

Εφόσον η πιθανότητα αυτή είναι σταθερή και ανεξάρτητη από τις αναμεταδόσεις του πακέτου, είναι δυνατόν να μοντελοποιηθεί η δύο διαστάσεων διαδικασία $\{s(t), b(t)\}$ με μια διακριτού χρόνου αλυσίδα Markov. Στο σχήμα 3.3 παρουσιάζεται η αλυσίδα Markov για το μέγεθος του παραθύρου υποχώρησης (backoff window).

Στην παραπάνω αλυσίδα Markov η μετάβαση από μια κατάσταση σε μια άλλη (πορεία βελών) μπορεί να αντιστοιχεί σε μια άδεια χρονική σχισμή, ή σε μια σύγκρουση ή σε μια επιτυχημένη μετάδοση.

Ορίζουμε τον ακόλουθο συμβολισμό:

$$P\{i_1, k_1 | i_0, k_0\} = P\{s(t + 1) = i_1, b(t + 1) = k_1 | s(t) = i_0, b(t) = k_0\} \quad (3.1)$$

Οι μόνες μη μηδενικές πιθανότητες για να γίνει η μετάβαση από την μια δισδιάστατη κατάσταση στην άλλη με ένα βήμα είναι:

$$P\{i, k | i, k + 1\} = 1 \quad k \in (0, W_i - 2) \quad i \in (0, m) \quad (3.2)$$

$$P\{0, k | i, 0\} = (1 - p)/W_0 \quad k \in (0, W_0 - 1) \quad i \in (0, m) \quad (3.3)$$

$$P\{i, k | i - 1, 0\} = p/W_i \quad k \in (0, W_i - 1) \quad i \in (1, m) \quad (3.4)$$

$$P\{m, k | m, 0\} = p/W_m \quad k \in (0, W_m - 1) \quad (3.5)$$

Η σχέση (3.2) αναπαριστά το γεγονός ότι στην αρχή κάθε σχισμής, ο μετρητής υποχώρησης μειώνεται. Η (3.3) αναπαριστά το γεγονός μιας επιτυχημένης μετάδοσης πακέτου. Η (3.4) αναπαριστά μια αποτυχημένη μετάδοση, όπου το στάδιο υποχώρησης αυξάνεται (γίνεται i από $i - 1$) και η (3.5) αναπαριστά μια αποτυχημένη μετάδοση όπου το στάδιο υποχώρησης ήταν m και δεν αυξάνεται επιπλέον.

Έστω 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 πιθανοτήτων της αλυσίδας Markov. Ένα πακέτο μπορεί να μεταπέσει από το στάδιο υποχώρησης $i-1$ στο στάδιο υποχώρησης i , αν η μετάδοση του είναι ανεπιτυχής λόγω σύγκρουσης.

Στη συνέχεια θα αποδειχθεί η ισχύς της παρακάτω συνεπαγωγής (3.6), χρησιμοποιώντας την αλυσίδα Markov του σχήματος 3.3:

$$b_{i-1,0} \cdot p = b_{i,0} \rightarrow b_{i,0} = p^i \cdot b_{0,0} \quad 0 < i < m \quad (3.6)$$

Συγκεκριμένα:

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

Αν τώρα το στάδιο υποχώρησης ενός πακέτου έχει φθάσει στην ανώτερη τιμή του m , τότε σύμφωνα με το σχήμα 3.3 αυτό μπορεί να γίνει είτε από το στάδιο $b_{m-1,0}$ είτε από τον εαυτό του $b_{m,0}$.

Συνεπώς:

$$\begin{aligned} b_{m,0} &= b_{m-1,0} \cdot p + b_{m,0} \cdot p \rightarrow b_{m,0} \cdot (1 - p) = b_{m-1,0} \cdot p \rightarrow \\ \rightarrow b_{m,0} &= \frac{b_{m-1,0} \cdot p}{(1 - p)} = \frac{p^m}{(1 - p)} b_{0,0} \end{aligned} \quad (3.7)$$

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

$$b_{i,k} = \frac{W_i - k}{W_i} \begin{cases} (1 - p) \sum_{j=0}^m b_{j,0} & i = 0 \\ p \cdot b_{i-1,0} & 0 < i < m \\ p \cdot (b_{m-1,0} + b_{m,0}) & i = m \end{cases} \quad (3.8)$$

Στη συνέχεια θα αποδειχθεί η (3.8):

Για $0 < i < m$:

Η μετάβαση στην κατάσταση $b_{i,k}$, σύμφωνα με το σχήμα 3.3, μπορεί να γίνει είτε από την $b_{i-1,0}$ με πιθανότητα $\frac{p}{W_i}$, είτε μέσω $b_{i,k+1}$ με πιθανότητα $1 \cdot (\frac{p}{W_i})$, είτε μέσω $b_{i,k+2}$ με πιθανότητα $1 \cdot 1 \cdot (\frac{p}{W_i})$ κλπ και τελικά μέσω b_{i,W_i-1} με πιθανότητα $1 \cdots 1 \cdot 1 \cdot (\frac{p}{W_i})$.

Αθροίζοντας τις παραπάνω πιθανότητες:

$$\frac{p}{W_i} + \frac{p}{W_i} + \cdots + \frac{p}{W_i} = \frac{W_i - k}{W_i} \cdot p$$

και τελικά:

$$b_{i,k} = \frac{W_i - k}{W_i} \cdot p \cdot b_{i-1,0}$$

Για $i = m$:

Η μετάβαση στην κατάσταση $b_{m,k}$ μπορεί να γίνει ξεκινώντας από την $b_{m-1,0}$ είτε από την $b_{m,0}$ πάντα σύμφωνα με το σχήμα 3.3. Η συνολική πιθανότητα είναι:

$$\frac{W_m - k}{W_m} \cdot p \cdot b_{m-1,0} + \frac{W_m - k}{W_m} \cdot p \cdot b_{m,0} = \frac{W_m - k}{W_m} \cdot p \cdot (b_{m-1,0} + b_{m,0})$$

και τελικά:

$$b_{m,k} = \frac{W_m - k}{W_m} \cdot p \cdot (b_{m-1,0} + b_{m,0})$$

Για $i = 0$:

Η μετάβαση στην κατάσταση $b_{0,k}$ μπορεί να γίνει είτε από την κατάσταση $b_{0,0}$ με πιθανότητα $\frac{W_0-k}{W_0} \cdot (1-p)$, είτε από την κατάσταση $b_{1,0}$ με πιθανότητα $\frac{W_0-k}{W_0} \cdot (1-p)$, είτε από την $b_{2,0}$ με πιθανότητα $\frac{W_0-k}{W_0} \cdot (1-p)$ κλπ (με κατάληξη η μετάβαση να γίνει από την κατάσταση $b_{m,0}$ με πιθανότητα $\frac{W_0-k}{W_0} \cdot (1-p)$). Αθροίζοντας τις παραπάνω πιθανότητες προκύπτει:

$$b_{0,k} = \frac{W_0 - k}{W_0} \cdot (1 - p) \sum_{j=0}^m b_{j,0}$$

Στη συνέχεια θα αποδειχθεί η σχέση:

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

Αναπτύσσουμε το άθροισμα:

$$\sum_{i=0}^m b_{i,0} = b_{0,0} + b_{1,0} + b_{2,0} + b_{3,0} + \dots + b_{m,0}$$

Χρησιμοποιώντας την (3.6) και την (3.7) το παραπάνω άθροισμα μετασχηματίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned} \sum_{i=0}^m b_{i,0} &= b_{0,0} + p \cdot b_{0,0} + p^2 \cdot b_{0,0} + p^3 \cdot b_{0,0} + \dots + p^{(m-1)} \cdot b_{0,0} + \frac{p^m}{(1-p)} \cdot b_{0,0} = \\ &= b_{0,0} (1 + p + p^2 + p^3 + \dots + p^{(m-1)} + \frac{p^m}{(1-p)}) = \\ &= b_{0,0} \left(\frac{1-p+p(1-p)+p^2(1-p)+p^3(1-p)+\dots+p^{(m-1)}(1-p)+p^m}{(1-p)} \right) = \\ &= b_{0,0} \left(\frac{1-p+p-p^2+p^2-p^3+p^3-p^4+\dots+p^{(m-1)}-p^m+p^m}{(1-p)} \right) = \frac{b_{0,0}}{(1-p)} \end{aligned}$$

Λαμβάνοντας υπ' όψιν τις σχέσεις (3.6), (3.7) και (3.9), η σχέση (3.8) μπορεί να ξαναγραφεί ως εξής:

$$b_{i,k} = \frac{W_i - k}{W_i} b_{i,0} \quad i \in (0, m), k \in (0, W_i - 1) \quad (3.10)$$

Στη συνέχεια αποδεικνύεται η σχέση (3.10):

Για $i = 0$:

Από την σχέση (3.8) και χρησιμοποιώντας την (3.9) λαμβάνεται:

$$b_{i,k} = \frac{W_i - k}{W_i} (1 - p) \sum_{j=0}^m b_{j,0} = \frac{W_0 - k}{W_0} (1 - p) \frac{b_{0,0}}{(1-p)} = \frac{W_0 - k}{W_0} b_{0,0}$$

Για $0 < i < m$:

Από την σχέση (3.8) και χρησιμοποιώντας την (3.6) λαμβάνεται:

$$b_{i,k} = \frac{W_i - k}{W_i} p \cdot b_{i-1,0} = \frac{W_i - k}{W_i} b_{i,0}$$

Για $i = m$:

Από την σχέση (3.8) και χρησιμοποιώντας την (3.7) λαμβάνεται:

$$\begin{aligned} b_{m,k} &= \frac{W_m - k}{W_m} p \cdot (b_{m-1,0} + b_{m,0}) = \frac{W_m - k}{W_m} p \cdot b_{m-1,0} + \frac{W_m - k}{W_m} p \cdot b_{m,0} = \\ &= \frac{W_m - k}{W_m} \cdot [(1 - p) \cdot b_{m,0} + p \cdot b_{m,0}] = \frac{W_m - k}{W_m} \cdot b_{m,0} \end{aligned}$$

Χρησιμοποιώντας τελικά τις σχέσεις (3.6), (3.7) και (3.10), διαπιστώνεται ότι όλες οι τιμές $b_{i,k}$ μπορούν να εκφραστούν συναρτήσει της $b_{0,0}$ και της υπό συνθήκη πιθανότητας σύγκρουσης p . Στη συνέχεια υπολογίζεται η $b_{0,0}$, αθροίζοντας όλες τις πιθανές τιμές $b_{i,k}$ (σημειώνεται εδώ ότι το άθροισμα των πιθανοτήτων αυτών ισούται με την μονάδα):

$$1 = \sum_{i=0}^m \sum_{k=0}^{W_i - 1} b_{i,k} = \sum_{i=0}^m b_{i,0} \sum_{k=0}^{W_i - 1} \frac{W_i - k}{W_i} \quad (3.11)$$

Από την παραπάνω σχέση (3.11), το εσωτερικό άθροισμα γίνεται:

$$\begin{aligned} \sum_{k=0}^{W_i - 1} \frac{W_i - k}{W_i} &= \frac{W_i - 0}{W_i} + \frac{W_i - 1}{W_i} + \frac{W_i - 2}{W_i} + \dots + \frac{W_i - (W_i - 1)}{W_i} = \\ &= 1 + \frac{W_i + W_i + W_i + \dots + W_i - (1 + 2 + 3 + \dots + W_i - 2) + 1}{W_i} = \\ &= 1 + \frac{(W_i - 2) \cdot W_i - \left(\frac{(W_i - 2)^2 + (W_i - 2)}{2} \right) + 1}{W_i} = \\ &= 1 + \frac{2W_i^2 - 4W_i - (W_i^2 - 4W_i + 4 + W_i - 2) + 2}{2W_i} = 1 + \frac{W_i^2 - W_i}{2W_i} = \\ &= 1 + \frac{W_i - 1}{2} = \frac{W_i - 1 + 2}{2} = \frac{W_i + 1}{2} \end{aligned}$$

Συνεπώς η (3.11) γίνεται:

$$\begin{aligned}
& \sum_{i=0}^m b_{i,0} \sum_{k=0}^{W_i-1} \frac{W_i - k}{W_i} = \sum_{i=0}^m b_{i,0} \frac{W_i + 1}{2} = \\
& = b_{0,0} \frac{W+1}{2} + p \cdot b_{0,0} \cdot \frac{2 \cdot W+1}{2} + p^2 \cdot b_{0,0} \cdot \frac{2^2 \cdot W+1}{2} + p^3 \cdot b_{0,0} \cdot \frac{2^3 \cdot W+1}{2} + \dots + b_{0,0} \cdot \frac{p^m}{(1-p)} \cdot \frac{2^m \cdot W+1}{2} \\
& = \frac{b_{0,0}}{2} (2^0 \cdot p^0 \cdot W + p^0 + 2^1 \cdot p^1 \cdot W + p^1 + 2^2 \cdot p^2 \cdot W + p^2 + \dots + \frac{2^m \cdot p^m \cdot W}{(1-p)} + \frac{p^m}{(1-p)}) = \\
& = \frac{b_{0,0}}{2} (W \cdot (2^0 \cdot p^0 + 2^1 \cdot p^1 + 2^2 \cdot p^2 + \dots + \frac{2^m \cdot p^m}{(1-p)})) + (p^0 + p^1 + p^2 + \dots + \frac{p^m}{(1-p)}) \\
& \quad \rightarrow \\
& 1 = \frac{b_{0,0}}{2} \left[W \cdot \left(\sum_{i=0}^{m-1} (2 \cdot p)^i + \frac{(2p)^m}{(1-p)} \right) + \frac{1}{(1-p)} \right] \tag{3.12}
\end{aligned}$$

Η σχέση (3.12) μπορεί να απλοποιηθεί περαιτέρω θεωρώντας ότι:

$$\sum_{i=0}^{m-1} (2 \cdot p)^i = \frac{1 - (2p)^m}{1 - 2p}$$

Συνεπώς η (3.12) γίνεται:

$$\begin{aligned}
1 &= \frac{b_{0,0}}{2} (W \cdot (\frac{1 - (2p)^m}{1 - 2p} + \frac{(2p)^m}{1 - p}) + \frac{1}{(1-p)}) \rightarrow \\
1 &= \frac{b_{0,0}}{2} \frac{W(1 - 2^m \cdot p^m) \cdot (1 - p) + W \cdot 2^m \cdot p^m \cdot (1 - 2p) + (1 - 2p)}{(1 - 2p)(1 - p)}
\end{aligned}$$

Λύνοντας την παραπάνω σχέση ως προς $b_{0,0}$:

$$b_{0,0} = \frac{2 \cdot (1 - 2p)(1 - p)}{W(1 - (2p)^m) \cdot (1 - p) + W \cdot (2p)^m \cdot (1 - 2p) + (1 - 2p)} \tag{3.13}$$

Στη συνέχεια εκφράζεται η πιθανότητα τ κατά την οποία ένας σταθμός εκπέμπει σε μια τυχαία χρονική σχισμή (slot time). Καθώς οποιαδήποτε εκπομπή συμβαίνει όταν ο μετρητής υποχώρησης μηδενισθεί, η πιθανότητα τ δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\tau = \sum_{i=0}^m b_{i,0} = \frac{b_{0,0}}{(1-p)} = \frac{2 \cdot (1 - 2p)}{(1 - 2p)(W + 1) + p \cdot W(1 - (2p)^m)} \tag{3.14}$$

Στην σχέση (3.14), όταν $m=0$, δηλαδή όταν θεωρείται ότι δεν υπάρχει εκθετική υποχώρηση στην DCF (σταθερό παράθυρο υποχώρησης W), τότε η τ υπολογίζεται ως εξής:

$$\tau = \frac{2}{W + 1} \quad (3.15)$$

Σε αυτή τη περίπτωση η τ είναι ανεξάρτητη από την p .

Γενικά όμως η πιθανότητα τ εξαρτάται από την πιθανότητα p . Για να υπολογισθεί η p , σημειώνεται εδώ ότι ένα πακέτο είναι δυνατόν να εμπλακεί σε σύγκρουση αν την ίδια χρονική στιγμή εκπέμψει ένας από τους εναπομείναντες $n-1$ σταθμούς. Κάθε σταθμός αντιλαμβάνεται το σύστημα στην ίδια κατάσταση (πχ σε μια σταθερή κατάσταση). Στην σταθερή κατάσταση κάθε ένας από τους υπόλοιπους σταθμούς είναι δυνατόν να μεταδώσει ένα πακέτο με πιθανότητα τ . Συνεπώς η p εκφράζεται ως εξής:

$$p = 1 - (1 - \tau)^{n-1} \quad (3.16)$$

Οι εξισώσεις (3.14) και (3.16) αποτελούν ένα μη γραμμικό σύστημα με αγνώστους τις τ και p , το οποίο μπορεί να επιλυθεί χρησιμοποιώντας αριθμητικές μεθόδους και όπως απέδειξε ο Bianchi [1], έχει μοναδική πραγματική λύση.

3.4.2 Διεκπεραιωτική Ικανότητα (Throughput)

Έστω S η κανονικοποιημένη διεκπεραιωτική ικανότητα ενός ασύρματου IEEE 802.11 δικτύου. Η S ορίζεται ως το κλάσμα του χρόνου κατά το οποίο το κανάλι είναι απασχολημένο για να μεταδώσει επιτυχώς το ωφέλιμο φορτίο. Για τον υπολογισμό της S εξετάζεται παρακάτω τι θα μπορούσε να συμβεί σε μια τυχαία επιλεγμένη χρονική σχισμή.

