

Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου

Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών

Μεταπτυχιακή Διατριβή Στα Συστήματα Ασύρματης Επικοινωνίας



**Μαθηματική Μοντελοποίηση IEEE 802.11 WLANs Που
Περιλαμβάνουν Σταθμούς Δεδομένων Με Basic Access Και
Σταθμούς Φωνής (VoIP) Με Ταυτόχρονα Basic Access Data**

Σταύρος Καλαμπούκας

**Επιβλέπων Καθηγητής
Βασίλειος Βίτσας**

Μάιος 2017

Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου

Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών

**Μαθηματική Μοντελοποίηση IEEE 802.11 WLANs Που
Περιλαμβάνουν Σταθμούς Δεδομένων Με Basic Access Και
Σταθμούς Φωνής (VoIP) Με Ταυτόχρονα Basic Access Data**

Σταύρος Καλαμπούκας

**Επιβλέπων Καθηγητής
Βασίλειος Βίτσας**

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή υποβλήθηκε
προς μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων για απόκτηση
μεταπτυχιακού τίτλου σπουδών
στα Συστήματα Ασύρματης Επικοινωνίας
από τη Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών
του Ανοικτού Πανεπιστημίου Κύπρου

Μάιος 2017

Περίληψη

Η εδραίωση των προτύπων IEEE 802.11 στο χώρο της ασύρματης δικτύωσης καθιστά αναγκαία την περαιτέρω ανάπτυξή τους. Τώρα, περισσότερο από πότε, οι άνθρωποι πραγματοποιούν κλήσεις μέσω του διαδικτύου και ταυτόχρονα συνδέονται σε αυτό για περιήγηση ή μεταφορά αρχείων.

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή αναπτύσσεται ένα μαθηματικό μοντέλο για το IEEE 802.11 DCF μηχανισμό πρόσβασης στο κοινό μέσο μετάδοσης, θεωρώντας ταυτόχρονη εκπομπή σταθμών δεδομένων με basic access και σταθμών φωνής (VoIP) με ταυτόχρονα basic access data stream. Το νέο μοντέλο υπολογίζει την απόδοση του μηχανισμού DCF χρησιμοποιώντας τις μετρικές απόδοσης, όπως η διεκπεραιωτική ικανότητα (throughput), η μέση καθυστέρηση επιτυχημένης αποστολής πακέτων (average packet delay), η διακύμανση της καθυστέρησης (jitter) και η πιθανότητα απόρριψης (drop probability) για τα πακέτα μετάδοσης φωνής. Χρησιμοποιούνται ανώτατες τιμές που χαρακτηρίζουν την καλή ποιότητα επικοινωνίας φωνής και υπολογίζεται η χωρητικότητα (capacity) του ασύρματου δικτύου σε φωνητικές κλήσεις καλής ποιότητας. Εξετάζεται η επίδραση σταθμών που μεταφέρουν δεδομένα και του ταυτόχρονου data stream στην χωρητικότητα φωνής.

Το προτεινόμενο μαθηματικό μοντέλο επαληθεύεται συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του με τα αποτελέσματα προσομοιωτή.

Summary

The stabilization of IEEE 802.11 standards in wireless networking requires further development. Now, more than ever, people make calls over the Internet and simultaneously connect to it for browsing or transferring files.

In this research a mathematical model for the IEEE 802.11 DCF access mechanism for the common transmission medium is being developed, considering the simultaneous transmission of basic data and voice stations (VoIP) with simultaneous basic access data stream. The new model calculates the performance of the DCF using the performance metrics, such as throughput, average packet delay, packet jitter and packet drop probability for the voice transmission packets. Higher values are used to characterize good voice communication quality and calculate the capacity of the wireless network in good quality voice calls. It examines the impact of data transfer stations and the simultaneous data stream on voice capacity.

The proposed mathematical model is verified by comparing its results with simulation results.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες προς τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Βασίλειο Βίτσα, ο οποίος με παιδαγωγικό πνεύμα και αμέριστη στήριξη με βοηθούσε σε όλη την διάρκεια της εκπόνησης της μεταπτυχιακής διατριβής μου και τελικά με εισήγαγε στον κόσμο της έρευνας.

Επίσης, δε θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω την σύζυγο μου, Μαρία, που με προέτρεψε να ξεκινήσω τις μεταπτυχιακές μου σπουδές, καθώς και για τη συμπαράσταση και εμπύχωση, καθ' όλη τη διάρκεια της μεταπτυχιακής διατριβής μου.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	1
1.1	Γενικά	1
1.2	Μεταπτυχιακή Διατριβή	2
1.2.1	Μεθοδολογία	2
1.2.2	Δομή	3
2	Πρωτόκολλα IEEE 802.11	5
2.1	Είδη Δικτύων	5
2.2	Τοπολογίες Ασύρματων Δικτύων	6
2.3	Η Οικογένεια IEEE 802.11	7
2.3.1	Διαστρωμάτωση Των Προτύπων IEEE 802.11	8
2.3.2	Το Φυσικό Στρώμα Των Προτύπων IEEE 802.11	8
2.3.3	Το Υπόστρωμα MAC Των Προτύπων IEEE 802.11	8
2.4	Κατανεμημένη Λειτουργία Συντονισμού - DCF	9
2.4.1	Η Τεχνική Basic Access	10
2.4.2	Η Τεχνική RTS/CTS	11
3	Μοντελοποίηση Του Μηχανισμού DCF	14
3.1	Η Πιθανότητα Μετάδοσης Ενός Πακέτου	14
3.2	Η Διεκπεραιωτική Ικανότητα Του Συστήματος	21
3.2.1	Η Τεχνική Basic Access	22
3.2.2	Η Τεχνική RTS/CTS	23
3.3	Επικύρωση Μοντέλου	24
3.4	Ανάλυση Αποτελεσμάτων	25
4	Εισαγωγή Ορίου Αναμετάδοσης	26
4.1	Η Πιθανότητα Μετάδοσης Ενός Πακέτου	26
4.2	Η Διεκπεραιωτική Ικανότητα Του Συστήματος	32
4.2.1	Η Τεχνική Basic Access	33
4.2.2	Η Τεχνική RTS/CTS	34
4.3	Επικύρωση Μοντέλου	34
4.4	Ανάλυση Αποτελεσμάτων	35

5	Μέση καθυστέρηση Πακέτων	38
5.1	Πιθανότητα Μετάδοσης και Ρυθμαπόδοση	38
5.2	Πιθανότητα Απόρριψης Πακέτου	40
5.3	Μέσος Χρόνος Απόρριψης Πακέτου	40
5.4	Μέση Καθυστέρηση Πακέτων	41
5.5	Ανάλυση Αποτελεσμάτων	44
6	Μετρικές Καθυστέρησης	49
6.1	Μέση Καθυστέρηση Ανά Στάδιο	50
6.2	Μέσος Χρόνος Απόρριψης Πακέτου	52
6.3	Μέση Καθυστέρηση Πακέτων	52
6.4	Διακύμανση Της Καθυστέρησης	53
6.5	Ανάλυση Αποτελεσμάτων	55
7	Χωρητικότητα Σταθμών Φωνής	59
7.1	Βασικά Στοιχεία Του Μοντέλου	59
7.2	Περιγραφή Δικτύου	60
7.3	Μετρικές Ποιότητας	61
7.4	Ανάλυση Αποτελεσμάτων	62
8	Υβριδικά Συστήματα	67
8.1	Πρώτο Υβριδικό Μοντέλο	67
8.1.1	Περιγραφή Δικτύου Και Παραδοχές	68
8.1.2	Υβριδικό Σύστημα	68
8.1.3	Χωρητικότητα Φωνής	71
8.1.4	Ανάλυση Αποτελεσμάτων	72
8.2	Δεύτερο Υβριδικό Μοντέλο	78
8.2.1	Περιγραφή Δικτύου Και Παραδοχές	78
8.2.2	Υβριδικό Σύστημα	79
8.2.3	Χωρητικότητα Φωνής	81
8.2.4	Ανάλυση Αποτελεσμάτων	82

9	Μαθηματικό Μοντέλο Υβριδικού Συστήματος	87
9.1	Μοντέλο Ασύρματου Δικτύου	88
9.1.1	Περιγραφή Δικτύου Και Παραδοχές	88
9.1.2	Υπόβαθρο Μαθηματικού Μοντέλου	89
9.2	Υβριδικό Σύστημα	89
9.3	Χωρητικότητα Φωνής	92
9.4	Ανάλυση Αποτελεσμάτων	95
10	Επίλογος	104
10.1	Συμπεράσματα	105
10.2	Προτάσεις Για Εξέλιξη Της Έρευνας	105
	Βιβλιογραφία	107

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Η ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας και η ανάγκη για ασύρματη δικτύωση οδήγησε στην αύξηση της χρήσης ασύρματων δικτύων. Πλέον, η εγκατάσταση τοπικών ασύρματων δικτύων (WLANs – Wireless Local Area Networks) σε κλειστούς, αλλά και ανοικτούς χώρους, δεν είναι μόνο συνήθης, αλλά πολλές φορές και αναγκαία. Οι κύριοι λόγοι εξάπλωσης αυτών των ασύρματων δικτύων είναι η φτηνή και εύκολη εγκατάστασή τους, όπως επίσης και η άμεση διασύνδεση τερματικών συσκευών.

1.1 Γενικά

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή πραγματεύεται τα ανεξάρτητα ασύρματα τοπικά δίκτυα (ad-hoc wireless local area networks). Ερευνά το πρωτόκολλο IEEE 802.11 και συγκεκριμένα τη διαδικασία πρόσβαση στο μέσο DCF του υποεπιπέδου MAC. Ειδικότερα, αναπτύσσεται ένα μαθηματικό μοντέλο που μετρά την απόδοση του μηχανισμού DCF του IEEE 8021.11 χρησιμοποιώντας μετρικές απόδοσης, όπως η διεκπεραιωτική ικανότητα και τη μέση καθυστέρηση επιτυχημένης αποστολής πακέτων. Το ασύρματο δίκτυο που μελετάται είναι ένα υβριδικό σύστημα με σταθμούς δεδομένων, που μεταδίδουν πακέτα δεδομένων (data), και σταθμούς φωνής που

μεταδίδουν πακέτα φωνής (VoIP) και πακέτα δεδομένων. Όλοι οι σταθμοί μεταδίδουν χρησιμοποιώντας την τεχνική πρόσβασης στο μέσο Basic Access. Τέλος, εξετάζεται η επίδραση των σταθμών δεδομένων και η ταυτόχρονη μετάδοση πακέτων δεδομένων από τους σταθμούς φωνής στην χωρητικότητα φωνής.

1.2 Μεταπτυχιακή Διατριβή

Ο σκοπός της διατριβής είναι η αξιολόγηση της DCF, του θεμελιώδους, δηλαδή, μηχανισμού πρόσβασης του ασύρματου μέσου, στην περίπτωση που στο ασύρματο δίκτυο συνυπάρχουν σταθμοί μετάδοσης δεδομένων (data) και σταθμοί μετάδοσης φωνής (VoIP) με ταυτόχρονα basic access data. Προσδοκώμενα αποτελέσματα είναι ο υπολογισμός της χωρητικότητας φωνής και η επίδραση, τόσο των σταθμών δεδομένων, όσο και του ταυτόχρονου data stream στην χωρητικότητα φωνής των WLANs.

1.2.1 Μεθοδολογία

1. Στη παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή έγινε μια εκτενής μελέτη της βιβλιογραφίας, ώστε να εξεταστούν μαθηματικά μοντέλα, τα οποία υπολογίζουν μετρικές, όπως η διεκπεραιωτική ικανότητα των ασύρματων τοπικών δικτύων IEEE 802.11.
2. Στη συνέχεια, αναπτύχθηκε ένα μαθηματικό μοντέλο για ασύρματα δίκτυα IEEE 802.11, στα οποία συνυπάρχουν σταθμοί δεδομένων και σταθμοί φωνής με ταυτόχρονα basic access data.
3. Τα αποτελέσματα του μαθηματικού μοντέλου επαληθεύτηκαν με τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από προσομοίωση (δημιουργήθηκε ένας προσομοιωτής στη γλώσσα προγραμματισμού python)
4. Έπειτα, υπολογίστηκε η χωρητικότητα φωνής των σταθμών φωνής και τέλος,
5. Μελετήθηκε η επίδραση των σταθμών δεδομένων στην χωρητικότητα του ασύρματου δικτύου.

1.2.2 Δομή

Η μεταπτυχιακή διατριβή χωρίζεται σε 10 κεφάλαια και το περιεχόμενο αυτών περιγράφεται συνοπτικά.

Το **Κεφάλαιο 2** αναφέρεται στα βασικά στοιχεία των ασύρματων δικτύων και στις τεχνολογίες τους.

Το **Κεφάλαιο 3** περιγράφει τη λειτουργία της διαδικασίας πρόσβασης στο μέσο DCF του πρωτοκόλλου IEEE 802.11 και παρουσιάζει ένα μαθηματικό μοντέλο που υπολογίζει τη ρυθμαπόδοση του 802.11 DCF.

Στο **Κεφάλαιο 4** παρουσιάζεται ένα μοντέλο που μετρά τη ρυθμαπόδοση του συστήματος λαμβάνοντας υπόψη το όριο των αναμεταδιδόμενων πακέτων.

Στο **Κεφάλαιο 5** μελετούνται μετρικές για την καθυστέρηση μετάδοσης πακέτων, όπως είναι η μέση καθυστέρηση πακέτων, η πιθανότητα απόρριψης πακέτου, ο μέσος χρόνος να απορριφτεί ένα πακέτο.

Το **Κεφάλαιο 6** παρουσιάζονται μαθηματικά μοντέλα τα οποία υπολογίζουν μετρικές της καθυστέρησης των πακέτων. Συγκεκριμένα, τα μοντέλα περιγράφουν τη μέση καθυστέρηση των πακέτων που μεταδόθηκαν επιτυχώς, τη μέση καθυστέρηση για πακέτα που έχουν μεταδοθεί επιτυχώς έχοντας υποστεί συγκεκριμένο αριθμό συγκρούσεων, το μέσο χρόνο απόρριψης πακέτου και τη διακύμανση της καθυστέρησης.

Στο **Κεφάλαιο 7** εξετάζονται οι επιπτώσεις της καθυστέρησης και απόρριψης πακέτων στην ποιότητα φωνής και προτείνεται μεθοδολογία υπολογισμού της χωρητικότητας φωνής.

Στο **Κεφάλαιο 8** παρουσιάζονται υβριδικά συστήματα ασύρματων τοπικών δικτύων, με σταθμού φωνής που μεταδίδουν πακέτα φωνής και σταθμούς δεδομένων που μεταδίδουν πακέτα δεδομένων, και αναπτύσσονται μαθηματικά μοντέλα για τον υπολογισμό της ρυθμαπόδοσης και της χωρητικότητάς τους.

Στο **Κεφάλαιο 9** αναπτύσσεται ένα μαθηματικό μοντέλο που υπολογίζει τη ρυθμαπόδοση και τη μέση καθυστέρηση πακέτων για ένα υβριδικό σύστημα που αποτελείται από σταθμούς δεδομένων που μεταδίδουν πακέτα δεδομένων και σταθμούς φωνής που μεταδίδουν πακέτα δεδομένων και πακέτα φωνής.

Το **Κεφάλαιο 10** περιλαμβάνει τα συμπεράσματα.

Κεφάλαιο 2

Πρωτόκολλα IEEE 802.11

Τα ασύρματα δίκτυα απαντώνται παντού. Λόγω της φτηνής και εύκολης εγκατάστασης, αλλά και λόγω της άμεσης συνδεσιμότητας των τερματικών σταθμών, όπως υπολογιστές και κινητά τηλέφωνα, ασύρματα δίκτυα εγκαθίστανται σε δημόσιες και ιδιωτικές υπηρεσίες, σε εκπαιδευτικά ιδρύματα και όπου υφίσταται η ανάγκη για άμεση πρόσβαση στο διαδίκτυο.

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει μια περιγραφή των βασικών στοιχείων των ασύρματων δικτύων και μια εισαγωγή στις τεχνολογίες που τα διέπουν. Έτσι, θα δημιουργηθεί το υπόβαθρο για την έρευνα που έχει πραγματοποιηθεί.

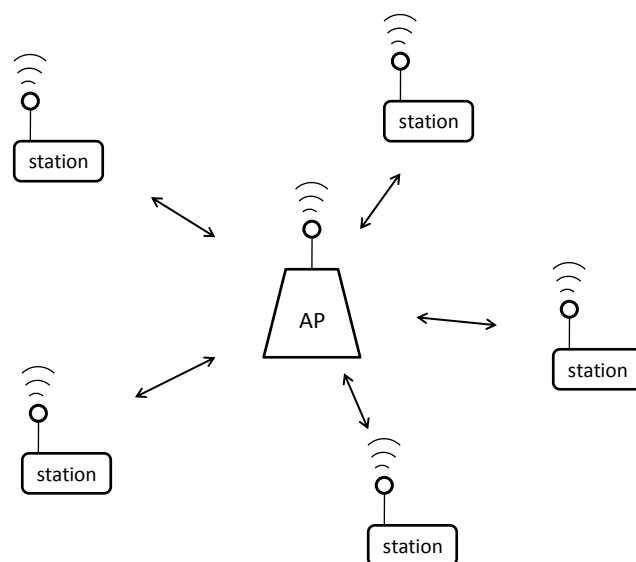
2.1 Είδη Δικτύων

Τα ασύρματα δίκτυα κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την κάλυψη. Ξεκινώντας από τα δίκτυα μικρής εμβέλειας, τα ασύρματα προσωπικά δίκτυα (WPANs – Wireless Personal Area Networks) αφορούν δίκτυα με κάλυψη λίγων μέτρων. Για παράδειγμα, ένα δίκτυο WPAN μπορεί να είναι η σύνδεση ενός κινητού με έναν υπολογιστή μέσω της τεχνολογίας Bluetooth. Ακολουθούν τα ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLANs – Wireless

Local Networks), με εμβέλεια μερικών δεκάδων μέτρων, τα οποία είναι και τα πιο κοινά. Για παράδειγμα, αυτά τα δίκτυα χρησιμοποιούνται στις οικίες για πρόσβαση στο διαδίκτυο. Η πιο διαδομένη τεχνολογία για αυτά τα δίκτυα είναι τα πρότυπα IEEE 802.11. Στη συνέχεια, είναι τα ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα (WMANs – Wireless Metropolitan Networks) τα οποία έχουν εμβέλεια ως και μερικά χιλιόμετρα και μπορούν να καλύψουν μικρές περιοχές, όπως μια πόλη. Και τέλος, είναι τα ασύρματα δίκτυα ευρείας περιοχής (WWANs – Wireless Wide Area Networks), και χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι ένα δίκτυο κινητής τηλεφωνίας, με τις τεχνολογίες που το συνοδεύει, όπως 4G.

2.2 Τοπολογίες Ασύρματων Δικτύων

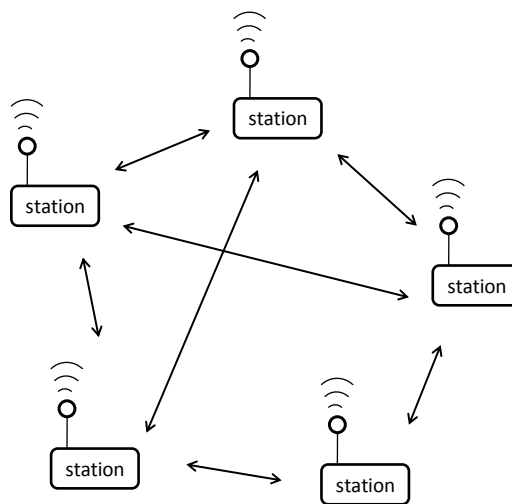
Οι τοπολογίες με τις οποίες σχηματίζονται τα ασύρματα τοπικά δίκτυα είναι δύο. Η μια ονομάζεται Basic Service Set (BSS) και η άλλη Independent Basic Service Set (IBSS), οι οποίες απεικονίζονται στα σχήματα 2.1 και 2.2 αντίστοιχα.



Σχήμα 2.1: Ασύρματο δίκτυο με την BSS τοπολογία.

Στην πρώτη τοπολογία, BSS, υπάρχει ένας κεντρικός σταθμός (AP – Access Point) και ένα πλήθος από τερματικούς σταθμούς. Όπως έχει ειπωθεί και παραπάνω, οι τερματικοί σταθμοί μπορεί να είναι υπολογιστές, κινητά ή οτιδήποτε άλλο που έχει τη

δυνατότητα να επικοινωνεί ασύρματα. Στο εξής, οι ασύρματες αυτές συσκευές θα αναφέρονται ως «σταθμοί». Στην τοπολογία BSS, λοιπόν, κάθε σταθμός επικοινωνεί με τον κεντρικό σταθμό (AP). Ο AP είναι ο υπεύθυνος σταθμός για όλες τις συνδέσεις, δηλαδή, κάθε σταθμός επικοινωνεί με έναν άλλο σταθμό διαμέσου του AP. Αλλά ο AP συνδέει το ασύρματο δίκτυο και με άλλα δίκτυα, είτε είναι ενσύρματα δίκτυα, είτε είναι ασύρματα. Η τοπολογία αυτή καλείται και δομημένο ασύρματο δίκτυο (Infrastructure Wireless LAN). Η δεύτερη τοπολογία IBSS ονομάζεται και ad-hoc network. Εδώ δεν υπάρχει ο AP και όλοι οι σταθμοί έχουν τη δυνατότητα να συνδεθούν με οποιοδήποτε σταθμό που βρίσκεται σε εμβέλεια.



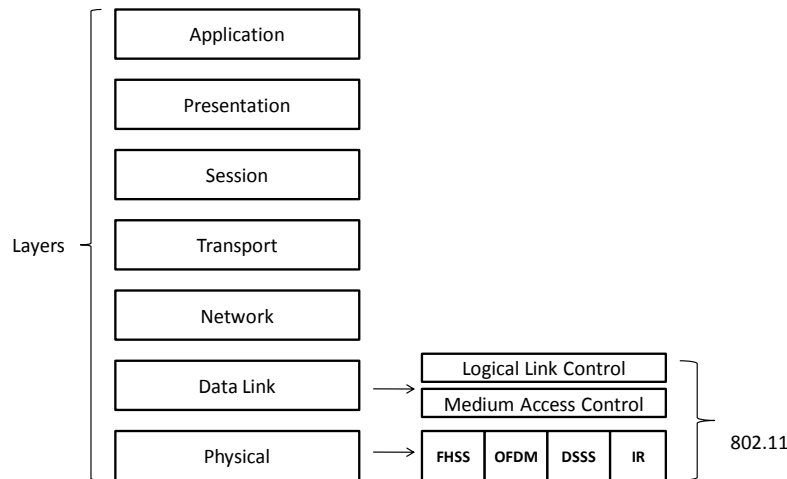
Σχήμα 2.2: Ασύρματο δίκτυο με την IBSS τοπολογία.

2.3 Η Οικογένεια IEEE 802.11

Τα ασύρματα δίκτυα χρησιμοποιούν κατά κόρον τα πρωτόκολλα IEEE 802.11, τα οποία είναι και γνωστά ως Wi-Fi. Η ανάπτυξή τους ξεκίνησε το 1997 με το πρότυπο IEEE 802.11. Στο πέρασμα των χρόνων εμφανίστηκαν κατά σειρά τα πρότυπα 802.11b, 802.11a, 802.11g, 802.11n και 802.11ac. Έτσι, περνώντας από το ένα πρότυπο στο άλλο, έχει επιτευχθεί αύξηση της απόδοσης τους και βελτίωση της ποιότητας υπηρεσιών. Κάποιες εφαρμογές αυτών των προτύπων είναι η σύνδεση ασύρματων συσκευών στο διαδίκτυο και η τηλεφωνία μέσω διαδικτύου.

2.3.1 Διαστρωμάτωση Των Προτύπων IEEE 802.11

Τα θεμέλια της αρχιτεκτονικής των προτύπων της οικογένειας IEEE 802.11 βρίσκονται στο μοντέλο αναφοράς OSI (Open Systems Interconnection). Συγκεκριμένα, τα πρότυπα IEEE 802.11 ορίζουν τις υπηρεσίες μόνο για δύο στρώματα του OSI, το φυσικό στρώμα (Physical Layer - PHY) και στρώμα ζεύξης δεδομένων (Data Link Layer - DLL).



Σχήμα 2.2: Μοντέλο αναφοράς OSI και τα πρότυπα IEEE 802.11.

Το στρώμα ζεύξης δεδομένων χωρίζεται σε δύο υποστρώματα. Το πρώτο είναι το υπόστρωμα ελέγχου λογικής ζεύξης (Logical Link Control - LLC) και το δεύτερο το υπόστρωμα ελέγχου πρόσβασης στο μέσο (Medium Access Control - MAC).

2.3.2 Το Φυσικό Στρώμα Των Προτύπων IEEE 802.11

Το φυσικό στρώμα περιγράφει τις τεχνικές διαμόρφωσης που χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση των δεδομένων. Οι τεχνικές αυτές είναι η διασπορά φάσματος με εναλλαγή συχνοτήτων (FHSS – Frequency Hoping Spread Spectrum), η πολυπλεξία με ορθογώνια διαίρεση συχνότητας (OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing), η εξάπλωση φάσματος ευθείας ακολουθίας (DSSS – Direct Sequence Spread Spectrum) και οι υπέρυθρες ακτίνες (IR – Infrared).

2.3.3 Το Υπόστρωμα MAC Των Προτύπων IEEE 802.11

Το υπόστρωμα MAC παρέχει δύο μηχανισμούς πρόσβασης στο μέσο. Ο ένας καλείται Point Coordination Function (PCF) και ο άλλος Distributed Coordination Function (DCF).

Στον πρώτο μηχανισμό, ορίζεται μια διαδικασία πρόσβασης στο μέσο χωρίς συγκρούσεις. Δίνεται, δηλαδή, σε κάθε σταθμό προτεραιότητα εκπομπής από ένα κεντρικό διαχειριστή, AP, και ταυτόχρονα εξασφαλίζεται η μη αποστολή πακέτων από άλλους σταθμούς, ώστε να αποφευχθούν οι συγκρούσεις. Όμως, ο κύριος μηχανισμός πρόσβασης στο μέσο είναι ο DCF, στον οποίο, σε αντίθεση με τον PCF, δεν υπάρχει κεντρικός διαχειριστής, AP, αλλά ο κάθε σταθμός ξεχωριστά διεκδικεί πρόσβαση στο μέσο.

2.4 Κατανεμημένη Λειτουργία Συντονισμού - DCF

Η κατανεμημένη λειτουργία συντονισμού, DCF, είναι ένας μηχανισμός πρόσβασης στο μέσο, ο οποίος βασίζεται στο πρωτόκολλο πολλαπλής προσπέλασης με ανίχνευση φέροντος και αποφυγή σύγκρουσης (Carrier Sense Multiple Access - CSMA/CA).

Ένας σταθμός με ένα πακέτο προς μετάδοση παρακολουθεί το κανάλι για τυχόν άλλες μεταδώσεις. Αν το κανάλι είναι ελεύθερο για χρονικό διάστημα ίσο με τη διάρκεια DIFS, (Distributed Interframe Space) τότε ο σταθμός εκπέμπει. Αλλιώς, αν το κανάλι είναι κατειλημμένο, ο σταθμός δεν εκπέμπει, αλλά συνεχίζει να παρακολουθεί έως ότου δεν παρατηρηθεί κίνηση για χρονικό διάστημα ίσο με DIFS. Αφού παρέλθει το απαιτούμενο DIFS χωρίς κίνηση στο κανάλι, τότε ο σταθμός επιλέγει ένα τυχαίο χρονικό διάστημα, κατά τη διάρκεια του οποίου θα απέχει από κάθε μετάδοση. Η χρησιμότητα του τυχαίου αυτού διαστήματος ελαχιστοποιεί την πιθανότητα σύγκρουσης δύο πακέτων, γιατί οι σταθμοί δεν θα μεταδίδουν ταυτόχρονα με το πέρασμα του DIFS, αλλά σε διαφορετικούς χρόνους. Επίσης, αποφεύγεται το φαινόμενο «channel capture», όταν δηλαδή ένας σταθμός έχει συνεχόμενα πακέτα για μετάδοση, δεν μεταδίδει μόνο αυτός, αλλά επειδή περιμένει τυχαίο χρονικό διάστημα μετά από κάθε μετάδοση, όπως κι οι υπόλοιποι σταθμοί, δίνεται η ευκαιρία και σε άλλους σταθμούς να μεταδώσουν.

Για λόγους απόδοσης, ο μηχανισμός DCF χρησιμοποιεί μια διακριτή κλίμακα αναμονής χρόνου. Το τυχαίο χρονικό διάστημα που επιλέγεται διαιρείται σε μικρότερα διαστήματα με μέγεθος σ και καλείτε χρονοθυρίδα (slot time), όπου είναι και ο χρόνος που απαιτείται ώστε ένας σταθμός να ανιχνεύσει κίνηση στο κανάλι από οποιοδήποτε άλλο σταθμό. Η διάρκεια σ είναι προκαθορισμένη από τα πρότυπα IEEE 802.11 για τις διάφορες διαμορφώσεις στο φυσικό στρώμα και οι τιμές του αναγράφονται στον

Πίνακα 2.1. Αυτή, λοιπόν, η διακριτή κλίμακα αναμονής, διαιρεμένη σε χρονοθυρίδες, είναι από μηδέν έως το $CW-1$, όπου το CW είναι το παράθυρο ανταγωνισμού (Contention Window) και εξαρτάται από το πλήθος των αναμεταδόσεων ενός πακέτου. Στην πρώτη προσπάθεια για μετάδοση ενός πακέτου, το CW είναι ίσο με CW_{min} και ύστερα από κάθε μη επιτυχημένη μετάδοση διπλασιάζεται έως ότου γίνει CW_{max} , Πίνακας 2.1.