Έστω P_{tr} η πιθανότητα ότι στη συγκεκριμένη χρονική σχισμή συμβαίνει τουλάχιστον μία μετάδοση. Εφόσον υπάρχουν n σταθμοί οι οποίοι ανταγωνίζονται για να μεταδώσουν πακέτα στο κανάλι και κάθε σταθμός μεταδίδει με πιθανότητα τ , η P_{tr} εκφράζεται από την παρακάτω σχέση:

$$P_{tr} = 1 - (1 - \tau)^n \quad (3.17)$$

Η πιθανότητα P_s ότι μια μετάδοση είναι επιτυχής δίνεται από την πιθανότητα ότι ακριβώς ένας σταθμός εκπέμπει, θεωρώντας ότι τουλάχιστον ένας σταθμός εκπέμπει:

$$P_s = \frac{n\tau(1-\tau)^{n-1}}{P_{tr}} = \frac{n\tau(1-\tau)^{n-1}}{1-(1-\tau)^n} \quad (3.18)$$

Η S δίνεται από τον παρακάτω λόγο:

$$S = \frac{E[\text{Φορτίο πληροφορίας που μεταδίδεται σε μια χρονική σχισμή}]}{E[\text{Μέγεθος χρονικής σχισμής}]} \quad (3.19)$$

Θεωρώντας ότι $E[P]$ είναι η μέση τιμή του ωφέλιμου φορτίου (πακέτου), τότε η μέση τιμή του ωφέλιμου φορτίου που μεταδίδεται επιτυχώς σε μια χρονική σχισμή είναι $P_{tr}P_sE[P]$. Η μέση τιμή μιας χρονικής σχισμής υπολογίζεται θεωρώντας ότι με πιθανότητα $1 - P_{tr}$, στη διάρκεια της χρονικής σχισμής δεν συνέβη μετάδοση (empty slot time), με πιθανότητα $P_{tr}P_s$ συνέβη επιτυχής μετάδοση και με πιθανότητα $P_{tr}(1 - P_s)$ συνέβη σύγκρουση. Συνεπώς η (3.19) μετασχηματίζεται ως εξής:

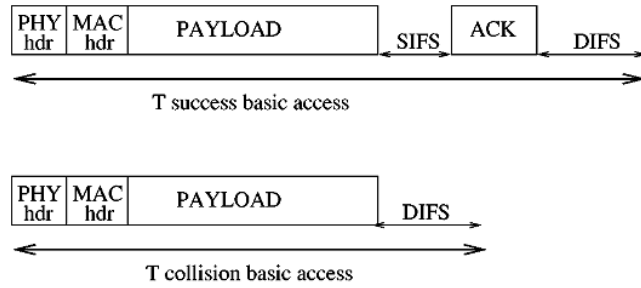
$$S = \frac{P_{tr}P_sE[P]}{(1 - P_{tr})\sigma + P_{tr}P_sT_s + P_{tr}(1 - P_s)T_c} \quad (3.20)$$

Όπου σ η διάρκεια μιας άδειας χρονικής σχισμής, T_s ο χρόνος κατά τον οποίο το κανάλι είναι απασχολημένο λόγω επιτυχούς μετάδοσης (δηλ ο χρόνος που διαρκεί μια χρονική σχισμή) και T_c ο χρόνος κατά τον οποίο το κανάλι είναι απασχολημένο λόγω σύγκρουσης.

Οι τιμές των T_s και T_c εξαρτώνται από τον μηχανισμό μετάδοσης που χρησιμοποιεί η DCF:

Βασικός μηχανισμός μετάδοσης

Έστω $H = PHY_{hdr} + MAC_{hdr}$ η επικεφαλίδα του πακέτου (η οποία αποτελείται από το άθροισμα των επικεφαλίδων του φυσικού και του MAC επιπέδου).



Σχήμα 3.4

T_s και T_c βασικού μηχανισμού μετάδοσης

Σύμφωνα με το σχήμα 3.4 οι χρόνοι T_s και T_c υπολογίζονται ως εξής (θεωρώντας ότι όλα τα πακέτα έχουν το ίδιο σταθερό μέγεθος):

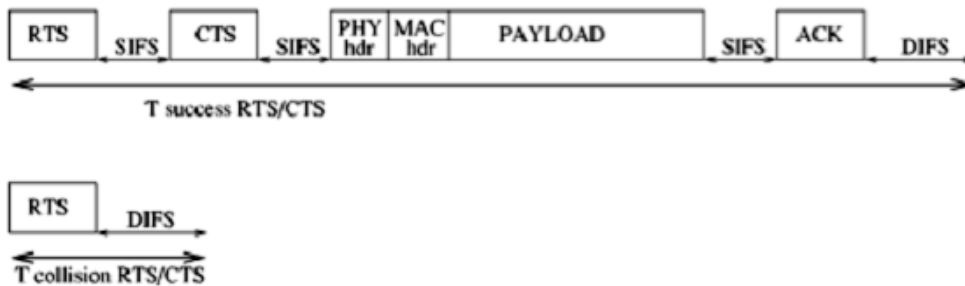
$$\begin{aligned}
 T_s^{bas} &= H + E[P] + SIFS + \delta + ACK + DIFS + \delta \\
 T_c^{bas} &= H + E[P] + DIFS + \delta
 \end{aligned}
 \tag{3.21}$$

RTS/CTS μηχανισμός μετάδοσης

Σύμφωνα με το σχήμα 3.5 οι χρόνοι T_s και T_c υπολογίζονται ως εξής:

$$\begin{aligned}
 T_s^{rts} &= RTS + SIFS + \delta + CTS + SIFS + \delta + H + E[P] + SIFS + \delta \\
 &\quad + ACK + DIFS + \delta
 \end{aligned}
 \tag{3.22}$$

$$T_c^{rts} = RTS + DIFS + \delta$$



Σχήμα 3.5

T_s και T_c μηχανισμού μετάδοσης RTS/CTS

3.5 Αποτελέσματα μαθηματικού μοντέλου - Επικύρωση

Χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Matlab για τον υπολογισμό των σχέσεων του μαθηματικού μοντέλου του Bianchi. Συγκεκριμένα, αρχικά υπολογίσθηκαν τα τ και p , επιλύοντας το μη γραμμικό σύστημα των εξισώσεων (3.14) και (3.16). Στη συνέχεια υπολογίσθηκαν οι πιθανότητες P_{tr} και P_s . Κατόπιν υπολογίσθηκαν τα T_s και T_c (ανάλογα με το μηχανισμό μετάδοσης) και στη συνέχεια με βάση την σχέση (3.20) υπολογίσθηκε η S . Οι τιμές της S που υπολογίσθηκαν για διαφορετικό αριθμό σταθμών, χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των διαγραμμάτων. Τα διαγράμματα που προέκυψαν από το μαθηματικό αναλυτικό μοντέλο, παριστάνονται με συνεχή γραμμή.

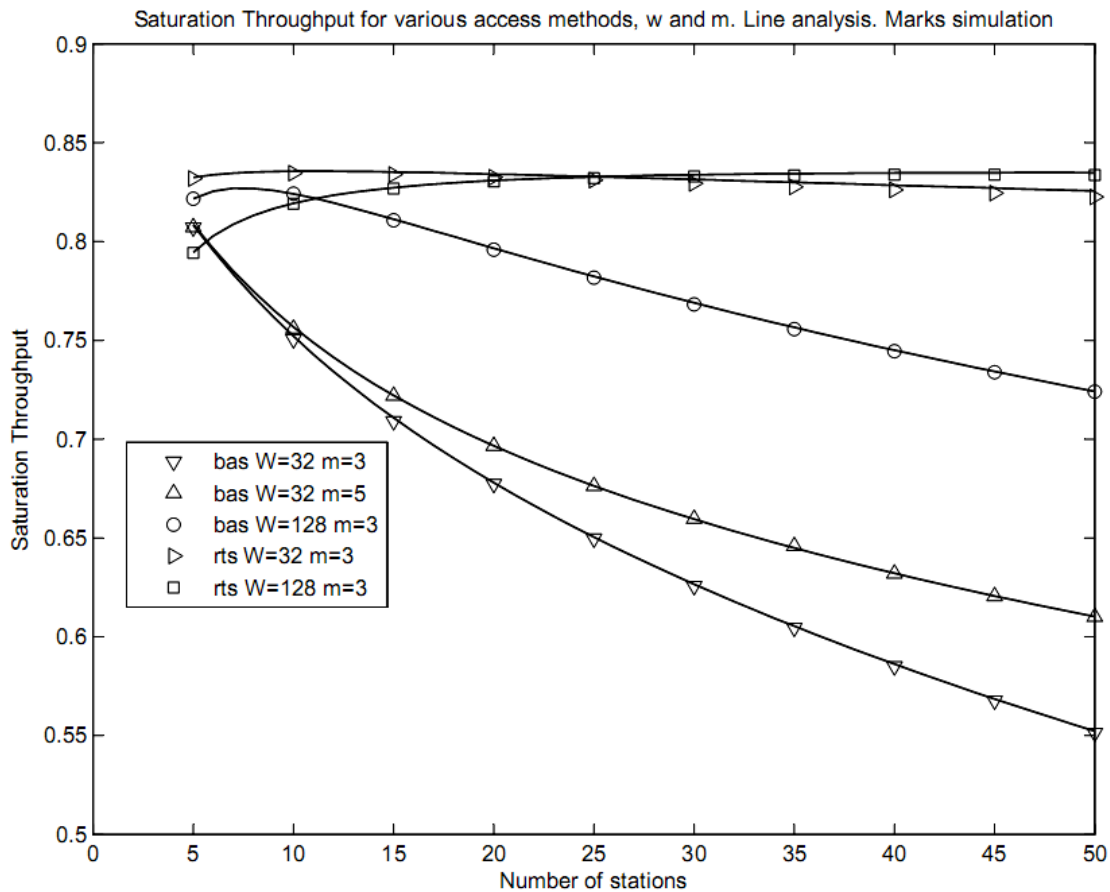
Για την επικύρωση του μαθηματικού μοντέλου, κατασκευάστηκε πρόγραμμα προσομοίωσης σε Matlab, το οποίο προσομοιώνει την λειτουργία ενός ασύρματου δικτύου IEEE 802.11. Οι τιμές της S που υπολογίσθηκαν με τον προσομοιωτή χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή διαγραμμάτων. Τα διαγράμματα αυτά κατασκευάστηκαν στο ίδιο σύστημα αξόνων με τα αναλυτικά διαγράμματα για να είναι ευκολότερη η σύγκριση. Τα διαγράμματα της προσομοίωσης παριστάνονται με σημάδια (marks).

Όπως φαίνεται στα διαγράμματα 3.6, 3.7, 3.8 και 3.9, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης (marks) συμπίπτουν με αυτά του αναλυτικού μοντέλου (lines), γεγονός που αποδεικνύει την αξιοπιστία του αναλυτικού μοντέλου. Στη γενική περίπτωση τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έχουν διαφορά μικρότερη από 0,5% με αυτά του αναλυτικού μοντέλου.

Πίνακας 3.3
Παράμετροι FHSS, 802.11

| Παράμετρος | Τιμή |
|-------------------|-----------------------|
| 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/s |
| Propagation Delay | 1 μ s |
| Slot Time | 50 μ s |
| SIFS | 28 μ s |
| DIFS | 128 μ s |

Τα αποτελέσματα του αναλυτικού μοντέλου και του προσομοιωτή έχουν ληφθεί χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους του πίνακα 3.3 . Οι τιμές αυτές ισχύουν για το Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS) φυσικό επίπεδο. Ο ρυθμός μετάδοσης του καναλιού είναι 1 Mbps. Το ωφέλιμο φορτίο θεωρείται ότι είναι σταθερό και ίσο με 8184 bits.

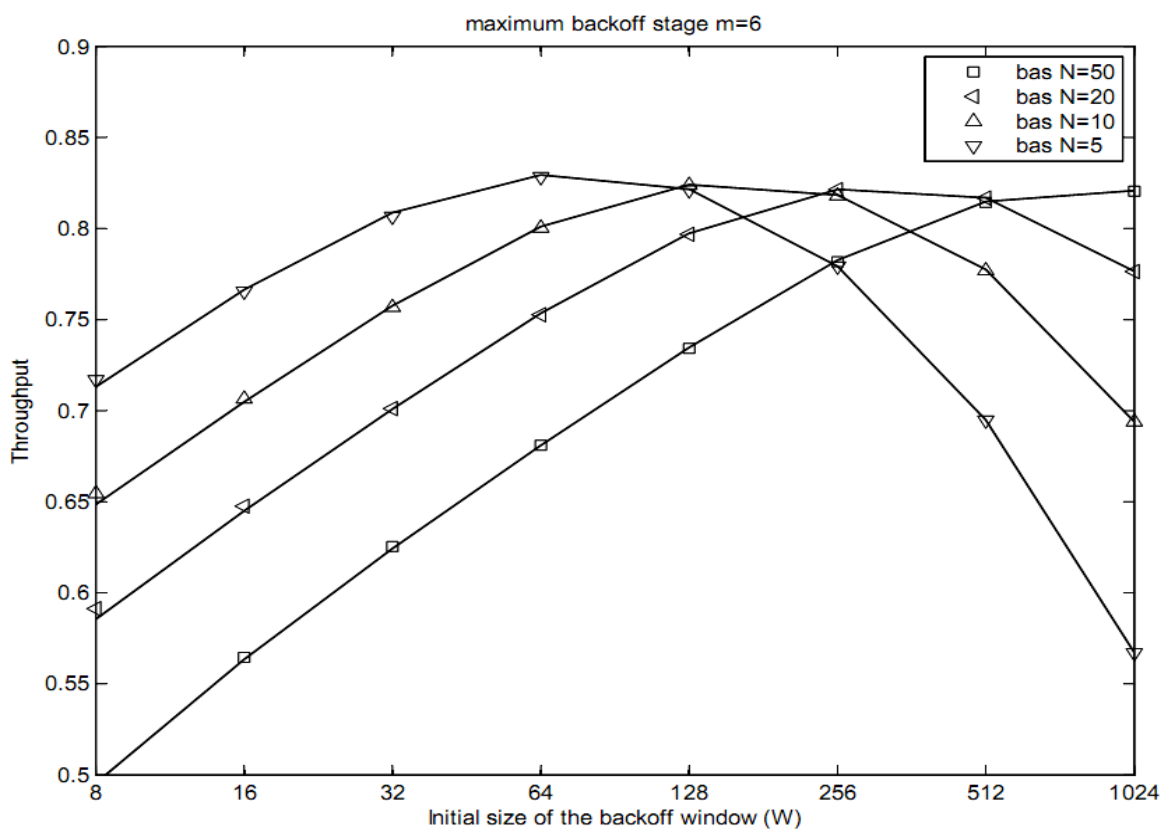


Σχήμα 3.6

Γραφική παράσταση Διεκπαιωτικής Ικανότητας ως προς τον αριθμό σταθμών

Στο σχήμα 3.6 παριστάνεται η διεκπαιωτική ικανότητα ενός ασύρματου δικτύου, ως προς τον αριθμό σταθμών, για διάφορα W, m και για διαφορετικούς μηχανισμούς πρόσβασης του μέσου μετάδοσης. Από το σχήμα 3.6 γίνεται φανερό ότι στην περίπτωση του βασικού μηχανισμού πρόσβασης, η διεκπαιωτική ικανότητα ελαττώνεται σημαντικά όσο ο αριθμός των ασύρματων σταθμών αυξάνει. Αντίθετα στην περίπτωση του μηχανισμού πρόσβασης RTS/CTS η διεκπαιωτική ικανότητα παραμένει πρακτικά σταθερή όσο αυξάνεται ο αριθμός των σταθμών.

Στο σχήμα 3.7 παριστάνεται η διεκπεραιωτική ικανότητα ως προς το μέγεθος του αρχικού παραθύρου ανταγωνισμού όταν χρησιμοποιείται ο βασικός μηχανισμός πρόσβασης,



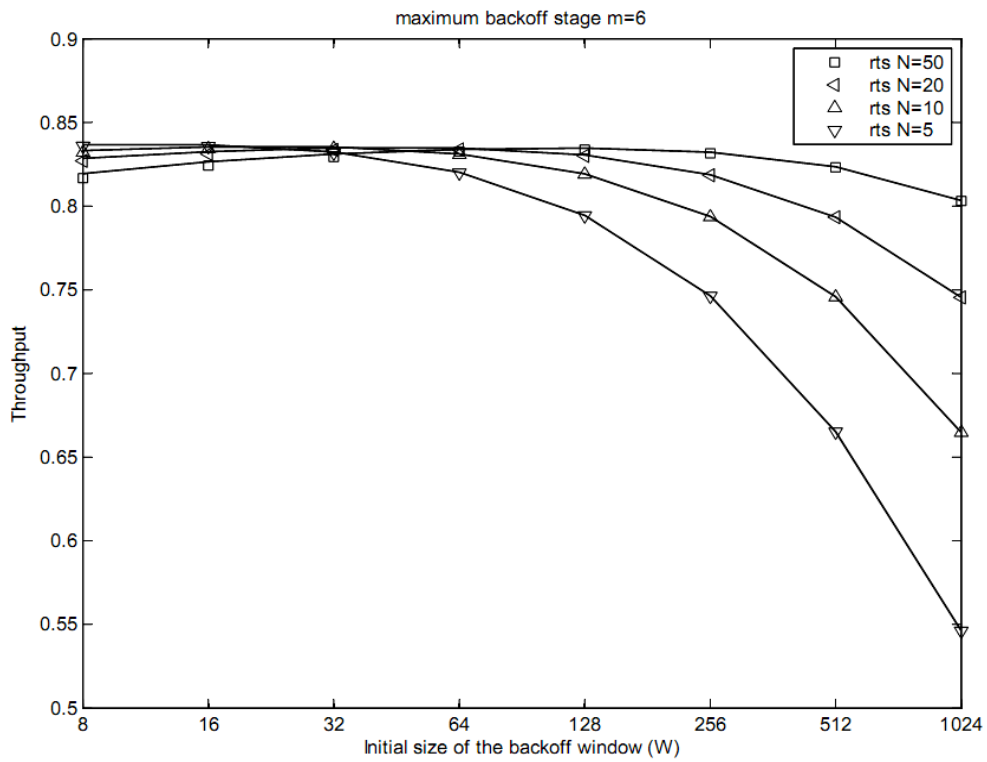
Σχήμα 3.7

Διεκπεραιωτική Ικανότητα ως προς αρχικό μέγεθος παραθύρου ανταγωνισμού για βασική πρόσβαση μέσου

Στο σχήμα 3.8 παριστάνεται η διεκπεραιωτική ικανότητα ως προς το μέγεθος του αρχικού παραθύρου ανταγωνισμού όταν χρησιμοποιείται ο μηχανισμός πρόσβασης RTS/CTS.

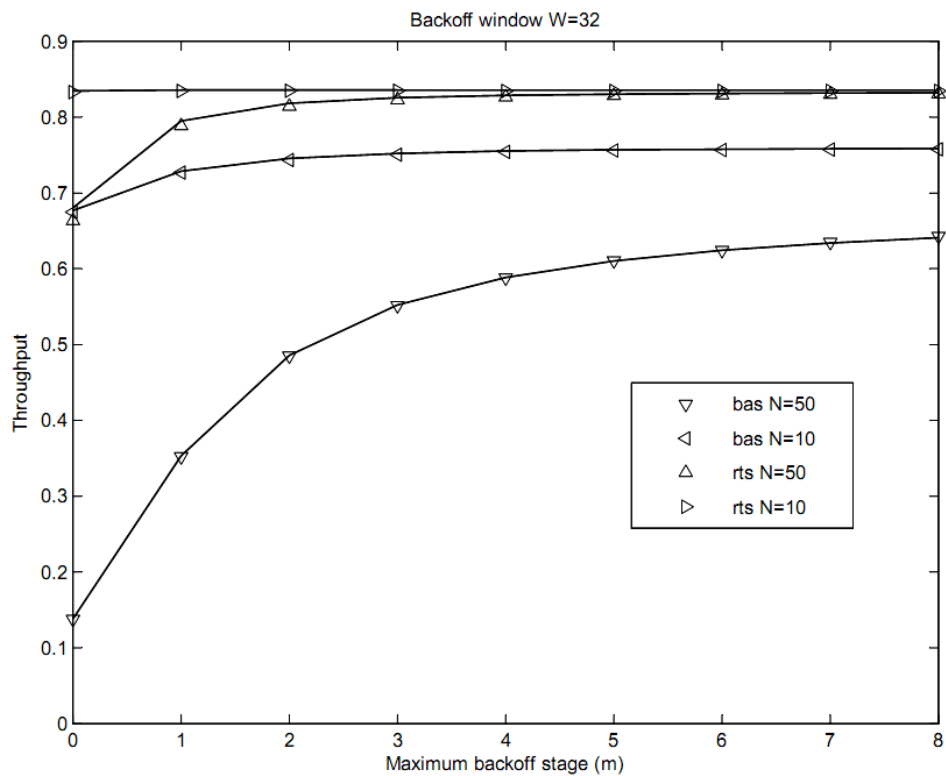
Η S , εξαρτάται σημαντικά από την μεταβολή του παραθύρου W και για τις δύο περιπτώσεις πρόσβασης του μέσου μετάδοσης. Η μέγιστη τιμή της S εξαρτάται και από την τιμή του W , αλλά και από τον αριθμό των σταθμών.