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

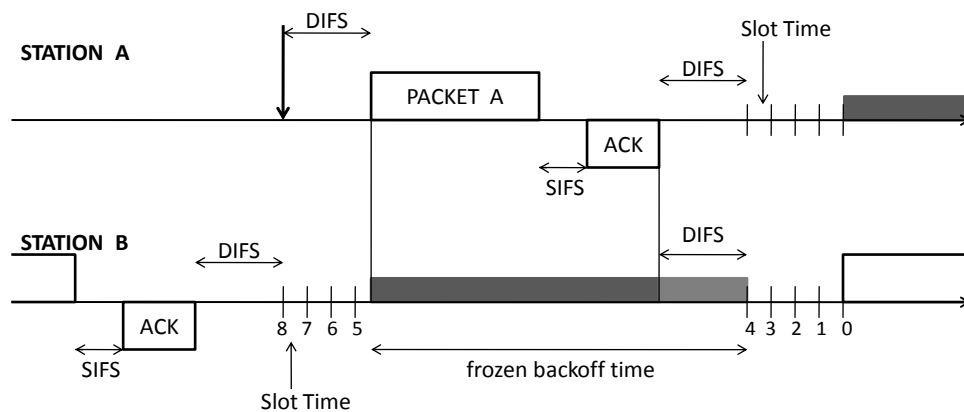
Πίνακας 2.1: Παράμετροι του φυσικού στρώματος 802.11.

Όταν το κανάλι παραμείνει ελεύθερο για χρονικό διάστημα ίσο με DIFS, επιλέγεται τυχαία ένας αριθμός (0, $CW-1$) από τη διακριτή κλίμακα αναμονής. Ο αριθμός αυτός καλείται μετρητής οπισθοχώρησης (backoff time counter). Ο μετρητής οπισθοχώρησης ξεκινά να μειώνεται εφόσον δεν ανιχνεύεται κάποια κίνηση στο κανάλι. Σε αντίθετη περίπτωση, σταματά την αντίστροφη μέτρηση (backoff time), και θα συνεχίσει να μειώνεται όταν το κανάλι θα είναι ελεύθερο για διάστημα ίσο με DIFS. Όταν ο μετρητής μηδενιστεί, τότε ο σταθμός εκπέμπει. Σε περίπτωση που δύο σταθμοί επιλέξουν τον ίδιο ακέραιο αριθμό από τη διακριτή κλίμακα αναμονής, ή ένας σταθμός έχει σταματήσει την αντίστροφη μέτρηση σε αριθμό που είναι ίδιος με τον αριθμό που έχει επιλέξει ένας άλλος σταθμός, τότε η σύγκρουση δεν αποφεύγεται.

2.4.1 Η Τεχνική Basic Access

Υπάρχουν δύο τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την αποστολή πακέτων. Η τεχνική Basic Access και η τεχνική Request-To-Send/Clear-To-Send (RTS/CTS). Ο προκαθορισμένος μηχανισμός μετάδοσης πακέτων είναι η τεχνική two-way handshaking, ή αλλιώς basic access. Σε αυτήν την περίπτωση, όταν σταλεί ένα πακέτο επιτυχώς από ένα σταθμό, τότε υπάρχει άμεση απάντηση από τον σταθμό αποδέκτη με την αποστολή μιας επιβεβαίωσης (acknowledgement - ACK). Η μετάδοση του ACK είναι απαραίτητη, μιας και στο ασύρματο μέσο, ένας πομπός δεν μπορεί να αποφανθεί αν το

πακέτο που μετέδωσε έχει φτάσει στον προορισμό του χωρίς να υπάρχει μια επιβεβαίωση από το σταθμό αποδέκτη.



Σχήμα 2.3: Παράδειγμα από την τεχνική basic access.

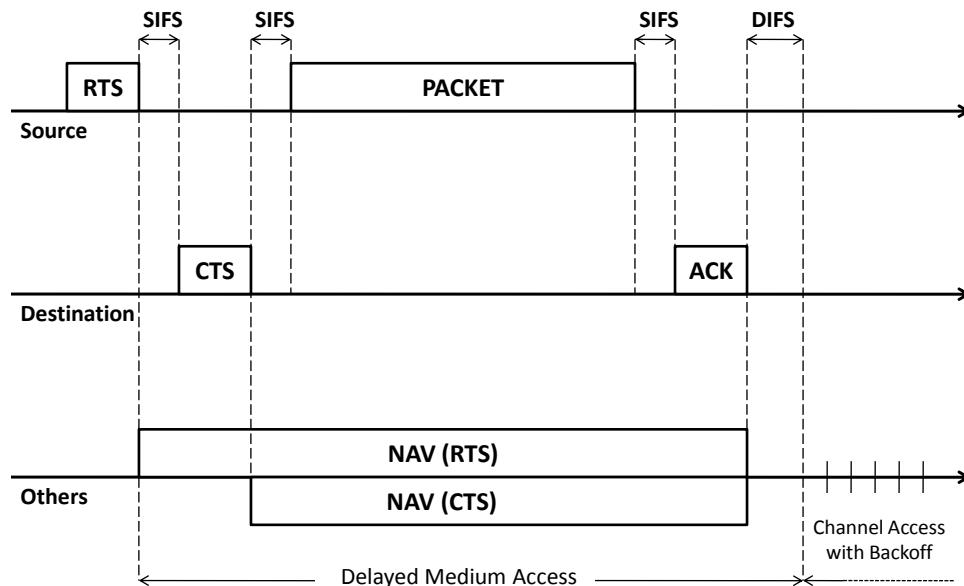
Το Σχήμα 2.3 αναπαριστά τον τρόπο με τον οποίο λειτουργεί η τεχνική Basic Access. Σε αυτό το σχήμα υπάρχουν δύο σταθμοί, A και B, που ανταγωνίζονται για την πρόσβαση στο κανάλι. Εξετάζοντας το σχήμα από αριστερά προς τα δεξιά, φαίνεται ότι έχει ολοκληρωθεί η αποστολή ενός πακέτου από τον σταθμό B και υπάρχει και η επιβεβαίωση, ACK. Ακολουθεί ένα διάστημα DIFS και έπειτα ο σταθμός B, αφού έχει επιλέξει το μετρητή οπισθοχώρησης να είναι ίσος με 8, αρχίζει την αντίστροφη μέτρηση. Πριν ολοκληρωθεί η αντίστροφη μέτρηση για το σταθμό B, έχει ξεκινήσει η εκπομπή από το σταθμό A, οπότε τώρα ο σταθμός B παγώνει τον μετρητή οπισθοχώρησης ώσπου να ολοκληρωθεί η αποστολή του πακέτου από τον σταθμό A. Έπειτα, συνεχίζει την αντίστροφη μέτρηση και στο τέλος της τελευταίας χρονοθυρίδας σ εκπέμπει.

Με την ολοκλήρωση της αποστολής ενός πακέτου και αφού μεσολαβήσει ένα χρονικό διάστημα SIFS (Short Interframe Space) αποστέλλεται μια επιβεβαίωση (ACK) από τον σταθμό παραλήπτη στον σταθμό αποστολέα. Για να θεωρηθεί μια αποστολή ενός πακέτου επιτυχής, θα πρέπει να ολοκληρωθεί και η αποστολή της επιβεβαίωσης. Σε αντίθετη περίπτωση το πακέτο ξαναστέλνεται.

2.4.2 Η Τεχνική RTS/CTS

Η τεχνική Request-To-Send/Clear-To-Send (RTS/CTS), ή αλλιώς και four-way handshaking, είναι η εναλλακτική τεχνική για την πρόσβαση στο μέσο. Η διαφορά με

την basic access είναι στο γεγονός ότι ο σταθμός που εκπέμπει στέλνει αρχικά ένα μικρό πακέτο RTS (Request To Send) στο σταθμό παραλήπτη. Με τη σειρά του ο σταθμός παραλήπτης, και αφού περάσει ένα διάστημα SIFS, απαντά με ένα πακέτο CTS (Clear To Send). Αν ο πρώτος σταθμός, λάβει το CTS, τότε περιμένει ένα διάστημα SIFS και η συνέχεια είναι ίδια με την τεχνική basic access, δηλαδή, ο σταθμός στέλνει το πακέτο και περιμένει την επιβεβαίωση. Στο Σχήμα 2.4 περιγράφεται η τεχνική RTS/CTS.



Σχήμα 2.4: Παράδειγμα από την τεχνική RTS/CTS.

Στην τεχνική RTS/CTS χρησιμοποιείται το διάνυσμα κατανομής του δικτύου (NAV - Network Allocation Vector), το οποίο υπάρχει σε κάθε σταθμό. Ο NAV είναι ένας μετρητής που όταν μηδενιστεί τότε ο σταθμός ξεκινά τη διαδικασία διεκδίκησης του μέσου, ενώ ο σταθμός πρέπει απέχει από εκπομπή εφόσον ο NAV έχει τιμή μεγαλύτερη του μηδέν. Τα πακέτα RTS και CTS περιέχουν την πληροφορία του φορτίου για το πακέτο δεδομένων που πρόκειται να μεταδοθεί. Αυτή η πληροφορία μπορεί να «διαβαστεί» από όλους τους σταθμούς και στη συνέχεια ενημερώνεται ο NAV, ο οποίος γνωρίζει πλέον αν υπάρχει κάποιο εκπομπή και το χρονικό διάστημα αυτής.

Η τεχνική RTS/CTS είναι πολύ αποτελεσματική όσον αφορά την επίδοση του συστήματος, γιατί συγκρούονται μόνο τα πακέτα RTS. Έτσι, η ανίχνευση της σύγκρουσης από τους σταθμούς είναι άμεση, λόγω της έλλειψης των πακέτων CTS. Δηλαδή, κατά τη διεκδίκηση του μέσου από δύο σταθμούς δεν εμπλέκονται τα πακέτα

δεδομένων και έτσι δεν αυξάνεται ο χρόνος αναμονής για τους υπόλοιπους σταθμούς, οι οποίοι «βλέπουν» το κανάλι απασχολημένο. Για τον παραπάνω λόγο η τεχνική RTS/CTS πετυχαίνει καλύτερα αποτελέσματα, από ότι η τεχνική basic access, για μεγάλα πακέτα δεδομένων. Τέλος, η τεχνική RTS/CTS δίνει λύση στο πρόβλημα των κρυμμένων σταθμών (hidden stations). Το πρόβλημα αυτό υπάρχει όταν κάποιος σταθμός βρίσκεται έξω από την εμβέλεια ενός άλλου σταθμού και δε λαμβάνει τις εκπομπές του.

Κεφάλαιο 3

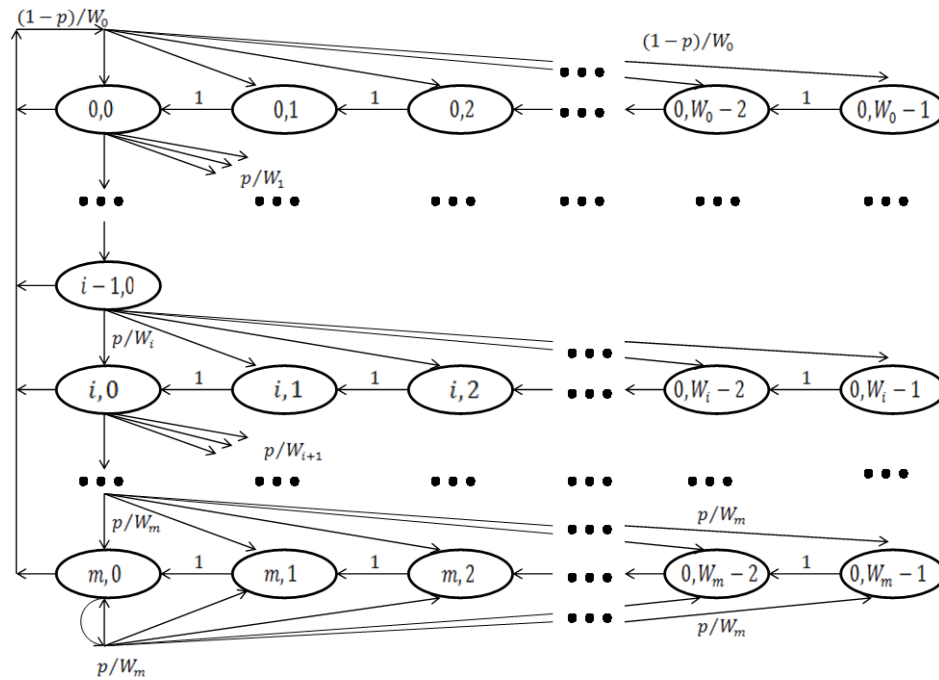
Μοντελοποίηση Του DCF

Η εργασία του Giuseppe Bianchi [2] παρέχει ένα απλό, αλλά και ακριβές αναλυτικό μοντέλο το οποίο υπολογίζει την ρυθμαπόδοση του 802.11 Distributed Coordination Function. Σε αυτό το μοντέλο υπάρχει ένας σταθερός αριθμός σταθμών και η αναλυτική ανάπτυξή του προϋποθέτει ιδανικές συνθήκες στο κανάλι, δηλαδή, στο μέσο δεν υπάρχουν τα φαινόμενα hidden terminals και capture. Επιπρόσθετα, κάθε σταθμός του ασύρματου δικτύου έχει πάντα ένα πακέτο προς μετάδοση, που σημαίνει ότι το δίκτυο λειτουργεί σε συνθήκες κορεσμού. Το μοντέλο είναι κατάλληλο και για τους δυο μηχανισμούς πρόσβασης στο μέσο, δηλαδή, και για τον basic access, αλλά και για τον RTS/CTS μηχανισμό.

3.1 Η Πιθανότητα Μετάδοσης Ενός Πακέτου

Η θεωρητική μελέτη του Giuseppe Bianchi [2] ξεκινά με τον υπολογισμό της πιθανότητας επιτυχημένης μετάδοσης ενός πακέτου από ένα σταθμό, βασιζόμενη στη θεωρία των Μαρκοβιανών Αλυσίδων. Ονομάζεται αυτή η πιθανότητα τ και δεν

εξαρτάται από το μηχανισμό πρόσβασης στο μέσο, δηλαδή δεν εξαρτάται από το αν χρησιμοποιείται η μέθοδος Basic Access ή η μέθοδος RTS/CTS.



Σχήμα 3.1: Μοντέλο Μαρκοβιανής Αλυσίδας.

Σε ένα σταθερό αριθμό n σταθμών επικρατούν συνθήκες κορεσμού. Δηλαδή, κάθε σταθμός έχει άμεσα ένα διαθέσιμο πακέτο έτοιμο για μετάδοση ύστερα από την ολοκλήρωση μιας επιτυχημένης αποστολής. Επιπλέον, κάθε σταθμός πρέπει να περιμένει ένα τυχαία επιλεγμένο χρονικό διάστημα πριν ξανά μεταδώσει και αυτό συμβολίζεται ως $b(t)$ και καλείται μετρητής οπισθοχώρησης (backoff time counter). Επίσης, εισάγεται μια διακριτή κλίμακα η οποία ξεκινά από το μηδέν και φτάνει ως το m . Το βήμα της κλίμακας συμβολίζεται με i και είναι $i \in [0, m]$. Το i καλείται στάδιο οπισθοχώρησης (backoff stage) και το m μέγιστο στάδιο οπισθοχώρησης (maximum backoff stage). Το $s(t)$ παριστάνει το στάδιο οπισθοχώρησης ενός σταθμού για τη χρονική στιγμή t . Σε αυτήν την κλίμακα, τα t και $t+1$ αντιστοιχούν στην αρχή δύο διαδοχικών χρονοθυρίδων (slot times) και ο μετρητής οπισθοχώρησης, $b(t)$, του κάθε σταθμού μειώνεται στην αρχή της κάθε χρονοθυρίδας. Στην αρχή της χρονικής κλίμακας, όταν δηλαδή είναι $i=0$, ο μετρητής οπισθοχώρησης επιλέγει μια τιμή από το διάστημα $[0, W_0 - 1]$, όπου $W_0 = CW_{min}$ και είναι η ελάχιστη τιμή για το παράθυρο ανταγωνισμού (contention window). Εν συνεχεία, όταν αυξάνεται το στάδιο, τότε

διπλασιάζεται το διάστημα από το οποίο ο μετρητής οπισθοχώρησης επιλέγει μια τιμή σύμφωνα με τον τύπο $W_i = 2^i W$, $i \in [0, m]$. Όταν το στάδιο φτάσει στο μέγιστο στάδιο οπισθοχώρησης, $i=m$, τότε θα είναι $CW_{max} = W_m = 2^m W$, όπου CW_{max} είναι η μέγιστη τιμή για το παράθυρο ανταγωνισμού. Οπότε, έχει δημιουργηθεί μια δισδιάστατη διαδικασία αντίστροφης μέτρησης και μπορεί αν συμβολιστεί ως $\{s(t), b(t)\}$. Ας σημειωθεί ότι αυτή η διακριτή και ακέραια χρονική κλίμακα, $i \in [0, m]$, δεν έχει άμεση σχέση με τον χρόνο του συστήματος και αυτό γιατί η μείωση του μετρητή οπισθοχώρησης σταματά όταν υπάρχει κίνηση στο κανάλι.

Η πιθανότητα να αποτύχει η αποστολή ενός πακέτου συμβολίζεται p . Η βασική προσέγγιση της εργασίας του Bianchi [2] είναι ότι θεωρεί την πιθανότητα σύγκρουσης ενός πακέτου p να είναι σταθερή και ανεξάρτητη από τον αριθμό των ανεπιτυχών μεταδόσεων του πακέτου, και αναφέρεται ως conditional collision probability. Θεωρώντας την πιθανότητα p σταθερή και ανεξάρτητη, γίνεται δυνατή η σύνδεση της δισδιάστατης διαδικασίας $\{s(t), b(t)\}$ που περιγράφηκε παραπάνω με την χρονικά διακριτή Μαρκοβιανή Αλυσίδα που απεικονίζεται στο Σχήμα 3.1. Σε αυτήν την Μαρκοβιανή Αλυσίδα υιοθετείται η σύντομη σημειογραφία: $P\{i_1, k_1 | i_0, k_0\} = P\{s(t+1) = i_1, b(t+1) = k_1 | s(t) = i_0, b(t) = k_0\}$. Έτσι, όλες οι πιθανότητες τις αλυσίδας περιγράφονται από την ομάδα εξισώσεων (3.1).

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

Η πρώτη εξίσωση στην παραπάνω ομάδα εξισώσεων (3.1) αναφέρεται στη μείωση του μετρητής οπισθοχώρησης, η οποία συμβαίνει στην αρχή της κάθε χρονοθυρίδας. Η δεύτερη εξίσωση περιγράφει το γεγονός ότι ο μετρητής οπισθοχώρησης έχει μηδενιστεί και υπάρχει μια πετυχημένη διάδοση πακέτου. Τότε, ένα νέο πακέτο ετοιμάζεται για μετάδοση, το στάδιο παίρνει την ελάχιστη τιμή του, $i=0$, και ο μετρητής οπισθοχώρησης επιλέγει τυχαία μια τιμή από τις τιμές 0 έως $W_0 - 1$. Οι τελευταίες δύο εξισώσεις είναι για την περίπτωση όπου υπάρχει ανεπιτυχής μετάδοση πακέτου. Συγκεκριμένα, στη τρίτη εξίσωση, κάθε φορά που ένα πακέτο συγκρούεται όταν είναι στο backoff stage $i-1$, τότε, το backoff stage αυξάνεται και ο μετρητής οπισθοχώρησης παίρνει μια νέα τιμή,

τυχαία επιλεγμένη από το εύρος $(0, W_i - 1)$. Τέλος, η τέταρτη εξίσωση υποδηλώνει την συνεχή παραμονή στο maximum backoff stage m , εφόσον δεν υπάρχει πετυχημένη μετάδοση πακέτου, και την τυχαία επιλογή μιας τιμής για τον μετρητή οπισθοχώρησης.

Αν είναι $b_{i,k} = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{s(t) = i, b(t) = k\}$, $i \in [0, m]$, $k \in [0, W_i - 1]$ η στάσιμη κατανομή της Μαρκοβιανής Αλυσίδας, γίνεται δυνατή η λύση της. Αρχικά, ισχύουν οι εξισώσεις στην ομάδα εξισώσεων (3.2).

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

Αυτές οι εξισώσεις αποδεικνύονται παρακάτω.

Είναι $b_{i-1,0} \cdot p = b_{i,0}$, $0 < i < m$ και αυτό, γιατί:

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

Επίσης, ισχύει:

$$b_{i,0} = p^i \cdot b_{0,0}, \quad 0 < i < m$$

Από την (2), είναι: $b_{i,0} = b_{i-1,0} \cdot p \stackrel{(2)}{\Rightarrow} b_{i,0} = (b_{i-2,0} \cdot p) \cdot p \Rightarrow \dots \Rightarrow b_{i,0} = p^i \cdot b_{0,0}$

Για την απόδειξη της σχέσης $b_{m-1,0} \cdot p = (1-p)b_{m,0}$ αρχικά, θα υπολογιστεί το $b_{m,0}$.

Είναι:

$$\begin{aligned} b_{m,0} &= b_{m-1,0} \frac{p}{W_m} + b_{m,0} \frac{p}{W_m} + b_{m,1} \cdot 1 \\ b_{m,1} &= b_{m-1,0} \frac{p}{W_m} + b_{m,0} \frac{p}{W_m} + b_{m,2} \cdot 1 \\ &\vdots \\ b_{m,W_m-1} &= b_{m-1,0} \frac{p}{W_m} + b_{m,0} \frac{p}{W_m} \end{aligned}$$

Οπότε, οι παραπάνω εξισώσεις δίνουν:

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

Συνεχίζοντας τις πράξεις, η τελευταία εξίσωση μετασχηματίζεται στην $b_{m,0} = \frac{p^m}{1-p} b_{0,0}$.

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

Επίσης, όταν $k \in (1, W_i - 1)$ ισχύουν οι επόμενες μαθηματικές εξισώσεις:

$$b_{i,k} = \frac{W_i - k}{W_i} \cdot \begin{cases} (1-p) \sum_{j=0}^m b_{j,0} & i = 0 \\ p \cdot b_{i-1,0} & 0 < i < m \\ p \cdot (b_{m-1,0} + b_{m,0}) & i = m \end{cases} \quad (3.3)$$

Απόδειξη:

α) Όταν $0 < i < m$:

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

β) Όταν $i = 0$:

$$\begin{aligned}
b_{0,\kappa} &= \frac{1-p}{W_0} \sum_{j=0}^m b_{j,0} + b_{0,k+1} = \frac{1-p}{W_0} \sum_{j=0}^m b_{j,0} + \frac{1-p}{W_0} \sum_{j=0}^m b_{j,0} + b_{0,k+2} = \dots \\
&= \left(\frac{1-p}{W_0} \sum_{j=0}^m b_{j,0} \right) (W_0 - 1 - k) + b_{0,W_0-1} = \left(\frac{1-p}{W_0} \sum_{j=0}^m b_{j,0} \right) (W_0 - 1 - k) \\
&+ \frac{1-p}{W_0} \sum_{j=0}^m b_{j,0} = \frac{W_0 - k}{W_0} (1-p) \sum_{j=0}^m b_{j,0}
\end{aligned}$$

γ) Όταν $i = m$:

$$b_{m,\kappa} = b_{m-1,0} \frac{p}{W_m} + b_{m,0} \frac{p}{W_m} + b_{m,\kappa+1} = \dots$$

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

Από την (3.2), και χρησιμοποιώντας τη σχέση $\sum_{i=0}^m b_{i,0} = \frac{b_{0,0}}{1-p}$, η (3.3) γράφεται:

$$b_{i,k} = \frac{W_i - k}{W_i} b_{i,0} \quad (3.4)$$

Απόδειξη για τη σχέση $\sum_{i=0}^m b_{i,0} = \frac{b_{0,0}}{1-p}$.

Είναι:

$$\begin{aligned}
\sum_{i=0}^m b_{i,0} &= b_{0,0} + b_{1,0} + \cdots + b_{m,0} = b_{0,0} + p b_{0,0} + p^2 b_{0,0} + \cdots + p^m b_{0,0} \\
&= b_{0,0} (1 + p + \cdots + p^m) = b_{0,0} \frac{p^{m+1} - 1}{p - 1} = \frac{b_{0,0}}{1 - p}
\end{aligned}$$

Τελικά, από τις σχέσεις (3.2) και (3.4), όλες οι τιμές $b_{i,k}$ εκφράζονται συναρτήσει της τιμής $b_{0,0}$ και της πιθανότητας σύγκρουσης p . Η τιμή $b_{0,0}$ υπολογίζεται παρακάτω:

$$1 = \sum_{i=0}^m \sum_{k=0}^{W_i-1} b_{i,k} \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned}
1 &= \sum_{i=0}^m \sum_{k=0}^{W_i-1} b_{i,k} = \sum_{i=0}^m b_{i,0} \sum_{k=0}^{W_i-1} \frac{W_i - k}{W_i} = \sum_{i=0}^m b_{i,0} \left(\frac{W_i - 0}{W_i} + \frac{W_i - 1}{W_i} + \cdots + \frac{W_i - (W_i - 1)}{W_i} \right) \\
&= \sum_{i=0}^m b_{i,0} \left(\frac{W_i \cdot W_i}{W_i} - \frac{1 + 2 + \cdots + (W_i - 1)}{W_i} \right) = \sum_{i=0}^m b_{i,0} \left(W_i - \frac{(W_i - 1)}{2} \right) \\
&= \sum_{i=0}^m b_{i,0} \left(\frac{W_i + 1}{2} \right) \\
&= \frac{1}{2} (b_{0,0} + b_{1,0} + \cdots + b_{m,0}) + \frac{1}{2} (b_{0,0} W_0 + b_{1,0} W_1 + \cdots + b_{m,0} W_m) \\
&= \frac{1}{2} \left(\sum_{i=0}^m b_{i,0} + \sum_{i=0}^m b_{i,0} \cdot W_i \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{b_{0,0}}{1-p} + \sum_{i=0}^{m-1} p^i b_{0,0} W_i + \frac{p^m}{1-p} b_{0,0} W_m \right) = \\
&= \frac{b_{0,0}}{2} \left(\frac{1}{1-p} + \sum_{i=0}^{m-1} p^i 2^i W_0 + \frac{p^m}{1-p} 2^m W_0 \right) =
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{b_{0,0}}{2} \left[W \left(\sum_{i=0}^{m-1} (2p)^i + \frac{(2p)^m}{1-p} \right) + \frac{1}{1-p} \right] \Rightarrow \\
2 &= b_{0,0} \left[W \left(\frac{(2p)^m - 1}{2p - 1} + \frac{(2p)^m}{1-p} \right) + \frac{1}{1-p} \right] \Rightarrow \\
2 &= b_{0,0} \left[W \left(\frac{((2p)^m - 1)(1-p) + (2p)^m(2p-1)}{(2p-1)(1-p)} \right) + \frac{1}{1-p} \right] \\
&= b_{0,0} \left[\frac{W}{(2p-1)(1-p)} ((2p)^m - p(2p)^m - 1 + p + 2(2p)^m p - (2p)^m) \right. \\
&\quad \left. + \frac{1}{1-p} \right] = b_{0,0} \left[\frac{W}{(2p-1)(1-p)} (p(2p)^m - 1 + p) + \frac{1}{1-p} \right] \Rightarrow \\
2(2p-1)(1-p) &= b_{0,0} (Wp(2p)^m - W + Wp + 2p - 1) \Rightarrow \\
2(2p-1)(1-p) &= b_{0,0} [(2p-1)(W+1) - (2p-1)W + Wp(2p)^m - W + Wp] \\
&= b_{0,0} [(2p-1)(W+1) - 2pW + W + Wp(2p)^m - W + Wp] \\
&= b_{0,0} [(2p-1)(W+1) + Wp((2p)^m - 1)] \Rightarrow \\
b_{0,0} &= \frac{2(1-2p)(1-p)}{(1-2p)(W+1) + pW(1-(2p)^m)} \tag{3.6}
\end{aligned}$$

Οπότε, η πιθανότητα μετάδοσης ενός πακέτου τ είναι ίση με $\sum_{i=0}^m b_{i,0}$. Όταν υπάρχει μια μετάδοση, τότε ο μετρητής οπισθοχώρησης είναι ίσος με μηδέν, ανεξάρτητα από το backoff stage.

Ποιο αναλυτικά, η πιθανότητα τ υπολογίζεται:

$$\tau = \sum_{i=0}^m b_{i,0} = \frac{b_{0,0}}{1-p} = \frac{2(1-2p)}{(1-2p)(W+1) + pW(1-(2p)^m)} \tag{3.7}$$

Ας σημειωθεί ότι για $m = 0$ η πιθανότητα τ , όπως προκύπτει από τη σχέση (3.7), είναι ανεξάρτητη από την πιθανότητα p και το παράθυρο ανταγωνισμού είναι σταθερό:

$$\tau = \frac{2}{W+1} \tag{3.8}$$

Από την σχέση (3.7) είναι φανερό ότι η πιθανότητα τ εξαρτάται από την p , η οποία είναι ακόμη άγνωστη. Σε ένα ασύρματο δίκτυο με n σταθμούς, όταν ένα πακέτο που εκπέμπεται από ένα σταθμό, σε συγκεκριμένη χρονοθυρίδα, συγκρούεται με πιθανότητα p , σημαίνει ότι τουλάχιστον ένας από τους $n-1$ υπόλοιπους σταθμούς

εκπέμπει στην ίδια χρονοθυρίδα. Να σημειωθεί ότι η πιθανότητα μετάδοσης τ είναι ίδια για όλους τους σταθμούς. Έτσι, η πιθανότητα σύγκρουσης p εκφράζεται από τη σχέση:

$$p = 1 - (1 - \tau)^{n-1} \quad (3.9)$$

Ο υπολογισμός των πιθανοτήτων τ και p γίνεται από τις σχέσεις (3.7) και (3.9), οι οποίες αποτελούν ένα μη γραμμικό σύστημα εξισώσεων και χρησιμοποιούνται αριθμητικές τεχνικές για την επίλυσή του.

3.2 Η Διεκπεραιωτική Ικανότητα Του Συστήματος

Στη συνέχεια θα υπολογιστεί η διεκπεραιωτική ικανότητα του συστήματος. Συμβολίζεται S και ορίζεται ως το διάστημα του χρόνου που χρησιμοποιείται το κανάλι για την επιτυχή μετάδοση ωφέλιμου φορτίου.

Για να γίνει δυνατός ο υπολογισμός της διεκπεραιωτικής ικανότητας S , θα εξεταστεί τι συμβαίνει σε μια τυχαία επιλεγμένη χρονοθυρίδα. Ας είναι P_{tr} η πιθανότητα να υπάρχει τουλάχιστον μια μετάδοση στην επιλεγμένη χρονοθυρίδα. Αν είναι n οι σταθμοί που διεκδικούν την πρόσβαση στο μέσο και κάθε σταθμός εκπέμπει με πιθανότητα τ , τότε η πιθανότητα P_{tr} είναι:

$$P_{tr} = 1 - (1 - \tau)^n \quad (3.10)$$

Συμβολίζεται P_s η πιθανότητα μια μετάδοση στο κανάλι να είναι επιτυχημένη. Για να συμβαίνει αυτό, θα πρέπει ακριβώς ένας σταθμός να εκπέμπει στο κανάλι, δεδομένου ότι υπάρχει τουλάχιστον ένας σταθμός που εκπέμπει.

$$P_s = \frac{n\tau(1-\tau)^{n-1}}{P_{tr}} = \frac{n\tau(1-\tau)^{n-1}}{1-(1-\tau)^n} \quad (3.11)$$

Τώρα, η διεκπεραιωτική ικανότητα S μπορεί να εκφραστεί ως ο λόγος:

$$S = \frac{E[\text{το φορτίο που μεταδίδεται σε μια χρονοθυρίδα}]}{E[\text{η μέση διάρκεια μιας χρονοθυρίδας}]} \quad (3.12)$$

Συμβολίζοντας ως $E[P]$ τη μέση τιμή του φοτίου ενός πακέτου, τότε η μέση ποσότητα φορτίου που μεταδίδεται επιτυχώς σε μια χρονοθυρίδα είναι $P_s P_{tr} E[P]$, αφού η πιθανότητα να υπάρχει πετυχημένη μετάδοση σε μια χρονοθυρίδα είναι $P_s P_{tr}$.

Η μέση διάρκεια μιας χρονοθυρίδας υπολογίζεται ως εξής. Η πιθανότητα να είναι μια χρονοθυρίδα κενή είναι $1 - P_{tr}$. Η πιθανότητα να υπάρχει επιτυχημένη μετάδοση σε μια χρονοθυρίδα είναι $P_s P_{tr}$. Τέλος, η πιθανότητα να υπάρχει μια σύγκρουση είναι $P_{tr}(1 - P_s)$.

Οπότε, η σχέση (3.12) μετατρέπεται στην παρακάτω σχέση (3.13), όπου εκφράζει τη ρυθμαπόδοση (throughput) του συστήματος.

$$S = \frac{P_s P_{tr} E[P]}{(1 - P_{tr})\sigma + P_{tr} P_s T_s + P_{tr}(1 - P_s)T_c} \quad (3.13)$$

Στη παραπάνω σχέση, T_s είναι ο μέσος χρόνος όπου στο κανάλι πραγματοποιείται μια επιτυχημένη μετάδοση πακέτου. T_c είναι ο μέσος χρόνος όπου το κανάλι είναι απασχολημένο κατά τη διάρκεια μιας σύγκρουσης. Τέλος, με σ συμβολίζεται η διάρκεια μιας κενής χρονοθυρίδας. Όλες οι τιμές των $E[P]$, T_c , T_s και σ εκφράζονται με την ίδια μονάδα μέτρησης.

Για να ολοκληρωθεί ο υπολογισμός της διεκπεραιωτικής ικανότητας S θα πρέπει να υπολογιστούν οι χρόνοι T_s και T_c . Ας σημειωθεί ότι ως τώρα δεν χρειάστηκε να ληφθεί υπόψη κάποιος μηχανισμός προσβασης στο μέσο. Αλλά για να υπολογιστούν οι χρόνοι T_s και T_c θα πρέπει να γίνει ξεχωριστά για τους δύο μηχανισμούς, basic access και request to send/clear to send (RTS/CTS).

3.2.1 Η Τεχνική Basic Access

Αρχικά, το πρώτο ασύρματο δίκτυο που θα μελετηθεί θα λειτουργεί με το μηχανισμό basic access. Σε κάθε πακέτο προς εκπομπή προστίθεται επιπλέον φορτίο από το Physical layer και το MAC sublayer. Έτσι, η κεφαλή του πακέτου (packet header) υπολογίζεται $H = PHY_{hdr} + MAC_{hdr}$. Επίσης, συμβολίζεται με δ η καθυστέρηση

διάδοσης στο μέσο. Τελικά οι χρόνοι T_s και T_c , όπως φαίνεται και από το Σχήμα 3.2 για το μηχανισμό basic access, είναι:

$$T_s^{bas} = H + E[P] + SIFS + \delta + ACK + DIFS + \delta \quad (3.14)$$

$$T_c^{bas} = H + E[P^*] + DIFS + \delta \quad (3.15)$$

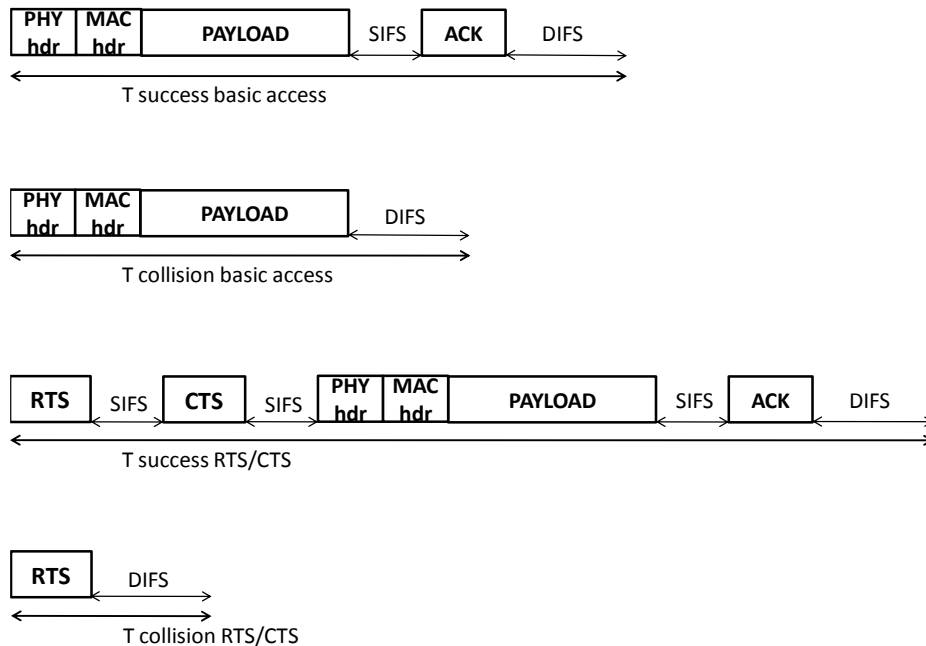
Όπου $E[P^*]$ είναι η μέση τιμή από το μεγαλύτερο φορτίο ανάμεσα στα πακέτα που συγκρούονται.

3.2.2 Η Τεχνική RTS/CTS

Όταν ο μηχανισμός διάδοσης είναι ο request to send/clear to send (RTS/CTS), τότε οι χρόνοι T_s και T_c ορίζονται διαφορετικά. Σε αυτήν την περίπτωση, σύγκρουση μπορεί να υπάρξει μόνο όταν αποστέλεται το πακέτο RTS. Το Σχήμα 3.2 δικαιολογεί τη σύνθεση των χρόνων T_s και T_c για τον RTS/CTS μηχανισμό.

$$T_s^{rts} = RTS + SIFS + \delta + CTS + SIFS + \delta + H + E[P] + SIFS + \delta + ACK + DIFS + \delta \quad (3.16)$$

$$T_c^{rts} = RTS + DIFS + \delta \quad (3.17)$$



Σχήμα 3.2: Οι χρόνοι T_s και T_c για τους μηχανισμούς basic access και RTS/CTS.

3.3 Επικύρωση Μοντέλου

Το ασύρματο δίκτυο που μελετάται χρησιμοποιεί την τεχνική Διασποράς Φάσματος με Εναλλαγή Συχνοτήτων (Frequency Hopping Spread Spectrum – FHSS). Οι τιμές του συστήματος που καθορίζονται για το φυσικό στρώμα του FHSS αναγράφονται στον Πίνακα 3.1, όπου φαίνεται ότι ο ρυθμός μετάδοσης στο κανάλι είναι 1Mbit/s.

Το μοντέλο επικυρώνεται με τη σύγκριση των αριθμητικών τιμών του θεωρητικού μοντέλου με αυτά ενός προσομοιωτή (simulator). Ο σκοπός του προσομοιωτή είναι να μιμηθεί την πραγματική λειτουργία ενός σταθμού που ανήκει στο ασύρματο δίκτυο. Τα δεδομένα που χρησιμοποιεί ο προσομοιωτής, Πίνακας 3.1, είναι οι ίδιες τιμές των παραμέτρων του συστήματος που χρησιμοποιούνται και για το θεωρητικό μοντέλο. Τέλος, ορίζεται ένα σταθερό μέγεθος για τα πακέτα στα 8184 bits.

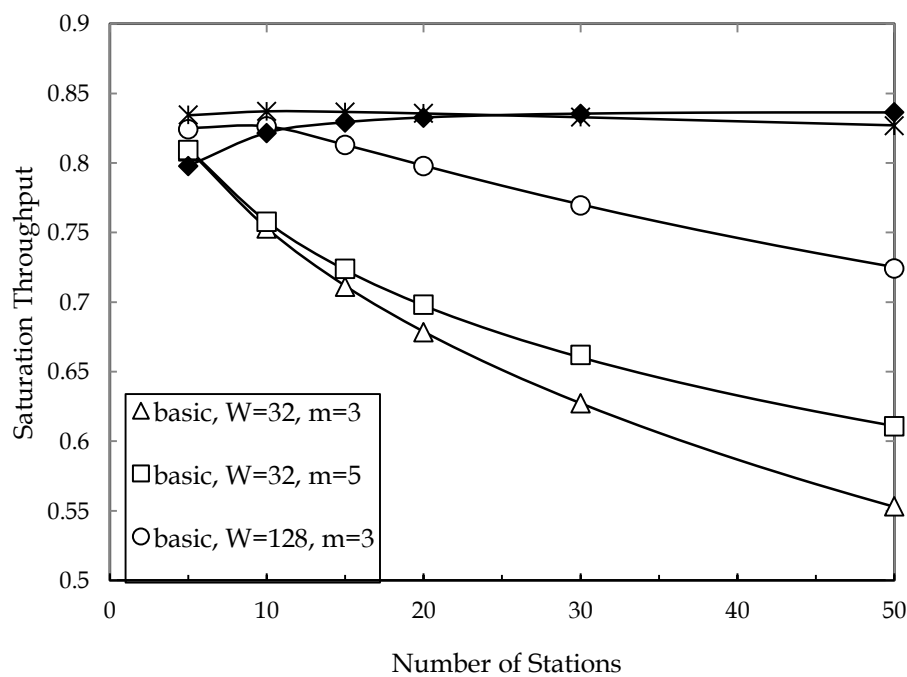
Παράμετροι	Τιμές
Packet payload	8184 bits
MAC header	272 bits
PHY header	128 bits
ACK	112 bits + PHY header
RTS	160 bits + PHY header
CTS	112 bits + PHY header
Channel bit rate	1Mbit/s
Propagation delay	1 μ s
Slot time, σ	50 μ s
SIFS	28 μ s
DIFS	128 μ s
ACK_timeout	300 μ s
CTS_timeout	300 μ s

Πίνακας 3.1 Παράμετροι του συστήματος για το FHSS.

Το Διάγραμμα 3.1 δείχνει ότι το αναλυτικό μοντέλο είναι ακριβές. Και αυτό γιατί τα αναλυτικά αποτελέσματα του μοντέλου, που απεικονίζονται με τις γραμμές στο διάγραμμα, συμπίπτουν με τα αποτελέσματα του προσομοιωτή, τα οποία απεικονίζονται με τα σύμβολα.

3.4 Ανάλυση Των Αποτελεσμάτων

Το Διάγραμμα 3.1 απεικονίζει τη ρυθμαπόδοση (throughput) και για τους δυο μηχανισμούς πρόσβασης στο μέσο. Επίσης, γίνεται ξεχωριστή ανάλυση για διαφορετικά contention windows, W , και διαφορετικά maximum backoff stage, m . Το Διάγραμμα 3.1 φανερώνει ότι η ρυθμαπόδοση στη τεχνική basic access εξαρτάται από τον αριθμό των σταθμών του δικτύου. Συγκεκριμένα, είναι σαφές ότι όσο αυξάνεται το πλήθος των σταθμών, τόσο μειώνεται η ρυθμαπόδοση του συστήματος. Ξεχωρίζει ίσως η περίπτωση όπου για την τεχνική basic access και για $W=128$ η μείωση της ρυθμαπόδοσης δεν είναι τόσο έντονη όσο για τις άλλες περιπτώσεις. Αντίθετα, στην τεχνική RTS/CTS, η ρυθμαπόδοση του συστήματος δεν μειώνεται όσο αυξάνονται οι σταθμοί, αλλά παραμένει σταθερή όταν $W=32$ και αυξάνεται όταν $W=128$.



Διάγραμμα 3.1 Διεκπαιρωτική Ικανότητα για basic access και RTS/CTS.

Κεφάλαιο 4

Εισαγωγή Ορίου Αναμετάδοσης

Το κεφάλαιο αυτό αναλύει την εργασία του Haitao Wu [4]. Όπως και το προηγούμενο κεφάλαιο, αναφέρεται στον υπολογισμό της ρυθμαπόδοσης του 802.11 Distributed Coordination Function. Ποιο συγκεκριμένα, η εργασία του Wu βασίζεται στην αντίστοιχη του Bianchi [2], με τη διαφορά ότι γίνεται τροποποίηση στο θεωρητικό μοντέλο που υπολογίζει τη διεκπεραιωτική ικανότητα του συστήματος και αυτό γιατί εισάγεται το όριο αναμετάδοσης ενός πακέτου.

Οι συνθήκες του συστήματος παραμένουν ίδιες με αυτές του Bianchi [2]. Δηλαδή, οι συνθήκες είναι ιδανικές, χωρίς να υπάρχουν τα φαινόμενα hidden terminals και capture, και το σύστημα λειτουργεί σε συνθήκες κορεσμού.

4.1 Η Πιθανότητα Μετάδοσης Ενός Πακέτου

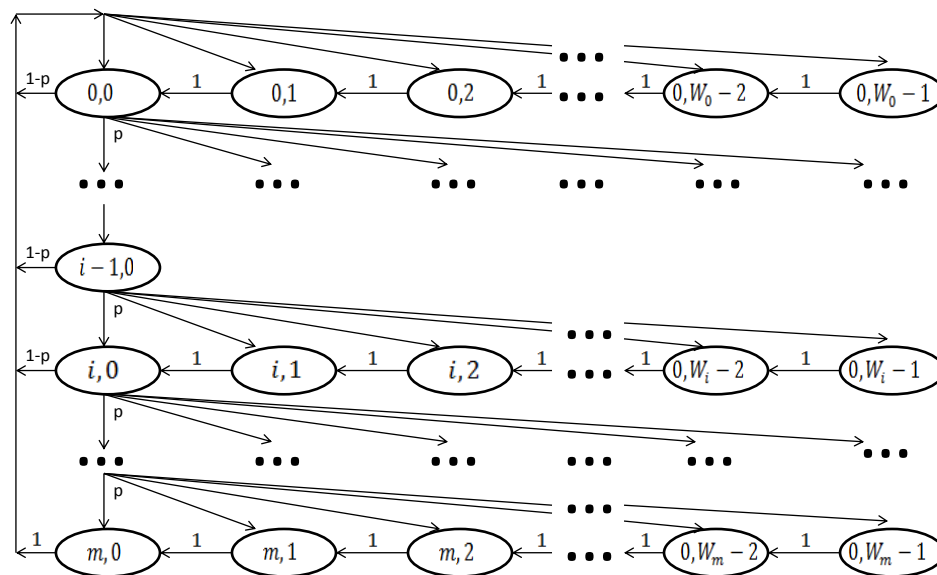
Αρχικός στόχος της ανάπτυξης του μοντέλου είναι να υπολογιστεί η πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης ενός πακέτου. Και σε αυτό το κεφάλαιο η πιθανότητα αυτή

συμβολίζεται τ , αλλά και κάθε σύμβολο και μεταβλητή, για την εύκολη σύγκριση με το προηγούμενο κεφάλαιο, παραμένει το ίδιο.

Το ασύρματο δίκτυο που μελετάται περιλαμβάνει ένα σταθερό αριθμό σταθμών, n , και ο κάθε σταθμός έχει πάντα ένα πακέτο προς μετάδοση, αφού το σύστημα λειτουργεί σε συνθήκες κορεσμού. Όταν ολοκληρώνεται η αποστολή ενός πακέτου, ο κάθε σταθμός περιμένει ένα τυχαίο χρονικό διάστημα πριν εκπέμψει. Εδώ εισάγεται ο μετρητής οπισθοχώρησης (backoff time counter), $b(t)$, όπου παίρνει τυχαία μια ακέραια τιμή από το διάστημα $(0, W_i - 1)$. Όπου για το W_i είναι:

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

και το W καλείται παράθυρο ανταγωνισμού (contention window), και είναι $W = (CW_{min} + 1)$ και $2^{m'} W = (CW_{max} + 1)$. Το CW_{min} είναι το minimum contention window, το CW_{max} είναι το maximum contention window και το W_i μεταβάλλεται ανάλογα με το στάδιο i (backoff stage).



Σχήμα 4.1: Μοντέλο Μαρκοβιανής Αλυσίδας με όριο αναμετάδοσης.

Όπως και στην εργασία του Bianchi [2], και εδώ το m αντιπροσωπεύει το maximum backoff stage. Ορίζεται από τις προδιαγραφές του πρωτοκόλλου IEEE 802.11 αυτή η τιμή να μπορεί να είναι μεγαλύτερη από την τιμή m' . Αν συμβαίνει αυτό, δηλαδή $m > m'$, τότε το CW δεν μεταβάλλεται για τιμές του m που είναι μεγαλύτερες ή ίσες με m' ,

όπως φαίνεται και από την εξίσωση (4.1). Επίσης, το m εδώ αντιπροσωπεύει τον αριθμό των αναμεταδόσεων ενός πακέτου. Αυτή είναι και η κύρια διαφορά με την εργασία του Bianchi [2]. Το μοντέλο της Μαρκοβιανής Αλυσίδας είναι διαφορετικό, διότι οι επαναλαμβανόμενες εκπομπές ενός πακέτου δεν μπορεί να είναι απεριόριστες, αλλά περιορίζονται στην τιμή m .

Σε αυτήν τη Μαρκοβιανή Αλυσίδα οι πιθανότητες που την περιγράφουν είναι οι ακόλουθες, σχέση (4.2), και όπως και στο προηγούμενο κεφάλαιο, όπου p είναι η πιθανότητα σύγκρουσης ενός πακέτου. Αυτή η πιθανότητα είναι σταθερή και ανεξάρτητη από τον αριθμό των ανεπιτυχών μεταδόσεων, δηλαδή, δεν εξαρτάται από το backoff stage, i , στο οποίο βρίσκεται το πακέτο.

$$\begin{cases} P\{i, k|i, k+1\} = 1 & k \in [0, W_i - 2], & i \in [0, m] \\ P\{0, k|i, 0\} = (1-p)/W_0 & k \in [0, W_0 - 1], & i \in [0, m-1] \\ P\{i, k|i-1, 0\} = p/W_i & k \in [0, W_i - 1], & i \in [1, m] \\ P\{0, k|m, 0\} = 1/W_0 & k \in [0, W_0 - 1] & . \end{cases} \quad (4.2)$$

Η πρώτη εξίσωση από την ομάδα (4.2) των εξισώσεων αναφέρεται στη μείωση του μετρητής οπισθοχώρησης. Δηλαδή, όταν ολοκληρώνεται μια χρονοθυρίδα, τότε ο μετρητής οπισθοχώρησης μειώνεται κατά ένα με πιθανότητα 1. Η δεύτερη εξίσωση είναι για την πιθανότητα με την οποία ένας σταθμός επιλέγει μια τιμή από το εύρος $(0, W_0 - 1)$ ύστερα από μια επιτυχημένη μετάδοση. Σε αυτήν την περίπτωση το backoff stage μηδενίζεται, $i = 0$, και δρομολογείται νέο πακέτο προς αποστολή. Η τρίτη εξίσωση αναφέρεται σε μια ανεπιτυχή μετάδοση, δηλαδή έχει προηγηθεί σύγκρουση, με αποτέλεσμα το backoff stage να αυξηθεί. Και η τελευταία εξίσωση είναι για το maximum backoff stage m . Εδώ οι περιπτώσεις είναι δύο. Το backoff stage είναι m και ένα πακέτο που βρίσκεται σε αυτό το στάδιο ή θα συγκρουστεί ή θα μεταδοθεί επιτυχώς. Και στις δύο περιπτώσεις το backoff stage μηδενίζεται και η διαδικασία αποστολής ξεκινά από την αρχή.

Για την ανάλυση της Μαρκοβιανής Αλυσίδας έχει υιοθετηθεί η σύντομη σημειογραφία: $P\{i_1, k_1|i_0, k_0\} = P\{s(t+1) = i_1, b(t+1) = k_1|s(t) = i_0, b(t) = k_0\}$.

Αρχικά θα αποδειχτούν οι σχέσεις:

$$b_{i-1,0} \cdot p = b_{i,0} \rightarrow b_{i,0} = p^i \cdot b_{0,0} \quad 0 < i < m \quad (4.3)$$

$$b_{i,0} = p^i \cdot b_{0,0} \quad 0 \leq i \leq m \quad (4.4)$$

Απόδειξη για την εξίσωση (4.3):

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

Απόδειξη για την εξίσωση (4.4):

$$b_{i,0} = b_{i-1,0} \cdot p \xrightarrow{(4.3)} b_{i,0} = (b_{i-2,0} \cdot p) \cdot p \Rightarrow \dots \Rightarrow b_{i,0} = p^i \cdot b_{0,0}$$

Από τη στιγμή που η αλυσίδα είναι κανονική, έτσι για κάθε $k \in (0, W_i - 1)$, θα ισχύει:

$$b_{i,k} = \frac{W_i - k}{W_i} \cdot \begin{cases} (1 - p) \sum_{j=0}^{m-1} b_{j,0} + b_{m,0} & i = 0 \\ p \cdot b_{i-1,0} & 0 < i \leq m \end{cases} \quad (4.5)$$

Η απόδειξη για την παραπάνω εξίσωση έχει ως εξής:

Για $i \in (0, m]$:

$$b_{i,k} = b_{i-1,0} \frac{p}{W_i} + b_{i,k+1} = b_{i-1,0} \frac{p}{W_i} + b_{i-1,0} \frac{p}{W_i} + b_{i,k+2} = \dots = \frac{W_i - k}{W_i} p \cdot b_{i-1,0}$$

Και για $i = 0$:

$$\begin{aligned} b_{0,k} &= b_{0,k+1} + b_{m,0} \frac{1}{W_0} + (b_{0,0} + b_{1,0} + \dots + b_{m-1,0}) \frac{1-p}{W_0} \\ &= b_{0,k+1} + b_{m,0} \frac{1}{W_0} + \left[\sum_{j=0}^{m-1} b_{j,0} \right] \frac{1-p}{W_0} \\ &= b_{0,k+2} + b_{m,0} \frac{1}{W_0} + \left[\sum_{j=0}^{m-1} b_{j,0} \right] \frac{1-p}{W_0} + b_{m,0} \frac{1}{W_0} + \left[\sum_{j=0}^{m-1} b_{j,0} \right] \frac{1-p}{W_0} = \dots \\ &= \frac{W_0 - k}{W_0} \left((1-p) \sum_{j=0}^{m-1} b_{j,0} + b_{m,0} \right) \end{aligned}$$

Με τη βοήθεια της εξίσωσης (4.4), η (4.5) γίνεται:

$$b_{i,k} = \frac{W_i - k}{W_i} b_{i,0}, \quad i \in [0, m] \quad (4.6)$$

Απόδειξη για την εξίσωση (4.6):

Για $i \in (0, m]$: από την (4.5) έχω:

$$b_{i,k} = \frac{W_i - k}{W_i} p \cdot b_{i-1,0} \stackrel{(3)}{\Rightarrow} b_{i,k} = \frac{W_i - k}{W_i} b_{i,0}$$

Για $i = 0$:

Αρχικά, θα υπολογιστεί το $b_{m,0}$.

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

$$b_{m,1} = b_{m-1,0} \frac{p}{W_m} + b_{m,2} \cdot 1$$

$\vdots$

$$b_{m,W_m-1} = b_{m-1,0} \frac{p}{W_m}$$

Οπότε, οι παραπάνω εξισώσεις δίνουν:

$$\begin{aligned} b_{m,0} &= W_m \left(b_{m-1,0} \frac{p}{W_m} \right) \Rightarrow b_{m,0} = b_{m-1,0} \cdot p \stackrel{(3)}{\Rightarrow} b_{m,0} \\ &= (b_{m-2,0} \cdot p) \cdot p \Rightarrow \dots \Rightarrow b_{m,0} = b_{0,0} \cdot p^m \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_{0,k} &= \frac{W_0 - k}{W_0} \left((1-p) \sum_{j=0}^{m-1} b_{j,0} + b_{m,0} \right) = \frac{W_0 - k}{W_0} \left((1-p) \sum_{j=0}^{m-1} p^j \cdot b_{0,0} + b_{m,0} \right) \\ &= \frac{W_0 - k}{W_0} \left((1-p)[p^0 + p^1 + \dots + p^{m-1}] b_{0,0} + b_{0,0} \cdot p^m \right) \\ &= \frac{W_0 - k}{W_0} \left((1-p) \frac{p^m - 1}{p - 1} b_{0,0} + b_{0,0} \cdot p^m \right) = \frac{W_0 - k}{W_0} b_{0,0} \end{aligned}$$

Άρα, για κάθε περίπτωση, ισχύει η εξίσωση (4.6).

Επομένως, χρησιμοποιώντας την συνθήκη ομαλοποίησης της στάσιμης κατανομής της Μαρκοβιανής Αλυσίδας, είναι:

$$1 = \sum_{i=0}^m \sum_{k=0}^{W_i-1} b_{i,k} = \sum_{i=0}^m b_{i,0} \sum_{k=0}^{W_i-1} \frac{W_i - k}{W_i} = \sum_{i=0}^m b_{i,0} \left(\frac{W_i - 0}{W_i} + \frac{W_i - 1}{W_i} + \dots + \frac{W_i - (W_i - 1)}{W_i} \right)$$

$$\begin{aligned}
&= \sum_{i=0}^m b_{i,0} \left(\frac{W_i \cdot W_i}{W_i} - \frac{1 + 2 + \dots + (W_i - 1)}{W_i} \right) \\
&= \sum_{i=0}^m b_{i,0} \left(W_i - \frac{(W_i - 1)}{2} \right) = \sum_{i=0}^m b_{i,0} \left(\frac{W_i + 1}{2} \right) \\
&= \frac{1}{2} (b_{0,0} + b_{1,0} + \dots + b_{m,0}) + \frac{1}{2} (b_{0,0}W_0 + b_{1,0}W_1 + \dots + b_{m,0}W_m) \\
&= \frac{1}{2} (b_{0,0} + p \cdot b_{0,0} + \dots + p^m \cdot b_{0,0}) + \frac{1}{2} b_{0,0}W_0 (1 + (2p)^1 + \dots + (2p)^{m'} + 2^{m'} p^{m'+1} + \dots + 2^{m'} p^m) \\
&= \frac{1}{2} b_{0,0} \frac{p^{m+1} - 1}{p - 1} + \frac{1}{2} b_{0,0}W_0 \left(\frac{(2p)^{m'+1} - 1}{2p - 1} + 2^{m'} (p^{m'+1} + p^{m'+2} + \dots + p^m) \right)
\end{aligned}$$

Σε αυτό το σημείο διακρίνονται δυο περιπτώσεις.