Τέλος στο σχήμα 3.9 παριστάνεται η διεκπεραιωτική ικανότητα ως προς τον μέγιστο αριθμό των σταδίων υποχώρησης m (για $W=32$). Από το διάγραμμα γίνεται φανερό ότι μετά από μια τιμή του m , η διεκπεραιωτική ικανότητα παραμένει σχεδόν σταθερή και για τους δύο μηχανισμούς πρόσβασης. Η τιμή αυτή είναι $m = 5$, δηλαδή είναι η τιμή που προτείνεται από το πρότυπο DSSS PHY (πίνακας 3.2).



Σχήμα 3.8

Διεκπεραιωτική Ικανότητα ως προς αρχικό μέγεθος παραθύρου ανταγωνισμού για RTS/CTS πρόσβαση μέσου



Σχήμα 3.9

Διεκπεραιωτική Ικανότητα ως προς τον μέγιστο αριθμό των σταδίων υποχώρησης

3.6 Υπολογισμός Διεκπεραιωτικής Ικανότητας με όριο αναμετάδοσης πακέτου

Στην εργασία του ο Haitao Wu [2] επέκτεινε το αναλυτικό μοντέλο του Bianchi [1], λαμβάνοντας υπ' όψιν το όριο αναμετάδοσης πακέτου. Δηλαδή, ενώ ο Bianchi θεωρεί ότι αν ένα πακέτο φθάσει στο μέγιστο στάδιο υποχώρησης συνεχίζεται η προσπάθεια αναμετάδοσης του από αυτό το στάδιο, ο Wu καθορίζει ένα στάδιο υποχώρησης στο οποίο αν ένα πακέτο φθάσει τότε αυτό απορρίπτεται.

Συγκεκριμένα, όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 3.2, στην πρώτη προσπάθεια μετάδοσης του πακέτου, το w παίρνει την τιμή CW_{min} . Εάν η προσπάθεια μετάδοσης είναι αποτυχημένη, τότε το παράθυρο ανταγωνισμού διπλασιάζεται. Αυτό συνεχίζεται μέχρι το παράθυρο ανταγωνισμού να φθάσει την μέγιστη τιμή του CW_{max} , οπότε δεν αυξάνεται άλλο. Ισχύει η σχέση $CW_{max} = CW_{min} \cdot 2^{m'}$. Εάν συνεχίζονται οι αποτυχημένες προσπάθειες μετάδοσης του πακέτου, τότε η τιμή βέβαια του παραθύρου ανταγωνισμού δεν αυξάνεται, αλλά όταν οι αποτυχημένες προσπάθειες (backoff stages) γίνουν μεγαλύτερες από ένα όριο m το πακέτο απορρίπτεται. Συνεπώς:

$$\begin{aligned} W_i &= 2^i \cdot W & 0 \leq i \leq m' \\ W_i &= 2^{m'} \cdot W & m' < i \leq m \end{aligned} \quad (3.23)$$

Όπου i είναι ο αριθμός των αποτυχημένων προσπαθειών μετάδοσης του πακέτου ή αλλιώς το στάδιο υποχώρησης, W είναι η ελάχιστη τιμή του παραθύρου ανταγωνισμού, m είναι το όριο αναμετάδοσης του πακέτου και m' ο αριθμός των διαφορετικών παραθύρων ανταγωνισμού. Η τιμή του m μπορεί να είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη από την τιμή του m' . Για το πρότυπο 802.11b προτείνεται η τιμή του $m=6$.

Σύμφωνα με το αναλυτικό μοντέλο του Wu [2], η πιθανότητα τ κατά την οποία ένας σταθμός εκπέμπει σε μια τυχαία χρονική σχισμή (slot time) είναι:

$$\tau = \sum_{i=0}^m b_{i,0} = \frac{1 - p^{m+1}}{1 - p} b_{0,0} \quad (3.24)$$

Επίσης με βάση το αναλυτικό μοντέλο του Wu [2], η τιμή του $b_{0,0}$ δίνεται από την:

$$b_{0,0} = \begin{cases} \frac{2(1-2p)(1-p)}{W(1-(2p)^{m+1})(1-p)+(1-2p)(1-p^{m+1})} & m \leq m' \\ \frac{2(1-2p)(1-p)}{W(1-(2p)^{m'+1})(1-p)+(1-2p)(1-p^{m+1})+W2^{m'}p^{m'+1}(1-2p)(1-p^{m-m'})} & m > m' \end{cases} \quad (3.25)$$

Η πιθανότητα σύγκρουσης ενός πακέτου το οποίο μεταδίδεται στο ασύρματο δίκτυο δίνεται από την:

$$p = 1 - (1 - \tau)^{n-1} \quad (3.26)$$

Οι εξισώσεις (3.24) και (3.26) αποτελούν ένα μη γραμμικό σύστημα με αγνώστους τις τ και p , το οποίο μπορεί να επιλυθεί χρησιμοποιώντας αριθμητικές μεθόδους και έχει μοναδική πραγματική λύση.

Για το υπολογισμό της διεκπεραιωτικής ικανότητας κορεσμού (Saturation Throughput), χρησιμοποιείται η σχέση (3.20).

Οι χρόνοι T_s και T_c σύμφωνα με τον Wu [2], υπολογίζονται ως εξής (θεωρώντας ότι όλα τα πακέτα έχουν το ίδιο σταθερό μέγεθος):

$$\begin{aligned} T_s^{bas} &= DIFS + H + E[P] + \delta + SIFS + ACK + \delta \\ T_c^{bas} &= DIFS + H + E[P] + SIFS + ACK \end{aligned} \quad (3.27)$$

$$\begin{aligned} T_s^{rts} &= DIFS + RTS + SIFS + \delta + CTS + SIFS + \delta + H + E[P] + SIFS \\ &\quad + \delta + ACK + \delta \end{aligned} \quad (3.28)$$

$$T_c^{rts} = DIFS + RTS + SIFS + CTS$$

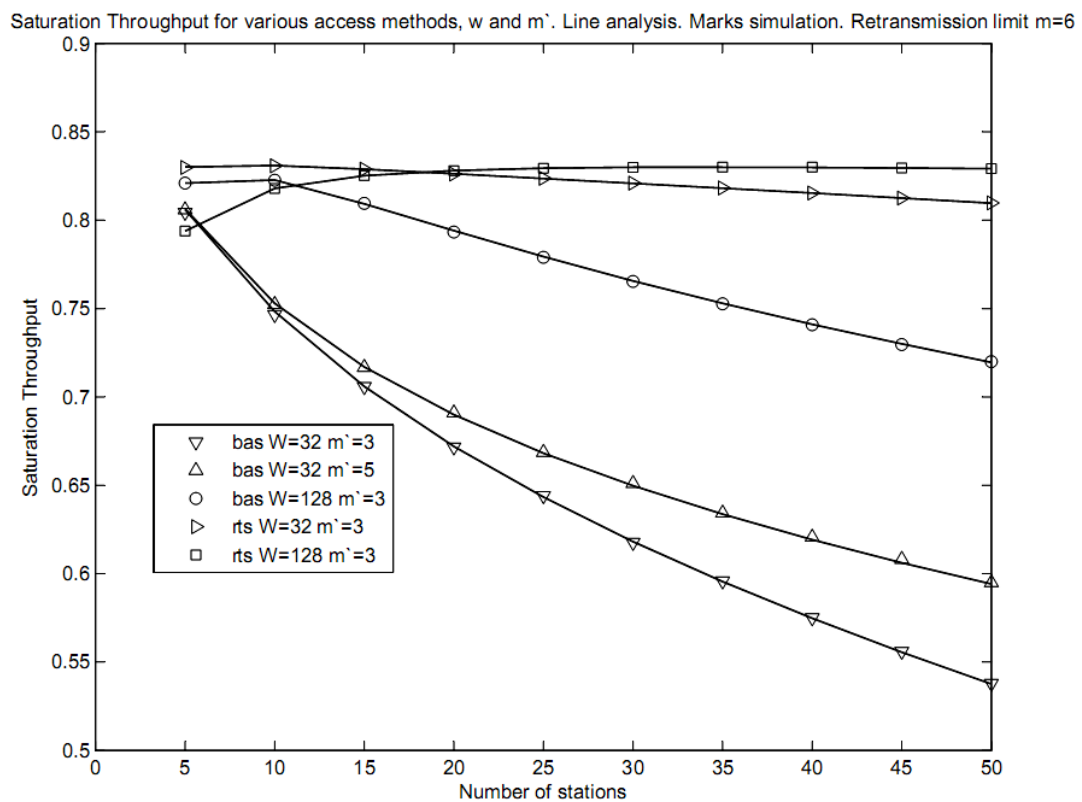
3.6.1 Αποτελέσματα μαθηματικού μοντέλου Wu - Επικύρωση

Χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Matlab για τον υπολογισμό των σχέσεων του μαθηματικού μοντέλου του Haitao Wu [2]. Επίσης για την επικύρωση του μαθηματικού μοντέλου, κατασκευάστηκε πρόγραμμα προσομοίωσης σε Matlab, το οποίο προσομοιώνει την λειτουργία ενός ασύρματου δικτύου IEEE 802.11. Οι τιμές της S που υπολογίσθηκαν με τον προσομοιωτή χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή διαγραμμάτων. Τα διαγράμματα αυτά κατασκευάσθηκαν στο ίδιο σύστημα αξόνων με

τα αναλυτικά διαγράμματα για να είναι ευκολότερη η σύγκριση. Τα διαγράμματα της προσομοίωσης παριστάνονται με σημάδια (marks).

Για είναι δυνατή η σύγκριση με το μοντέλο του Bianchi [1], τα αποτελέσματα του αναλυτικού μοντέλου και του προσομοιωτή έχουν ληφθεί χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους του πίνακα 3.3. Οι τιμές αυτές ισχύουν για το Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS) φυσικό επίπεδο. Ο ρυθμός μετάδοσης του καναλιού είναι 1 Mbps. Το ωφέλιμο φορτίο θεωρείται ότι είναι σταθερό και ίσο με 8184 bits. Επίσης το όριο αναμετάδοσης πακέτου είναι $m=6$.

Στο σχήμα 3.10 παριστάνεται η διεκπεραιωτική ικανότητα ενός ασύρματου δικτύου, ως προς τον αριθμό σταθμών, για διάφορα W, m' και για διαφορετικούς μηχανισμούς πρόσβασης του μέσου μετάδοσης. Σε όλες τις περιπτώσεις θεωρούμε ως όριο αναμετάδοσης πακέτου $m = 6$. Από το σχήμα συμπεραίνεται ότι η διεκπεραιωτική ικανότητα είναι ελαφρώς μικρότερη σε όλες τις περιπτώσεις από εκείνη που υπολογίσθηκε με βάση το μοντέλο του Bianchi [1]. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι το στο μαθηματικό μοντέλο του Bianchi [1] δεν λαμβάνεται υπ' όψιν το όριο αναμετάδοσης πακέτου (Retransmission limit).

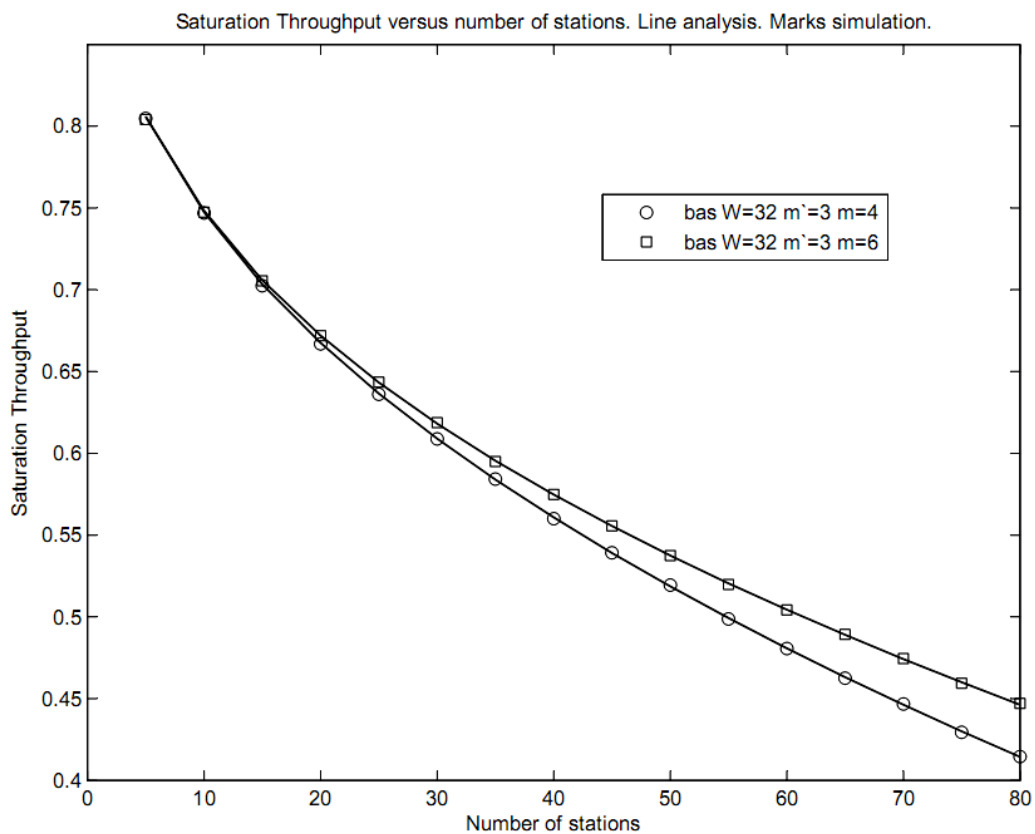


Σχήμα 3.10

Διεκπεραιωτική Ικανότητα ως προς τον αριθμό σταθμών, $m=6$

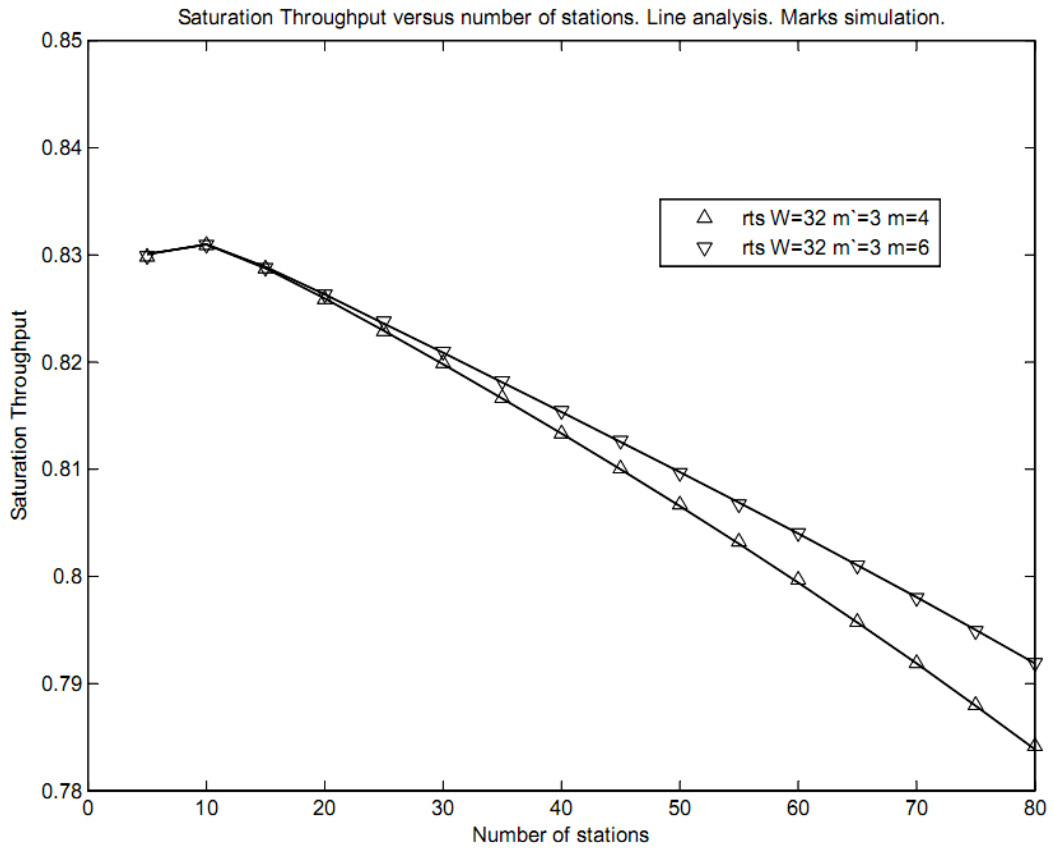
Στο σχήμα 3.11 παριστάνεται η διεκπεραιωτική ικανότητα ενός ασύρματου δικτύου, ως προς τον αριθμό σταθμών, για $W=32$, $m' = 3$, βασική πρόσβαση μέσου και διαφορετικά όρια αναμετάδοσης πακέτου m . Από τα διαγράμματα συμπεραίνεται ότι η διεκπεραιωτική ικανότητα επηρεάζεται από την τιμή του m . Για μεγαλύτερες τιμές του m η διεκπεραιωτική ικανότητα αυξάνει. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι για μεγαλύτερες τιμές του m , υπάρχουν περισσότερες ευκαιρίες το πακέτο να μεταδοθεί τελικά από το να απορριφθεί. Αν το πακέτο απορριφθεί, επηρεάζεται αρνητικά η διεκπεραιωτική ικανότητα.

Στο σχήμα 3.12 παριστάνεται η διεκπεραιωτική ικανότητα ενός ασύρματου δικτύου, με τα ίδια χαρακτηριστικά όπως και στο σχήμα 3.11, αλλά με RTS/CTS πρόσβαση μέσου. Ομοίως με παραπάνω η διεκπεραιωτική ικανότητα αυξάνει όταν αυξάνει και το όριο αναμετάδοσης πακέτου m .