α) Αν $m \leq m'$

$$\begin{aligned}
1 &= \frac{1}{2} b_{0,0} \frac{p^{m+1} - 1}{p - 1} + \frac{1}{2} b_{0,0}W_0 \left(\frac{(2p)^{m'+1} - 1}{2p - 1} \right) \Rightarrow 1 = b_{0,0} \frac{p^{m+1} - 1}{2(p - 1)} + b_{0,0}W_0 \left(\frac{(2p)^{m'+1} - 1}{2(2p - 1)} \right) \Rightarrow \\
b_{0,0} &= \frac{(p^{m+1} - 1)(2p - 1) + W_0((2p)^{m'+1} - 1)(p - 1)}{2(p - 1)(2p - 1)} \Rightarrow \\
b_{0,0} &= \frac{2(p - 1)(2p - 1)}{W_0((2p)^{m'+1} - 1)(p - 1) + (p^{m+1} - 1)(2p - 1)} \Rightarrow \\
b_{0,0} &= \frac{2(1 - p)(1 - 2p)}{W(1 - (2p)^{m'+1})(1 - p) + (1 - p^{m+1})(1 - 2p)}
\end{aligned}$$

β) Και αν $m > m'$

$$\begin{aligned}
2 &= b_{0,0} \left[\frac{p^{m+1}-1}{p-1} + W_0 \left(\frac{(2p)^{m'+1}-1}{2p-1} + 2^{m'} \left(p^{m'+1} \frac{p^{m-m'}-1}{p-1} \right) \right) \right] \Rightarrow \\
2 &= b_{0,0} \left[\frac{p^{m+1}-1}{p-1} + \frac{W_0((2p)^{m'+1}-1)}{2p-1} + \frac{W_0 \cdot 2^{m'} p^{m'+1} (p^{m-m'}-1)}{p-1} \right] \Rightarrow \\
2 &= b_{0,0} \left[\frac{(p^{m+1}-1)(2p-1) + W_0((2p)^{m'+1}-1)(p-1) + W_0 \cdot 2^{m'} p^{m'+1} (p^{m-m'}-1)(2p-1)}{2(p-1)(2p-1)} \right] \Rightarrow \\
b_{0,0} &= \frac{2(1-p)(1-2p)}{W((1-(2p)^{m'+1})(1-p) + (1-2p)(1-p^{m+1}) + W \cdot 2^{m'} p^{m'+1} (1-2p)(1-p^{m-m'}))}
\end{aligned}$$

Τώρα, η πιθανότητα τ , όπου ένας σταθμός εκπέμπει σε τυχαία χρονοθυρίδα, μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\tau = \sum_{i=0}^m b_{i,0} = b_{0,0} + b_{1,0} + \dots + b_{m,0} = b_{0,0} + p \cdot b_{0,0} + \dots + p^m \cdot b_{0,0}$$

$$= b_{0,0}(1 + p + \dots + p^m) \Rightarrow$$

$$\tau = \frac{1-p^{m+1}}{1-p} b_{0,0} \quad (4.7)$$

Έχοντας εκφράσει την πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης πακέτου από ένα σταθμό, μπορεί τώρα να υπολογιστεί η πιθανότητα σύγκρουσης p , συναρτήσει της πιθανότητας τ . Όπως έχει ήδη ειπωθεί, η πιθανότητα τ είναι ίδια για κάθε σταθμό του συστήματος.

$$p = 1 - (1 - \tau)^{n-1} \quad (4.8)$$

Τέλος, οι πιθανότητες τ και p υπολογίζονται από τη λύση του μη γραμμικού συστήματος των εξισώσεων (4.7) και (4.8) κάνοντας χρήση αριθμητικών μεθόδων και γνωρίζοντας ότι είναι πιθανότητες και θα πρέπει να ανήκουν στο διάστημα $(0,1)$.

4.2 Η Διεκπεραιωτική Ικανότητα Του Συστήματος

Για την ανάλυση της διεκπεραιωτικής ικανότητας του συστήματος θα χρειαστεί αρχικά να οριστούν οι πιθανότητες P_{tr} και P_S . Η πιθανότητα P_{tr} είναι η πιθανότητα να υπάρχει τουλάχιστον μια μετάδοση στην επιλεγμένη χρονοθυρίδα και εκφράζεται με την μαθηματική εξίσωση (4.9). Και P_S είναι η πιθανότητα να υπάρχει μια επιτυχημένη μετάδοση πακέτου στο κανάλι, δεδομένου ότι τουλάχιστον ένας σταθμός εκπέμπει, σχέση (4.10).

$$P_{tr} = 1 - (1 - \tau)^n \quad (4.9)$$

$$P_S = \frac{n\tau(1-\tau)^{n-1}}{P_{tr}} \quad (4.10)$$

Επομένως, η διεκπεραιωτική ικανότητα του συστήματος μπορεί να εκφραστεί από την παρακάτω σχέση, (4.11).

$$S = \frac{E[\text{το φορτίο που μεταδίδεται σε μια χρονοθυρίδα}]}{E[\text{η μεση διάρκεια μιας χρονοθυρίδας}]} = \frac{P_S P_{tr} E[P]}{(1-P_{tr})\sigma + P_{tr} P_S T_S + P_{tr} (1-P_S) T_C} \quad (4.11)$$

Στην σχέση (4.11) έχουν χρησιμοποιηθεί τα ίδια σύμβολα με αυτά της εργασίας του Bianchi [2] του προηγούμενου κεφαλαίου. Εδώ, T_s είναι ο μέσος χρόνος κατά τον οποίο πραγματοποιείται μια πετυχημένη μετάδοση πακέτου. Ενώ, το T_c είναι ο μέσος χρόνος που σπαταλάται λόγω σύγκρουσης πακέτων. Και για στους δύο αυτούς χρόνους το κανάλι θεωρείται απασχολημένο από όλους τους σταθμούς. Το $E[P]$ εκφράζει τη μέση τιμή του φορτίου ενός πακέτου και το φορτίο που μεταδίδεται σε μια χρονοθυρίδα είναι $P_s P_{tr} E[P]$, αφού η πιθανότητα να υπάρχει επιτυχημένη μετάδοση σε μια χρονοθυρίδα είναι $P_s P_{tr}$.

Το σ είναι η διάρκεια μιας κενής χρονοθυρίδας. Η πιθανότητα να είναι μια χρονοθυρίδα κενή είναι $1 - P_{tr}$. Η πιθανότητα να υπάρχει επιτυχημένη μετάδοση σε μια χρονοθυρίδα είναι $P_s P_{tr}$ και η πιθανότητα να υπάρχει μια σύγκρουση είναι $P_{tr}(1 - P_s)$. Άρα η μέση διάρκεια μιας χρονοθυρίδας είναι: $(1 - P_{tr})\sigma + P_{tr}P_s T_s + P_{tr}P_{tr}(1 - P_s)T_c$.

Όλες οι τιμές των $E[P]$, T_c , T_s και σ εκφράζονται με την ίδια μονάδα μέτρησης. Τέλος, για να υπολογιστεί η διεκπεραιωτική ικανότητα του συστήματος S υπολείπεται ο υπολογισμός των T_s και T_c .

4.2.1 Η Τεχνική Basic Access

Στη περίπτωση όπου ο μηχανισμός πρόσβασης στο μέσο είναι η τεχνική basic access, τότε οι χρόνοι επιτυχημένης μετάδοσης και σύγκρουσης ενός πακέτου αναγράφονται στις σχέσεις (4.12) και (4.13). Αυτοί οι χρόνοι υπολογίζονται να είναι διαφορετικοί από την εργασία του Bianchi [2] γιατί υπολογίζεται στον χρόνο T_c^{bas} το ACK timeout effect.

$$T_s^{bas} = DIFS + H + E[P] + \delta + SIFS + ACK + \delta \quad (4.12)$$

$$T_c^{bas} = DIFS + H + E[P^*] + SIFS + ACK \quad (4.13)$$

Στη παραπάνω σχέση είναι $H = PHY_{\square dr} + MAC_{\square dr}$ η κεφαλίδα του πακέτου (packet header) και δ η καθυστέρηση διάδοσης στο κανάλι. Όπου το “bas” υπονοεί την τεχνική basic access, δηλαδή στην περίπτωση αυτή οι χρόνοι T_s και T_c υπολογίζονται για την τεχνική basic access και συμβολίζονται T_s^{bas} και T_c^{bas} . Το $E[P^*]$ είναι για τη μεγαλύτερη μέση τιμή του φορτίου που εμπλέκεται στη σύγκρουση. Όμως, επειδή χρησιμοποιείται παντού η ίδια τιμή για το φορτίο, θα είναι $P = E[P] = E[P^*]$.

4.2.2 Η Τεχνική RTS/CTS

Στη δεύτερη περίπτωση όπου χρησιμοποιείται ο μηχανισμός διάδοσης request to send/clear to send (RTS/CTS), οι χρόνοι T_s και T_c υπολογίζονται από τις σχέσεις (4.14) και (4.15):

$$T_s^{rts} = DIFS + RTS + SIFS + \delta + CTS + SIFS + \delta + H + E[P] + SIFS + \delta + ACK + \delta \quad (4.14)$$

$$T_c^{rts} = DIFS + RTS + SIFS + CTS \quad (4.15)$$

Ας σημειωθεί ότι και εδώ ο χρόνος T_c^{rts} διαφέρει από τον αντίστοιχο χρόνο της εργασίας του Bianchi [2] και αυτό γιατί υπολογίζεται το CTS timeout effect. Το “rts” υπονοεί την τεχνική που χρησιμοποιεί το σύστημα. Εδώ, οι χρόνοι T_s και T_c υπολογίζονται για την τεχνική Request To Send/Clear To Send και συμβολίζονται T_s^{rts} και T_c^{rts} αντίστοιχα. Σημαντικό είναι να ειπωθεί ότι συγκρούσεις σε αυτήν την περίπτωση, δηλαδή όταν χρησιμοποιείται η τεχνική RTS/CTS, συμβαίνουν μόνο μεταξύ των πλαισίων RTS.

4.3 Επικύρωση Μοντέλου

Η συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιεί τις παραμέτρους για το φυσικό στρώμα της τεχνικής Διασποράς Φάσματος με Άμεση Ακολουθία (Direct Sequence Spread Spectrum - DSSS) στο IEEE 802.11. Οι τιμές του συστήματος που καθορίζονται για το φυσικό στρώμα και το MAC υπόστρωμα αναγράφονται στον Πίνακα 4.1.

Το μοντέλο επικυρώνεται με τη σύγκριση των θεωρητικών αποτελεσμάτων με αυτά μιας προσομοίωσης. Επίσης συγκρίνονται και τα δύο μοντέλα, δηλαδή, το μοντέλο της εργασίας του Wu [4] με αυτό του Bianchi [2]. Βασική παραδοχή είναι ότι το σύστημα λειτουργεί σε συνθήκες κορεσμού, δηλαδή κάθε σταθμός έχει πάντα ένα πακέτο έτοιμο προς αποστολή.

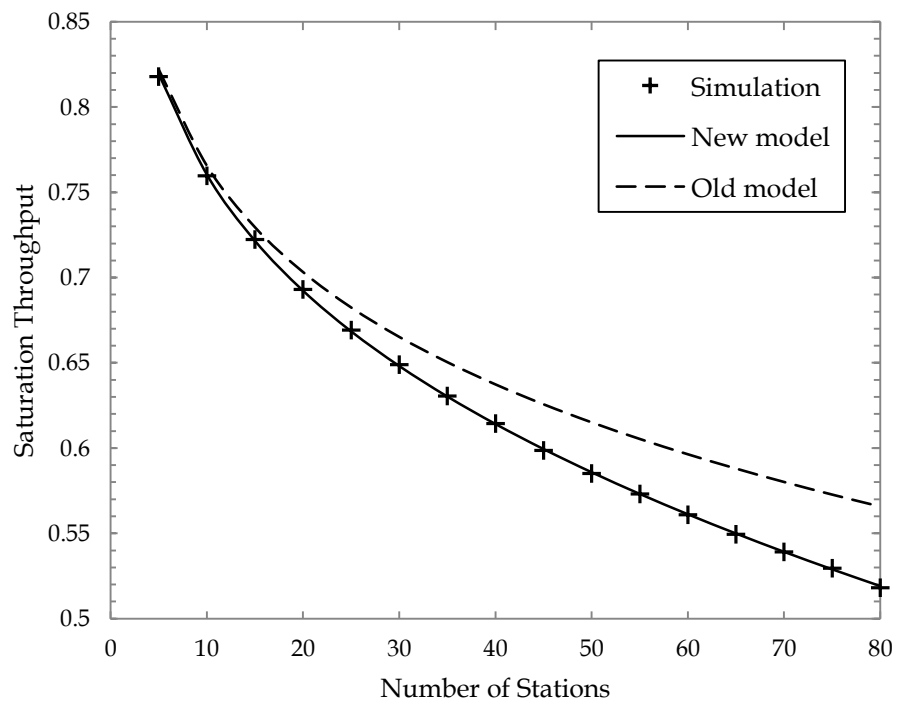
Παράμετροι	Τιμές
Packet payload	8224 bits
MAC header	224 bits
PHY header	192 bits
ACK	112 bits + PHY header
RTS	160 bits + PHY header
CTS	112 bits + PHY header
Channel bit rate	1Mbit/s
Propagation delay	1 μ s
Slot time, σ	20 μ s
SIFS	10 μ s
DIFS	50 μ s

Πίνακας 4.1 Παράμετροι του συστήματος για το DSSS.

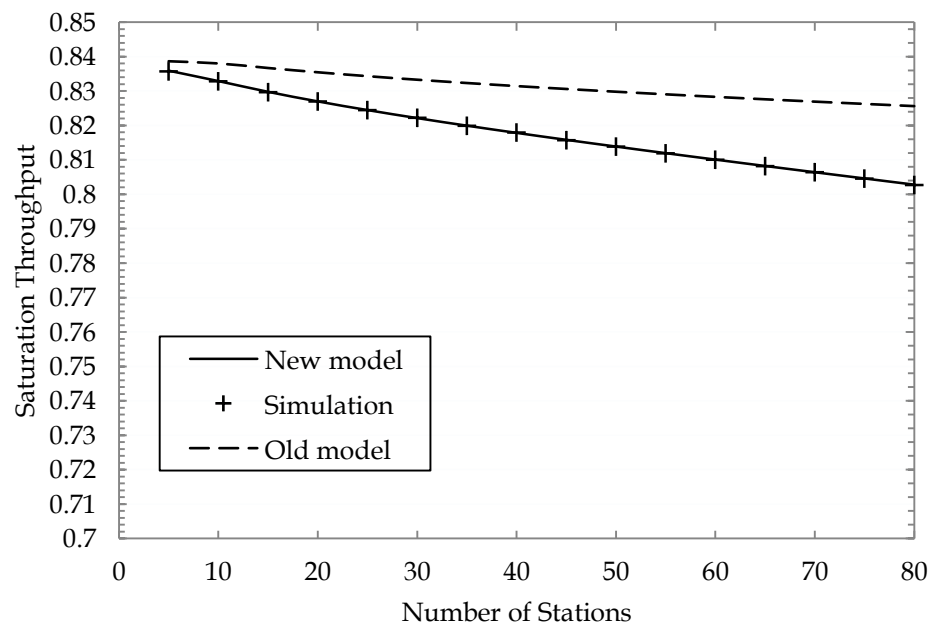
4.4 Ανάλυση Αποτελεσμάτων

Αρχικά μελετάται το σύστημα που χρησιμοποιεί την μέθοδο basic access και τα αποτελέσματα των δύο μοντέλων απεικονίζονται στο Διάγραμμα 4.1. Χρησιμοποιείται η ονομασία *new model* για να αναφερθεί στην ρυθμαπόδοση για το μοντέλο που προτείνει ο Wu [4] και *old model* για τη ρυθμαπόδοση του μοντέλου που παρουσιάζεται στην εργασία του Bianchi [2]. Επίσης, τα σύμβολα είναι για τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, ενώ οι γραμμές για τα θεωρητικά αποτελέσματα. Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα το αναλυτικό μοντέλο είναι ακριβές, αφού τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ταυτίζονται με τα αποτελέσματα του θεωρητικού μοντέλου.

Το πρώτο αποτέλεσμα που εξάγεται είναι ότι στην εργασία του Wu [4] η ρυθμαπόδοση βρίσκεται σε πιο χαμηλά επίπεδα από ότι συμβαίνει στο μοντέλο του Bianchi [2]. Και αυτό συμβαίνει διότι το μοντέλο του Wu υπολογίζει το όριο αναμετάδοσης για ένα πακέτο. Το ίδιο παρατηρείται και στο Διάγραμμα 4.2 το οποίο απεικονίζει τη ρυθμαπόδοση για τα δύο μοντέλα με τη μέθοδο RTS/CTS. Δηλαδή, η ρυθμαπόδοση για το μοντέλο του Wu είναι μικρότερη από την ρυθμαπόδοση του προηγούμενου μοντέλου.



Διάγραμμα 4.1 Η Διεκπαιωτική Ικανότητα των δύο μοντέλων με την τεχνική basic access.



Διάγραμμα 4.2 Η Διεκπαιωτική Ικανότητα των δύο μοντέλων με την τεχνική RTS/CTS.

Τέλος, συγκρίνοντας τα παραπάνω δύο διαγράμματα, είναι φανερό ότι ο μηχανισμός πρόσβασης στο μέσο RTS/CTS αποφέρει καλύτερα αποτελέσματα για το συγκεκριμένο δίκτυο, από ότι ο μηχανισμός basic access. Αυτό εξηγείται λόγω του μεγάλου μεγέθους των πακέτων δεδομένων, διότι τα μόνα πακέτα που συγκρούονται με την τεχνική RTS/CTS είναι τα πακέτα RTS. Ενώ, με την τεχνική basic access ο χρόνος της σύγκρουσης είναι μεγαλύτερος γιατί κατά τη σύγκρουση εμπλέκονται τα πακέτα δεδομένων.

Κεφάλαιο 5

Μέση Καθυστέρηση Πακέτων

Στο παρόν κεφάλαιο θα μελετηθούν μετρικές για την καθυστέρηση μετάδοσης πακέτων σε ασύρματο δίκτυο όπως παρουσιάζονται στην εργασία του Χατζημίσιου [3]. Αρχικά, μελετάται το αναλυτικό μοντέλο [3] βασισμένο σε μια Μαρκοβιανή Αλυσίδα, από το οποίο είναι δυνατόν να εξαχθούν εκφράσεις για τη μέση καθυστέρηση πακέτων, την πιθανότητα να απορριφθεί ένα πακέτο όταν φτάσει στο όριο της αναμετάδοσης και ο μέσος χρόνος να απορριφτεί ένα πακέτο. Όλα τα παραπάνω εξετάζονται για τους δύο μηχανισμούς πρόσβασης στο μέσο, basic access και RTS/CTS.

5.1 Πιθανότητα Μετάδοσης και Ρυθμαπόδοση

Στο προηγούμενο κεφάλαιο έγινε μια εκτενής ανάλυση για το μοντέλο της ρυθμαπόδοσης του Wu [4]. Επομένως, η πιθανότητα για την επιτυχημένη μετάδοση (5.1) είναι γνωστή, καθώς και η πιθανότητα σύγκρουσης ενός πακέτου (5.2):

$$\tau = \frac{1-p^{m+1}}{1-p} b_{0,0} \quad (5.1)$$

$$p = 1 - (1 - \tau)^{n-1} \quad (5.2)$$

όπου $b_{0,0}$, είναι:

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

Στη συνέχεια, η πιθανότητα όπου τουλάχιστον ένας σταθμός εκπέμπει ένα πακέτο σε συγκεκριμένη χρονοθυρίδα, δίνεται από τη σχέση (5.3) και η πιθανότητα ένα πακέτο να αποσταλεί επιτυχώς από τη σχέση (5.4).

$$P_{tr} = 1 - (1 - \tau)^n \quad (5.3)$$

$$P_S = \frac{n\tau(1-\tau)^{n-1}}{P_{tr}} \quad (5.4)$$

Τελικά, η ρυθμαπόδοση του συστήματος δίνεται από τη σχέση (5.5), δεδομένου ότι μια τυχαία χρονοθυρίδα είναι κενή με πιθανότητα $(1 - P_{tr})$, περιέχει μια πετυχημένη μετάδοση με πιθανότητα $P_{tr}P_S$ και περιέχει μια σύγκρουση με πιθανότητα $(1 - P_S)$.

$$S = \frac{P_S P_{tr} l}{(1-P_{tr})\sigma + P_{tr}P_S T_S + P_{tr}(1-P_S)T_C} \quad (5.5)$$

όπου l είναι το φορτίο του πακέτου, σ είναι η διάρκεια μιας κενής χρονοθυρίδας, T_S και T_C είναι οι μέσοι χρόνοι όπου το κανάλι είναι απασχολημένο εξαιτίας μιας πετυχημένης μετάδοσης ή μια σύγκρουσης αντίστοιχα. Αυτοί οι χρόνοι υπολογίζονται ξεχωριστά για τις δύο τεχνικές πρόσβασης στο μέσο basic access και RTS/CTS.

Όσον αφορά την τεχνική basic access, οι χρόνοι T_S και T_C υπολογίζονται από τις σχέσεις (5.6) και (5.7):

$$T_S^{bas} = DIFS + H + l + SIFS + ACK \quad (5.6)$$

$$T_C^{bas} = DIFS + H + l + SIFS + ACK \quad (5.7)$$

ενώ, οι χρόνοι T_S και T_C για την τεχνική RTS/CTS υπολογίζονται από τις σχέσεις (5.8) και (5.9):

$$T_S^{RTS} = DIFS + RTS + SIFS + CTS + SIFS + H + l + SIFS + ACK \quad (5.8)$$

$$T_C^{RTS} = DIFS + RTS + SIFS + CTS \quad (5.9)$$

όπου $H = PHY_{dr} + MAC_{dr}$ η κεφαλίδα του πακέτου (packet header).

5.2 Πιθανότητα Απόρριψης Πακέτου

Η πιθανότητα απόρριψης πακέτου ορίζεται ως η πιθανότητα όπου ένα πακέτο απορρίπτεται όταν φτάσει στο όριο της αναμετάδοσης [3] και είναι ίση με:

$$P_{drop} = p^{m+1} \quad (5.10)$$

αφού ένα πακέτο απορρίπτεται όταν υποστεί $m + 1$ συγκρούσεις.

5.3 Μέσος Χρόνος Απόρριψης Πακέτου

Ένα πακέτο απορρίπτεται όταν φτάσει στο τελευταίο backoff stage και υποστεί άλλη μια σύγκρουση. Η μέση τιμή όπου ένας σταθμός θα επιλέξει μια τιμή για τον μετρητή οπισθοχώρησης στο i στάδιο, είναι $(W_i + 1)/2$, όπου $i \in [0, m]$. Ας είναι $E[T_{drop}]$ ο μέσος αριθμός των χρονοθυρίδων για ένα πακέτο που βιώνει $m + 1$ συγκρούσεις στα $(0, 1, \dots, m)$ στάδια, τότε θα είναι:

$$E[T_{drop}] = \sum_{i=0}^m \frac{W_i + 1}{2} = \frac{m + 1}{2} + \frac{W_0 + W_1 + \dots + W_m}{2}$$

Όταν είναι $m > m'$, τότε η παραπάνω σχέση συνεχίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned} E[T_{drop}] &= \frac{m + 1}{2} + \frac{W}{2} [(2^0 + 2^1 + \dots + 2^{m'}) + 2^{m'}(m - m')] = \\ &= \frac{m + 1}{2} + \frac{W}{2} \left[\frac{2^{m'+1} - 1}{2 - 1} + 2^{m'}(m - m') \right] \Rightarrow \end{aligned}$$

$$E[T_{drop}] = \frac{1}{2} [W(2^{m'+1} - 1) + W \cdot 2^{m'}(m - m') + (m + 1)], m > m'$$

Όταν είναι $m \leq m'$, τότε είναι:

$$\begin{aligned} E[T_{drop}] &= \frac{m+1}{2} + \frac{W}{2} (2^0 + 2^1 + \dots + 2^m) = \frac{m+1}{2} + \frac{W}{2} \cdot \frac{2^{m+1} - 1}{2 - 1} \\ &= \frac{W(2^{m+1} - 1) + (m + 1)}{2} \end{aligned}$$

Οπότε, για κάθε περίπτωση, είναι:

$$E[T_{drop}] = \sum_{i=0}^m \frac{W_i+1}{2} = \begin{cases} \frac{W(2^{m+1}-1)+(m+1)}{2}, & m \leq m' \\ \frac{W(2^{m'+1}-1)+W \cdot 2^{m'}(m-m')+(m+1)}{2}, & m > m' \end{cases} \quad (5.11)$$

Η μέση διάρκεια μιας χρονοθυρίδας είναι:

$$E[slot] = (1 - P_{tr})\sigma + P_{tr}P_S T_S + P_{tr}(1 - P_S)T_C \quad (5.12)$$

Τελικά, ο μέσος χρόνος να απορριφτεί ένα πακέτο υπολογίζεται να είναι:

$$E[D_{drop}] = E[T_{drop}] \cdot E[slot] \quad (5.13)$$

5.4 Μέση Καθυστέρηση Πακέτων

Η μέση καθυστέρηση πακέτων (average packet delay) για μια επιτυχημένη εκπομπή πακέτου ορίζεται να είναι το χρονικό διάστημα από τη στιγμή που το πακέτο φτάνει πρώτο στην ουρά αναμονής του MAC επιπέδου έτοιμο να αποσταλεί, ωστόσο μια επιβεβαίωση, ACK, ληφθεί από το σταθμό που εκπέμπει το πακέτο για την επιτυχή αποστολή του. Αν το πακέτο απορριφτεί επειδή έχει φτάσει το ανώτατο όριο

αναμετάδοσης, m , τότε ο χρόνος καθυστέρησης του πακέτου δεν θα συμπεριληφθεί για τον υπολογισμό της μέσης καθυστέρησης.

Οπότε, ο μέσος χρόνος $E[D]$ που απαιτείται ώστε ένα πακέτο να φτάσει στον προορισμό του, δεδομένου ότι το πακέτο δεν θα απορριφτεί, δίνεται από τη σχέση:

$$E[D] = E[X] \cdot E[slot] \quad (5.14)$$

όπου $E[X]$ είναι ο μέσος αριθμός των χρονοθυρίδων που απαιτούνται για μια επιτυχημένη μετάδοση ενός πακέτου και δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$E[X] = \sum_{i=0}^m \frac{(p^i - p^{m+1}) \frac{W_i + 1}{2}}{1 - p^{m+1}} \quad (5.15)$$

όπου $1 - p^{m+1}$ είναι η πιθανότητα ένα πακέτο να μην απορριφτεί και $(p^i - p^{m+1})/(1 - p^{m+1})$ είναι η πιθανότητα όπου ένα πακέτο, το οποίο δεν έχει απορριφθεί, φτάνει στο i στάδιο

Από τις τελευταίες δύο σχέσεις, (5.14) και (5.15), υπολογίζεται τελικά η μέση καθυστέρηση επιτυχημένης αποστολής πακέτου.

Και εδώ υπάρχουν δύο περιπτώσεις. Αρχικά θα υπολογιστεί η παράσταση για $m > m'$.

$$\begin{aligned} E[X] &= \sum_{i=0}^m \frac{(p^i - p^{m+1}) \frac{W_i + 1}{2}}{1 - p^{m+1}} = \frac{1}{1 - p^{m+1}} \left[\sum_{i=0}^m p^i \frac{W_i + 1}{2} - \sum_{i=0}^m p^{m+1} \frac{W_i + 1}{2} \right] = \\ &= \frac{1}{2(1 - p^{m+1})} \left[\sum_{i=0}^m p^i W_i + \sum_{i=0}^m p^i - \sum_{i=0}^m p^{m+1} W_i - \sum_{i=0}^m p^{m+1} \right] \end{aligned}$$

Από την παραπάνω σχέση, το κάθε άθροισμα υπολογίζεται ξεχωριστά.

Αφού είναι $W_i = 2^i W$ για κάθε $i \leq m'$ και $W_i = 2^{m'} W$ για κάθε $i > m'$, τότε το πρώτο άθροισμα έχει ως εξής:

$$\sum_{i=0}^m p^i W_i = p^0 W_0 + p^1 W_1 + \dots + p^{m'} W_{m'} + p^{m'+1} W_{m'+1} + \dots + p^m W_m =$$

$$\begin{aligned}
&= p^0 2^0 W + p^1 2^1 W + \dots + p^{m'} 2^{m'} W + p^{m'+1} 2^{m'} W + \dots p^m 2^{m'} W = \\
&= W \frac{(2p)^{m'+1} - 1}{2p - 1} + W 2^{m'} p^{m'+1} \frac{p^{m-m'} - 1}{p - 1}
\end{aligned}$$

Στη συνέχεια υπολογίζεται το δεύτερο άθροισμα:

$$\sum_{i=0}^m p^i = p^0 + \dots + p^m = \frac{p^{m+1} - 1}{p - 1}.$$

Για το τρίτο άθροισμα είναι:

$$\begin{aligned}
\sum_{i=0}^m p^{m+1} W_i &= p^{m+1} (W_0 + W_1 + \dots + W_{m'} + W_{m'+1} + \dots + W_m) = p^{m+1} (2^0 W + 2^1 W + \\
&\dots + 2^{m'} W + 2^{m'} W + \dots + 2^{m'} W) = p^{m+1} W \frac{2^{m'+1} - 1}{2 - 1} + p^{m+1} W \cdot 2^{m'} (m - m') = \\
&p^{m+1} W (2^{m'+1} - 1 + 2^{m'} (m - m')).
\end{aligned}$$

Και τέλος, το τέταρτο άθροισμα είναι:

$$\sum_{i=0}^m p^{m+1} = p^{m+1} (m + 1)$$

Κάνοντας αντικατάσταση, προκύπτει η σχέση:

$$\begin{aligned}
E[X] &= \frac{1}{2(1-p^{m+1})} \cdot \left[W \frac{(2p)^{m'+1} - 1}{2p - 1} + W 2^{m'} p^{m'+1} \frac{p^{m-m'} - 1}{p - 1} + \frac{p^{m+1} - 1}{p - 1} - p^{m+1} W (2^{m'+1} - 1 + \right. \\
&2^{m'} (m - m')) - p^{m+1} (m + 1) \left. \right] = \frac{1}{2(1-p^{m+1})} \cdot \left[W \frac{(2p)^{m'+1} - 1}{2p - 1} + W 2^{m'} p^{m'+1} \frac{p^{m-m'} - 1}{p - 1} + \right. \\
&\left. + \frac{p^{m+1} - 1}{p - 1} - p^{m+1} (W(2^{m'+1} - 1) + W \cdot 2^{m'} (m - m') + (m + 1)) \right] = \\
&\frac{1}{(1-p^{m+1})} \left[\frac{W(1-(2p)^{m'+1})(1-p) + W 2^{m'} p^{m'+1} (1-p^{m-m'})(1-2p) + (1-2p)(1-p^{m+1})}{2(1-2p)(1-p)} - p^{m+1} E[T_{drop}] \right].
\end{aligned}$$

Για τη δεύτερη περίπτωση, από τη σχέση (15) και για $m \leq m'$, είναι:

$$E[X] = \sum_{i=0}^m \frac{(p^i - p^{m+1}) \frac{W_{i+1}}{2}}{1 - p^{m+1}} \Rightarrow$$

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

Το άθροισμα υπολογίζεται:

$$\begin{aligned} \sum_{i=0}^m [(p^i - p^{m+1})(W_i + 1)] &= \sum_{i=0}^m [p^i W_i + p^i - p^{m+1} W_i - p^{m+1}] = W \frac{(2p)^{m+1} - 1}{2p - 1} + \\ &\frac{p^{m+1} - 1}{p - 1} - p^{m+1} W \frac{2^{m+1} - 1}{2 - 1} - p^{m+1}(m + 1) = \frac{W(1 - (2p)^{m+1})(1 - p) + (1 - 2p)(1 - p^{m+1})}{(1 - 2p)(1 - p)} - \\ &2p^{m+1} \frac{W(2^{m+1} - 1) + (m + 1)}{2} = \frac{W(1 - (2p)^{m+1})(1 - p) + (1 - 2p)(1 - p^{m+1})}{(1 - 2p)(1 - p)} - 2p^{m+1} E[T_{drop}]. \end{aligned}$$

Τελικά, για $m \leq m'$, είναι:

$$E[X] = \left[\frac{W(1 - (2p)^{m+1})(1 - p) + (1 - 2p)(1 - p^{m+1})}{2(1 - 2p)(1 - p)} - p^{m+1} E[T_{drop}] \right] \frac{1}{1 - p^{m+1}}$$

Οπότε, για κάθε περίπτωση είναι:

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

Και αφού έχει υπολογιστεί ο μέσος αριθμός των χρονοθυρίδων $E[X]$, τότε υπολογίζεται και η μέση καθυστέρηση επιτυχημένης αποστολής πακέτου $E[D]$ από τη σχέση (5.14).