Σχήμα 3.11

Διεκπεραιωτική Ικανότητα ως προς τον αριθμό σταθμών. Βασική πρόσβαση



Σχήμα 3.12

Διεκπεραιωτική Ικανότητα ως προς τον αριθμό σταθμών. RTS/CTS πρόσβαση

Κεφάλαιο 4

Μέση καθυστέρηση πακέτου (Average Packet Delay)

Η καθυστέρηση D ενός πακέτου το οποίο έχει μεταδοθεί επιτυχώς, ορίζεται ως το χρονικό διάστημα μεταξύ του χρόνου κατά τον οποίο το πακέτο βρίσκεται στην κεφαλή της ουράς MAC, έτοιμο προς μετάδοση και του χρόνου κατά τον οποίο ένα αποδεικτικό παράδοσης (acknowledgement, ACK), για το συγκεκριμένο πακέτο, παραλαμβάνεται από τον αποστολέα. Εάν ένα πακέτο απορριφθεί λόγω του ότι έφθασε στο όριο αναμετάδοσης, τότε η καθυστέρηση γι' αυτό το πακέτο δεν προσμετράτε στην μέση καθυστέρηση.

Η διακύμανση καθυστέρησης (jitter), ορίζεται ως η πιθανή απόκλιση της τιμής της καθυστέρησης ενός πακέτου από την μέση τιμή της καθυστέρησης.

Για τον υπολογισμό της μέσης καθυστέρησης και της διακύμανσης καθυστέρησης, έχει αναπτυχθεί ένα αναλυτικό μαθηματικό μοντέλο από τον Π. Ράπτη [3], το οποίο θα παρουσιασθεί στη συνέχεια. Τα σύμβολα που θα χρησιμοποιηθούν είναι ίδια με αυτά των μοντέλων του Bianchi [1] και του Wu [2].

4.1 Μοντελοποίηση της DCF

Με βάση το αναλυτικό μαθηματικό μοντέλο του Haitao Wu [2], η πιθανότητα τ κατά την οποία ένας σταθμός εκπέμπει σε μια τυχαία χρονική σχισμή (slot time) δίνεται από τη σχέση (3.25) η οποία επαναλαμβάνεται εδώ για λόγους πληρότητας:

$$\tau = \frac{2 \cdot (1 - 2p) \cdot (1 - p^{m+1})}{W \cdot (1 - (2p)^{m'+1})(1 - p) + (1 - 2p) \cdot [(1 - p^{m+1}) + W \cdot 2^{m'} \cdot p^{m'+1} \cdot (1 - p^{m-m'})]} \quad (4.1)$$

για $m > m'$

Η πιθανότητα p ενός πακέτου, το οποίο μεταδίδεται στο ασύρματο δίκτυο, να συγκρουσθεί, δίνεται από την σχέση (3.26) την οποία επαναλαμβάνουμε για λόγους πληρότητας:

$$p = 1 - (1 - \tau)^{n-1} \quad (4.2)$$

Οι εξισώσεις (4.1) και (4.2) αποτελούν ένα μη γραμμικό σύστημα με αγνώστους τις τ και p , το οποίο μπορεί να επιλυθεί χρησιμοποιώντας αριθμητικές μεθόδους και έχει μοναδική πραγματική λύση.

4.2 Μέση καθυστέρηση ανά στάδιο υποχώρησης (backoff stage)

Έστω $E[D_j]$ η μέση καθυστέρηση πακέτων που έχουν μεταδοθεί επιτυχώς από το στάδιο υποχώρησης j . Η καθυστέρηση D_j είναι το άθροισμα των καθυστερήσεων στις οποίες υπόκειται ένα πακέτο στα $0, 1, 2, \dots, j$ στάδια. Η $E[D_j]$ υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$E[D_j] = T_s + j \cdot T_c + E[slot] \sum_{i=0}^j \left(\frac{W_i - 1}{2} \right) \quad 0 \leq j \leq m \quad (4.3)$$

όπου $\left(\frac{W_i - 1}{2} \right)$ είναι ο μέσος αριθμός των χρονικών σχισμών κατά τις οποίες ο σταθμός υποχωρεί στο στάδιο i , T_c είναι η χρονική διάρκεια κατά την οποία το μέσο ανιχνεύεται ως απασχολημένο κατά την διάρκεια μιας σύγκρουσης και $j \cdot T_c$ ο χρόνος που δαπανά ένα πακέτο σε συγκρούσεις μέχρι να φθάσει το στάδιο υποχώρησης j , T_s είναι ο χρόνος που απαιτείται για να μεταδοθεί ένα πακέτο από το j στάδιο και $E[slot]$ είναι ο μέσος χρόνος κατά τον οποίο ένας σταθμός υποχωρεί σε μια χρονική σχισμή. Το μέγεθος $E[slot]$ δίνεται από την σχέση:

$$E[slot] = (1 - P_{tr})\sigma + P_{tr}P_sT_s + P_{tr}(1 - P_s)T_c \quad (4.4)$$

Στην σχέση (4.4) η P_{tr} εκφράζει την πιθανότητα ένας τουλάχιστον σταθμός από τους $n - 1$ να εκπέμπει την συγκεκριμένη χρονική σχισμή και δίνεται από την σχέση:

$$P_{tr} = 1 - (1 - \tau)^{n-1} \quad (4.5)$$

Στην σχέση (4.4) η P_s είναι η πιθανότητα ότι μία μετάδοση που συμβαίνει στο κανάλι είναι επιτυχής και δίνεται από την πιθανότητα ότι μόνο ένας σταθμός μεταδίδει από τους $n - 1$ εναπομείναντες σταθμούς, με την προϋπόθεση ότι λαμβάνει χώρα μία μετάδοση στο κανάλι. Δηλαδή:

$$P_s = \frac{(n - 1) \cdot \tau \cdot (1 - \tau)^{n-2}}{P_{tr}} = \frac{(n - 1) \cdot \tau \cdot (1 - \tau)^{n-2}}{1 - (1 - \tau)^{n-1}} \quad (4.6)$$

Το μέγεθος των T_c και T_s εξαρτάται από την μέθοδο πρόσβασης μέσου που χρησιμοποιείται (βασική ή RTS/CTS).

Για βασική πρόσβαση μέσου:

$$T_s^{bas} = T_c^{bas} = H + E[P] + DIFS + SIFS + ACK + \delta \quad (4.7)$$

Για RTS/CTS πρόσβαση μέσου:

$$\begin{aligned} T_s^{rts} &= E[P] + DIFS + H + RTS + 3SIFS + 4\delta + CTS + ACK \\ T_c^{rts} &= DIFS + RTS + SIFS + CTS \end{aligned} \quad (4.8)$$

Έστω ότι η Q_j εκφράζει την πιθανότητα ένα πακέτο που έχει μεταδοθεί επιτυχώς, να έχει μεταδοθεί από το στάδιο j (πιθανότητα ανά στάδιο υποχώρησης). Η Q_j δίνεται από την σχέση:

$$Q_j = \frac{(1 - p) \cdot p^j}{1 - p^{m+1}} \quad 0 \leq j \leq m \quad (4.9)$$

Στην παραπάνω σχέση $(1 - p) \cdot p^j$ είναι η πιθανότητα ένα πακέτο να μεταδοθεί επιτυχώς αφού φθάσει στο j στάδιο, υπό την προϋπόθεση το πακέτο να μην απορριφθεί λόγω υπέρβασης του ορίου αναμετάδοσης $(1 - p^{m+1})$.

4.3 Μέση καθυστέρηση πακέτου

Με βάση το μαθηματικό μοντέλο που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 4.2, η μέση καθυστέρηση μπορεί να υπολογισθεί από την παρακάτω σχέση:

$$E[D] = \sum_{j=0}^m (E[D_j] \cdot Q_j) \quad (4.10)$$

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (4.3) και (4.9), η σχέση (4.10) γίνεται:

$$E[D] = \sum_{j=0}^m \left(T_s + j \cdot T_c + E[slot] \sum_{i=0}^j \left(\frac{W_i - 1}{2} \right) \right) \frac{(1 - p) \cdot p^j}{1 - p^{m+1}} \quad (4.11)$$

4.4 Αποτελέσματα μαθηματικού μοντέλου υπολογισμού Μέσης Καθυστέρησης Πακέτου - Επικύρωση

Αναπτύχθηκε ένα πρόγραμμα σε περιβάλλον MATLAB, για τον υπολογισμό των σχέσεων του μαθηματικού μοντέλου του Π. Ράπτη [3]. Οι τιμές της μέσης καθυστέρησης $E[D]$ που υπολογίσθηκαν για διαφορετικό αριθμό σταθμών χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των διαγραμμάτων. Τα διαγράμματα που προέκυψαν από το μαθηματικό αναλυτικό μοντέλο, παριστάνονται με συνεχή γραμμή.

Για την επικύρωση του μαθηματικού μοντέλου, κατασκευάστηκε πρόγραμμα προσομοίωσης σε Matlab, το οποίο προσομοιώνει την λειτουργία ενός ασύρματου δικτύου IEEE 802.11. Οι τιμές της $E[D]$ που υπολογίσθηκαν με τον προσομοιωτή χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή διαγραμμάτων. Τα διαγράμματα αυτά

κατασκευάστηκαν στο ίδιο σύστημα αξόνων με τα αναλυτικά διαγράμματα για να είναι ευκολότερη η σύγκριση. Τα διαγράμματα της προσομοίωσης παριστάνονται με σημάδια (marks).

Τα αποτελέσματα του αναλυτικού μοντέλου και του προσομοιωτή έχουν ληφθεί χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους του πίνακα 4.1 . Οι τιμές αυτές ισχύουν για το DSSS (Direct Spread Sequence Spectrum) φυσικό επίπεδο του πρωτοκόλλου IEEE 802.11b. Η ταχύτητα μετάδοσης του δικτύου θεωρούμε ότι είναι 11 Mbps. Οι επικεφαλίδες και τα πακέτα μεταδίδονται με 11 Mbps, εκτός από την PHY επικεφαλίδα και τα RTS/CTS πακέτα, τα οποία μεταδίδονται με ταχύτητα 1 Mbps.

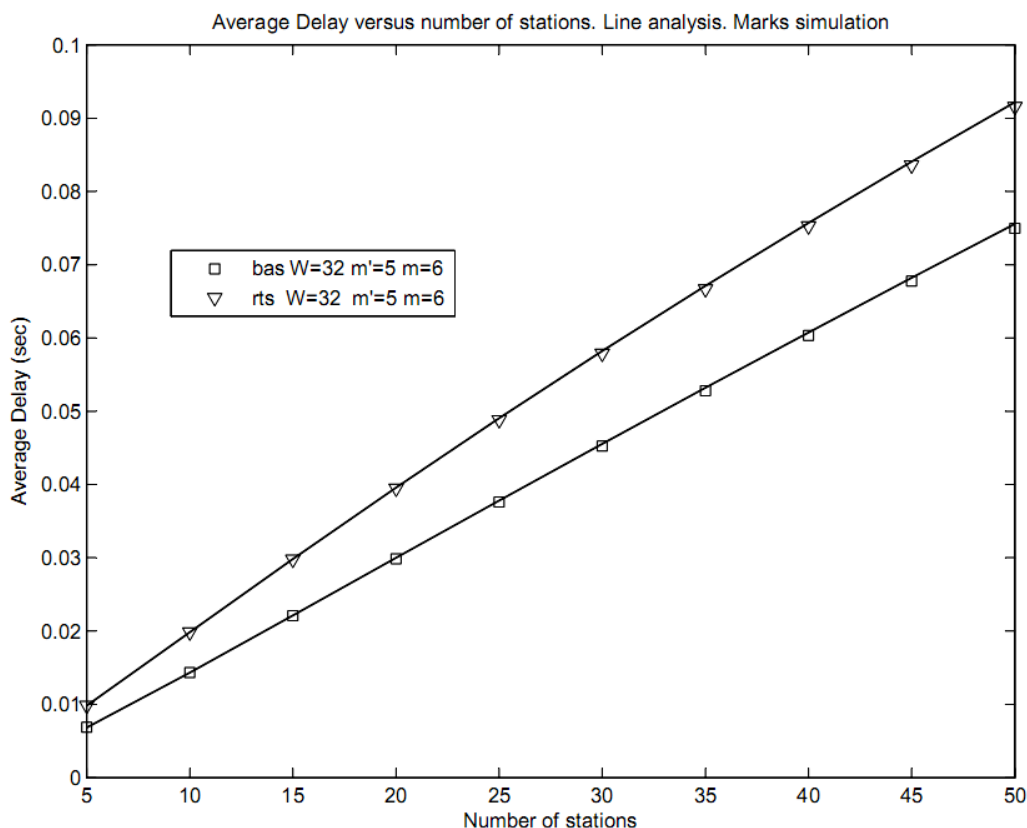
Πίνακας 4.1
Παράμετροι DSSS, 802.11b

| Παράμετρος | Τιμή |
|-----------------------------|-------------------------------------|
| Data packet | 8184 bits |
| Slot | 20 μ s |
| Propagation delay δ | 1 μ s |
| SIFS | 10 μ s |
| DIFS=2•slot+SIFS | 50 μ s |
| PHY (physical) layer header | 192 bits at 1Mbps |
| ACK | 112 bits at 11 Mbps + PHY at 1 Mbps |
| MAC layer header | 224 bits |
| RTS packet | 160 bits at 1 Mbps + PHY |
| CTS packet | 112 bits at 1 Mbps + PHY |
| Headers of a packet | 224 bits MAC 11 Mbps + PHY 1 Mbps |
| Number of CW sizes (m') | 5 |
| Retry Limit (m) | 6 |

Στο σχήμα 4.1 παριστάνεται η μέση καθυστέρηση πακέτου ως προς τον αριθμό σταθμών, για $W = 32$, $m' = 5$ και $m = 6$ για τον βασικό και τον RTS/CTS μηχανισμό πρόσβασης του μέσου μετάδοσης. Από το σχήμα 4.1 φαίνεται ότι τα διαγράμματα του αναλυτικού μοντέλου (γραμμές) συμπίπτουν με αυτά της προσομοίωσης (σημάδια). Το γεγονός αυτό δείχνει την αξιοπιστία του αναλυτικού μοντέλου.

Η μέση καθυστέρηση πακέτου, όπως φαίνεται από το σχήμα 4.1, αυξάνει όσο αυξάνει και ο αριθμός των σταθμών. Αυτό συμβαίνει αφ' ενός γιατί με την αύξηση του αριθμού των σταθμών αυξάνεται και η πιθανότητα συγκρούσεων και αναμεταδόσεων άρα αυξάνεται και ο χρόνος επιτυχούς μετάδοσης και αφ' ετέρου επειδή ένας σταθμός θα πρέπει να αναμένει συνεχόμενες μεταδόσεις άλλων σταθμών πριν μεταδώσει ένα πακέτο.

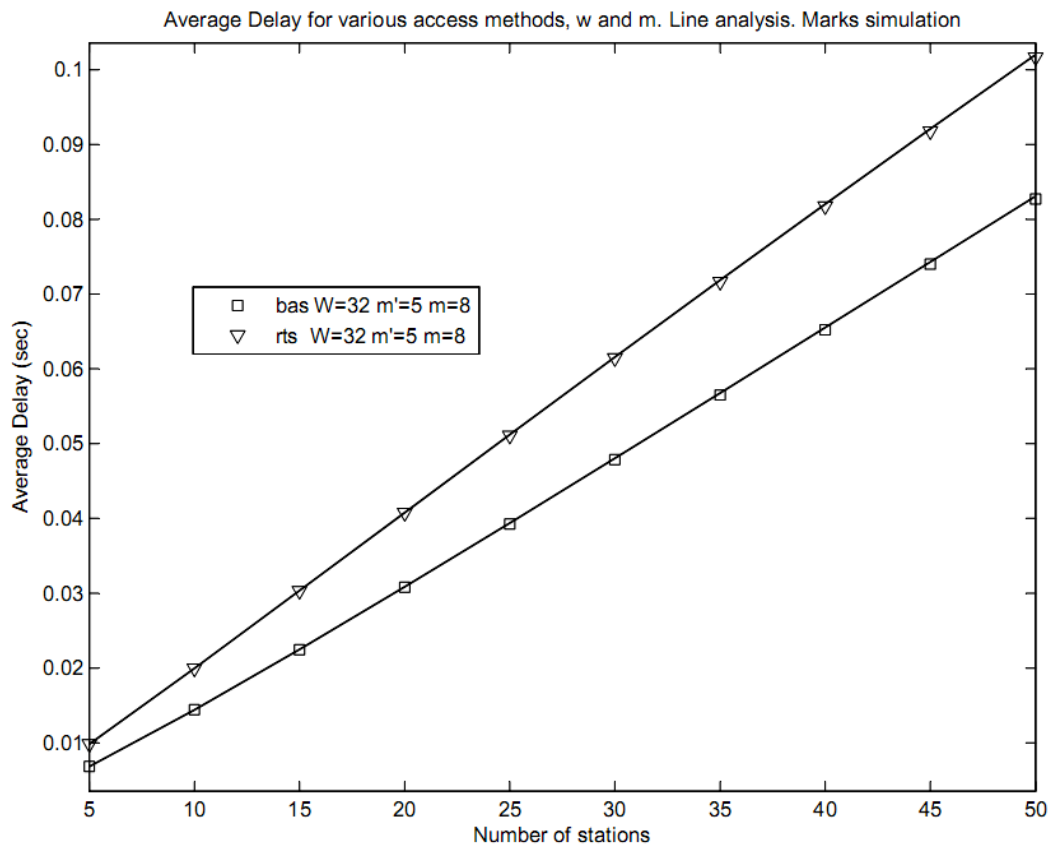
Επίσης παρατηρείται ότι στον βασικό μηχανισμό πρόσβασης μέσου, η μέση καθυστέρηση είναι μικρότερη. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί ως εξής: Θεωρώντας ότι η μετάδοση των πακέτων RTS και CTS, γίνεται σε πολύ χαμηλότερη ταχύτητα μετάδοσης (1 Mbps), οι καθυστερήσεις που προκύπτουν για το μηχανισμό RTS/CTS είναι μεγαλύτερες από αυτές που προκύπτουν όταν συγκρούονται τα μεγαλύτερα σε μέγεθος πακέτα δεδομένων του βασικού μηχανισμού πρόσβασης [3].



Σχήμα 4.1

Μέση καθυστέρηση πακέτου ως προς τον αριθμό σταθμών ($m = 6$)

Στο σχήμα 4.2 παριστάνεται η μέση καθυστέρηση πακέτου ως προς τον αριθμό σταθμών, για $W = 32, m' = 5$ και $m = 8$ για τον βασικό και τον RTS/CTS μηχανισμό πρόσβασης του μέσου μετάδοσης. Το όριο αναμετάδοσης πακέτου m επιλέχθηκε να λαμβάνει την τιμή 8. Συνεπώς ένα πακέτο θα έχει στην περίπτωση αυτή περισσότερες ευκαιρίες αναμετάδοσης από την προηγούμενη περίπτωση του διαγράμματος 4.1 όπου το όριο αναμετάδοσης είναι $m = 6$. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε μεγαλύτερες τιμές της μέσης καθυστέρησης πακέτου και για τους δύο μηχανισμούς πρόσβασης. Αυτό φαίνεται στο σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.2

Μέση καθυστέρηση πακέτου ως προς τον αριθμό σταθμών ($m = 8$)

4.5 Διακύμανση καθυστέρησης πακέτου (jitter)

Η καθυστέρηση $D_{0,i}$ ενός πακέτου το οποίο μεταδόθηκε επιτυχώς από το στάδιο 0 και για το οποίο είχε επιλεχθεί η τιμή υποχώρησης i στο στάδιο υποχώρησης 0 δίνεται από τη σχέση:

$$D_{0,i} = T_s + k_s \cdot T_s + k_c \cdot T_c + (i - k_s - k_c) \cdot \sigma \quad (4.12)$$

όπου k_s είναι ο αριθμός των επιτυχών μεταδόσεων άλλων σταθμών που συναντά ο σταθμός και k_c είναι ο αριθμός των συγκρούσεων άλλων σταθμών που συναντά ο σταθμός (πριν την μετάδοση του πακέτου). Ο υπολογισμός των παραμέτρων k_s και k_c είναι εξαιρετικά πολύπλοκος λόγω της τυχαίας επιλογής της τιμής υποχώρησης, ειδικά σε μεγαλύτερες τιμές του σταδίου υποχώρησης.

Η βασική παραδοχή του προτεινόμενου από τον Ράπτη [3] μαθηματικού μοντέλου είναι η εξής: Η διακύμανση της καθυστέρησης οφείλεται κυρίως στην επιλογή διαφορετικών τιμών υποχώρησης σε διαφορετικά στάδια υποχώρησης και όχι στην διαφορετική χρονική διακύμανση των σχισμών οι οποίες μπορεί να λάβουν τις τιμές T_s , T_c , σ . Η παραπάνω παραδοχή οδηγεί σε ακριβή αναλυτικά αποτελέσματα με λιγότερη υπολογιστική πολυπλοκότητα. Συνεπώς αντί για τον υπολογισμό της $D_{0,i}$ υπολογίζεται η μέση καθυστέρηση $E[D_{0,i}]$ πακέτων τα οποία μεταδόθηκαν επιτυχώς από το στάδιο 0 και για τα οποία είχε επιλεχθεί η τιμή υποχώρησης i στο στάδιο υποχώρησης 0 (θεωρώντας ότι οι σταθμοί υποχωρούν σε κάθε σχισμή υποχώρησης, κατά μέσο όρο για χρονικό διάστημα ίσο με $E[slot]$):

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

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

όπου $E[U_{0,i}]$ είναι η μέση καθυστέρηση των πακέτων που μεταδόθηκαν ανεπιτυχώς από το στάδιο 0 και για τα οποία είχε επιλεχθεί η τιμή υποχώρησης i στο στάδιο υποχώρησης 0.

Χρησιμοποιώντας τη σχέση (4.14), υπολογίζεται η μέση καθυστέρηση $E[U_0]$ των πακέτων που μεταδόθηκαν ανεπιτυχώς από το στάδιο 0:

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

Συνεπώς η μέση καθυστέρηση $E[U_j]$ των πακέτων που μεταδόθηκαν ανεπιτυχώς από το στάδιο j υπολογίζεται ως εξής:

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

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (4.13) και (4.15), μπορεί να υπολογισθεί η μέση καθυστέρηση $E[D_{1,i}]$ των πακέτων που μεταδόθηκαν επιτυχώς από το στάδιο 1 αφού υπέστησαν σύγκρουση στο στάδιο 0 (i είναι ο μετρητής υποχώρησης):

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

Τέλος η μέση καθυστέρηση $E[D_{j,i}]$ των πακέτων που μεταδόθηκαν επιτυχώς από το στάδιο j και τα οποία είχαν επιλέξει την τιμή υποχώρησης i στο στάδιο j δίνεται από την σχέση:

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

όπου $E[U_{-1}] = 0$

Η πιθανότητα ένας σταθμός να επιλέξει ως τιμή του μετρητή υποχώρησης την i , στο στάδιο j , είναι $1/W_j$ (ανεξάρτητη από την i). Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι ο σταθμός επιλέγει τυχαία μια τιμή από το διάστημα $[0, W_j-1]$. Συνεπώς η πιθανότητα P_j ότι ένα πακέτο μεταδίδεται επιτυχώς από το στάδιο j , επιλέγοντας ως τιμή του μετρητή υποχώρησης την i (εφόσον το πακέτο δεν απορρίφθηκε), είναι:

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

Στη συνέχεια υπολογίζεται η μέση τιμή των τετραγώνων των καθυστερήσεων ενός πακέτου:

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

Αντικαθιστώντας τα $E[D_{j,i}]$ και P_j από τις (4.18) και (4.19) λαμβάνουμε:

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

όπου $E[U_{-1}] = 0$

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (4.11) και (4.21), υπολογίζεται η διακύμανση καθυστέρησης J , ως εξής:

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

4.6 Αποτελέσματα μαθηματικού μοντέλου υπολογισμού Jitter - Επικύρωση

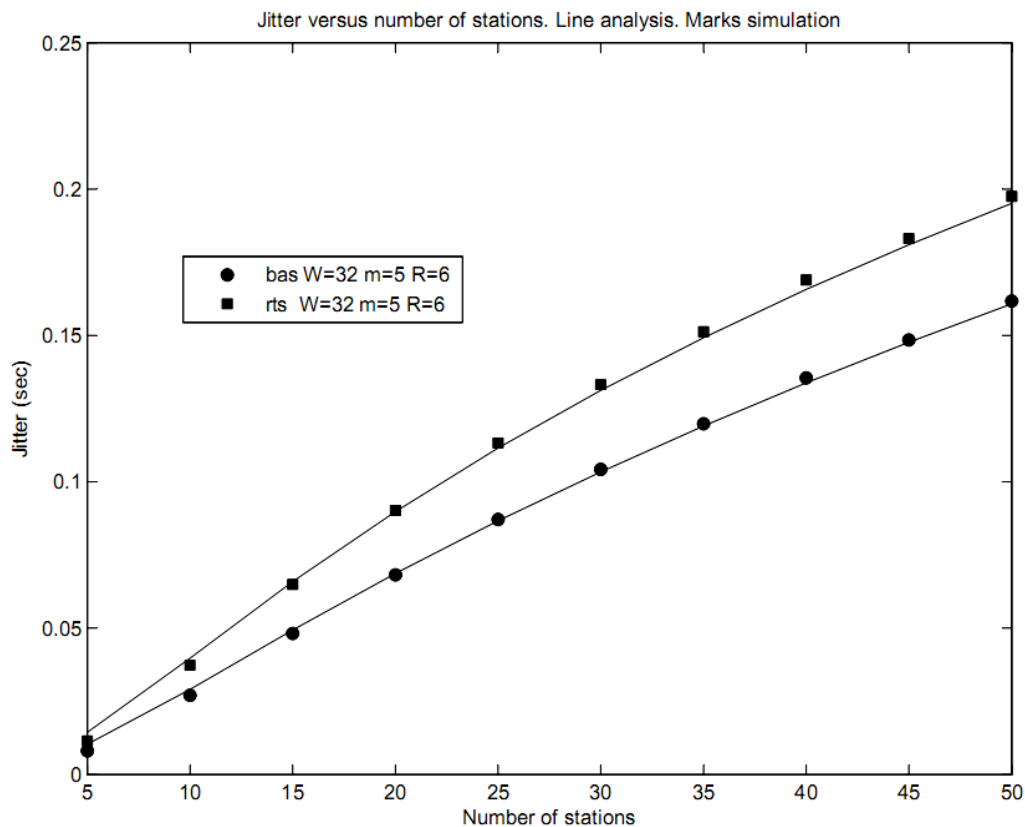
Για τον υπολογισμό των σχέσεων του μαθηματικού μοντέλου της διακύμανσης καθυστέρησης πακέτου, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Matlab. Οι τιμές του Jitter που υπολογίσθηκαν για διαφορετικό αριθμό σταθμών χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή διαγραμμάτων. Τα διαγράμματα που προέκυψαν από το μαθηματικό αναλυτικό μοντέλο, παριστάνονται με συνεχή γραμμή.

Για την επικύρωση του μαθηματικού μοντέλου, επεκτάθηκε το πρόγραμμα προσομοίωσης που κατασκευάσαμε για την μέση καθυστέρηση πακέτου, ώστε να υπολογίζει και την διακύμανση καθυστέρησης. Οι τιμές του Jitter που υπολογίσθηκαν με τον προσομοιωτή χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή διαγραμμάτων. Τα διαγράμματα αυτά κατασκευάσθηκαν στο ίδιο σύστημα αξόνων με τα αναλυτικά διαγράμματα για να είναι ευκολότερη η σύγκριση. Τα διαγράμματα της προσομοίωσης παριστάνονται με σημάδια (marks).

Τα αποτελέσματα του αναλυτικού μοντέλου και του προσομοιωτή έχουν ληφθεί χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους του πίνακα 4.1. Οι τιμές αυτές ισχύουν για το DSSS (Direct Spread Sequence Spectrum) φυσικό επίπεδο του πρωτοκόλλου IEEE 802.11b. Η ταχύτητα μετάδοσης του δικτύου θεωρούμε ότι είναι 11 Mbps. Οι επικεφαλίδες και τα πακέτα μεταδίδονται με 11 Mbps, εκτός από την PHY επικεφαλίδα και τα RTS/CTS πακέτα, τα οποία μεταδίδονται με ταχύτητα 1 Mbps.

Στο σχήμα 4.3 παριστάνεται το jitter ως προς τον αριθμό σταθμών, για $W = 32, m' = 5$ και $m = 6$ για τον βασικό και τον RTS/CTS μηχανισμό πρόσβασης του μέσου μετάδοσης. Από το σχήμα 4.3 φαίνεται ότι τα διαγράμματα του αναλυτικού μοντέλου (γραμμές) είναι πολύ κοντά με αυτά της προσομοίωσης (σημάδια). Το γεγονός αυτό δείχνει την αξιοπιστία του αναλυτικού μοντέλου.

Από το σχήμα 4.3 συμπεραίνεται επίσης ότι όσο αυξάνεται το μέγεθος του δικτύου, τόσο αυξάνεται και το jitter. Το γεγονός αυτό μπορεί να εξηγηθεί ως εξής: Όταν ο αριθμός των σταθμών αυξάνεται, τότε αυξάνεται και ο αριθμός των πακέτων που συγκρούονται. Συνεπώς οι σταθμοί επιλέγουν μεγαλύτερο στάδιο υποχώρησης. Τα πακέτα που μεταδίδονται από μεγαλύτερα στάδια υποχώρησης, έχουν μεγαλύτερους χρόνους καθυστέρησης, άρα και η διακύμανση της καθυστέρησης πακέτου αυξάνεται.



Σχήμα 4.3

Διακύμανση καθυστέρησης πακέτου ως προς τον αριθμό σταθμών

Ακόμη από το σχήμα 4.3 φαίνεται ότι ο βασικός μηχανισμός πρόσβασης μέσου επιτυγχάνει καλύτερα αποτελέσματα, όσον αφορά στο jitter, από τον μηχανισμό RTS/CTS. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι η ανταλλαγή των RTS και CTS

πακέτων σε πολύ χαμηλότερη ταχύτητα μετάδοσης, έχει σαν αποτέλεσμα μεγαλύτερη μέση καθυστέρηση από τον βασικό μηχανισμό (αν και τα πακέτα που συγκρούονται στον βασικό μηχανισμό είναι αρκετά μεγαλύτερα σε μέγεθος).

Κεφάλαιο 5

Μαθηματικό μοντέλο ασύρματου τοπικού δικτύου που περιλαμβάνει σταθμούς φωνής και σταθμούς δεδομένων που χρησιμοποιούν βασική πρόσβαση (hybrid model)

Σε αυτό το κεφάλαιο, θα αναπτυχθεί ένα αναλυτικό μοντέλο με βάση το οποίο θα είναι δυνατόν να υπολογισθεί η χωρητικότητα σταθμών φωνής σε ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο IEEE 802.11. Στο συγκεκριμένο δίκτυο θα θεωρήσουμε ότι συνυπάρχουν σταθμοί φωνής και σταθμοί δεδομένων. Έτσι οι σταθμοί φωνής ανταγωνίζονται με τους σταθμούς δεδομένων για την μετάδοση των πακέτων (πακέτα φωνής ή πακέτα δεδομένων).

5.1 Περιγραφή δικτύου – Παραδοχές

Το ασύρματο δίκτυο το οποίο μελετήθηκε, λειτουργεί χρησιμοποιώντας την διαδικασία προσπέλασης μέσου (DCF) η οποία περιγράφεται από το πρωτόκολλο IEEE 802.11.

Οι παραδοχές του μαθηματικού μοντέλου είναι οι ακόλουθες :

1. Θεωρείται ότι δεν υπάρχουν σφάλματα μετάδοσης στο μέσο και επίσης ότι δεν υπάρχουν κρυμμένοι σταθμοί (hidden stations).
2. Το δίκτυο λειτουργεί σε συνθήκες κορεσμού (saturation), δηλαδή όλοι οι σταθμοί έχουν πάντα στη διάθεση τους ένα πακέτο έτοιμο για αποστολή.
3. Το δίκτυο απαρτίζεται από σταθμούς φωνής και σταθμούς δεδομένων (hybrid model). Οι σταθμοί φωνής μεταδίδουν μόνο πακέτα φωνής και οι σταθμοί δεδομένων μεταδίδουν μόνο πακέτα δεδομένων.
4. Οι χρόνοι διάδοσης (δ) είναι πάρα πολύ μικροί και αγνοούνται. Η παραδοχή αυτή είναι έγκυρη, μια και όλοι οι σταθμοί είναι πολύ κοντά ο ένας στον άλλον (LAN).
5. Το μέγεθος των πακέτων δεδομένων είναι σταθερό.
6. Όλοι οι σταθμοί φωνής είναι εντός εμβελείας και μεταδίδουν με τον ίδιο ρυθμό μετάδοσης, χρησιμοποιώντας τον ίδιο κωδικοποιητή φωνής (voice codec).
7. Κάθε κλήση VoIP (συνεδρία φωνής) αποτελείται από δύο ασύρματους σταθμούς που επικοινωνούν.

5.2 Κωδικοποιητές φωνής (Voice codecs)

Η φωνή μετατρέπεται από τα τηλέφωνα σε αναλογικό σήμα, το οποίο με τη σειρά του θα πρέπει να μετατραπεί σε ψηφιακό για να μπορεί να μεταδοθεί στο δίκτυο. Οι κωδικοποιητές μετατρέπουν το αναλογικό σήμα φωνής σε ψηφιακό. Ένας κωδικοποιητής εκτελεί τις ακόλουθες εργασίες: 1) δειγματοληψία, 2) κβαντοποίηση και 3) κωδικοποίηση. Η είσοδος ενός κωδικοποιητή είναι ένα αναλογικό σήμα και η έξοδος του είναι πλαίσια δεδομένων. Το μέγεθος ενός πλαισίου εξαρτάται από τον τύπο του κωδικοποιητή και από το διάστημα δειγματοληψίας. Το διεθνές πρότυπο για κωδικοποίηση ήχων τηλεφώνου είναι το G.711. Ο κωδικοποιητής G.711 δημιουργεί πακέτα φωνής των 160 bytes, κάθε 20 ms, πράγμα το οποίο έχει ως συνέπεια ένα ρυθμό της τάξεως των 64 Kbps. Ο κωδικοποιητής G.729 δημιουργεί πακέτα φωνής των 20 bytes κάθε 20 ms (ρυθμός 8 Kbps), ενώ ο κωδικοποιητής G.723.1 δημιουργεί πακέτα φωνής των 24 bytes κάθε 30 ms (ρυθμός 6,3 Kbps). Στον πίνακα 5.1 παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των κωδικοποιητών που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την μεταπτυχιακή διατριβή.

Πίνακας 5.1
Δημοφιλείς κωδικοποιητές φωνής

| Voice Codec | | G.711 | G.729 | G.723.1 |
|---------------------------|-------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Bit Rate | | 64 kbps | 8 kbps | 5.3/6.3 kbps |
| Sample Period (ms) | Frames/sec | Payload (byte) | Payload (byte) | Payload (byte) |
| 10 | 100 | 80 | 10 | |
| 20 | 50 | 160 | 20 | |
| 30 | 33.33 | 240 | 30 | 20/24 |
| 40 | 25 | 320 | 40 | |
| 50 | 20 | 400 | 50 | |
| 60 | 16.67 | 480 | 60 | 40/48 |

Πίνακας 5.2
Πολυπλοκότητα κωδικοποιητών

| Codec Complexity | Codecs |
|-------------------------|---|
| Low | <ul style="list-style-type: none"> • G.711 • Modem-relay / Modem - passthrough • Clear channel |
| Medium | <ul style="list-style-type: none"> • G.729A • G.729AB • G.726 |
| High | <ul style="list-style-type: none"> • G.729 • G.729B • G.7.28 • G.723.1 |

Οι κωδικοποιητές μπορεί να ταξινομηθούν ως χαμηλής, μέσης και υψηλής πολυπλοκότητας (σε σχέση με τον αλγόριθμο κωδικοποίησης που χρησιμοποιούν). Οι χαμηλής πολυπλοκότητας κωδικοποιητές, όπως ο G.711, χρησιμοποιούν ελάχιστο ποσό υπολογιστικής ισχύος. Οι υψηλής πολυπλοκότητας κωδικοποιητές όπως ο G.729, έχουν υψηλές απαιτήσεις επεξεργασίας. Οι μέσης πολυπλοκότητας κωδικοποιητές είναι ανάμεσα στα δύο παραπάνω άκρα. Εν τούτοις στην βιβλιογραφία αρκετές φορές οι χαμηλής πολυπλοκότητας κωδικοποιητές ταξινομούνται ως μέσης πολυπλοκότητας με αποτέλεσμα να έχουμε μόνο δύο κατηγορίες: μέση και υψηλή πολυπλοκότητα.

Στον πίνακα 5.2 παρουσιάζονται δημοφιλείς κωδικοποιητές φωνής, ταξινομημένοι ως προς την πολυπλοκότητα τους [9], [10].

5.3 Επιβάρυνση πακέτων φωνής

Σε κάθε πακέτο φωνής προστίθενται οι ακόλουθες επικεφαλίδες:

- RTP 12 bytes
- UDP 8 bytes
- IP 20 bytes

Συνεπώς η συνολική επιβάρυνση είναι 40 bytes. Επίσης μια επικεφαλίδα του επιπέδου MAC μεγέθους 28 bytes, προστίθεται σε ένα πακέτο φωνής και σε κάθε πλαίσιο του επιπέδου MAC προστίθεται μια επικεφαλίδα του φυσικού επιπέδου (PHY).

Υπό την προϋπόθεση ότι χρησιμοποιείται ο κωδικοποιητής G.711 στα 20 ms (χρονικό διάστημα δειγματοληψίας), η συνολική επιβάρυνση ανέρχεται στα 68 bytes και έτσι το μέγεθος του πακέτου φωνής αυξάνει από τα 160 bytes στα 228 bytes. Συμπερασματικά, οι επικεφαλίδες συνολικά, είναι αρκετά μεγάλες σε μέγεθος σχετικά με το συνολικό μέγεθος ενός πακέτου φωνής. Στον πίνακα 5.3 παρουσιάζονται οι τυπικές επιβαρύνσεις σε ένα G.711 πακέτο φωνής.