5.5 Ανάλυση Αποτελεσμάτων

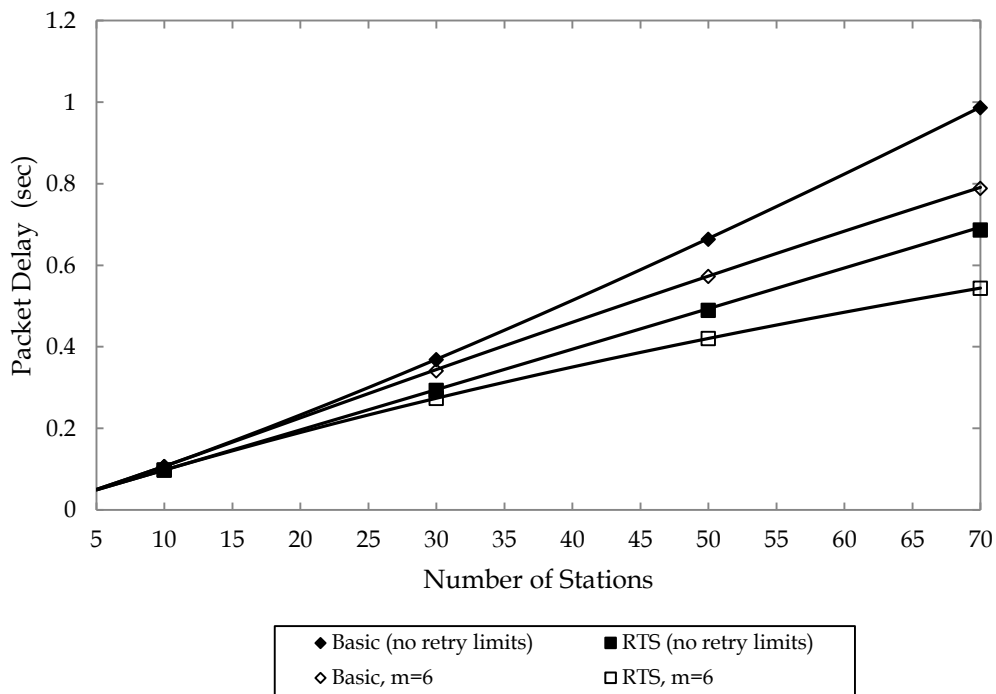
Οι τιμές που έχουν χρησιμοποιηθεί για τα παρακάτω διαγράμματα είναι οι τιμές των παραμέτρων του συστήματος και απεικονίζονται στον Πίνακα 5.1. Αυτές οι τιμές αφορούν το φυσικό στρώμα για το Direct Spread Sequence Spectrum (DSSS) που χρησιμοποιείται στο πρωτόκολλο IEEE 802.11b. Όσο αφορά τα διαγράμματα, οι γραμμές είναι για τα αναλυτικά αποτελέσματα των μοντέλων που χρησιμοποιούνται, ενώ τα σύμβολα για τις προσομοιώσεις.

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

Πίνακας 5.1 Παράμετροι του DSSS συστήματος στο 802.11b.

Το Διάγραμμα 5.1 απεικονίζει τη μέση καθυστέρηση των πακέτων για τις διάφορες τιμές των σταθμών. Ποιο συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα του διαγράμματος αναφέρονται για δύο διαφορετικά μοντέλα, το μοντέλο του Χατζημίσιου [3] που παρουσιάζεται εδώ, το οποίο χρησιμοποιεί το όριο αναμετάδοσης m , και το μοντέλο της εργασίας του Bianchi [2], το οποίο δεν έχει όριο αναμετάδοσης (no retry limits). Επίσης, το κάθε μοντέλο εξετάζεται για τους δύο μηχανισμούς πρόσβασης στο μέσο, basic access και Request To Sent/Clear To Sent (RTS/CTS).

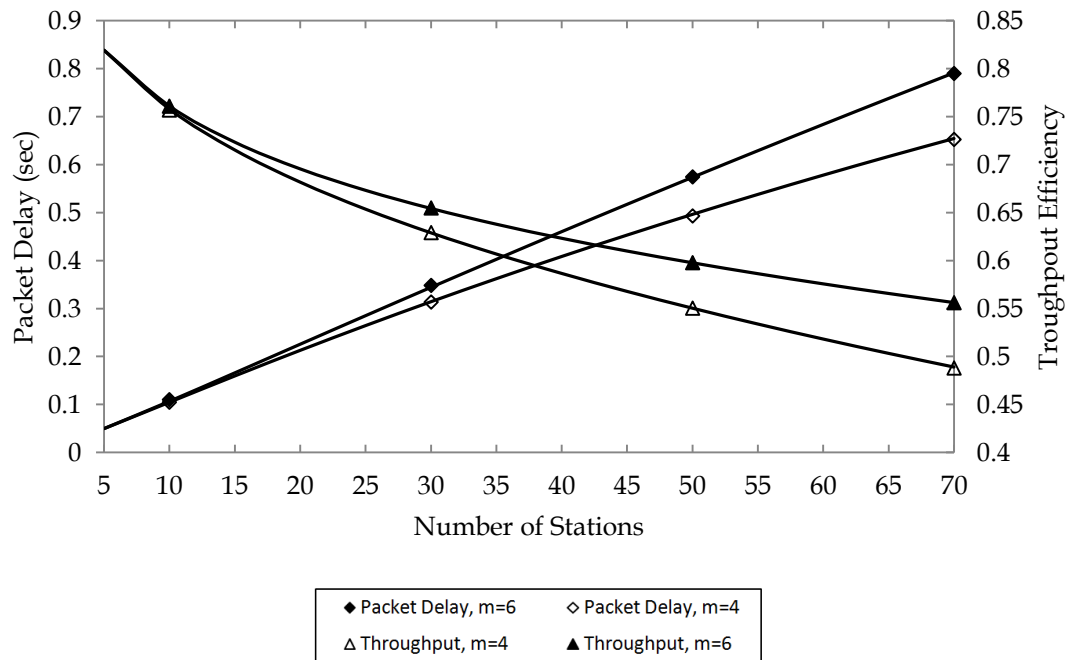
Παρατηρείται ότι και για τους δύο μηχανισμούς η μέση καθυστέρηση των πακέτων είναι μεγαλύτερη στο μοντέλο του Bianchi [2] όπου δεν υπάρχει όριο αναμετάδοσης και αυτό γιατί το πακέτο, μετά από κάθε σύγκρουση, ξανά μεταδίδεται έως ότου αποσταλεί επιτυχώς. Συγκρίνοντας τα αναλυτικά αποτελέσματα με αυτά των προσομοιώσεων παρατηρείται μια ακριβής ταύτιση, κάτι που επικυρώνει το μοντέλο του Χατζημίσιου [3].



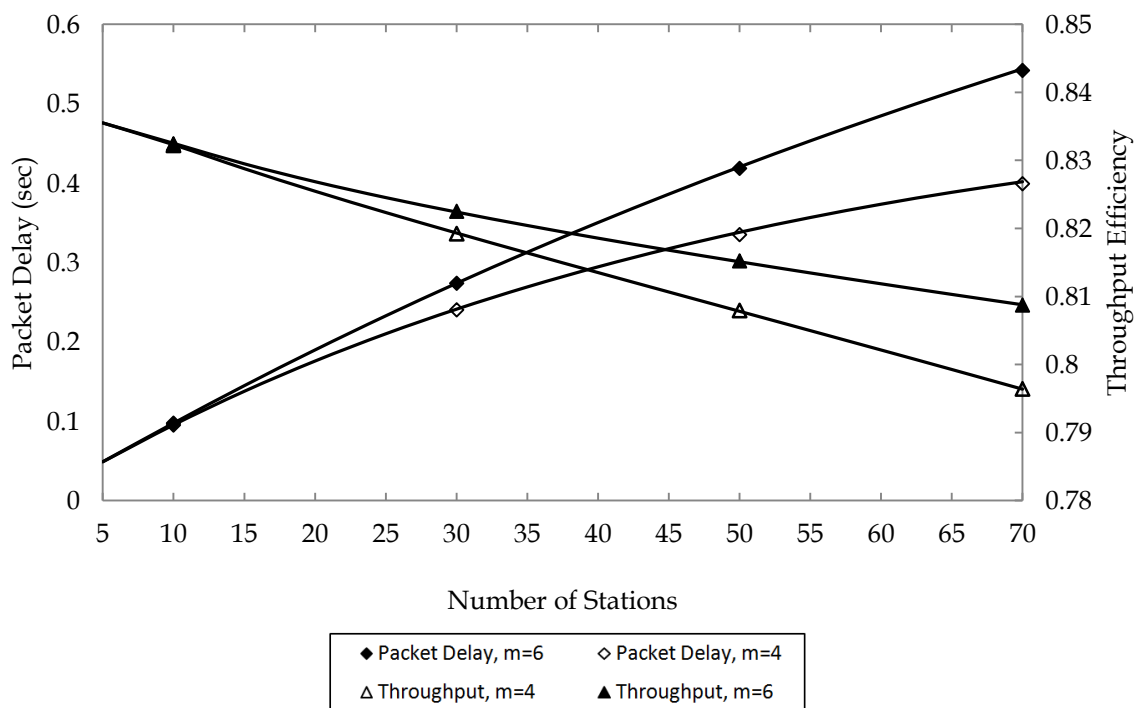
Διάγραμμα 5.1. Μέση καθυστέρηση πακέτων ως συνάρτηση του αριθμού των σταθμών για Basic Access και RTS/CTS.

Στα επόμενα διαγράμματα, Διάγραμμα 5.2 και 5.3, εξετάζεται η εξάρτηση της μέσης καθυστέρησης με τον αριθμό των σταθμών και τον μηχανισμό πρόσβασης στο μέσο. Και για στα δύο διαγράμματα παρατηρείται αύξηση της μέσης καθυστέρησης καθώς αυξάνονται οι σταθμοί. Αυτό συμβαίνει για δύο λόγους. Ένας σταθμός μπαίνει σε κατάσταση αναμονής όταν ένας άλλος σταθμός εκπέμπει, οπότε χρειάζεται να περιμένει περισσότερο ώστε να μπορέσουν οι άλλοι σταθμοί να μεταδώσουν. Και όσο αυξάνονται οι σταθμοί τόσο αυξάνεται και η πιθανότητα σύγκρουσης, οπότε και οι αναμεταδόσεις. Συγκρίνοντας τα δύο διαγράμματα, εξάγεται το συμπέρασμα ότι με τον μηχανισμό RTS/CTS η μέση καθυστέρηση είναι μικρότερη από ότι με τον μηχανισμό Basic Access, και αυτό συμβαίνει γιατί στον RTS/CTS τα πακέτα που συγκρούονται έχουν μικρότερο μέγεθος.

Επίσης, στα Διαγράμματα 5.2 και 5.3, παρουσιάζονται τιμές για τη ρυθμαπόδοση και τη μέση καθυστέρηση για δύο διαφορετικά όρια αναμετάδοσης, και για τους δύο μηχανισμούς πρόσβασης στο μέσο. Και στα δύο διαγράμματα φαίνεται η αύξηση στη μέση καθυστέρηση όταν αυξάνεται το όριο αναμετάδοσης. Ενώ συμβαίνει το αντίθετο με τη ρυθμαπόδοση, δηλαδή, καθώς το όριο αναμετάδοσης αυξάνεται, τότε αυξάνεται και η ρυθμαπόδοση.



Διάγραμμα 5.2. Ρυθμαπόδοση και μέση καθυστέρηση πακέτων ως συνάρτηση του αριθμού των σταθμών για τον μηχανισμό Basic Access.

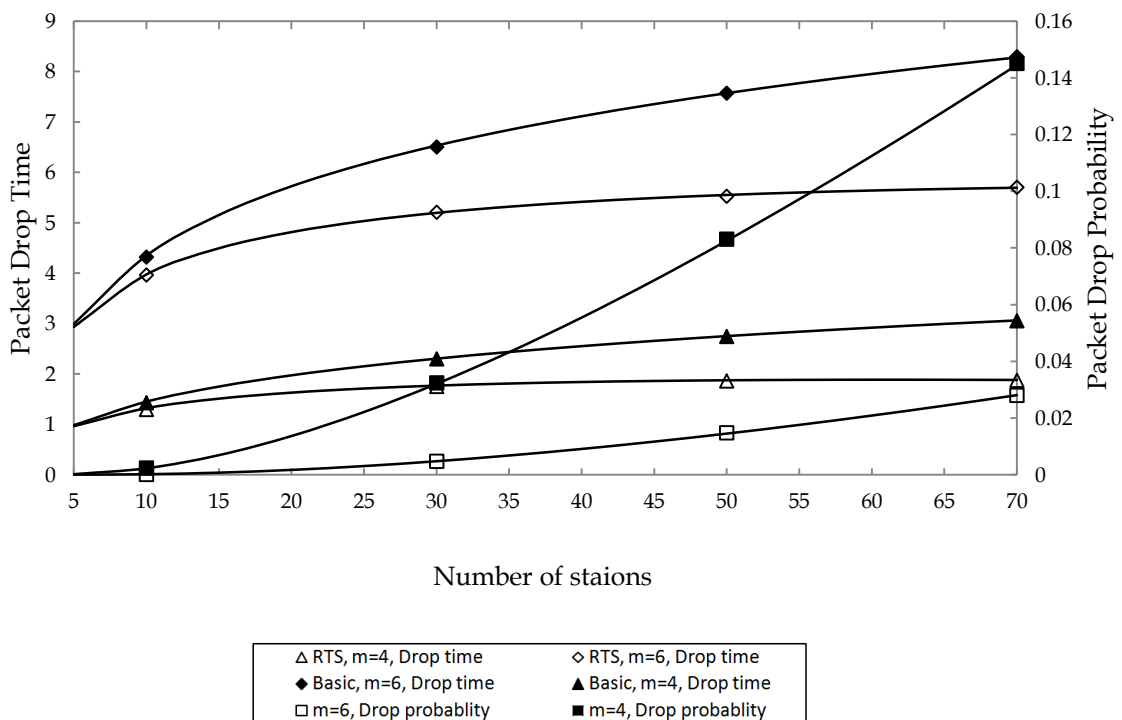


Διάγραμμα 5.3. Ρυθμαπόδοση και μέση καθυστέρηση πακέτων ως συνάρτηση του αριθμού των σταθμών για τον μηχανισμό RTS/CTS.

Το Διάγραμμα 5.4 απεικονίζει την επίδραση που έχει το όριο αναμετάδοσης στην πιθανότητα απόρριψης πακέτου και στο μέσο χρόνο όπου απορρίπτεται ένα πακέτο.

Όπως φαίνεται από το διάγραμμα οι τιμές για τον μηχανισμό RTS/CTS είναι μικρότερες για το μέσο χρόνο απόρριψης πακέτων, έναντι του μηχανισμού Basic Access. Ακόμα, και για τους δύο μηχανισμούς, ισχύει ότι αν το όριο αναμετάδοσης μικραίνει, τότε μικραίνει και ο μέσος χρόνος απόρριψης πακέτων.

Να σημειωθεί επίσης, όπως φαίνεται και από τη σχέση (10), η τιμή της πιθανότητας απόρριψης πακέτου εξαρτάται από το όριο αναμετάδοσης και από την πιθανότητα σύγκρουσης πακέτων, και όχι από το μηχανισμό πρόσβασης στο μέσο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι τιμές της πιθανότητας απόρριψης πακέτου να ταυτίζονται για τους δύο μηχανισμούς.



Διάγραμμα 5.4. Μέσος χρόνος απόρριψης πακέτων και πιθανότητα απόρριψης πακέτου ως συνάρτηση του αριθμού των σταθμών.

Κεφάλαιο 6

Μετρικές Καθυστέρησης

Στην εργασία του Ράπτη [6] πραγματοποιείται ανάλυση της καθυστέρησης των πακέτων για ασύρματα δίκτυα βασισμένα στο πρωτόκολλο IEEE 802.11. Αναπτύσσονται μαθηματικά μοντέλα τα οποία υπολογίζουν μετρικές της καθυστέρησης των πακέτων. Αυτές είναι η μέση καθυστέρηση των πακέτων (average packet delay) που μεταδόθηκαν επιτυχώς, η μέση καθυστέρηση για πακέτα που έχουν μεταδοθεί επιτυχώς έχοντας όμως υποστεί συγκεκριμένο αριθμό συγκρούσεων (average delay per stage), ο μέσος χρόνος απόρριψης πακέτου (average packet drop time), και η διακύμανση της καθυστέρησης (delay jitter).

Όπως και η εργασία του Χατζημίσσιου [3] στηρίζεται στο μοντέλο του Wu [4], έτσι και το παρόν κεφάλαιο χρησιμοποιεί τους ίδιους τύπους για την πιθανότητα μετάδοσης και την πιθανότητα σύγκρουσης, σχέσεις (6.1) και (6.2).

$$\tau = \frac{2(1-2p)(1-p^{R+1})}{W(1-(2p)^{m+1})(1-p) + (1-2p)(1-p^{R+1}) + W2^m p^{m+1}(1-2p)(1-p^{R-m})} \quad (6.1)$$

$$p = 1 - (1 - \tau)^{n-1} \quad (6.2)$$

όπου R το όριο αναμετάδοσης ενός πακέτου και m ο αριθμός των διαφορετικών μεγεθών του παραθύρου ανταγωνισμού.

6.1 Μέση Καθυστέρηση Ανά Στάδιο

Η καθυστέρηση για μια επιτυχημένη αποστολή πακέτου ορίζεται ως το χρονικό διάστημα από τη στιγμή που ένα πακέτο φτάνει στην πρώτη θέση στην ουρά των πακέτων που πρόκειται να μεταδοθούν του MAC επιπέδου, έως ότου ληφθεί μια επιβεβαίωση, ACK, από τον σταθμό που έχει εκπέμψει το πακέτο. Αν το πακέτο φτάσει στο όριο αναμετάδοσης, τότε αυτό το πακέτο απορρίπτεται και η χρονική του καθυστέρηση δεν θα ληφθεί υπόψη για τον υπολογισμό της μέσης καθυστέρησης.

Αν είναι $E[D_j]$ η μέση καθυστέρηση των επιτυχώς μεταδιδόμενων πακέτων για το j στάδιο (backoff stage), τότε με D_j συμβολίζεται το άθροισμα των καθυστερήσεων που βίωσε ένα πακέτο στα $0, 1, \dots, j$ στάδια και η $E[D_j]$ υπολογίζεται από τη σχέση (6.3).

$$E[D_j] = T_s + j \cdot T_c + E[slot] \sum_{i=0}^j \left(\frac{W_i - 1}{2} \right), \text{ for } 0 \leq j \leq R \quad (6.3)$$

όπου $(W_i - 1)/2$ είναι ο μέσος αριθμός των χρονοθυρίδων όπου ένας σταθμός απέχει από μετάδοση πακέτου στο i στάδιο, T_c είναι ο χρόνος όπου το κανάλι είναι απασχολημένο λόγω μια σύγκρουσης και jT_c είναι ο χρόνος κατά τον οποίο το πακέτο συγκρούεται έως ότου φτάσει στο στάδιο j , T_s είναι ο χρόνος που απαιτείται για μια επιτυχημένη μετάδοση από το στάδιο j και $E[slot]$ η μέση χρονική διάρκεια μιας χρονοθυρίδας και δίνεται από τη σχέση:

$$E[slot] = (1 - P_{tr})\sigma + P_{tr}P_sT_s + P_{tr}(1 - P_s)T_c \quad (6.4)$$

όπου σ είναι η διάρκεια μιας κενής χρονοθυρίδας, P_{tr} είναι η πιθανότητα μετάδοσης τουλάχιστον από ένα σταθμό και P_s είναι η πιθανότητα μια μετάδοση να είναι επιτυχής δεδομένου ότι ένας τουλάχιστον σταθμός εκπέμπει. Οι πιθανότητες P_{tr} και P_s δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$P_{tr} = 1 - (1 - \tau)^n \quad (6.5)$$

$$P_S = \frac{n\tau(1-\tau)^{n-1}}{P_{tr}} \quad (6.6)$$

Οι χρόνοι T_S και T_C υπολογίζονται ανάλογα με τη μέθοδο πρόσβασης στο μέσο που χρησιμοποιείται. Έτσι, αν η μέθοδος είναι basic access, τότε οι χρόνοι θα είναι:

$$T_S^{bas} = DIFS + T_H + SIFS + T_{ACK} + \delta + (l/C) \quad (6.7)$$

$$T_C^{bas} = DIFS + T_H + SIFS + T_{ACK} + \delta + (l/C) \quad (6.8)$$

όπου l είναι το μέγεθος του πακέτου και C είναι η ταχύτητα μετάδοσης στο κανάλι. Επίσης, είναι $T_H = PHY_{dr} + MAC_{dr}$ η κεφαλή του πακέτου (packet header) και δ η καθυστέρηση διάδοσης στο μέσο. Τέλος, το T_{ACK} είναι ο χρόνος που απαιτείται για τη μετάδοση ενός ACK.

Όσον αφορά την μέθοδο RTS/CTS, οι χρόνοι T_S και T_C δίνονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$T_S^{rts} = DIFS + T_H + T_{RTS} + 3SIFS + 4\delta + T_{CTS} + T_{ACK} + (l/C) \quad (6.9)$$

$$T_C^{rts} = DIFS + T_{RTS} + SIFS + T_{CTS} \quad (6.10)$$

όπου, T_{ACK} και T_{CTS} είναι οι χρόνοι μετάδοσης των ACK και CTS αντίστοιχα.

Συμβολίζεται με Q_j η πιθανότητα επιτυχημένης αποστολής πακέτου από το j στάδιο (probability per stage):

$$Q_j = \frac{(1-p)p^j}{1-p^{R+1}} \quad 0 \leq j \leq R \quad (6.11)$$

όπου $(1 - p)$ είναι η πιθανότητα όπου ένα πακέτο μεταδίδεται επιτυχώς, αφού έχει φτάσει στο j στάδιο, δηλαδή μετά από j συγκρούσεις, με πιθανότητα p^j , δεδομένου ότι το πακέτο δεν απορρίπτεται με πιθανότητα $1 - p^{R+1}$.

6.2 Μέσος Χρόνος Απόρριψης Πακέτου

Όταν ένα πακέτο φτάσει στο στάδιο R και υποστεί άλλη μια σύγκρουση, τότε απορρίπτεται. Μέσος χρόνος απόρριψης πακέτου (average packet drop time) ορίζεται ως ο μέσος χρόνος που απαιτείται ώστε να φτάσει ένα πακέτο στο όριο αναμετάδοσης R και να υποστεί άλλη μια σύγκρουση. Από τη σχέση (6.3) εξάγεται ο μέσος χρόνος απόρριψης πακέτου:

$$E[T_{drop}] = (R + 1)T_C + E[slot] \sum_{i=0}^R \left(\frac{W_i - 1}{2} \right) \quad (6.12)$$

όπου $(R + 1)T_C$ είναι ο χρόνος που απαιτείται για $(R + 1)$ συγκρούσεις.

Η σχέση (6.12), μετά από μερικές πράξεις, γράφεται και ως:

$$E[T_{drop}] = (R + 1)T_C + \frac{1}{2} (W(2^{m+1} - 1) + 2^m W(R - m) - (R + 1)) E[slot] \quad (6.13)$$

6.3 Μέση Καθυστέρηση Πακέτων

Η μέση καθυστέρηση πακέτων (average packet delay) υπολογίζεται με τη βοήθεια της μέσης καθυστέρησης πακέτων ανά στάδιο $E[D_j]$, σχέση (6.3), και της πιθανότητας ανά στάδιο Q_j , σχέση (6.11). Έτσι, είναι:

$$E[D] = \sum_{i=0}^R (E[D_j] \cdot Q_j) \quad (6.14)$$

Από τις σχέσεις (6.3) και (6.11), η (6.14) γίνεται:

$$E[D] = \sum_{i=0}^R \left(\left(T_S + j \cdot T_C + E[slot] \sum_{l=0}^j \left(\frac{W_l - 1}{2} \right) \right) \frac{(1-p)p^j}{1-p^{R+1}} \right) \quad (6.15)$$

Τελικά, μετά από μερικές πράξεις η σχέση (6.15) γίνεται:

$$\begin{aligned}
E[D] = T_S + T_C \frac{A_R}{B_R} + \frac{1}{2B_R} E[slot] ((W2^{m+1} - W - m - 1)(B_R - B_m) - (A_m - B_m) \\
+ W(2H - B_m) + (W2^m - 1)(A_R - A_m - mB_R - mB_m))
\end{aligned} \tag{6.16}$$

όπου A_i , B_i και H είναι:

$$A_i = \frac{p(1-p^i - ip^i(1-p))}{(p-1)^2}, \quad B_i = \frac{1-p^{i+1}}{1-p}, \quad H = \frac{1-(1p)^{m+1}}{1-2p}$$

6.4 Διακύμανση Της Καθυστερήσης

Η τυπική απόκλιση της καθυστέρησης (jitter) ορίζεται ως η πιθανή διαφορά των τιμών της καθυστέρησης από τη μέση τιμή της καθυστέρησης των πακέτων που μεταδόθηκαν επιτυχώς [6].

Η καθυστέρηση $D_{0,i}$ ενός πακέτου που μεταδόθηκε επιτυχώς από το στάδιο μηδέν και έχει επιλεγεί η τιμή i για τον μετρητή οπισθοχώρησης στο στάδιο μηδέν, είναι:

$$D_{0,i} = T_S + k_S T_S + k_C T_C + (i - k_S - k_C) \sigma \tag{6.17}$$

όπου k_S (k_C) είναι ο αριθμός των επιτυχημένων (μη επιτυχημένων) μεταδόσεων που έχουν πραγματοποιηθεί από άλλους σταθμούς, πριν μεταδώσει ο σταθμός. Λόγω της δυσκολίας υπολογισμού των k_S και k_C , παραλείπεται ο υπολογισμός της καθυστέρησης $D_{0,i}$. Υπολογίζεται όμως η μέση καθυστέρηση $E[D_{0,i}]$ των πακέτων που μεταδόθηκαν επιτυχώς από το στάδιο μηδέν και έχει επιλεγεί η τιμή i για τον μετρητή οπισθοχώρησης για αυτό το στάδιο, λαμβάνοντας υπόψη ότι ο σταθμός δεν εκπέμπει για i χρονοθυρίδες και ο χρόνος της χρονοθυρίδας είναι ίσος με $E[slot]$. Επίσης, ορίζεται η μέση καθυστέρηση $E[U_{0,i}]$ των πακέτων που μεταδόθηκαν ανεπιτυχώς από το στάδιο μηδέν, έχοντας επιλέξει την τιμή i για τον μετρητή οπισθοχώρησης.

$$E[D_{0,i}] = T_S + i \cdot E[slot], \quad 0 \leq i \leq W_0 - 1 \tag{6.18}$$

$$E[U_{0,i}] = T_C + i \cdot E[slot], \quad 0 \leq i \leq W_0 - 1 \tag{6.19}$$

Η μέση καθυστέρηση $E[U_0]$ των πακέτων που μεταδόθηκαν ανεπιτυχώς από στο στάδιο μηδέν υπολογίζεται με τη βοήθεια της εξίσωσης (6.19), και είναι:

$$E[U_0] = \frac{1}{W} \sum_{i=0}^{W-1} E[U_{0,i}] = T_c + E[slot] \frac{W-1}{2} \quad (6.20)$$

Οπότε, η μέση καθυστέρηση $E[U_j]$ των ανεπιτυχώς μεταδιδόμενων πακέτων, από το στάδιο j , δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$E[U_j] = (j+1) \cdot T_c + E[slot] \cdot \sum_{i=0}^j \left(\frac{W_i-1}{2} \right), \quad 0 \leq j \leq R \quad (6.21)$$

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (6.18) και (6.20) υπολογίζεται η μέση καθυστέρηση $E[D_{1,i}]$ των πακέτων που μεταδόθηκαν επιτυχώς από το στάδιο 1, έχοντας όμως υποστεί μια σύγκρουση στο στάδιο μηδέν:

$$E[D_{1,i}] = T_s + i \cdot E[slot] + E[U_0], \quad 0 \leq i \leq W_1 - 1 \quad (6.22)$$

Τελικά, η μέση καθυστέρηση $E[D_{j,i}]$ για τα πακέτα που μεταδόθηκαν επιτυχώς από το στάδιο j και έχοντας επιλέξει την τιμή i στο στάδιο αυτό, δίνεται από τη σχέση (6.23).

$$E[D_{j,i}] = T_s + i \cdot E[slot] + E[U_{j-1}], \quad 0 \leq j \leq R \text{ και } 0 \leq i \leq W_j - 1 \quad (6.23)$$

όπου $E[U_{-1}] = 0$.

Η πιθανότητα ένας σταθμός να επιλέξει την τιμή i για τον μετρητή οπισθοχώρησης στο στάδιο j είναι $1/W_j$, επειδή ο σταθμός επιλέγει τυχαία και με ίση πιθανότητα από το εύρος $[0, W_j - 1]$. Οπότε, η πιθανότητα P_j όπου ένα πακέτο μεταδίδεται επιτυχώς, δεδομένου ότι το πακέτο δεν απορρίπτεται, από το στάδιο j επιλέγοντας την τιμή i για τον μετρητή οπισθοχώρησης σε αυτό το στάδιο, είναι:

$$P_j = \frac{(1-p)p^j}{1-p^{R+1}} \frac{1}{W_j}, \quad 0 \leq j \leq R \quad (6.24)$$

Στη συνέχεια, υπολογίζεται η μέση τιμή των τετραγώνων των καθυστερήσεων $E[D^2]$:

$$E[D^2] = \sum_{j=0}^R \left(\sum_{i=0}^{W_j-1} (E[D_{j,i}])^2 \cdot P_j \right) \quad (6.25)$$

και συνδυάζοντας τις σχέσεις (23) και (24), η σχέση (25) μετατρέπεται στην επόμενη:

$$E[D^2] = \sum_{j=0}^R \frac{(1-p)p^j}{1-p^{R+1}} \frac{1}{W_j} \sum_{i=0}^{W_j-1} (T_s + i \cdot E[slot] + E[U_{j-1}])^2 \quad (6.26)$$

όπου $E[U_{-1}] = 0$.

Τελικά, από τις σχέσεις (6.15) και (6.26) υπολογίζεται η τυπική απόκλιση J (jitter) των καθυστερήσεων των πακέτων:

$$J = \sqrt{E[D^2] - (E[D])^2} \quad (6.27)$$

Η διακύμανση της καθυστέρησης είναι J^2 .

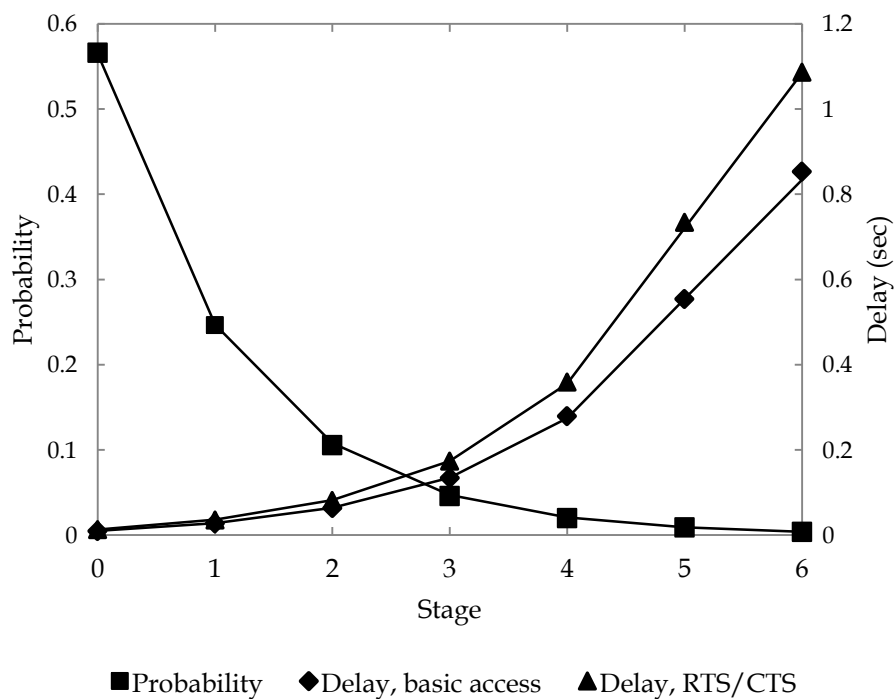
6.5 Ανάλυση Αποτελεσμάτων

Τα προτεινόμενα μοντέλα [6] επικυρώνονται με τη σύγκριση των αναλυτικών τους αποτελεσμάτων με αποτελέσματα από εξομοίωση. Οι τιμές των παραμέτρων, που χρησιμοποιήθηκαν και για την προσομοίωση και για τα αναλυτικά αποτελέσματα, ακολουθούν τις προδιαγραφές του Direct Spread Sequence Spectrum (DSSS), που χρησιμοποιείται στο πρωτόκολλο IEEE 802.11b, και αναγράφονται στον Πίνακα 6.1. Όλοι οι σταθμοί χρησιμοποιούν ένα σταθερό φορτίο για το πακέτο των δεδομένων, ίσο με 8184 bits, και μεταδίδουν με ταχύτητα $C=11$ Mbit/s.

Το Διάγραμμα 6.1 απεικονίζει την πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης ανά στάδιο και τη μέση καθυστέρηση των πακέτων ανά στάδιο, για τους μηχανισμούς basic access και RTS/CTS. Στο διάγραμμα, οι γραμμές είναι για τα αναλυτικά μοντέλα, ενώ τα σύμβολα για τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Όπως φαίνεται, τα μοντέλα για τη μέση καθυστέρηση πακέτων ανά στάδιο και της πιθανότητας επιτυχημένης αποστολής ανά στάδιο είναι ακριβείς, αφού τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και τα αποτελέσματα των αναλυτικών μοντέλων συμπίπτουν. Στο διάγραμμα φαίνεται η μείωση της πιθανότητας εκπομπής όσο τα στάδια αυξάνονται, και αυτό συμβαίνει επειδή χρειάζονται περισσότερες συγκρούσεις ώστε ένα πακέτο να μεταβεί σε υψηλότερα στάδια. Επίσης, η πιθανότητα μετάδοσης είναι ανεξάρτητη από το μηχανισμό διάδοσης, basic access ή RTS/CTS.

Παράμετροι	Τιμές
MAC header	224 bits at 11 Mbit/s
Physical header PHY	192 bits at 1 Mbit/s
ACK	112 bits at 11 Mbit/s + PHY
RTS	160 bits at 1 Mbit/s + PHY
CTS	112 bits at 1 Mbit/s + PHY
Propagation delay, δ	1 μ s
Slot time, σ	20 μ s
SIFS	10 μ s
DIFS	50 μ s
Minimum CW, w	32
Number of CW sizes, m	5
Retransmission limit, R	6

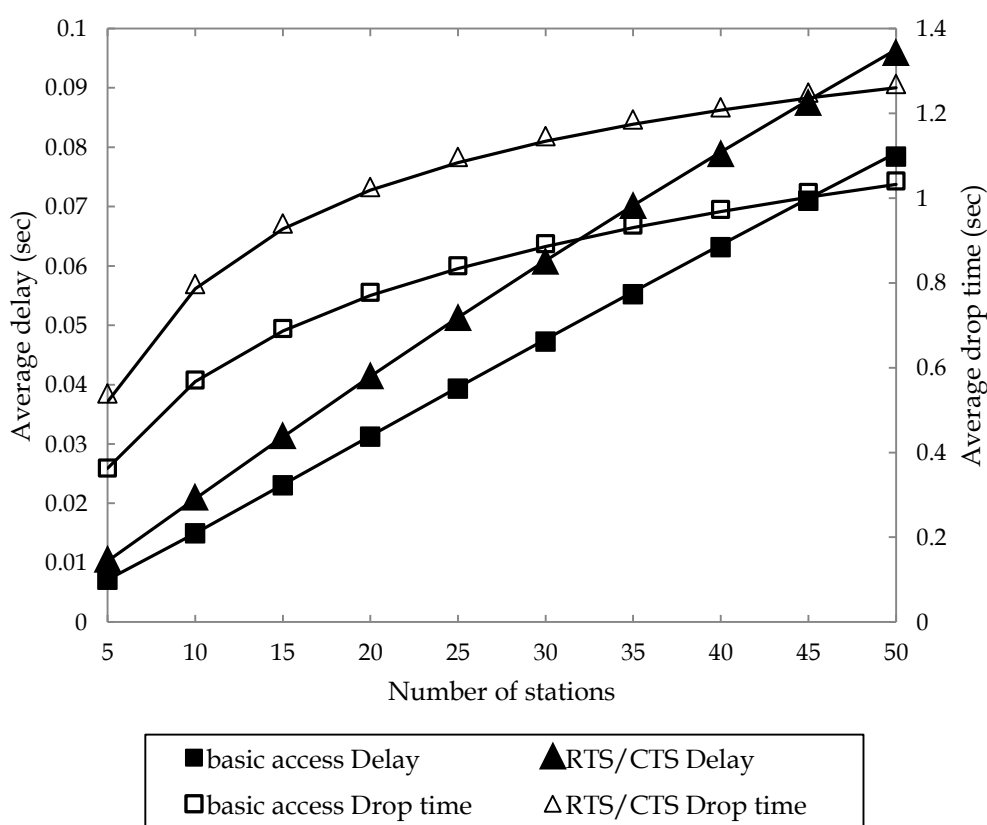
Πίνακας 6.1 Παράμετροι του DSSS συστήματος στο 802.11b.



Διάγραμμα 6.1. Μέση καθυστέρηση πακέτων ανά στάδιο και πιθανότητα εκπομπής ανά στάδιο για $n=25$.

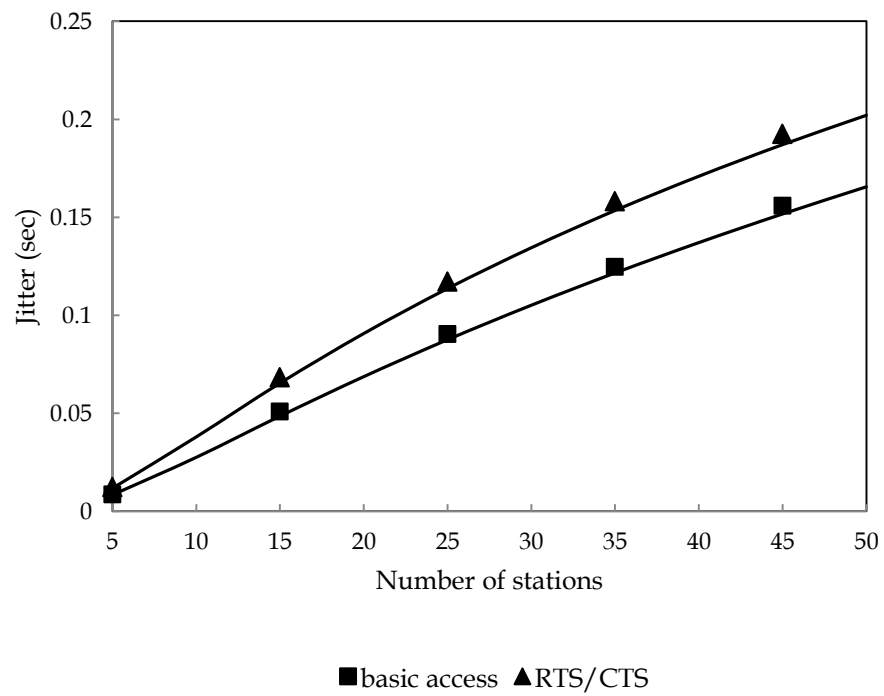
Το Διάγραμμα 6.2 απεικονίζει τη μέση καθυστέρηση επιτυχημένης μετάδοσης πακέτου (average packet delay) και το μέσο χρόνο απόρριψης πακέτου (average drop time) για

τους μηχανισμούς πρόσβασης στο μέσο basic access και RTS/CTS. Όπως και στο προηγούμενο διάγραμμα, οι γραμμές είναι τα αποτελέσματα των αναλυτικών μοντέλων, ενώ τα σύμβολα αναπαριστούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Όσο αυξάνεται ο αριθμός των σταθμών, τόσο αυξάνονται και οι συγκρούσεις, με αποτέλεσμα και την αύξηση της μέσης καθυστέρησης, όπως φαίνεται και από το Διάγραμμα 6.2. Επίσης, παρόλο που ο αριθμός των συγκρούσεων είναι μεγάλος όταν και το πλήθος των σταθμών είναι μεγάλο, η τεχνική basic access πετυχαίνει μικρότερη μέση καθυστέρηση και μικρότερο μέσο χρόνο απόρριψης πακέτων από την τεχνική RTS/CTS. Αυτό εξηγείτε από τους χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης των πακέτων RTS και CTS, Πίνακας 6.1, οι οποίοι προκαλούν σημαντικές καθυστερήσεις στην επικοινωνία.



Διάγραμμα 6.2. Μέση καθυστέρηση πακέτων και μέσος χρόνος απόρριψης πακέτου ως συνάρτηση των σταθμών.

Στο Διάγραμμα 6.3 απεικονίζεται η τυπική απόκλιση (Jitter) για τους δύο μηχανισμούς πρόσβασης στο μέσο, basic access και RTS/CTS, ως συνάρτηση των σταθμών. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα, όσο μεγαλώνει το πλήθος των σταθμών, τόσο αυξάνεται και η τυπική απόκλιση. Αυτό εξηγείται ως εξής. Όσο αυξάνονται οι σταθμοί τόσο αυξάνονται και οι συγκρούσεις. Τότε, οι σταθμοί χρησιμοποιούν μεγαλύτερα στάδια για να εκπέμψουν, με αποτέλεσμα να υπάρχουν μεγαλύτερες καθυστερήσεις. Οπότε, θα υπάρχει και μεγάλη ποικιλία στις καθυστερήσεις, που σημαίνει και μεγάλες αποκλίσεις.



Διάγραμμα 6.3. Η τυπική απόκλιση της καθυστέρησης των σταθμών ως συνάρτηση των σταθμών.

Κεφάλαιο 7

Χωρητικότητα Σταθμών Φωνής

Αυτό το κεφάλαιο είναι μια σύντμηση της εργασίας του Αμανατιάδη [1]. Αρχικά παρουσιάζονται αναλυτικά μοντέλα τα οποία περιγράφουν τη ρυθμαπόδοση κορεσμού, τη μέση καθυστέρηση πακέτων και την πιθανότητα απόρριψης πακέτου ώστε να γίνει εκτίμηση της κίνησης της φωνής σε ασύρματα δίκτυα, WLANS. Στη συνέχεια, εξετάζονται οι επιπτώσεις της καθυστέρησης, της τυπικής απόκλισης και της απόρριψης των πακέτων στην ποιότητα φωνής. Προτείνεται μια μεθοδολογία ώστε να αποφανθεί η χωρητικότητα φωνής για τα δίκτυα WLANS και μελετάται η επίδραση που έχει το διάστημα παραγωγής πακέτων και ο ρυθμός μετάδοσης στη χωρητικότητα φωνής για διάφορους κωδικοποιητές φωνής.

Η εργασία του Αμανατιάδη [1] στηρίζεται στο αναλυτικό μοντέλο του Wu [4] και στις μετρικές καθυστέρησης που παρουσιάζονται στην εργασία του Χατζημίσιου [3].

7.1 Βασικά Στοιχεία Του Μοντέλου

Η μελέτη που γίνεται στην εργασία του Αμανατιάδη [1] αφορά ασύρματο δίκτυο με ένα σταθερό αριθμό σταθμών και κάτω από ιδανικές συνθήκες, δηλαδή χωρίς λάθη στη

μετάδοση και χωρίς να υπάρχουν κρυμμένοι σταθμοί (hidden stations), επικρατούν συνθήκες κορεσμού, δηλαδή κάθε σταθμός έχει πάντα ένα πακέτο για αποστολή. Για αυτό το δίκτυο η πιθανότητα μετάδοσης τ , η πιθανότητα σύγκρουσης p και η ρυθμαπόδοση κορεσμού S έχουν υπολογιστεί στο Κεφάλαιο 4, το οποίο παρουσιάζει την εργασία του Wu [4]. Όμως οι χρόνοι T_c και T_s είναι διαφορετικοί στην εργασία του Αμανατιάδη [1] γιατί χρησιμοποιούνται οι παράμετροι του Direct Spread Sequence Spectrum (DSSS) και υπολογίζονται μόνο για τον μηχανισμό πρόσβασης στο μέσο Basic Access.

$$T_c^{bas} = DIFS + H/C + l/C + SIFS + ACK/C \quad (7.1)$$

$$T_s^{bas} = DIFS + H/C + l/C + SIFS + ACK/C \quad (7.2)$$

όπου C είναι ο ρυθμός μετάδοσης και H είναι η κεφαλίδα του πακέτου και ισούται με: $H = PHY_{dr} + MAC_{dr}$.

Επίσης, η εργασία του Αμανατιάδη [1] περιλαμβάνει την πιθανότητα απόρριψης πακέτου P_{drop} (packet drop probability) και τη μέση καθυστέρηση επιτυχημένης μετάδοσης πακέτων $E[D]$ (average packet delay), οι οποίες έχουν αναλυθεί στην εργασία του Χατζημίσιου [3].

7.2 Περιγραφή Δικτύου

Το ασύρματο δίκτυο που μελετάται [1] λειτουργεί κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις. Στο φυσικό κανάλι οι συνθήκες που επικρατούν είναι ιδανικές, δηλαδή, δεν υπάρχουν λάθη στη μετάδοση, ούτε κρυμμένοι σταθμοί (no hidden stations). Όλοι οι σταθμοί είναι σε κοντινή απόσταση ο ένας με τον άλλον, για αυτό η καθυστέρηση μετάδοσης είναι μικρή και μπορεί να παραβλεφτεί. Κάθε VoIP συνομιλία αποτελείται από δύο ασύρματους σταθμούς, οι οποίοι επικοινωνούν μεταξύ τους. Όλοι οι σταθμοί είναι εντός εμβέλειας και εκπέμπουν στο μέγιστο ρυθμό μετάδοσης (maximum data rate), χρησιμοποιώντας τον ίδιο κωδικοποιητή φωνής. Η χωρητικότητα φωνής μετράται σε συνθήκες κορεσμού, δηλαδή, όλοι οι σταθμοί έχουν πάντα ένα πακέτο έτοιμο για μετάδοση.

Η αρχική μορφή της φωνής είναι ένα αναλογικό σήμα. Για να γίνει εφικτή η μετάδοσή της θα πρέπει να ψηφιοποιηθεί. Αυτό επιτυγχάνεται με τη βοήθεια των κωδικοποιητών φωνής οι οποίοι μετατρέπουν το αναλογικό σήμα σε ψηφιακό. Η διαδικασία ψηφιοποίησης είναι οι εξής: α) δειγματοληψία β) κβαντισμός και γ) κωδικοποίηση. Στην ψηφιακή έξοδο του κωδικοποιητή υπάρχει μια συνεχόμενη ροή από bits (Constant-Bit-Rate, CBR) τα οποία ομαδοποιούνται για να δημιουργηθούν τα πακέτα φωνής. Το μέγεθος των πακέτων είναι προκαθορισμένο και είναι ανάλογο με το διάστημα της παραγωγής των πακέτων (packetization interval) που θα χρησιμοποιείται. Κάθε κλήση VoIP συνεπάγεται αμφίδρομη ροή πακέτων φωνής χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο Real-time Transport Protocol (RTP). Σε κάθε πακέτο επισυνάπτεται ένα πακέτο με μέγεθος 40 bytes, όπου είναι 12 bytes RTP, 8 bytes UDP και 20 bytes IP.

Ο Πίνακας 7.1 περιέχει τις κύριες παραμέτρους από τρεις ευρέως διαδεδομένους κωδικοποιητές. Οι διαφορετικοί κωδικοποιητές χρησιμοποιούν διαφορετικούς αλγόριθμους συμπίεσης, με αποτέλεσμα να υπάρχουν και διαφορετικοί ρυθμοί δεδομένων.

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

Πίνακας 7.1 Παράμετροι των κωδικοποιητών G.711, G.729 και G.723.1.

7.3 Μετρικές Ποιότητας

Το ανθρώπινο αυτί είναι ευαίσθητο σε χρονικές καθυστερήσεις μεγαλύτερες των 200ms. Έτσι, αν ένα πακέτο φωνής καθυστερήσει περισσότερο από 200 ms, θα πρέπει

να θεωρηθεί ως ένα χαμένο πακέτο. Επιπρόσθετα, ένα πακέτο απορρίπτεται όταν φτάσει στο όριο αναμετάδοσης του 802.11 DCF. Για να χαρακτηριστεί μια μετάδοση φωνής ποιοτικά αποδεκτή ή μη, χρησιμοποιούνται η μέση καθυστέρηση, η διακύμανση και η απόρριψη πακέτων. Ο Πίνακας 7.2 [1] καθορίζει τις προδιαγραφές για την ποιότητα υπηρεσιών (Quality of Services - QoS) της τηλεφωνίας μέσω διαδικτύου (VoIP).

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

Πίνακας 7.2 Προδιαγραφές της ποιότητας υπηρεσιών για την VoIP.

Στην εργασία του Αμανατιάδη [1] υπολογίζεται ο αριθμός των VoIP κλήσεων με καλή ποιότητα που μπορεί να υποστηρίξει ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο. Ορίζεται ως χωρητικότητα φωνής (voice capacity) ο μέγιστος αριθμός των συνεδριών φωνής (voice sessions) που πραγματοποιούνται ταυτόχρονα, σε καθορισμένα όρια ποιότητας. Ως μέτρο για τον υπολογισμό της χωρητικότητας φωνής χρησιμοποιείται η μέση καθυστέρηση πακέτων, η οποία θα πρέπει να είναι μικρότερη από το διάστημα παραγωγής πακέτων (packetization interval). Αν η καθυστέρηση είναι μεγαλύτερη, τότε ένα νέο πακέτο δημιουργείται και θα πρέπει να αποθηκευτεί ως τη στιγμή που θα έρθει η σειρά του να μεταδοθεί. Καθώς, λοιπόν, η καθυστέρηση είναι μεγάλη και νέα πακέτα δημιουργούνται και αποθηκεύονται, η ποιότητα φωνής μειώνεται.

7.4 Ανάλυση Αποτελεσμάτων

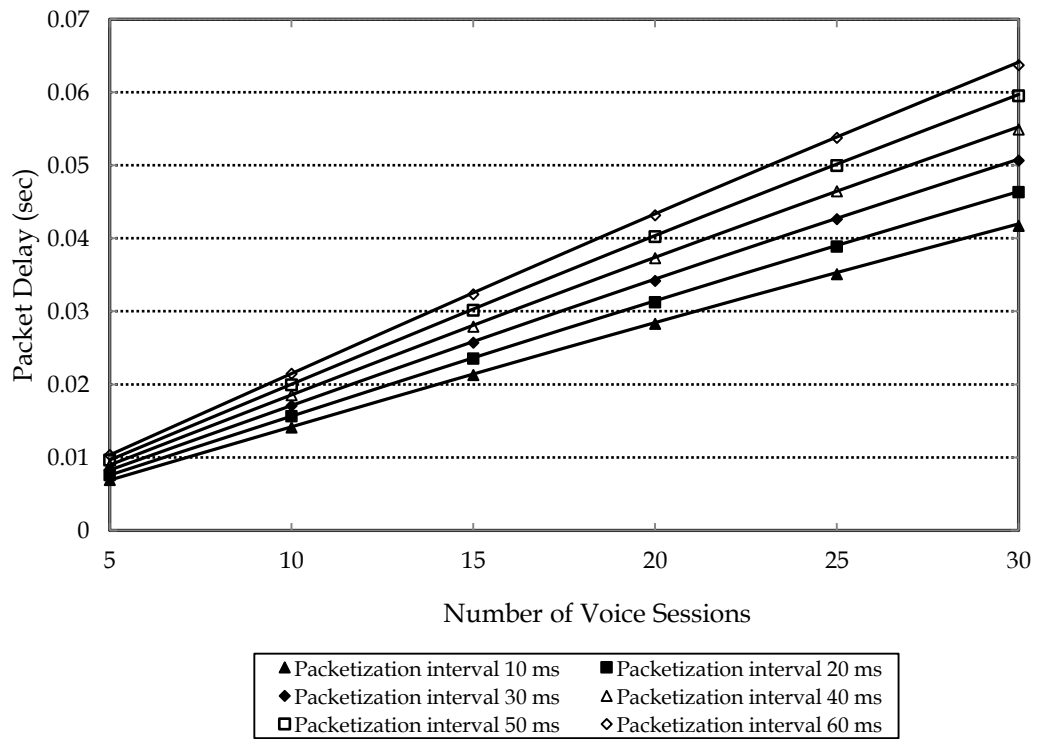
Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων του αναλυτικού μοντέλου, αλλά και της προσομοίωσης, έχουν ληφθεί από τις παραμέτρους του Direct Spread Sequence Spectrum (DSSS) που χρησιμοποιείται στο πρότυπο 802.11b, και αναγράφονται στον Πίνακα 7.3.

Παράμετροι	Τιμές
Slot	20 μ s
SIFS	10 μ s
DIFS=(2*slot+SIFS)	50 μ s
PHY layer header	192 bits (at 1Mbit/s)
MAC layer header + FCS	272 bits (at 1Mbit/s)
ACK packet	112 bits (at 1Mbit/s) +PHY layer header
CW _{min}	32
CW _{max}	1024
Number of CW sizes, m'	5
Retry limit	6
Packet payload	Depends on codec
Channel bit rate	11 Mbit/s

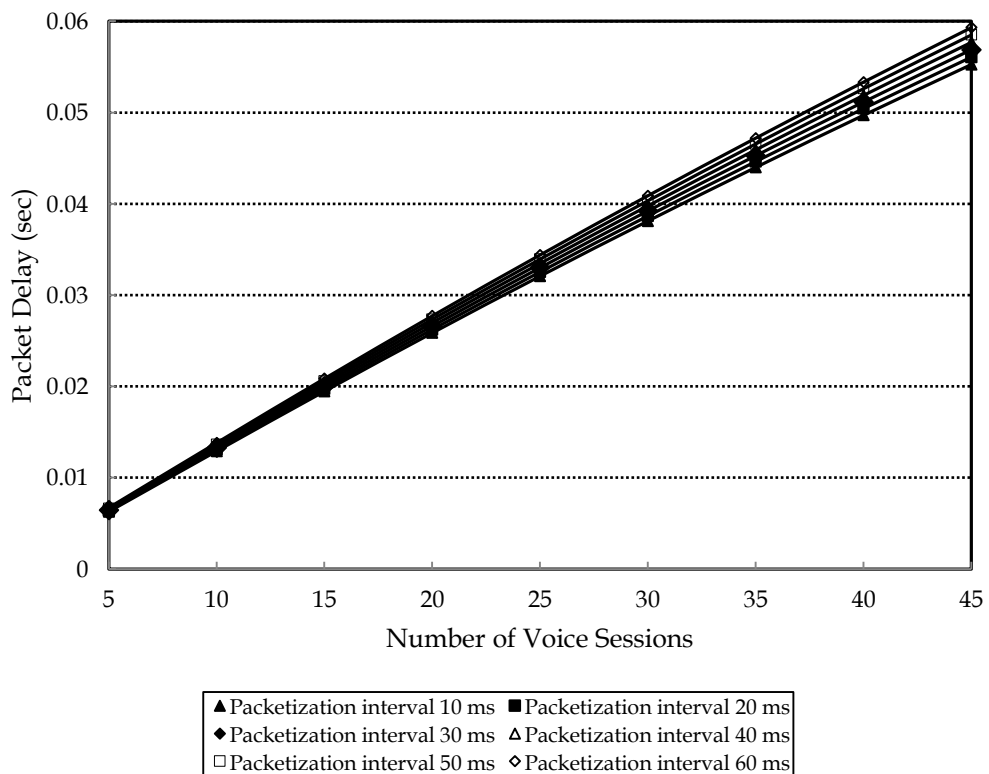
Πίνακας 7.3 Παράμετροι του DSSS συστήματος στο 802.11b.

Στο Διάγραμμα 7.1. απεικονίζεται η μέση καθυστέρηση πακέτων συναρτήσει των αριθμών συνεδριών της φωνής για διαφορετικά διαστήματα παραγωγής πακέτων (packetization intervals) που χρησιμοποιεί ο κωδικοποιητής G.711. Η χωρητικότητα φωνής, δηλαδή, ο μέγιστος αριθμός συνεδριών φωνής, υπολογίζεται στο σημείο όπου η μέση καθυστέρηση για συγκεκριμένο διάστημα παραγωγής πακέτων συναντά την οριζόντια γραμμή που έχει την τιμή του διαστήματος παραγωγής πακέτων (packetization interval). Τα αποτελέσματα της χωρητικότητας φωνής για τον κωδικοποιητή G.711 αναγράφονται στον Πίνακα 7.4.

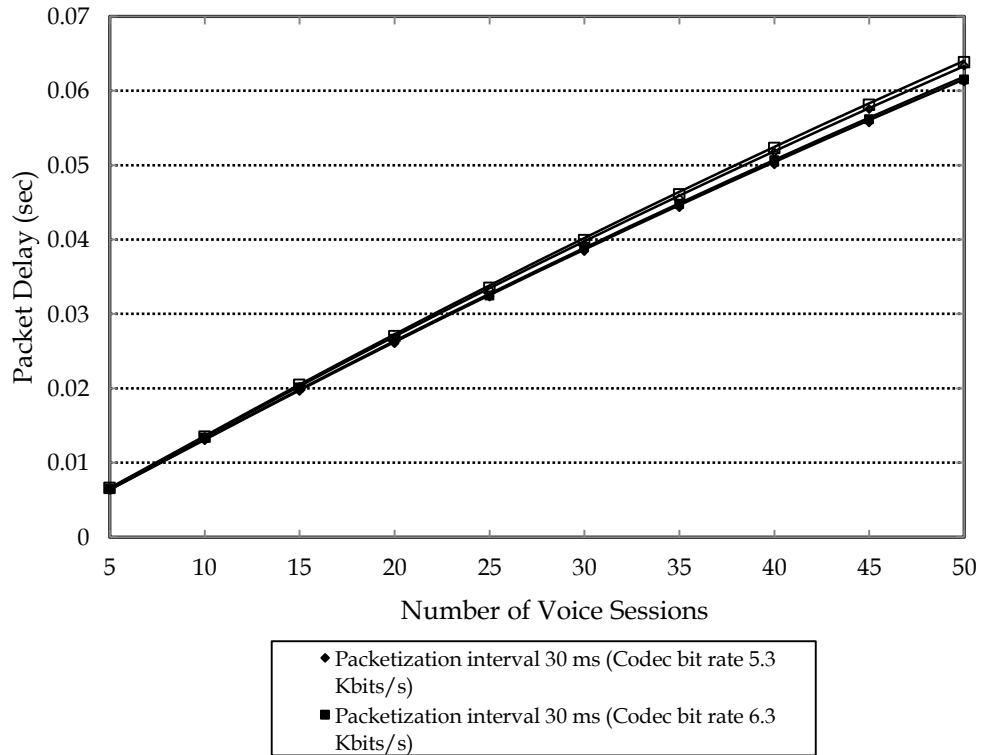
Στο Διάγραμμα 7.2. απεικονίζεται η μέση καθυστέρηση πακέτων συναρτήσει των αριθμών συνεδριών της φωνής για διαφορετικά διαστήματα παραγωγής πακέτων (packetization intervals) που χρησιμοποιεί ο κωδικοποιητής G.729. Από το διάγραμμα φαίνεται ότι για διαφορετικά διαστήματα παραγωγής πακέτων η μέση καθυστέρηση των πακέτων είναι περίπου ίδια και αυτό γιατί ενώ τα διαστήματα παραγωγής πακέτων αυξάνονται ανά 10 ms, το φορτίο της φωνής αυξάνεται μόνο ανά 10 bytes, Πίνακας 7.1. Για να υπολογιστεί η χωρητικότητα φωνής χρησιμοποιήθηκε η ίδια μεθοδολογία όπως και με τον κωδικοποιητή G.711 και τα αποτελέσματα αναγράφονται στον Πίνακα 7.4.