Πίνακας 5.3
Επιβαρύνσεις πακέτου φωνής G.711

| Transmission Parameter | Size (bytes) | Time (μs) | Fraction (%) |
|-------------------------------|---------------------|------------------|---------------------|
| DIFS | | 50.0 | 5.38 |
| Min average channel access | | 310.0 | 33.33 |
| Physical header and Preamble | 24 | 192.0 | 20.64 |
| MAC header + FCS | 28 | 20.4 | 2.19 |
| RTP/UDP/IP | 40 | 29.1 | 3.13 |
| Voice payload | 160 | 116.4 | 12.51 |
| SIFS | | 10 | 1.08 |
| Physical header & Preamble | 24 | 192.0 | 20.64 |
| ACK | 14 | 10.2 | 1.10 |
| Total | 290 | 930.1 | 100.0 |

5.4 Υβριδικό σύστημα

Υβριδικό σύστημα, είναι ένα ασύρματο δίκτυο στο οποίο συνυπάρχουν σταθμοί φωνής και σταθμοί δεδομένων. Οι σταθμοί φωνής είναι N_{voice} τον αριθμό και οι σταθμοί δεδομένων είναι N_{data} . Εάν n είναι ο συνολικός αριθμός των ασυρμάτων σταθμών, τότε ισχύει:

$$n = N_{data} + N_{voice} \quad (5.1)$$

Στο θεωρούμενο μοντέλο, τα πακέτα φωνής (με μέγεθος l_{voice}) μεταδίδονται με τον βασικό μηχανισμό πρόσβασης μέσου και τα πακέτα δεδομένων (με μέγεθος l_{data}) μεταδίδονται επίσης με τον βασικό μηχανισμό πρόσβασης μέσου.

Επίσης στο θεωρούμενο υβριδικό μοντέλο, τα πακέτα δεδομένων έχουν διαφορετικό μέγεθος από τα πακέτα φωνής. Γενικά το μέγεθος των πακέτων δεδομένων είναι μεγαλύτερο από αυτό των πακέτων φωνής. Σε αυτή την μεταπτυχιακή διατριβή χρησιμοποιήθηκαν πακέτα δεδομένων μεγέθους 8184 bits. Επιλέχθηκε το μέγεθος αυτό για υπάρξουν συγκρίσιμα αποτελέσματα με αυτά των εργασιών που αναφέρονται στη βιβλιογραφία. Το μέγεθος ενός πακέτου φωνής εξαρτάται από τον κωδικοποιητή που χρησιμοποιείται. Για παράδειγμα, εάν χρησιμοποιηθεί ο G.711 στα 20 ms, τότε το μέγεθος του πακέτου φωνής που προκύπτει είναι 1280 bits.

Σε μια σύγκρουση εμπλέκονται δύο ή περισσότερα πακέτα. Θεωρούμε ότι η πιθανότητα σε μια σύγκρουση να εμπλέκονται τρία ή περισσότερα πακέτα είναι πολύ μικρή, συνεπώς θεωρούμε ότι σε μια σύγκρουση πάντοτε συμμετέχουν μόνο δύο πακέτα. Για να υπολογισθεί η χρονική διάρκεια μιας σύγκρουσης, θα πρέπει να εξετασθεί εάν στην σύγκρουση εμπλέκεται τουλάχιστον ένα πακέτο δεδομένων. Εάν συμβαίνει αυτό το γεγονός και θεωρώντας ότι τα πακέτα δεδομένων είναι μεγαλύτερα σε μέγεθος από τα πακέτα φωνής, τότε η χρονική διάρκεια της σύγκρουσης υπολογίζεται λαμβάνοντας υπ' όψιν το μέγεθος του πακέτου δεδομένων (l_{data}).

Ο αριθμός των ανά δύο δυνατών συνδυασμών, των σταθμών φωνής είναι:

$$CM_{voice} = \binom{N_{voice}}{2} = \frac{N_{voice}!}{2!(N_{voice} - 2)!} \quad (5.2)$$

Ο αριθμός των ανά δύο δυνατών συνδυασμών όλων των σταθμών του δικτύου είναι:

$$CM = \binom{n}{2} = \frac{n!}{2!(n-2)!} \quad (5.3)$$

Από τις σχέσεις (5.2) και (5.3) εξάγεται η πιθανότητα P_{voice} , σε μια σύγκρουση να εμπλέκονται δύο σταθμοί φωνής:

$$P_{voice} = \frac{CM_{voice}}{CM} \quad (5.4)$$

Η πιθανότητα σε μια σύγκρουση να εμπλέκονται ένας σταθμός δεδομένων και ένας σταθμός φωνής, ή δύο σταθμοί δεδομένων είναι:

$$P_{data} = 1 - P_{voice} \quad (5.5)$$

Εάν ένα πακέτο έχει μεταδοθεί επιτυχώς, τότε η πιθανότητα PS_{voice} η μετάδοση αυτή να αφορά σε ένα πακέτο φωνής υπολογίζεται ως εξής:

$$PS_{voice} = N_{voice}/n \quad (5.6)$$

Εάν ένα πακέτο έχει μεταδοθεί επιτυχώς, τότε η πιθανότητα PS_{data} η μετάδοση αυτή να αφορά σε ένα πακέτο δεδομένων υπολογίζεται ως εξής:

$$PS_{data} = 1 - PS_{voice} \quad (5.7)$$

Η επιβάρυνση των πακέτων φωνής, λόγω των πρωτοκόλλων RTP, UDP και IP υπολογίζεται ως εξής:

$$RTPUDPIP = RTP + UDP + IP \quad (5.8)$$

Όπου η *RTP* παριστάνει την επιβάρυνση ενός πακέτου η οποία οφείλεται στο πρωτόκολλο μεταφοράς πραγματικού χρόνου (Real-time Transport Protocol), η *UDP* παριστάνει την επιβάρυνση του πακέτου η οποία οφείλεται στο Πρωτόκολλο αυτοδύναμων πακέτων χρήστη (User Datagram Protocol) και η *IP* παριστάνει την επιβάρυνση του πακέτου η οποία οφείλεται στο πρωτόκολλο διαδικτύου (Internet Protocol).

Με T_{cdata} συμβολίζεται η χρονική διάρκεια μιας σύγκρουσης η οποία εμπλέκει τουλάχιστον ένα σταθμό δεδομένων και με T_{cvoice} συμβολίζεται η χρονική διάρκεια μιας σύγκρουσης στην οποία εμπλέκονται δύο σταθμοί φωνής. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, εάν σε μια σύγκρουση εμπλέκονται ένας σταθμός δεδομένων και ένας σταθμός φωνής, τότε η χρονική διάρκεια της σύγκρουσης υπολογίζεται λαμβάνοντας υπ' όψιν το μέγεθος του πακέτου δεδομένων και είναι ίση με T_{cdata} . Τα μεγέθη T_{cvoice} και T_{cdata} υπολογίζονται όπως παρακάτω:

$$T_{cdata} = DIFS + H + \left(\frac{l_{data}}{C}\right) + SIFS + ACK \quad (5.9)$$

$$T_{cvoice} = DIFS + H + RTPUDPIP + \left(\frac{l_{voice}}{C}\right) + SIFS + ACK \quad (5.10)$$

Όπου C είναι ο ρυθμός μετάδοσης και H είναι το μέγεθος των επικεφαλίδων του πακέτου (οι τιμές δίνονται στον πίνακα 6.1).

Έστω T_{sdata} η χρονική διάρκεια κατά την οποία το μέσο ανιχνεύεται ως απασχολημένο, λόγω μιας επιτυχούς μετάδοσης πακέτου δεδομένων και T_{svoice} η χρονική διάρκεια κατά την οποία το μέσο ανιχνεύεται ως απασχολημένο, λόγω μιας επιτυχούς μετάδοσης πακέτου φωνής. Τα μεγέθη T_{sdata} και T_{svoice} υπολογίζονται ως εξής:

$$T_{sdata} = DIFS + H + \left(\frac{l_{data}}{C}\right) + SIFS + ACK \quad (5.11)$$

$$T_{svoice} = DIFS + H + RTPUDPIP + \left(\frac{l_{voice}}{C}\right) + SIFS + ACK \quad (5.12)$$

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (5.2) έως (5.12), υπολογίζονται τα T_s και T_c που αντιπροσωπεύουν αντίστοιχα, τον μέσο χρόνο που απαιτείται για την αποστολή ενός πακέτου και την μέση χρονική διάρκεια μιας σύγκρουσης.

$$T_s = PS_{data} \cdot T_{sdata} + PS_{voice} \cdot T_{svoice} \quad (5.13)$$

$$T_c = P_{data} \cdot T_{cdata} + P_{voice} \cdot T_{cvoice} \quad (5.14)$$

Το μέσο μέγεθος l ενός πακέτου που μεταδόθηκε επιτυχώς, δίνεται από την σχέση:

$$l = PS_{voice} \cdot l_{voice} + PS_{data} \cdot l_{data} \quad (5.15)$$

5.5 Χωρητικότητα φωνής

Ως χωρητικότητα φωνής ορίζεται ο μέγιστος αριθμός συνεδριών φωνής που μπορούν να εξυπηρετηθούν ταυτοχρόνως από το δίκτυο, λαμβάνοντας υπ' όψιν συγκεκριμένους περιορισμούς ποιότητας [6], [7].

Οι κωδικοποιητές φωνής, δημιουργούν πακέτα φωνής αναλόγως με το «διάστημα πακεταρίσματος» (packetization interval). Εάν η μέση καθυστέρηση των πακέτων είναι μεγαλύτερη από το παραπάνω διάστημα, τότε αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την προσωρινή αποθήκευση πακέτων και την καθυστέρηση μετάδοσης τους πάνω από το όριο που σηματοδοτεί την καλή ποιότητα φωνής. Η χωρητικότητα φωνής ενός δικτύου υπολογίζεται στο σημείο που υπερβάλλονται οι περιορισμοί ποιότητας φωνής. Στην εργασία του Αμανατιάδη [4] παρουσιάζεται μια μέθοδος για το υπολογισμό της χωρητικότητας φωνής σε ένα δίκτυο στο οποίο υπάρχουν μόνο σταθμοί φωνής.

Με χρήση των σχέσεων (3.20), (5.13) και (5.14) η διεκπεραιωτική ικανότητα κορεσμού (Saturation Throughput) όλων των σταθμών φωνής υπολογίζεται από την σχέση:

$$S_{voice} = \frac{PS_{voice} \cdot P_{tr} \cdot P_s \cdot l_{voice}}{(1 - P_{tr})\sigma + P_{tr}P_sT_s + P_{tr}(1 - P_s)T_c} \quad (5.16)$$

Για να υπολογισθεί η διεκπεραιωτική ικανότητα κορεσμού S_{single} ενός και μόνο σταθμού φωνής, διαιρείται η S_{voice} διά του αριθμού των σταθμών φωνής N_{voice} :

$$S_{single} = S_{voice}/N_{voice} \quad (5.17)$$

Βασικές παραδοχές της εργασίας αυτής είναι α) ότι η χωρητικότητα φωνής μπορεί να υπολογισθεί σε συνθήκες κορεσμού και β) ότι η διεκπεραιωτική ικανότητα ενός σταθμού φωνής θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση από ένα όριο S_{limit} :

$$S_{single} \geq S_{limit} \quad (5.18)$$

Το όριο S_{limit} , είναι η διεκπεραιωτική ικανότητα που πρέπει να απολαμβάνει ένας σταθμός φωνής για να δημιουργεί και να αποστέλλει πακέτα ομιλίας εντός των ορίων ποιότητας. Το όριο S_{limit} μπορεί να υπολογισθεί από την παρακάτω σχέση:

$$S_{limit} = l_{voice}/T_{pck} \quad (5.19)$$

Όπου T_{pck} είναι το «διάστημα πακεταρίσματος», ο χρόνος δηλαδή που απαιτείται για να δημιουργηθεί ένα πακέτο φωνής.

Εναλλακτικά η χωρητικότητα φωνής μπορεί να υπολογισθεί χρησιμοποιώντας την μέση καθυστέρηση πακέτου $E[D]$ (βλ. κεφάλαιο 4, σχέση (4.11)). Η χωρητικότητα φωνής υπολογίζεται στο σημείο όπου η μέση καθυστέρηση πακέτου $E[D]$ είναι μικρότερη ή ίση από το όριο T_{pck} :

$$E[D] \leq T_{pck} \quad (5.20)$$

5.6 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό, αναπτύχθηκε ένα μαθηματικό μοντέλο για τον υπολογισμό της χωρητικότητας φωνής ενός τοπικού δικτύου IEEE 802.11 .

Στο δίκτυο συνυπάρχουν σταθμοί φωνής και δεδομένων. Οι σταθμοί φωνής και οι σταθμοί δεδομένων χρησιμοποιούν τον αλγόριθμο DCF με βασικό μηχανισμό πρόσβασης μέσου.

Σαν δείκτης ποιότητας για τον υπολογισμό της χωρητικότητας φωνής του δικτύου, χρησιμοποιήθηκε η διεκπεραιωτική ικανότητα ενός σταθμού.

Κεφάλαιο 6

Επικύρωση των αποτελεσμάτων του μαθηματικού μοντέλου με χρήση προσομοιωτή

Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκε ένα αναλυτικό μοντέλο για τον υπολογισμό της διεκπεραιωτικής ικανότητας σε ένα υβριδικό δίκτυο με σταθμούς δεδομένων και σταθμούς φωνής. Το μοντέλο που προτάθηκε, υπολογίζει την χωρητικότητα φωνής του δικτύου.

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει επικύρωση του αναλυτικού μοντέλου, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του με αυτά που προκύπτουν από την χρήση προσομοιωτή.

Για την κωδικοποίηση φωνής, χρησιμοποιήθηκαν 3 δημοφιλείς κωδικοποιητές: ο G.711, ο G.729 και ο G.723.1 .

6.1 Παράμετροι - Προσομοίωση

Για την κατασκευή των παρακάτω διαγραμμάτων, χρησιμοποιήθηκαν οι παράμετροι του DSSS (Direct Spread Sequence Spectrum) φυσικού επιπέδου του προτύπου IEEE 802.11b. Οι τιμές των παραμέτρων αυτών παρουσιάζονται στον πίνακα 6.1. Στον ίδιο πίνακα παρουσιάζονται και οι παράμετροι των κωδικοποιητών G.711, G.729 και G.723.1 .

Για την επικύρωση του μαθηματικού μοντέλου που προτάθηκε, τα αναλυτικά αποτελέσματα συγκρίθηκαν με αποτελέσματα που προέκυψαν από προσομοίωση. Το πρόγραμμα που προσομοιώνει το ασύρματο δίκτυο IEEE 802.11 δημιουργήθηκε σε MATLAB. Το πρόγραμμα αυτό ακολουθεί πιστά όλες τις λεπτομέρειες που ορίζει το πρωτόκολλο IEEE 802.11 σε σχέση με τη πρόσβαση των σταθμών στο μέσο μετάδοσης και την αποστολή ή την σύγκρουση των πακέτων. Επίσης χρησιμοποιεί τις παραμέτρους που αναφέρονται στον πίνακα 6.1.

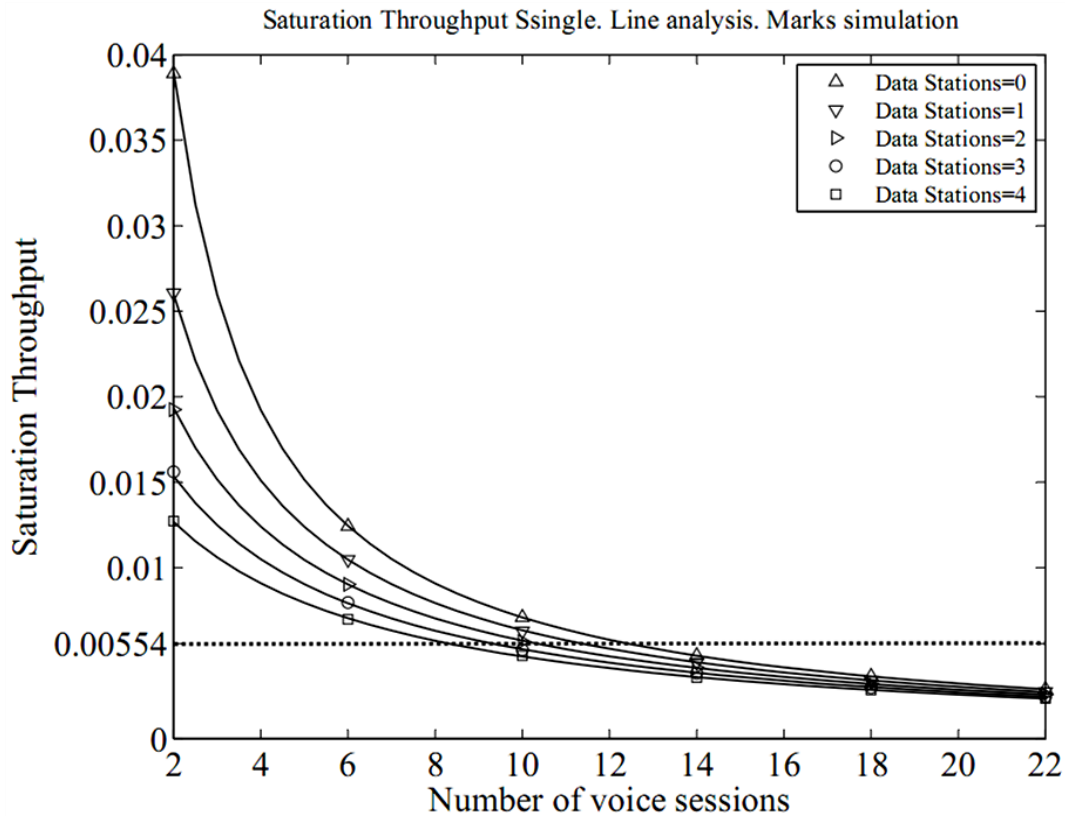
Σε όλα τα διαγράμματα που ακολουθούν, οι τιμές που προέκυψαν από το αναλυτικό μοντέλο παρουσιάζονται με συνεχείς γραμμές, ενώ οι τιμές που προέκυψαν από την προσομοίωση παρουσιάζονται με σημάδια. Σε όλα τα διαγράμματα οι τιμές του αναλυτικού μοντέλου συμπίπτουν με αυτές της προσομοίωσης. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει την αξιοπιστία του αναλυτικού μοντέλου που προτάθηκε. Σε κάθε περίπτωση η διαφορά μεταξύ των αποτελεσμάτων του αναλυτικού μοντέλου και των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης είναι μικρότερη από 0,5 % .

Πίνακας 6.1
Parameters DSSS, 802.11b, G.711, G.729, G.723.1

| Parameter | Value |
|-----------------------------|--|
| Data packet | 8184 bits |
| Slot | 20 μ s |
| SIFS | 10 μ s |
| DIFS=2•slot+SIFS | 50 μ s |
| PHY (physical) layer header | 192 bits at 1Mbps |
| ACK | 112 bits at 11 Mbps + PHY at 1 Mbps |
| MAC layer header | 224 bits |
| H (packet header) | 224 bits MAC data at 11 Mbps + PHY at 1 Mbps |
| RTP | 12 • 8 = 96 bits |
| UDP | 8 • 8 = 64 bits |
| IP | 20 • 8 = 160 bits |
| CW _{min} | 32 |
| CW _{max} | 1024 |
| Number of CW sizes (m') | 5 |
| Retry Limit | 6 |
| Voice codec | G.711 |
| Interval | 20 ms |
| Packet payload | 1280 bits |
| Voice codec | G.729 |
| Interval | 20 ms |
| Packet payload | 160 bits |
| Voice codec | G.723.1 |
| Interval | 30 ms |
| Packet payload | 192 bits |

6.2 Αποτελέσματα

Στο σχήμα 6.1 παριστάνεται η διεκπεραιωτική ικανότητα ενός σταθμού φωνής (S_{single}) ως προς τον αριθμό των συνεδριών φωνής, με ή χωρίς σταθμούς δεδομένων στο δίκτυο, για τον κωδικοποιητή φωνής G.711.



Σχήμα 6.1

Χωρητικότητα φωνής, χρήση codec G.711 (packetization interval 20 ms)

Η χωρητικότητα φωνής υπολογίζεται στο σημείο στο οποίο η γραμμή η οποία παριστά την Saturation Throughput για το συγκεκριμένο packetization interval, τέμνει την οριζόντια κάθετη στον άξονα των y και στο σημείο S_{limit} . Η τιμή του S_{limit} υπολογίζεται από τη σχέση (5.19) και είναι 0,00554. Η υπολογισμένη με αυτό τον τρόπο χωρητικότητα φωνής, παρουσιάζεται στον πίνακα 6.2.

Πίνακας 6.2
Χωρητικότητα φωνής, χρήση codec G.711 (packetization interval 20 ms)

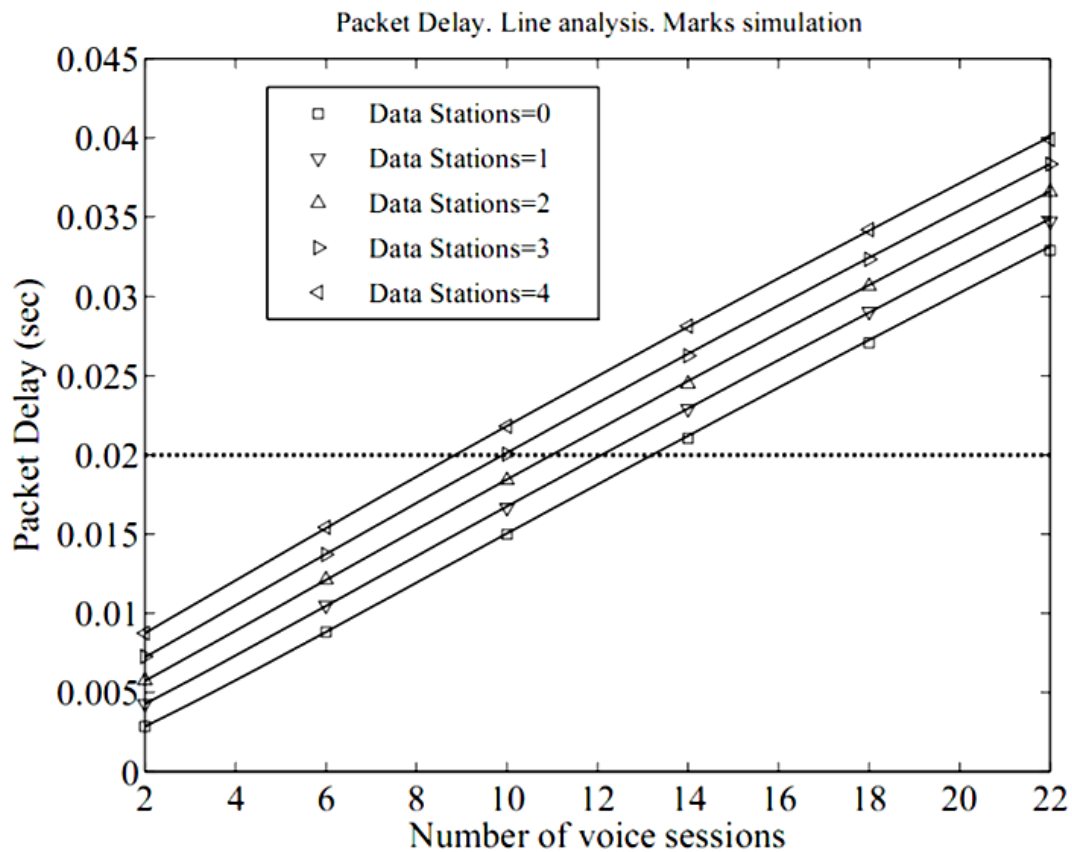
| Data stations | Voice sessions |
|---------------|----------------|
| 0 | 12 |
| 1 | 11 |
| 2 | 10 |
| 3 | 9 |
| 4 | 8 |

Πίνακας 6.3
Σύγκριση χωρητικότητας φωνής για διάφορους κωδικοποιητές

| Packetization Interval (ms) | G. 711 | | G.729 | | G.723.1 | |
|-----------------------------|--------|-----|-------|-----|---------|-----|
| | PA | [8] | PA | [8] | PA | [8] |
| 10 | 7 | 6 | 7 | 7 | | |
| 20 | 12 | 11 | 14 | 13 | | |
| 30 | 16 | 15 | 20 | 19 | 20 | 19 |
| 40 | 19 | 18 | 25 | 23 | | |
| 50 | 22 | 20 | 30 | 28 | | |
| 60 | 24 | 22 | 35 | 32 | 35 | 33 |

Στον πίνακα 6.3 παρουσιάζεται η χωρητικότητα φωνής του αλγορίθμου που προτείνεται σε αυτή την μεταπτυχιακή διατριβή (PA Proposed Algorithm), για τους δημοφιλέστερους κωδικοποιητές φωνής, θεωρώντας ότι δεν υπάρχουν σταθμοί δεδομένων στο δίκτυο. Στον ίδιο πίνακα παρατίθενται για λόγους σύγκρισης, τα αποτελέσματα της εργασίας του Π. Χατζημίσιου [8], όσον αφορά στην χωρητικότητα φωνής. Από τον πίνακα 6.3 φαίνεται ότι τα αποτελέσματα του PA είναι παρόμοια με αυτά της εργασίας του Χατζημίσιου [8], αν και ο PA είναι απλούστερος και εύκολα υλοποιήσιμος. Το γεγονός αυτό καταδεικνύει την αξιοπιστία του αναλυτικού μαθηματικού μοντέλου που προτείνεται σε αυτή την μεταπτυχιακή διατριβή.

Στο σχήμα 6.2 παριστάνεται η μέση καθυστέρηση πακέτου ως προς τον αριθμό των συνεδριών φωνής, με ή χωρίς σταθμούς δεδομένων στο δίκτυο, για τον κωδικοποιητή φωνής G.711 (packetization interval 20 ms). Η χωρητικότητα φωνής υπολογίζεται στο σημείο στο οποίο η γραμμή η οποία παριστά την μέση καθυστέρηση, τέμνει την οριζόντια κάθετη στον άξονα των y και στο σημείο T_{pck} . Η τιμή του T_{pck} είναι ίση με 20 ms. Η υπολογισμένη με αυτό τον τρόπο χωρητικότητα φωνής, παρουσιάζεται στον πίνακα 6.4.



Σχήμα 6.2

Χωρητικότητα φωνής-Μέση καθυστέρηση (packetization interval 20 ms)

Τα αποτελέσματα του πίνακα 6.4 είναι παρόμοια με αυτά που υπολογίσθηκαν χρησιμοποιώντας την saturation throughput ενός σταθμού του δικτύου (S_{single}).

Πίνακας 6.4

Χωρητικότητα φωνής (από μέση καθυστέρηση πακέτου). Codec G.711, packetization interval 20 ms

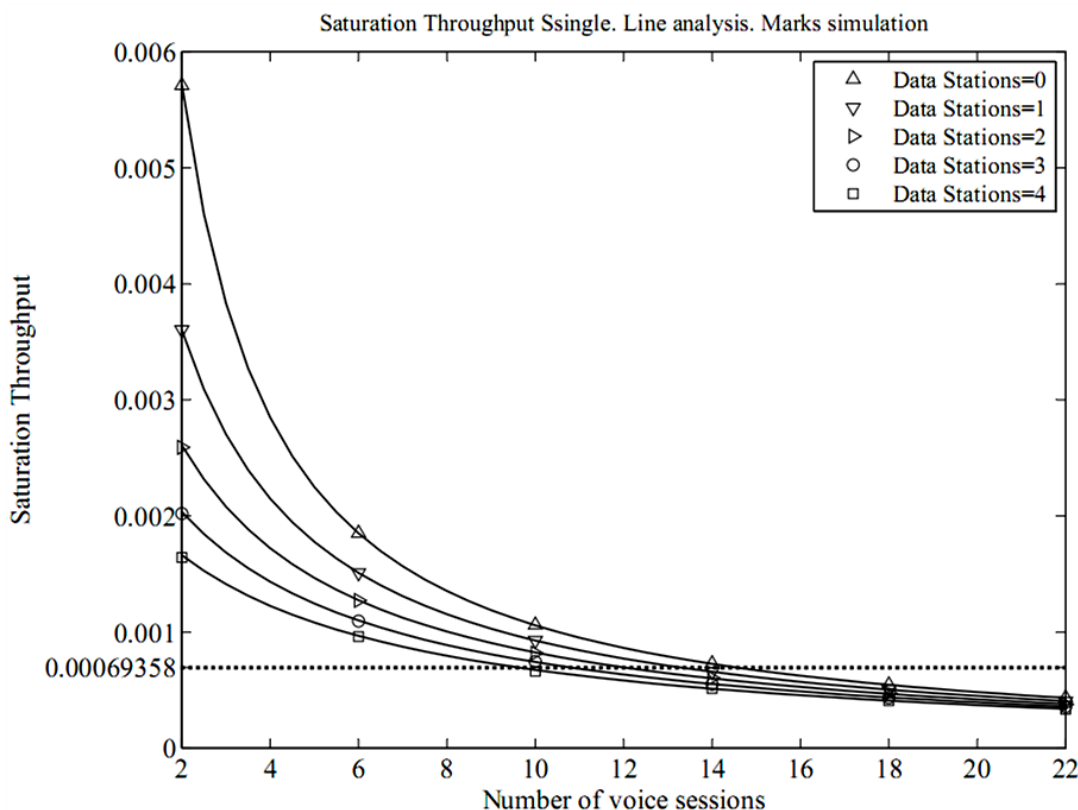
| Data stations | Voice sessions |
|---------------|----------------|
| 0 | 13 |
| 1 | 12 |
| 2 | 10 |
| 3 | 9 |
| 4 | 8 |

Στο σχήμα 6.3 παριστάνεται η διεκπεραιωτική ικανότητα ενός σταθμού φωνής (S_{single}) ως προς τον αριθμό των συνεδριών φωνής, με ή χωρίς σταθμούς δεδομένων στο δίκτυο, για τον κωδικοποιητή φωνής G.729. Η χωρητικότητα φωνής υπολογίζεται

στο σημείο στο οποίο η γραμμή η οποία παριστά την Saturation Throughput για το συγκεκριμένο packetization interval, τέμνει την οριζόντια κάθετη στον άξονα των y και στο σημείο S_{limit} . Η τιμή του S_{limit} υπολογίζεται από τη σχέση (5.19) και είναι 0,00069358. Η υπολογισμένη με αυτό τον τρόπο χωρητικότητα φωνής, παρουσιάζεται στον πίνακα 6.5.

Πίνακας 6.5
Χωρητικότητα φωνής, χρήση codec G.729 (packetization interval 20 ms)

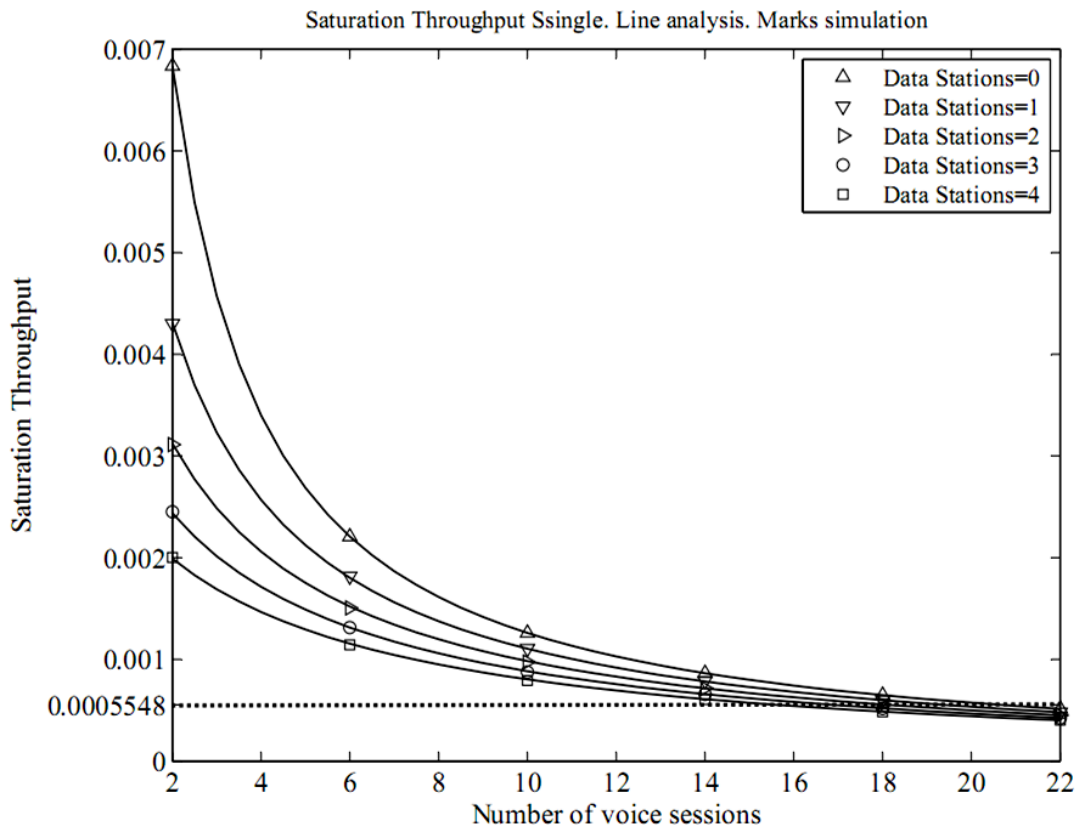
| Data stations | Voice sessions |
|---------------|----------------|
| 0 | 14 |
| 1 | 13 |
| 2 | 12 |
| 3 | 10 |
| 4 | 9 |



Σχήμα 6.3
Χωρητικότητα φωνής, χρήση codec G.729 (packetization interval 20 ms)

Στο σχήμα 6.4 παριστάνεται η διεκπεραιωτική ικανότητα ενός σταθμού φωνής (S_{single}) ως προς τον αριθμό των συνεδριών φωνής, με ή χωρίς σταθμούς δεδομένων

στο δίκτυο, για τον κωδικοποιητή φωνής G.723.1 (packetization interval 30 ms). Η χωρητικότητα φωνής υπολογίζεται στο σημείο στο οποίο η γραμμή η οποία παριστά την Saturation Throughput για το συγκεκριμένο packetization interval, τέμνει την οριζόντια κάθετη στον άξονα των y και στο σημείο S_{limit} . Η τιμή του S_{limit} υπολογίζεται από τη σχέση (5.19) και είναι 0,0005548. Η υπολογισμένη με αυτό τον τρόπο χωρητικότητα φωνής, παρουσιάζεται στον πίνακα 6.6.



Σχήμα 6.4

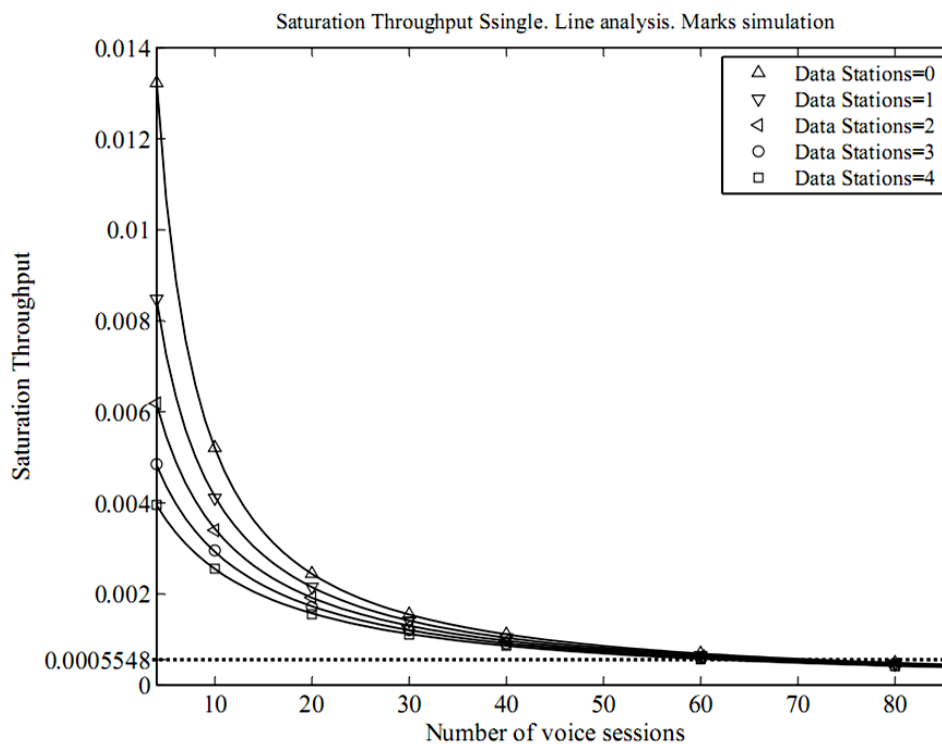
Χωρητικότητα φωνής, χρήση codec G.723.1 (packetization interval 30 ms)

Πίνακας 6.6

Χωρητικότητα φωνής, χρήση codec G.723.1 (packetization interval 30 ms)

| Data stations | Voice sessions |
|---------------|----------------|
| 0 | 20 |
| 1 | 19 |
| 2 | 18 |
| 3 | 16 |
| 4 | 15 |

Στο σχήμα 6.5 παριστάνεται η διεκπεραιωτική ικανότητα ενός σταθμού φωνής (S_{single}) ως προς τον αριθμό των συνεδριών φωνής, με ή χωρίς σταθμούς δεδομένων στο δίκτυο, για τον κωδικοποιητή φωνής G.723.1 (packetization interval 60 ms). Η χωρητικότητα φωνής υπολογίζεται στο σημείο στο οποίο η γραμμή η οποία παριστά την Saturation Throughput για το συγκεκριμένο packetization interval, τέμνει την οριζόντια κάθετη στον άξονα των y και στο σημείο S_{limit} . Η τιμή του S_{limit} υπολογίζεται από τη σχέση (5.19) και είναι 0,0005548. Η υπολογισμένη με αυτό τον τρόπο χωρητικότητα φωνής, παρουσιάζεται στον πίνακα 6.7.