Διάγραμμα 7.1. Μέση καθυστέρηση ως συνάρτηση των σταθμών, με χρήση του κωδικοποιητή G.711 (C=11 Mbit/s).



Διάγραμμα 7.2. Μέση καθυστέρηση ως συνάρτηση των σταθμών, με χρήση του κωδικοποιητή G.729 (C=11 Mbit/s).



Διάγραμμα 7.3. Μέση καθυστέρηση ως συνάρτηση των σταθμών, με χρήση του κωδικοποιητή G.723.1 (C=11 Mbit/s).

Τέλος, το Διάγραμμα 7.3 απεικονίζει τη μέση καθυστέρηση των πακέτων συναρτήσει των αριθμών συνεδριών της φωνής για διαφορετικά διαστήματα παραγωγής πακέτων (packetization intervals) που χρησιμοποιεί ο κωδικοποιητής G.723.1 και οι τιμές της χωρητικότητας φωνής αναγράφεται στον Πίνακα 7.4

Packetization Interval	G.711	G.729	G.723.1
10 ms	6	7	
20 ms	12	14	
30 ms	16	21	21
40 ms	20	29	
50 ms	24	36	
60 ms	27	45	46

Πίνακας 7.4 Παράμετροι του DSSS συστήματος στο 802.11b.

Παρατηρείται ότι για μεγάλα διαστήματα παραγωγής πακέτων καταγράφονται μεγαλύτερες τιμές για τη χωρητικότητα φωνής. Αυτό φαίνεται πιο έντονα στον κωδικοποιητή G.711, όπου για διαφορετικά packetization interval τα φορτία των

πακέτων φωνής διαφέρουν περισσότερο σε μέγεθος, σε αντίθεση με τους κωδικοποιητές G.729 και G.723.1.

Κεφάλαιο 8

Υβριδικά Συστήματα

Οι εργασίες των Βούρκα [7] και Καλαθά [5] εξετάζουν υβριδικά συστήματα ασύρματων τοπικών δικτύων (WLANs). Συγκεκριμένα, οι εργασίες αυτές αναπτύσσουν αναλυτικά μοντέλα για τον υπολογισμό της κορεσμένης ρυθμαπόδοσης και της μέσης καθυστέρησης αποστολής πακέτων για τον μηχανισμό Distributed Coordination Function (DCF), των πρωτοκόλλων IEEE 802.11, με απώτερο σκοπό τον υπολογισμό της χωρητικότητας φωνής (voice capacity) του δικτύου. Τα υβριδικά ασύρματα συστήματα αποτελούνται από σταθμούς φωνής (voice stations), που μεταδίδουν πακέτα φωνής (voice packets) και από σταθμούς δεδομένων (data stations), που μεταδίδουν πακέτα δεδομένων (data packets). Στην εργασία του Βούρκα [7], οι σταθμοί φωνής μεταδίδουν με την τεχνική basic access και οι σταθμοί δεδομένων μεταδίδουν με την τεχνική RTS/CTS. Ενώ στην εργασία του Καλαθά [5] οι σταθμοί φωνής και οι σταθμοί δεδομένων μεταδίδουν με την τεχνική basic access.

8.1 Πρώτο Υβριδικό Μοντέλο

Για το υβριδικό ασύρματο δίκτυο που αναλύεται στην εργασία του Βούρκα [7], η πιθανότητα μετάδοσης τ , η πιθανότητα σύγκρουσης p και η ρυθμαπόδοση κορεσμού S έχουν υπολογιστεί

στο Κεφάλαιο 4. Αυτό που υπολείπεται να υπολογιστεί είναι ο μέσος χρόνος σύγκρουσης T_c , ο μέσος χρόνος επιτυχημένης αποστολής πακέτου T_s και η μέση τιμή για το φορτίο των πακέτων I . Επίσης, στην εργασία του Βούρκα [7] χρησιμοποιείται η μέση καθυστέρηση επιτυχημένης μετάδοσης πακέτων $E[D]$, όπως έχει υπολογιστεί από τον Χατζημίσιο [3] στο Κεφάλαιο 5.

8.1.1 Περιγραφή Δικτύου Και Παραδοχές

Το ασύρματο δίκτυο που μελετάται χρησιμοποιεί τον μηχανισμό Distributed Coordination Function (DCF), ο οποίος ορίζεται από το πρωτόκολλο IEEE 801.11 και έχουν γίνει οι παρακάτω παραδοχές:

6. Οι συνθήκες στο κανάλι είναι ιδανικές, δηλαδή, δεν υπάρχουν λάθη στη μετάδοση, ούτε κρυμμένοι σταθμοί (hidden stations).
7. Όλοι οι σταθμοί βρίσκονται σε κοντινές αποστάσεις μεταξύ τους, έτσι, οι καθυστερήσεις διάδοσης είναι πολύ μικρές και μπορούν να παραβλεφθούν.
8. Κάθε VoIP κλήση αποτελείται από δύο ασύρματους σταθμούς που επικοινωνούν.
9. Όλοι οι σταθμοί μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους και μεταδίδουν στον μέγιστο ρυθμό μετάδοσης (maximum data rate), χρησιμοποιώντας την ίδια κωδικοποίηση φωνής.
10. Η χωρητικότητα φωνής (voice capacity) μετράται σε συνθήκες κορεσμού, δηλαδή, όλοι οι σταθμοί έχουν πάντα ένα πακέτο έτοιμο για μετάδοση.
11. Όλα τα πακέτα δεδομένων έχουν σταθερό μέγεθος φορτίου.

8.1.2 Υβριδικό Σύστημα

Το υβριδικό σύστημα, όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, αποτελείται από σταθμούς φωνής, οι οποίοι μεταδίδουν πακέτα φωνής, και από σταθμούς δεδομένων, οι οποίοι μεταδίδουν πακέτα

δεδομένων. Συμβολίζεται με N_{data} το πλήθος των σταθμών δεδομένων και με N_{voice} το πλήθος των σταθμών φωνής. Οπότε, όλοι οι σταθμοί που αποτελούν το δίκτυο είναι σε αριθμό:

$$n = N = N_{data} + N_{voice} \quad (8.1)$$

Στο υβριδικό μοντέλο του Βούρκα [7] τα πακέτα φωνής, με φορτίο l_{voice} , μεταδίδονται χρησιμοποιώντας τον μηχανισμό basic access και τα πακέτα δεδομένων, με φορτίο l_{data} , μεταδίδονται χρησιμοποιώντας το μηχανισμό RTS/CTS.

Υπολογίζεται ο αριθμός των συνδυασμών ανά δύο για τους σταθμούς δεδομένων CM_{data} από την παρακάτω εξίσωση:

$$CM_{data} = \binom{N_{data}}{2} = \frac{N_{data}!}{2!(N_{data}-2)!} \quad (8.2)$$

Επίσης, ο αριθμός των συνδυασμών ανά δύο, για όλους τους σταθμούς, φωνής και δεδομένων, CM υπολογίζεται από:

$$CM = \binom{N}{2} = \frac{N!}{2!(N-2)!} \quad (8.3)$$

Από τις εξισώσεις (8.2) και (8.3) υπολογίζεται η πιθανότητα P_{data} , η οποία είναι για τη σύγκρουση όπου εμπλέκονται δύο σταθμοί δεδομένων.

$$P_{data} = \frac{CM_{data}}{CM} \quad (8.4)$$

Ας είναι P_{voice} η πιθανότητα όπου σε μια σύγκρουση υπάρχει ένα σταθμός φωνής και ένας σταθμός δεδομένων ή δύο σταθμοί δύο σταθμοί φωνής. Η πιθανότητα P_{voice} υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$P_{voice} = 1 - P_{data} \quad (8.5)$$

Δεδομένου ότι υπάρχει μια επιτυχημένη μετάδοση πακέτου, η πιθανότητα PS_{data} να αφορά αυτή η μετάδοση πακέτο δεδομένων υπολογίζεται από:

$$PS_{data} = \frac{N_{data}}{N} \quad (8.6)$$

Αν υπάρχει επιτυχημένη μετάδοση, PS_{voice} είναι η πιθανότητα αυτή η μετάδοση να είναι από ένα σταθμό φωνής και δίνεται από:

$$PS_{voice} = 1 - PS_{data} \quad (8.7)$$

Ορίζεται ως $RTPUDPIP$ το επιπρόσθετο φορτίο (overloading) για τα πακέτα φωνής, λόγω των πρωτοκόλλων RTP , UDP και IP , το οποίο δίνεται από:

$$RTPUDPIP = RTP + UDP + IP \quad (8.8)$$

Οι τιμές των T_c και T_s εξαρτώνται από το μηχανισμό πρόσβασης στο κανάλι που χρησιμοποιείται. T_c^{data} είναι η χρονική διάρκεια μιας σύγκρουσης μεταξύ δύο σταθμών δεδομένων. Ενώ ο χρόνος T_c^{voice} αναφέρεται στη διάρκεια μιας σύγκρουσης μεταξύ δύο σταθμών φωνής ή μεταξύ ενός σταθμού φωνής και ενός σταθμού δεδομένων. Όταν συγκρούεται ένα πακέτο φωνής και ένα πακέτο δεδομένων υπολογίζεται ως η διάρκεια της σύγκρουσης ο χρόνος T_c^{voice} και αυτό γιατί είναι μεγαλύτερος από τον χρόνο T_c^{data} , εξαιτίας της διαφορετικής τεχνικής πρόσβασης στο μέσο και του φορτίου των πακέτων φωνής l_{voice} . Οι χρόνοι T_c^{data} και T_c^{voice} δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$T_c^{data} = DIFS + RTS + SIFS + CTS \quad (8.9)$$

$$T_c^{voice} = DIFS + H + RTPUDPIP + \frac{l_{voice}}{c} + SIFS + ACK \quad (8.10)$$

Στη συνέχεια, υπολογίζονται οι χρόνοι T_s^{data} και T_s^{voice} οι οποίοι είναι για τη χρονική διάρκεια όπου το μέσο είναι απασχολημένο κατά τη διάρκεια μιας επιτυχημένης μετάδοσης πακέτου δεδομένων και για τη χρονική διάρκεια όπου το μέσο είναι απασχολημένο κατά τη διάρκεια επιτυχημένης μετάδοσης πακέτου φωνής αντίστοιχα:

$$T_s^{data} = DIFS + RTS + SIFS + CTS + SIFS + H + \frac{l_{data}}{c} + SIFS + ACK \quad (8.11)$$

$$T_s^{voice} = DIFS + H + RTPUDPIP + \frac{l_{voice}}{c} + SIFS + ACK \quad (8.12)$$

Τελικά, από τις εξισώσεις (8.6), (8.7), (8.9), (8.10), (8.11) και (8.12) υπολογίζονται οι όροι των T_c , T_s και l :

$$T_s = PS_{data} \cdot T_s^{data} + PS_{voice} \cdot T_s^{voice} \quad (8.13)$$

$$T_c = P_{data} \cdot T_c^{data} + P_{voice} \cdot T_c^{voice} \quad (8.14)$$

$$l = PS_{voice} \cdot l_{voice} + PS_{data} \cdot l_{data} \quad (8.15)$$

8.1.3 Χωρητικότητα Φωνής

Ο στόχος της εργασίας του Βούρκα [7] είναι ο υπολογισμός της χωρητικότητας της φωνής. Χωρητικότητα φωνής ορίζεται ως ο μέγιστος αριθμός συνεδριών, που μπορούν να υπάρξουν ταυτόχρονα χωρίς να πέφτει η ποιότητα κάτω από συγκεκριμένα επίπεδα. Αρχικά, θα υπολογιστεί η ρυθμαπόδοση κορεσμού S_{voice} για όλους τους σταθμούς φωνής. Η ρυθμαπόδοση κορεσμού S , όπως έχει υπολογιστεί στο Κεφάλαιο 4, δίνεται από τη παρακάτω σχέση:

$$S = \frac{P_s P_{tr} l}{(1 - P_{tr})\sigma + P_{tr} P_s T_s + P_{tr} (1 - P_s) T_c} \quad (8.16)$$

Ως τώρα, σε αυτό το κεφάλαιο, έχουν υπολογιστεί τα T_c , T_s και l , ενώ οι υπόλοιποι όροι της σχέσης (8.16) είναι γνωστοί από το Κεφάλαιο 4. Οπότε, από τις εξισώσεις (8.7), (8.13), (8.14), (8.15) και (8.16) υπολογίζεται η ρυθμαπόδοση κορεσμού S_{voice} όλων των σταθμών φωνής:

$$S_{voice} = \frac{PS_{voice} P_{tr} P_s l_{voice}}{(1 - P_{tr})\sigma + P_{tr} P_s T_s + P_{tr} (1 - P_s) T_c} \quad (8.17)$$

Η ρυθμαπόδοση κορεσμού ενός σταθμού φωνής S_{single} υπολογίζεται διαιρώντας τη ρυθμαπόδοση S_{voice} με το πλήθος των σταθμών φωνής N_{voice} :

$$S_{single} = S_{voice} / N_{voice} \quad (8.18)$$

Αν είναι T_{pck} το διάστημα παραγωγής των πακέτων φωνής (packetization interval), τότε η ρυθμαπόδοση ενός σταθμού φωνής S_{singe} θα πρέπει να είναι ίση ή μεγαλύτερη της τιμής S_{limit} , η οποία αποτελεί το όριο ώστε πάνω από αυτή τη τιμή η ποιότητα να παραμένει σε ικανοποιητικά επίπεδα. Αν η ρυθμαπόδοση ενός σταθμού φωνής υπερβαίνει αυτό το κατώφλι, τότε, η ποιότητα της μεταδιδόμενης φωνής είναι αποδεκτή.

Η S_{limit} υπολογίζεται ως εξής:

$$S_{limit} = l_{voice} / T_{pck} \quad (8.19)$$

και θα πρέπει να είναι:

$$S_{singe} \geq S_{limit} \quad (8.20)$$

8.1.4 Ανάλυση Αποτελεσμάτων

Όλα τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην εργασία του Βούρκα [7] έχουν ληφθεί χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους του Direct Spread Sequence Spectrum (DSSS) που χρησιμοποιείται στο πρότυπο IEEE 802.11b, Πίνακας 8.1. Η μαθηματική ανάλυση για το υβριδικό σύστημα που παρουσιάζεται στην εργασία του Βούρκα [7] επικυρώνεται συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του μαθηματικού μοντέλου με τα αποτελέσματα προσομοίωσης. Σε όλα τα διαγράμματα που ακολουθούν τα αποτελέσματα του αναλυτικού μοντέλου αποτυπώνονται με γραμμές, ενώ, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με σύμβολα.

Ο Πίνακας 8.2 παρουσιάζει τις κύριες παραμέτρους τριών ευρέως χρησιμοποιούμενων κωδικοποιητών φωνής. Όπως φαίνεται και από τον πίνακα, για διαφορετικά διαστήματα παραγωγής πακέτων (packetization intervals) δημιουργούνται και διαφορετικά μεγέθη πακέτων φωνής. Για τα διαγράμματα που δημιουργήθηκαν σε αυτό το υβριδικό σύστημα [7] έχουν χρησιμοποιηθεί και οι τρεις κωδικοποιητές φωνής (G.711, G.729, G.723.1) και κάποια από τα διαστήματα παραγωγής πακέτων. Συγκριμένα, για τον κωδικοποιητή G.711 χρησιμοποιήθηκε το διάστημα 20 ms, όπως και για τον κωδικοποιητή G.729. Για τον κωδικοποιητή G.723.1, ο οποίος έχει δύο ρυθμούς κωδικοποίησης (codec bit rate), στα 6.3 Kbits/s έχουν χρησιμοποιηθεί τα διαστήματα 30 ms και 60 ms.

Παράμετροι	Τιμές
Dada packet	8184 bits
Slot, σ	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 1Mbps +PHY at 1Mbps
MAC layer header	224 bits
H (packet header)	224 bits MAC data at 11Mbps +PHY at 1Mbps
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

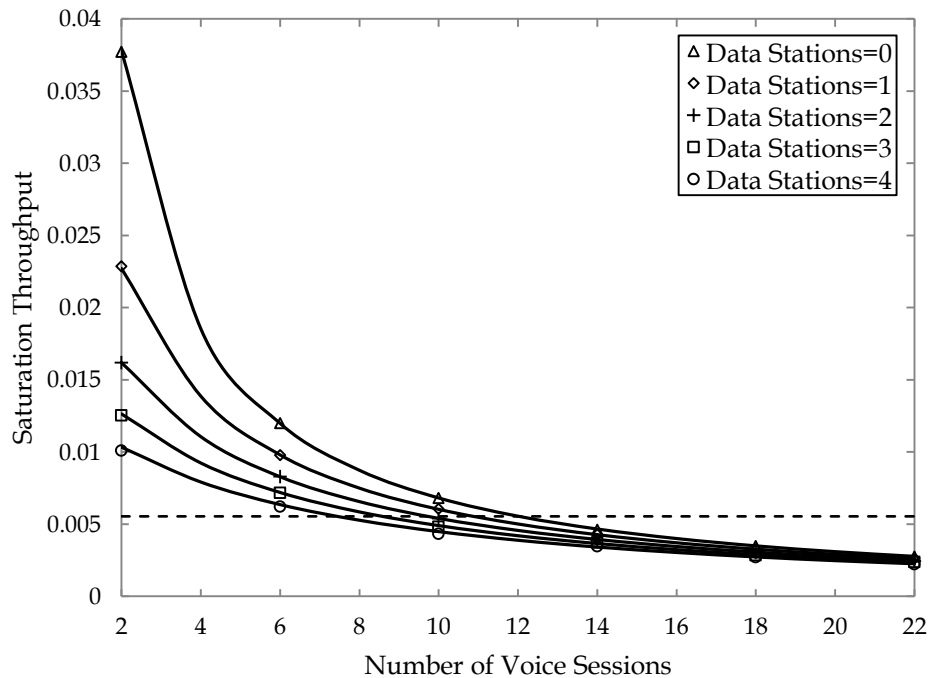
Πίνακας 8.1. Οι παράμετροι για το DSSS.

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

Πίνακας 8.2. Παράμετροι των κωδικοποιητών G.711, G729 και G.723.1.

Το Διάγραμμα 8.1 απεικονίζει τη ρυθμαπόδοση ενός σταθμού φωνής, με ή χωρίς σταθμούς δεδομένων, για τον κωδικοποιητή φωνής G.711. Η διακεκομμένη οριζόντια

γραμμή στο διάγραμμα είναι η τιμή για το όριο S_{limit} , το οποίο υπολογίζεται από τη σχέση (8.19) και είναι ίσο με 0.00554. Οπότε, η χωρητικότητα φωνής (voice capacity) υπολογίζεται στο σημείο που η οριζόντια γραμμή, S_{limit} , τέμνει την καμπύλη της ρυθμαπόδοσης. Τα αποτελέσματα της χωρητικότητας για τον κωδικοποιητή G.711 και για διάστημα παραγωγής πακέτων 20 ms, αλλά και για τις άλλες περιπτώσεις που θα εξεταστούν στη συνέχεια, αναγράφονται στον Πίνακα 8.3. Το μέγεθος των πακέτων φωνής είναι 160 bytes.

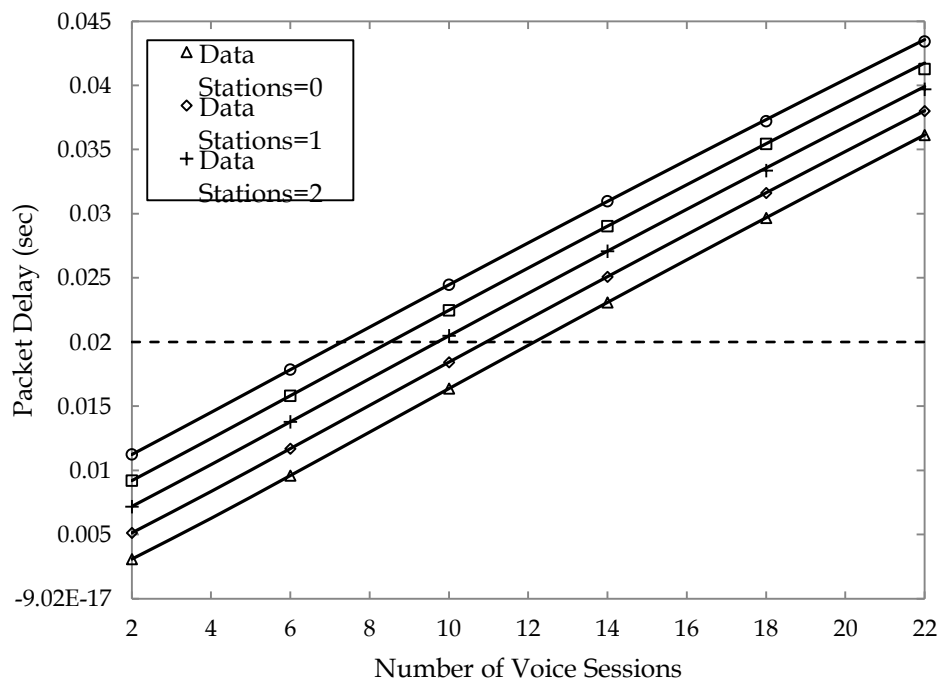


Διάγραμμα 8.1. Χωρητικότητα φωνής για τον κωδικοποιητή G.711, με διάστημα παραγωγής πακέτων 20ms και φορτίο 160 bytes.

Data stations	Voice sessions				
	G.711	G.711 Packet delay	G.729	G.723.1	G.723.1
	interval 20 ms	interval 20 ms	interval 20 ms	interval 30 ms	interval 60 ms
0	12	12	13	19	34
1	10	10	12	18	33
2	9	9	11	17	32
3	8	8	9	15	30
4	7	7	8	14	29

Πίνακας 8.3. Χωρητικότητα φωνής για τους κωδικοποιητές G.711, G.729 και G.723.1

Το Διάγραμμα 8.2 απεικονίζει τη μέση καθυστέρηση πακέτων, ως συνάρτηση των συνεδριών φωνής (voice sessions), με ή χωρίς σταθμούς δεδομένων, για τον κωδικοποιητή φωνής G.711. Η χωρητικότητα φωνής αναγράφεται στον Πίνακα 8.3 και έχει υπολογιστεί στο σημείο όπου η μέση καθυστέρηση συναντά την οριζόντια γραμμή, η οποία έχει τη τιμή του διαστήματος παραγωγής πακέτων 20 ms.

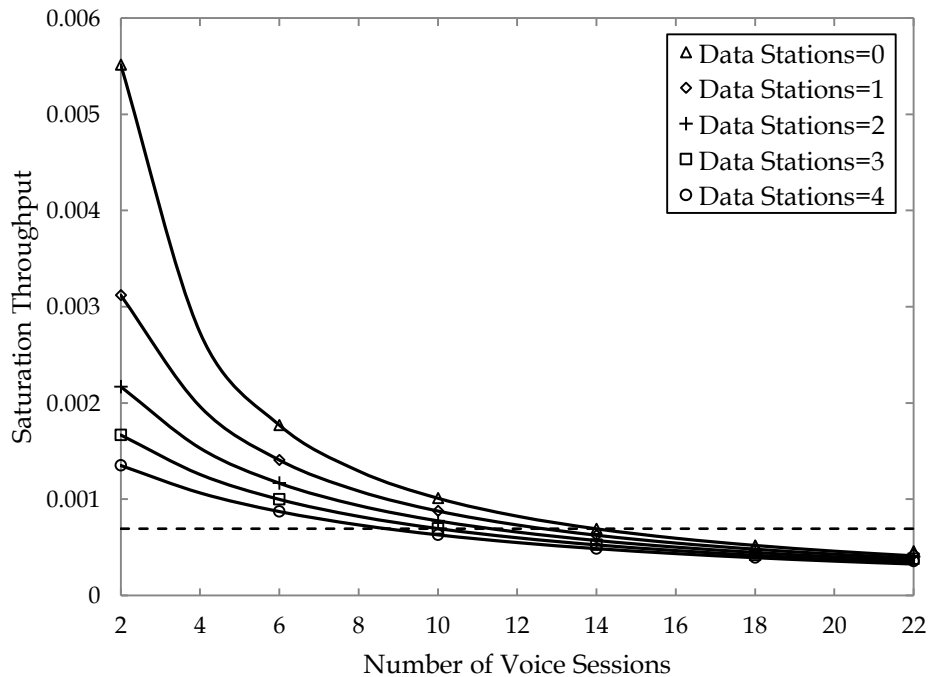


Διάγραμμα 8.2. Χωρητικότητα φωνής, υπολογιζόμενη από τη μέση καθυστέρηση, για τον κωδικοποιητή G.711, με διάστημα παραγωγής πακέτων 20ms και φορτίο 160 bytes.

Το Διάγραμμα 8.3 απεικονίζει τη ρυθμαπόδοση ενός σταθμού φωνής, με ή χωρίς σταθμούς δεδομένων, για τον κωδικοποιητή φωνής G.729. Το διάστημα παραγωγής πακέτων είναι 20 ms και το μέγεθος των πακέτων φωνής διαμορφώνεται στα 20 bytes. Τα αποτελέσματα της χωρητικότητας φωνής αναγράφονται στον Πίνακα 8.3 και έχουν υπολογιστεί από την τομή των καμπυλών της μέσης καθυστέρησης με το όριο S_{limit} που απεικονίζεται με την οριζόντια γραμμή. Για αυτήν την περίπτωση, το όριο S_{limit} έχει την τιμή 0.0006935.

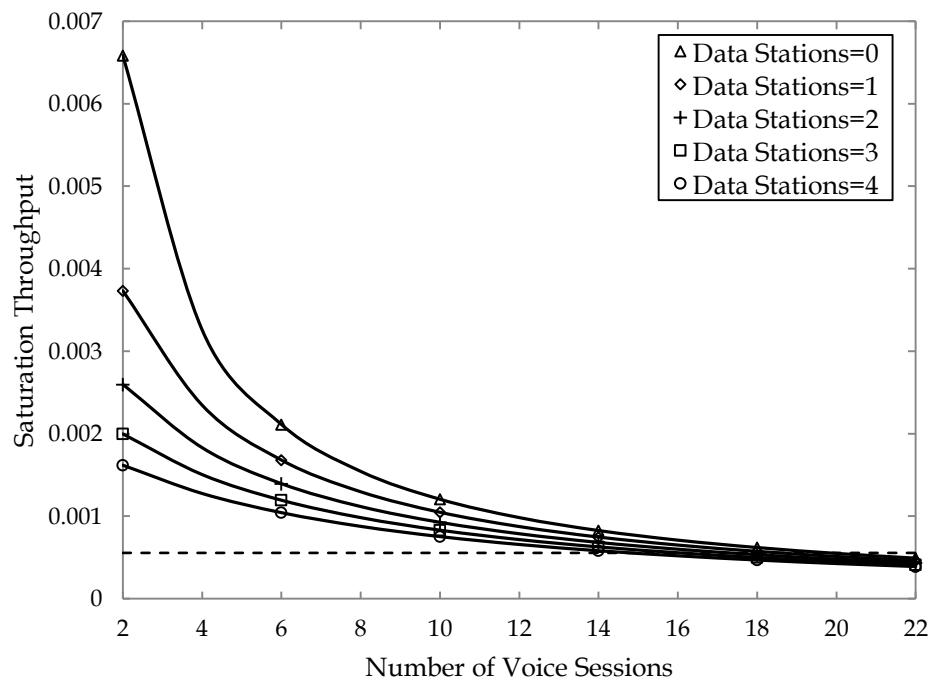
Τα Διαγράμματα 8.4 και 8.5 απεικονίζουν τη ρυθμαπόδοση ενός σταθμού φωνής, με ή χωρίς σταθμούς δεδομένων, για τον κωδικοποιητή φωνής G.723.1 και τα διαστήματα παραγωγής πακέτων που χρησιμοποιούνται είναι 30 ms και 60 ms αντίστοιχα. Έτσι, τα φορτία των πακέτων φωνής διαμορφώνονται στα 24 bytes και 48 bytes. Και για τις δύο

περιπτώσεις, η χωρητικότητα φωνής αναγράφεται στον Πίνακα 8.3 και υπολογίζεται στο σημείο όπου η καμπύλη της ρυθμαπόδοσης τέμνει την οριζόντια γραμμή. Και για τα δύο διαγράμματα η οριζόντια γραμμή, δηλαδή το όριο S_{limit} , είναι ίση με τη τιμή 0.0005548.