Σχήμα 6.5

Χωρητικότητα φωνής, χρήση codec G.723.1 (packetization interval 60 ms)

Πίνακας 6.7

Χωρητικότητα φωνής, χρήση codec G.723.1 (packetization interval 60 ms)

| Data stations | Voice sessions |
|---------------|----------------|
| 0 | 35 |
| 1 | 34 |
| 2 | 33 |
| 3 | 32 |
| 4 | 31 |

6.3 Συμπεράσματα

Στο προηγούμενο κεφάλαιο υπολογίσθηκε η χωρητικότητα φωνής ενός ασύρματου δικτύου που περιλαμβάνει σταθμούς φωνής και δεδομένων, για ορισμένους δημοφιλείς κωδικοποιητές φωνής. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους πίνακες 6.2, 6.5, 6.6 και 6.7. Παρατηρώντας τους πίνακες, διαπιστώνεται ότι εάν ένας σταθμός δεδομένων εισέλθει στο δίκτυο, τότε χάνεται αντίστοιχα μια συνεδρία φωνής. Για παράδειγμα, στον πίνακα 6.2 παρουσιάζεται η χωρητικότητα φωνής σε ένα ασύρματο δίκτυο, χρησιμοποιώντας τον G.711 codec με packetization interval 20 ms. Εάν δεν υπάρχουν σταθμοί δεδομένων στο δίκτυο, τότε η χωρητικότητα φωνής υπολογίσθηκε στις 12 συνεδρίες. Εάν είναι παρών ένας σταθμός δεδομένων, τότε η χωρητικότητα φωνής μειώνεται στις 11 συνεδρίες, εάν είναι παρόντες δύο σταθμοί δεδομένων τότε η χωρητικότητα φωνής υπολογίσθηκε στις 10 συνεδρίες φωνής κοκ.

Στην εργασία του ο Δ. Βούρκας [5] έκανε αντίστοιχους υπολογισμούς, θεωρώντας όμως ότι οι σταθμοί δεδομένων χρησιμοποιούν την RTS/CTS μέθοδο πρόσβασης μέσου. Η χωρητικότητα φωνής που υπολογίσθηκε από τον Βούρκα [5], χρησιμοποιώντας τον G.711 codec με packetization interval 20 ms, παρουσιάζεται στον πίνακα 6.8.

Πίνακας 6.8
Χωρητικότητα φωνής υπολογισμένη από τον Βούρκα [5], χρήση codec G.711
(packetization interval 20 ms)

| Data stations | Voice sessions |
|----------------------|-----------------------|
| 0 | 12 |
| 1 | 10 |
| 2 | 9 |
| 3 | 8 |
| 4 | 7 |

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα αυτής της μεταπτυχιακής διατριβής με τα αποτελέσματα του Βούρκα [5] (πίνακες 6.2 και 6.8) διαπιστώνεται ότι αν οι σταθμοί δεδομένων χρησιμοποιούν τη βασική μέθοδο πρόσβασης μέσου, τότε η χωρητικότητα φωνής του δικτύου αυξάνεται, για μικρό αριθμό σταθμών δεδομένων παρόντων στο δίκτυο. Απ' ότι φαίνεται ο βασικός μηχανισμός της DCF (για τα πακέτα των σταθμών δεδομένων) χρησιμοποιεί αποδοτικότερα το μέσο και δίνει ελαφρώς καλύτερη

διεκπεραιωτική ικανότητα και ελαφρώς χαμηλότερη μέση καθυστέρηση πακέτων. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί ως εξής:

Όταν υπάρχουν λίγοι σταθμοί φωνής στο δίκτυο (αριστερό τμήμα των καμπυλών στα διαγράμματα), τότε οι συγκρούσεις είναι περιορισμένες. Συνεπώς το πλεονέκτημα της μεθόδου πρόσβασης μέσου RTS/CTS δεν είναι σημαντικό και τελικά η μέθοδος της Βασικής πρόσβασης μέσου δίνει καλύτερα αποτελέσματα. Η αποδοτικότητα της RTS/CTS μεθόδου πρόσβασης μέσου είναι αυξημένη όταν ο αριθμός των συγκρούσεων μεταξύ των πακέτων είναι μεγάλος. Αυτό συμβαίνει διότι η διάρκεια μιας σύγκρουσης μειώνεται, επειδή μόνο τα μικρά σε μέγεθος RTS πλαίσια συμμετέχουν στη σύγκρουση και όχι τα πακέτα πληροφορίας.

Ο μηχανισμός RTS/CTS δεν είναι αποδοτικός, όταν ο αριθμός των συγκρούσεων είναι μικρός και αντίστοιχα ο αριθμός των επιτυχώς μεταδιδόμενων πακέτων είναι μεγάλος. Σ' αυτή τη περίπτωση η επιβάρυνση που εισάγουν τα RTS/CTS πλαίσια μειώνει την αποδοτικότητα.

Καθώς ο αριθμός των σταθμών φωνής αυξάνεται, ο αριθμός των συγκρούσεων στο δίκτυο αυξάνεται επίσης λόγω του ότι περισσότεροι σταθμοί ανταγωνίζονται για την πρόσβαση στο μέσο. Θεωρώντας ότι οι σταθμοί δεδομένων είναι σημαντικά λιγότεροι από τους σταθμούς φωνής, η πιθανότητα σε μια σύγκρουση να εμπλέκονται δύο σταθμοί φωνής ή ένας σταθμός φωνής και ένας σταθμός δεδομένων είναι μεγαλύτερη από την πιθανότητα στην σύγκρουση να εμπλέκονται δύο σταθμοί δεδομένων.

Στο RTS/CTS σενάριο του Βούρκα [5], όταν συμβαίνει μια σύγκρουση και σε αυτή εμπλέκεται ένας σταθμός δεδομένων, τότε ένα μικρό σε μέγεθος πακέτο RTS συγκρούεται. Εάν στην σύγκρουση εμπλέκονται ένα πακέτο φωνής και ένα RTS πακέτο, τότε η διάρκεια της σύγκρουσης υπολογίζεται θεωρώντας το μέγεθος του πακέτου φωνής (που χρησιμοποιεί τον βασικό μηχανισμό). Συνεπώς το πλεονέκτημα της RTS/CTS μεθόδου χάνεται επειδή η πιθανότητα να εμπλακούν σε σύγκρουση δύο σταθμοί δεδομένων είναι πολύ μικρή (εάν βέβαια ο αριθμός των σταθμών φωνής είναι πολύ μεγαλύτερος).

Κεφάλαιο 7

Συμπεράσματα

Σ' αυτή τη μεταπτυχιακή διατριβή, αναπτύχθηκε ένα μαθηματικό μοντέλο το οποίο υπολογίζει την διεκπεραιωτική ικανότητα κορεσμού και την μέση καθυστέρηση πακέτου, σε ένα υβριδικό ασύρματο LAN (IEEE 802.11), στο οποίο ασύρματοι σταθμοί φωνής και ασύρματοι σταθμοί δεδομένων εκπέμπουν ταυτόχρονα. Επίσης αναπτύχθηκε ένα πρόγραμμα προσομοίωσης σε περιβάλλον Matlab, το οποίο προσομοιώνει την λειτουργία του υβριδικού WLAN. Το μαθηματικό μοντέλο επικυρώθηκε συγκρίνοντας τα αναλυτικά αποτελέσματα με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Βασιζόμενοι στην διεκπεραιωτική ικανότητα κορεσμού, αναπτύξαμε μια μεθοδολογία υπολογισμού της χωρητικότητας φωνής, θεωρώντας ότι τα πακέτα δεδομένων και τα πακέτα φωνής χρησιμοποιούν την βασική μέθοδο πρόσβασης της DCF.

Το προτεινόμενο μοντέλο επικυρώθηκε συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του με αποτελέσματα που παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία (τα οποία προκύπτουν χρησιμοποιώντας περισσότερο πολύπλοκες μεθόδους από την προτεινόμενη μέθοδο). Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου που προτείνουμε είναι απλότητα και ταχύτητα.

Το μαθηματικό μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για να υπολογισθεί η χωρητικότητα φωνής για τρεις δημοφιλείς κωδικοποιητές φωνής: G.711, G.729, G.723.1 .

Από τα αποτελέσματα που λάβαμε για την χωρητικότητα φωνής, συμπεραίνεται ότι για κάθε σταθμό δεδομένων που εισέρχεται στο ασύρματο δίκτυο χάνονται μια ή δύο συνεδρίες φωνής (voice sessions). Πιο συγκεκριμένα όπως φαίνεται και από τον πίνακα 6.2, αν χρησιμοποιηθεί ως κωδικοποιητής φωνής ο G.711 με packetization interval 20 ms, τότε χωρίς σταθμούς δεδομένων στο ασύρματο δίκτυο, οι συνεδρίες φωνής που υποστηρίζονται μπορεί να είναι ως 12. Αν ένας σταθμός δεδομένων εισέλθει στο δίκτυο τότε οι συνεδρίες φωνής μειώνονται στις 11 και η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι να μειωθούν οι υποστηριζόμενες συνεδρίες φωνής στις 8 αν υπάρχουν 4 σταθμοί δεδομένων στο ασύρματο δίκτυο.

Παρόμοια αποτελέσματα έχουμε και στην περίπτωση που χρησιμοποιηθεί ως κωδικοποιητής φωνής ο G.729 με packetization interval 20 ms. Παρατηρούμε ότι οι συνεδρίες φωνής ξεκινούν από 14, αν δεν υπάρχουν σταθμοί δεδομένων στο ασύρματο δίκτυο και μειώνονται κατά μία συνεδρία αν ένας σταθμός δεδομένων συνδέεται κάθε φορά στο δίκτυο. Επίσης παρατηρείται ότι αν οι σταθμοί δεδομένων από 2 γίνουν 3 στο ασύρματο δίκτυο, τότε χάνονται δύο συνεδρίες φωνής.

Όσον αφορά τώρα στον κωδικοποιητή G.723.1 με packetization interval 30 ms, οι συνεδρίες φωνής ξεκινούν από 20, χωρίς σταθμούς δεδομένων στο δίκτυο και μειώνονται κατά μία για κάθε σταθμό δεδομένων που εισέρχεται στο ασύρματο δίκτυο. Στην περίπτωση που οι σταθμοί δεδομένων αυξηθούν από 2 σε 3 τότε έχουμε μείωση κατά 2 συνεδρίες φωνής, δηλαδή από 18 συνεδρίες σε 16 συνεδρίες.

Παρόμοια αποτελέσματα παίρνουμε και για τον κωδικοποιητή G.723.1 με packetization interval 60 ms. Συγκεκριμένα όταν δεν υπάρχουν σταθμοί δεδομένων στο ασύρματο δίκτυο, τότε μπορούν να υποστηριχθούν μέχρι 35 συνεδρίες φωνής. Οι συνεδρίες φωνής βαίνουν μειούμενες κατά μία, για κάθε σταθμό δεδομένων που εισέρχεται στο δίκτυο. Έτσι όταν ένας σταθμός δεδομένων είναι παρών στο ασύρματο δίκτυο, οι συνεδρίες φωνής γίνονται 34 κοκ. Στην περίπτωση που υπάρχουν 4 σταθμοί δεδομένων στο ασύρματο δίκτυο, οι συνεδρίες φωνής γίνονται 31.

Ένα άλλο σημαντικό συμπέρασμα της μεταπτυχιακής αυτής διατριβής είναι ότι η βασική πρόσβαση μέσου την οποία χρησιμοποιούν οι σταθμοί δεδομένων (όπως και οι σταθμοί φωνής, οι οποίοι όμως πάντα χρησιμοποιούν βασική πρόσβαση), εκμεταλλεύεται αποδοτικότερα το ασύρματο μέσο.

Το συμπέρασμα αυτό προήλθε από σύγκριση των αποτελεσμάτων που πήραμε με τα αποτελέσματα της εργασίας του Δ. Βούρκα [5]. Στην εργασία του ο Βούρκας θεωρεί ότι οι σταθμοί δεδομένων χρησιμοποιούν την RTS/CTS μέθοδο πρόσβασης του ασύρματου μέσου. Συγκεκριμένα και για χρήση του κωδικοποιητή φωνής G.711 με packetization interval 20 ms, ο Βούρκας πήρε σαν αποτέλεσμα χωρητικότητας φωνής 12 συνεδρίες όταν δεν υπάρχει σταθμός δεδομένων στο δίκτυο (όσες και εμείς σε αυτή την μεταπτυχιακή διατριβή). Όταν υπάρχει ένας σταθμός δεδομένων στο δίκτυο τότε οι συνεδρίες φωνής, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της εργασίας του Βούρκα μειώνονται στις 10 (ενώ στα αποτελέσματα της δικής μας μεταπτυχιακής διατριβής το αντίστοιχο νούμερο είναι 11). Παρατηρώντας τους πίνακες 6.2 και 6.8 (τους οποίους για λόγους πληρότητας του κειμένου εμφανίζουμε ξανά παρακάτω) συμπεραίνουμε ότι ο βασικός μηχανισμός πρόσβασης όταν χρησιμοποιείται στους σταθμούς δεδομένων,

χρησιμοποιεί πιο αποδοτικά το μέσο από τον μηχανισμό RTS/CTS και αυξάνει την χωρητικότητα φωνής, κατά μία συνεδρία:

Πίνακας 6.2
Χωρητικότητα φωνής, χρήση codec G.711 (packetization interval 20 ms)

| Data stations | Voice sessions |
|----------------------|-----------------------|
| 0 | 12 |
| 1 | 11 |
| 2 | 10 |
| 3 | 9 |
| 4 | 8 |

Πίνακας 6.8
Χωρητικότητα φωνής υπολογισμένη από τον Βούρκα [5], χρήση codec G.711 (packetization interval 20 ms)

| Data stations | Voice sessions |
|----------------------|-----------------------|
| 0 | 12 |
| 1 | 10 |
| 2 | 9 |
| 3 | 8 |
| 4 | 7 |

Αυτό μπορεί να εξηγηθεί ως εξής: Ο μηχανισμός RTS/CTS είναι αποδοτικός όταν ο αριθμός των συγκρούσεων μεταξύ των πακέτων είναι μεγάλος. Η διάρκεια μιας σύγκρουσης στον μηχανισμό RTS/CTS μειώνεται επειδή συμμετέχουν στη σύγκρουση μόνο τα μικρά σε μέγεθος πακέτα RTS. Όταν ο αριθμός των συγκρούσεων είναι μικρός και ο αριθμός των επιτυχώς μεταδιδόμενων πακέτων είναι μεγάλος, τότε η επιβάρυνση που εισάγουν τα RTS/CTS πλαίσια μειώνει την αποδοτικότητα της μεθόδου πρόσβασης.

Στο υβριδικό σύστημα που μελετήσαμε, όταν υπάρχουν λίγοι σταθμοί φωνής στο δίκτυο τότε οι συγκρούσεις μεταξύ των πακέτων είναι περιορισμένες και η βασική πρόσβαση είναι αποδοτικότερη.

Όταν ο αριθμός των σταθμών φωνής στο δίκτυο αυξηθεί, τότε αυξάνονται και οι συγκρούσεις μεταξύ των πακέτων. Επειδή οι σταθμοί δεδομένων είναι σημαντικά λιγότεροι από τους σταθμούς φωνής, η πιθανότητα σε μια σύγκρουση να εμπλέκονται δύο πακέτα φωνής ή ένα πακέτο φωνής και ένα πακέτο δεδομένων είναι μεγαλύτερη από την πιθανότητα να εμπλέκονται στη σύγκρουση δύο πακέτα δεδομένων.

Εάν στη σύγκρουση εμπλέκονται δύο πακέτα φωνής τότε η διάρκεια της σύγκρουσης υπολογίζεται με βάση το μέγεθος των πακέτων φωνής, τα οποία χρησιμοποιούν τον βασικό μηχανισμό πρόσβασης μέσου.

Εάν στη σύγκρουση εμπλέκονται ένα πακέτο φωνής και ένα δεδομένων και υπό την προϋπόθεση ότι τα πακέτα δεδομένων χρησιμοποιούν την RTS/CTS μέθοδο πρόσβασης μέσου, η διάρκεια της σύγκρουσης θα υπολογισθεί με βάση το μέγεθος του μεγαλύτερου σε μέγεθος πακέτου φωνής.

Τελικά μόνο αν στη σύγκρουση εμπλέκονται δύο πακέτα δεδομένων η διάρκεια της σύγκρουσης θα υπολογισθεί με βάση το μέγεθος των μικρών RTS πλαισίων. Η πιθανότητα να συγκρουσθούν δύο πακέτα δεδομένων είναι πολύ μικρή (αν ο αριθμός των σταθμών φωνής είναι μεγάλος), συνεπώς το πλεονέκτημα της μεθόδου πρόσβασης RTS/CTS σε αυτή την περίπτωση δεν είναι σημαντικό.

Βιβλιογραφία

- [1] B. Bianchi G (2000) "Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function", IEEE Selected Areas In Communications VOL. 18, No. 3, MARCH 2000, σελ. 535-547.
- [2] B. Haitao Wu, Yong Peng, Keping Long, Shiduan Cheng, Jian Ma (2002) "Performance of Reliable Transport Protocol over IEEE 802.11 Wireless Lan: Analysis and Enhancement" IEEE INFOCOM 2002.
- [3] B. P. Raptis - V. Vitsas - K. Paparrizos, "Packet Delay Metrics for IEEE 802.11 Distributed Coordination Function", Mobile Netw Appl, 05 December 2008 .
- [4] B. 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.
- [5] D. Vourkas, V. Vitsas, "Analytical Modeling of Voice Capacity under Data Traffic in 802.11 WLANs", 8th IEEE, IET International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing.
- [6] M. Eiger, M. Elaoud, D. Famolari, "The effect of packetization on voice capacity in IEEE802.11B networks", Proc 2nd IEEE Consumer Communications and Networking Conf. (CCNC2005), Las Vegas, Nevada, USA, 3-6 Jan
- [7] R. Caputo, CISCO "*Packetized voice & Data Integration*", McGraw-Hill 2000
- [8] 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, October2008.

- [9] <http://www.howtonetwork.net/public/1760.cfm>
- [10] Paul Browning, CCNA Simplified v3, Reality Press Ltd UK.
- [11] IEEE standard for Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications ISO/IEC8802-11:1999(E), Aug. 1999
- [12] Roger Freeman Fundamentals Of Telecommunications, 2nd Ed, Wiley NY – 2005
- [13] Roger Freeman Practical Data Communications, 2nd ed., Wiley, N.Y., 2001.
- [14] Roger Freeman Telecommunication System Engineering, 4th ed, Wiley, N.Y., 2004
- [15] Pavlos Papageorgiou A Comparison of H.323 vs SIP University of Maryland at College Park June 4 , 2001
- [16] Ramesh Kaza, Salman Asadullah, Planning, Design, Implementation, Operation, and Optimization, Cisco Press (March 5, 2005)
- [17] Olivier Hersent, Jean-Pierre Petit, David Gurle, Deploying Voice-over-IP Protocols, John Wiley 1 edition (March 11, 2005).