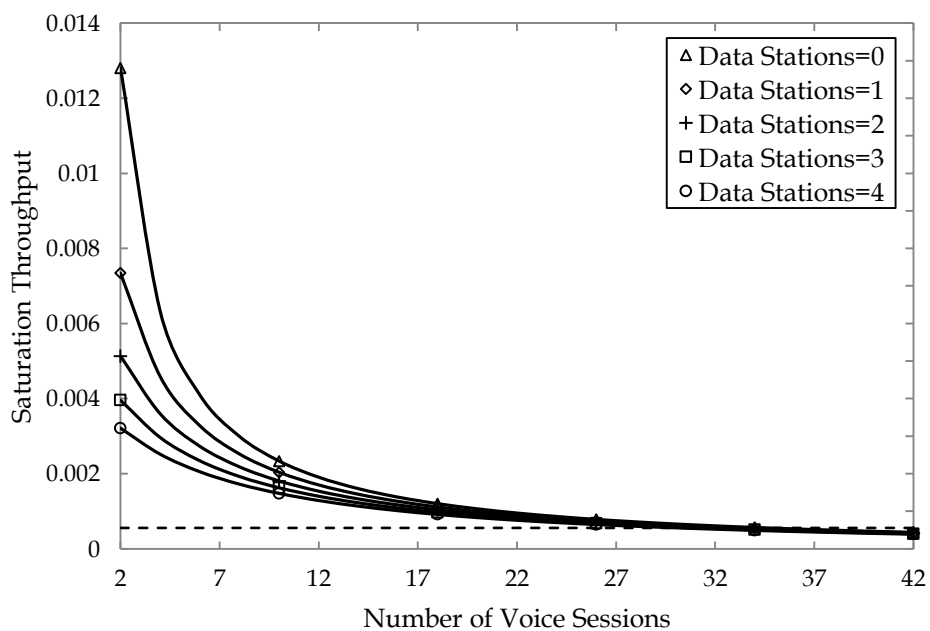


Διάγραμμα 8.3. Χωρητικότητα φωνής για τον κωδικοποιητή G.729, με διάστημα παραγωγής πακέτων 20ms και φορτίο 20 bytes.

Τα αποτελέσματα από τα δύο πρώτα διαγράμματα, Διάγραμμα 8.1 και 8.2, για τη χωρητικότητα φωνής είναι τα ίδια, Πίνακας 8.3. Δηλαδή, δύο διαφορετικές μέθοδοι υπολογισμού της χωρητικότητας φωνής οδήγησαν στα ίδια αποτελέσματα, οπότε, το μαθηματικό μοντέλο για αυτό το υβριδικό σύστημα [7] θεωρείται αξιόπιστο. Επίσης, παρατηρείται ότι η χωρητικότητα φωνής μειώνεται ανά μια ή δύο συνεδρίες φωνής, καθώς οι σταθμοί δεδομένων αυξάνονται ανά ένας, Πίνακας 8.3.



Διάγραμμα 8.4. Χωρητικότητα φωνής για τον κωδικοποιητή G.723.1, με διάστημα παραγωγής πακέτων 30ms και φορτίο 24 bytes.



Διάγραμμα 8.5. Χωρητικότητα φωνής για τον κωδικοποιητή G.723.1, με διάστημα παραγωγής πακέτων 60ms και φορτίο 48 bytes.

8.2 Δεύτερο Υβριδικό Μοντέλο

Στην εργασία του Καλαθά [5] παρουσιάζεται ένα διαφορετικό υβριδικό μοντέλο από αυτό που μελετήθηκε στην Παράγραφο 8.1. Οπότε οι μαθηματικές σχέσεις που περιγράφουν τους όρους T_c, T_s και η μέση τιμή για το φορτίο των πακέτων l για το υβριδικό σύστημα του Καλαθά [5], με σταθμούς φωνής και σταθμούς δεδομένων να μεταδίδουν ταυτόχρονα, υπολογίζονται με διαφορετικό τρόπο.

8.2.1 Περιγραφή Δικτύου Και Παραδοχές

Το ασύρματο δίκτυο που παρουσιάζεται εδώ λειτουργεί χρησιμοποιώντας το μηχανισμό Distributed Coordination Function (DCF) ο οποίος ορίζεται από το πρωτόκολλο IEEE 801.11. Για αυτό το δίκτυο έχουν γίνει οι παρακάτω παραδοχές:

1. Οι συνθήκες στο κανάλι είναι ιδανικές, δηλαδή δεν υπάρχουν λάθη στη μετάδοση, ούτε κρυμμένοι σταθμοί (no hidden stations).
2. Το δίκτυο λειτουργεί σε συνθήκες κορεσμού, δηλαδή όλοι οι σταθμοί έχουν πάντα ένα πακέτο έτοιμο για μετάδοση.
3. Το δίκτυο αποτελείται από σταθμούς φωνής και σταθμούς δεδομένων. Οι σταθμοί φωνής μεταδίδουν μόνο πακέτα φωνής, ενώ οι σταθμοί δεδομένων μεταδίδουν μόνο πακέτα δεδομένων.
4. Η καθυστέρηση διάδοσης (δ) είναι θεωρείται πολύ μικρή και μπορεί να παραβλεφθεί. Αυτή η παραδοχή είναι έγκυρη επειδή οι αποστάσεις όλων των σταθμών είναι κοντινές.
5. Το μέγεθος των πακέτων δεδομένων είναι σταθερό.
6. Όλοι οι σταθμοί μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους και εκπέμπουν στον ίδιο ρυθμό μετάδοσης (data rate) χρησιμοποιώντας τον ίδιο κωδικοποιητή φωνής.
7. Κάθε VoIP κλήση (voice session) αποτελείται από δύο ασύρματους σταθμούς που επικοινωνούν.

8.2.2 Υβριδικό Σύστημα

Αρχικός στόχος της ανάλυσης του υβριδικού μοντέλου που παρουσιάζεται στην εργασία του Καλαθά [5] είναι ο υπολογισμός των όρων T_c , T_s και I . Ο αριθμός των σταθμών δεδομένων συμβολίζεται με N_{data} και ο αριθμός των σταθμών φωνής με N_{voice} , ενώ το πλήθος όλων των σταθμών n υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$n = N = N_{data} + N_{voice} \quad (8.21)$$

Για το συγκεκριμένο υβριδικό μοντέλο [5], τα πακέτα φωνής, με φορτίο l_{voice} , μεταδίδονται χρησιμοποιώντας το μηχανισμό basic access του DCF και τα πακέτα δεδομένων, με φορτίο l_{data} , μεταδίδονται χρησιμοποιώντας τον ίδιο μηχανισμό, δηλαδή τον basic access.

Ο αριθμός όλων των πιθανών ζευγαριών των σταθμών φωνής CM_{voice} μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$CM_{voice} = \binom{N_{voice}}{2} = \frac{N_{voice}!}{2!(N_{voice}-2)!} \quad (8.22)$$

Στη συνέχεια, υπολογίζεται ο αριθμός των πιθανών ζευγαριών όλων των σταθμών CM :

$$CM = \binom{n}{2} = \frac{n!}{2!(n-2)!} \quad (8.23)$$

Από τις εξισώσεις (8.22) και (8.32) μπορεί να υπολογιστεί η πιθανότητα P_{voice} , η οποία είναι η πιθανότητα σε μια σύγκρουση να εμπλέκονται δύο σταθμοί φωνής:

$$P_{voice} = \frac{CM_{voice}}{CM} \quad (8.24)$$

Η πιθανότητα P_{data} να συμμετέχουν σε μια σύγκρουση ένας σταθμός φωνής και ένας σταθμός δεδομένων ή δύο σταθμοί φωνής, δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$P_{data} = 1 - P_{voice} \quad (8.25)$$

Αν ένα πακέτο μεταδοθεί επιτυχώς, η πιθανότητα PS_{voice} το μεταδιδόμενο πακέτο να είναι ένα πακέτο φωνής, μπορεί να υπολογιστεί από:

$$PS_{voice} = \frac{N_{voice}}{n} \quad (8.26)$$

Αν ένα πακέτο μεταδοθεί επιτυχώς, η πιθανότητα PS_{data} το μεταδιδόμενο πακέτο να είναι ένα πακέτο δεδομένων είναι:

$$PS_{data} = 1 - PS_{voice} \quad (8.27)$$

Η κεφαλίδα των πακέτων φωνής $RTPUDPIP$ λόγω των πρωτοκόλλων RTP , UDP και IP , υπολογίζεται να είναι:

$$RTPUDPIP = RTP + UDP + IP \quad (8.28)$$

Με T_C^{voice} συμβολίζεται η χρονική διάρκεια μιας σύγκρουσης μεταξύ δύο σταθμών φωνής. Ενώ ο χρόνος T_C^{data} είναι για τη διάρκεια μιας σύγκρουσης μεταξύ δύο σταθμών δεδομένων ή μεταξύ ενός σταθμού φωνής και ενός σταθμού δεδομένων. Όταν συγκρούεται ένα πακέτο φωνής και ένα πακέτο δεδομένων υπολογίζεται ως η διάρκεια της σύγκρουσης ο χρόνος T_C^{data} και αυτό γιατί είναι μεγαλύτερος από τον χρόνο T_C^{voice} , εξαιτίας του μεγαλύτερου μεγέθους των πακέτων δεδομένων l_{data} συγκριτικά με αυτό των πακέτων φωνής l_{voice} . Οι χρόνοι T_C^{data} και T_C^{voice} δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$T_C^{data} = DIFS + H + l_{data}/C + SIFS + ACK \quad (8.29)$$

$$T_C^{voice} = DIFS + H + RTPUDPIP/C + l_{voice}/C + SIFS + ACK \quad (8.30)$$

Επίσης, ο χρόνος T_S^{data} είναι για τη χρονική διάρκεια όπου το μέσο είναι απασχολημένο κατά τη διάρκεια μιας επιτυχημένης μετάδοσης πακέτου δεδομένων, ενώ, ο χρόνος T_S^{voice} είναι για τη χρονική διάρκεια όπου το μέσο είναι απασχολημένο κατά τη διάρκεια επιτυχημένης μετάδοσης πακέτου φωνής:

$$T_S^{data} = DIFS + H + l_{data}/C + SIFS + ACK \quad (8.31)$$

$$T_S^{voice} = DIFS + H + RTPUDPIP/C + l_{voice}/C + SIFS + ACK \quad (8.32)$$

Τώρα, οι χρόνοι T_c και T_s μπορούν να υπολογιστούν από τις εξισώσεις (8.22) έως (8.32) και είναι:

$$T_S = PS_{data} \cdot T_S^{data} + PS_{voice} \cdot T_S^{voice} \quad (8.33)$$

$$T_C = P_{data} \cdot T_C^{data} + P_{voice} \cdot T_C^{voice} \quad (8.34)$$

Τέλος, η μέση τιμή για το μέγεθος του φορτίου που μεταδίδεται επιτυχώς είναι:

$$l = PS_{voice} \cdot l_{voice} + PS_{data} \cdot l_{data} \quad (8.35)$$

8.2.3 Χωρητικότητα Φωνής

Ο τρόπος υπολογισμού της χωρητικότητας φωνής στην εργασία του Καλαθά [5] είναι κοινοί με αυτούς που παρουσιάζονται στην Παράγραφο 8.1 [7].

Αρχικά, υπολογίζεται η ρυθμαπόδοση κορεσμού S_{voice} για όλους τους σταθμούς φωνής:

$$S_{voice} = \frac{PS_{voice}P_{tr}P_S l_{voice}}{(1-P_{tr})\sigma + P_{tr}P_S T_S + P_{tr}(1-P_S)T_C} \quad (8.36)$$

Η σχέση (8.36) είναι ίδια με τη σχέση (8.17), με την διαφορά ότι οι χρόνοι T_c, T_s και η μέση τιμή για το φορτίο των πακέτων l υπολογίζονται από τις σχέσεις (8.33), (8.34) και (8.35).

Επομένως, για να υπολογιστεί η ρυθμαπόδοση κορεσμού ενός σταθμού φωνής S_{singe} , σχέση (8.18), θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση του ορίου S_{limit} , σχέση (8.19). Δηλαδή, αν ισχύει $S_{singe} \geq S_{limit}$, τότε, η ποιότητα της μεταδιδόμενης φωνής είναι αποδεκτή.

Η χωρητικότητα φωνής στην Παράγραφο 8.1 υπολογίζεται και με έναν άλλον τρόπο, με τη βοήθεια της μέσης καθυστέρησης των πακέτων $E[D]$. Συγκεκριμένα, η χωρητικότητα φωνής υπολογίζεται στο σημείο όπου η μέση καθυστέρηση είναι μικρότερη ή ίση με το διάστημα παραγωγής πακέτων (packetization interval) T_{pck} :

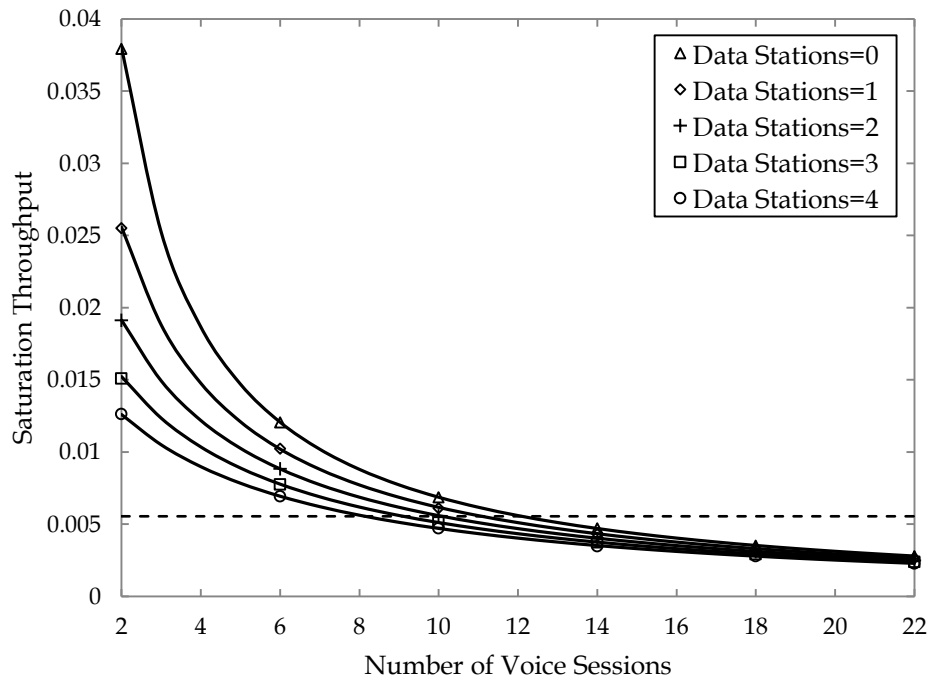
$$E[D] \leq T_{pck} \quad (8.37)$$

8.2.4 Ανάλυση Αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα έχουν ληφθεί χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους του συστήματος του φυσικού επιπέδου Direct Spread Sequence Spectrum (DSSS), το οποίο χρησιμοποιείται στο πρότυπο IEEE 802.11b, Πίνακας 8.1. Το αναλυτικό μοντέλο [5] επικυρώνεται με τη σύγκριση των αποτελεσμάτων του με τα αποτελέσματα προσομοίωσης. Σε όλα τα διαγράμματα τα αποτελέσματα του αναλυτικού μοντέλου παρουσιάζονται με γραμμές, ενώ τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με σύμβολα. Επίσης, όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα, τα αποτελέσματα του μοντέλου ταυτίζονται με αυτά της προσομοίωσης. Αυτό το γεγονός αποδεικνύει ότι το μοντέλο του Καλαθά [5] είναι αξιόπιστο.

Όπως και στην Παράγραφο 8.1, για τα διαγράμματα που δημιουργήθηκαν σε αυτό το υβριδικό σύστημα [7] έχει χρησιμοποιηθεί: α) ο κωδικοποιητής φωνής G.711, με διάστημα παραγωγής πακέτων (packetization interval) 20 ms και φορτίο φωνής (voice payload) 160 bytes, β) ο κωδικοποιητής G.729, με διάστημα 20 ms και φορτίο 20 bytes και γ) ο κωδικοποιητής G.723.1, για δύο διαστήματα 30 ms και 60 ms, με φορτίο 24 bytes και 48 bytes αντίστοιχα. Όλα τα παραπάνω αναγράφονται και στον Πίνακα 8.2.

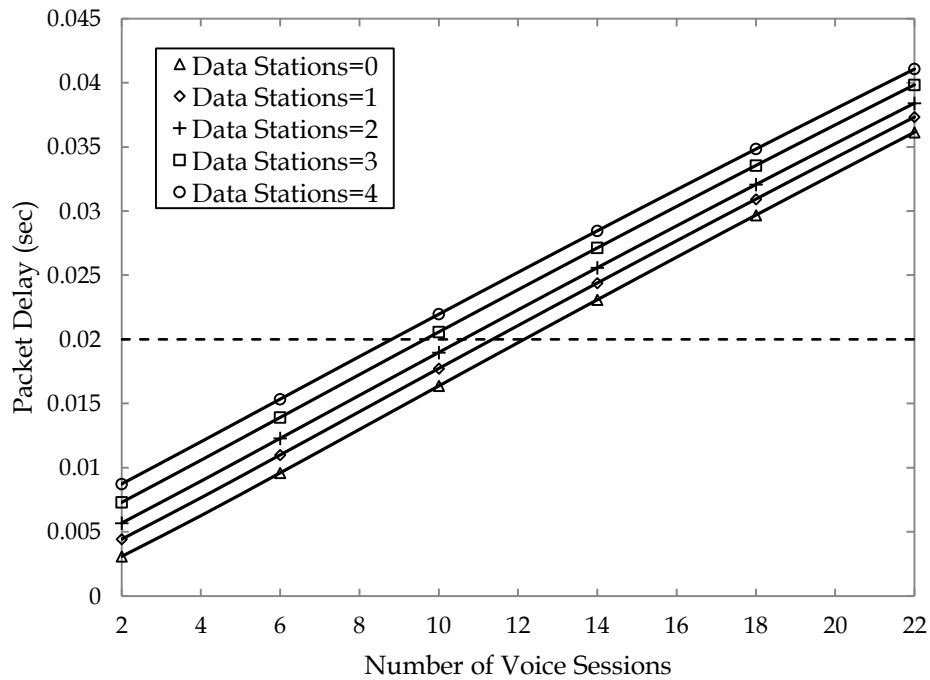
Το Διάγραμμα 8.6 απεικονίζει τη ρυθμαπόδοση κορεσμού ενός σταθμού φωνής S_{single} , με ή χωρίς σταθμούς δεδομένων, ως συνάρτηση των συνεδριών φωνής, για τον κωδικοποιητή φωνής G.711. Η χωρητικότητα φωνής υπολογίζεται στο σημείο όπου η καμπύλη της ρυθμαπόδοσης τέμνει την οριζόντια γραμμή, η οποία έχει την τιμή του ορίου S_{limit} . Το όριο S_{limit} υπολογίζεται από τη σχέση (8.19) και για αυτήν την περίπτωση είναι ίσο με 0.00554. Τα αποτελέσματα της χωρητικότητας φωνής αναγράφονται στον Πίνακα 8.4.



Διάγραμμα 8.6. Χωρητικότητα φωνής για τον κωδικοποιητή G.711, με διάστημα παραγωγής πακέτων 20ms και φορτίο 160 bytes.

Data stations	Voice sessions				
	G.711	G.711 Packet delay	G.729	G.723.1	G.723.1
	interval 20 ms	interval 20 ms	interval 20 ms	interval 30 ms	interval 60 ms
0	12	13	14	20	35
1	11	12	13	19	34
2	10	10	12	18	33
3	9	9	10	16	32
4	8	8	9	15	31

Πίνακας 8.4. Χωρητικότητα φωνής για τους κωδικοποιητές G.711, G.729 και G.723.1.



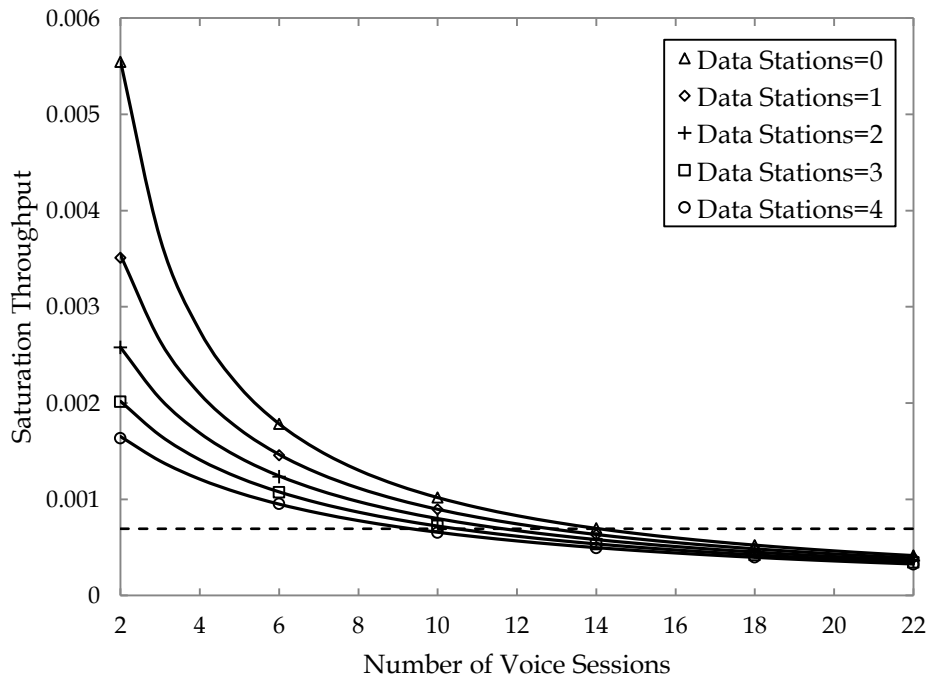
Διάγραμμα 8.7. Χωρητικότητα φωνής, υπολογιζόμενη από τη μέση καθυστέρηση, για τον κωδικοποιητή G.711, με διάστημα παραγωγής πακέτων 20ms και φορτίο 160 bytes.

Το Διάγραμμα 8.7 απεικονίζει τη μέση καθυστέρηση των πακέτων, ως συνάρτηση των συνεδριών φωνής (voice sessions), με ή χωρίς σταθμούς δεδομένων, για τον κωδικοποιητή φωνής G.711. Τα αποτελέσματα της χωρητικότητας φωνής αναγράφονται στον Πίνακα 8.4 και έχουν υπολογιστεί στο σημείο που η μέση καθυστέρηση συναντά την οριζόντια γραμμή, η οποία έχει τη τιμή του διαστήματος παραγωγής πακέτων 20 ms.

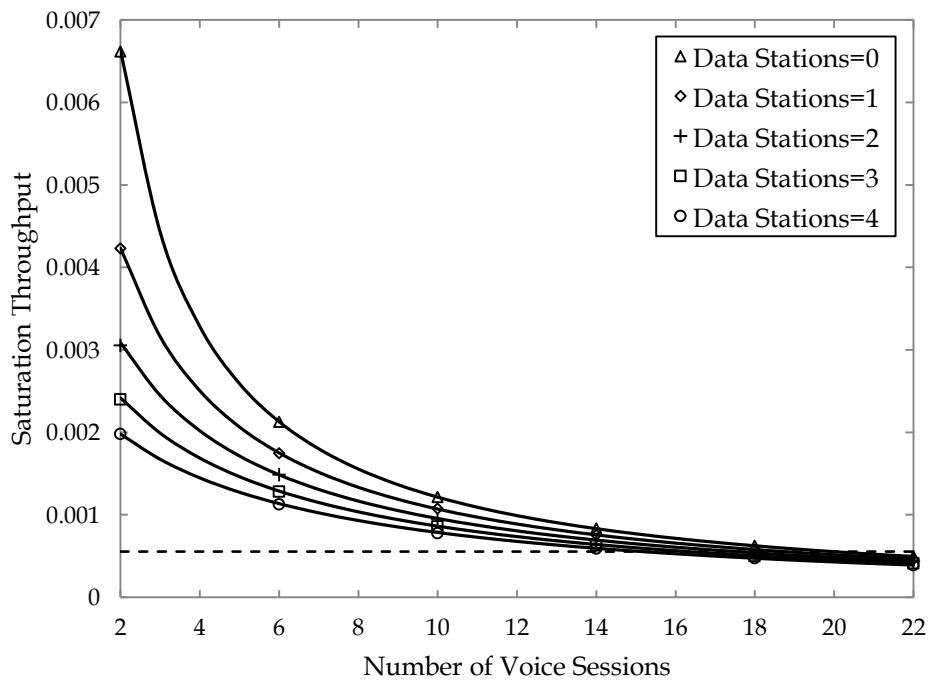
Το Διάγραμμα 8.8 απεικονίζει τη ρυθμαπόδοση ενός σταθμού φωνής, με ή χωρίς σταθμούς δεδομένων, ως συνάρτηση των συνεδριών φωνής, για τον κωδικοποιητή φωνής G.729. Η χωρητικότητα φωνής υπολογίζεται στο σημείο όπου η ρυθμαπόδοση κορεσμού για το συναντά την οριζόντια γραμμή, η οποία αναπαριστά το όριο S_{limit} και έχει την τιμή 0.00069358. Η χωρητικότητα αναγράφεται στον Πίνακα 8.4.

Τα Διαγράμματα 8.9 και 8.10 απεικονίζουν τη ρυθμαπόδοση ενός σταθμού φωνής, με ή χωρίς σταθμούς δεδομένων, ως συνάρτηση των συνεδριών φωνής, για τον κωδικοποιητή φωνής G.723.1. Το διαστήματα παραγωγής πακέτων που χρησιμοποιείται στο Διάγραμμα 8.9 είναι 30 ms και 60 ms στο Διάγραμμα 8.10. Και για τις δύο περιπτώσεις, η χωρητικότητα φωνής αναγράφεται στον Πίνακα 8.4 και υπολογίζεται στο σημείο

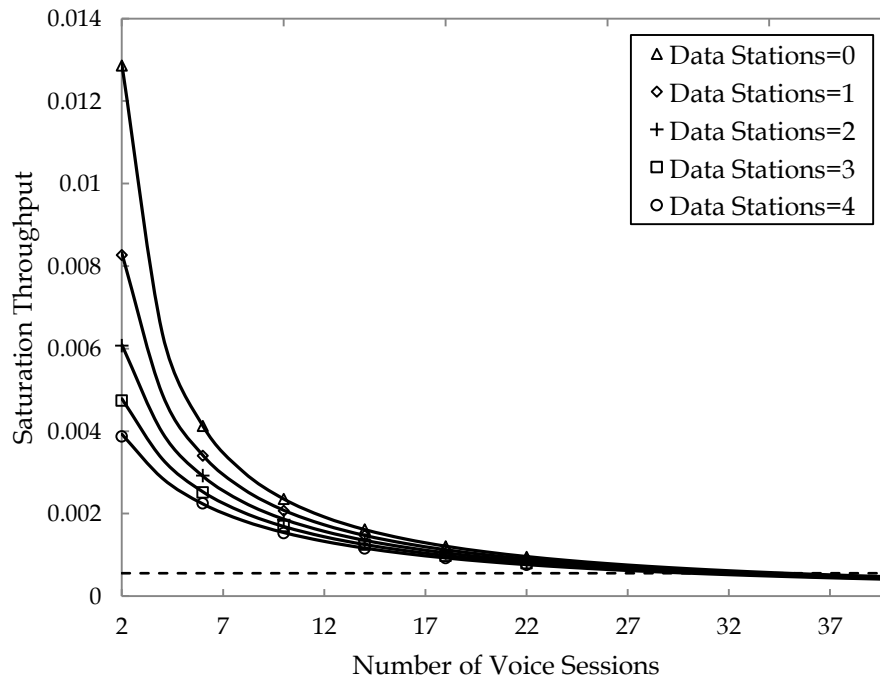
όπου η καμπύλη της ρυθμαπόδοσης τέμνει την οριζόντια γραμμή. Και για τα δύο διαγράμματα η οριζόντια γραμμή, δηλαδή το όριο S_{limit} , είναι ίση με τη τιμή 0.0005548.



Διάγραμμα 8.8. Χωρητικότητα φωνής για τον κωδικοποιητή G.729, με διάστημα παραγωγής πακέτων 20ms και φορτίο 20 bytes.



Διάγραμμα 8.9. Χωρητικότητα φωνής για τον κωδικοποιητή G.723.1, με διάστημα παραγωγής πακέτων 30ms και φορτίο 24 bytes.



Διάγραμμα 8.10. Χωρητικότητα φωνής για τον κωδικοποιητή G.723.1, με διάστημα παραγωγής πακέτων 60ms και φορτίο 48 bytes.

Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα της χωρητικότητας φωνής που αναγράφονται στον Πίνακα 8.4 για τους τρεις κωδικοποιητές, βγαίνει το συμπέρασμα ότι για κάθε σταθμό δεδομένων που προστίθεται στο υβριδικό σύστημα η χωρητικότητα φωνής ελαττώνεται κατά μια συνεδρία φωνής (voice session).

Ο Βούρκας [7] έχει κάνει παρόμοιους υπολογισμούς, υποθέτοντας ότι τα πακέτα δεδομένων μεταδίδονται χρησιμοποιώντας τον μηχανισμό RTS/CTS του DCF και τα αποτελέσματα της χωρητικότητας φωνής αναγράφονται στον Πίνακα 8.3. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στους Πίνακες 8.3 και 8.4, γίνεται αντιληπτό ότι αν οι σταθμοί δεδομένων χρησιμοποιούν τη μέθοδο basic access, η χωρητικότητα φωνής του δικτύου είναι λίγο μεγαλύτερη σε σχέση με τους σταθμούς δεδομένων που χρησιμοποιούν τη μέθοδο RTS/CTS. Φαίνεται, δηλαδή, ότι ο μηχανισμός basic access του DCF, για τα πακέτα δεδομένων, αξιοποιεί καλύτερα το μέσο και δίνει ελαφρώς αυξημένη ρυθμαπόδοση και πιο μικρή μέση καθυστέρηση πακέτων.

Κεφάλαιο 9

Μαθηματικό Μοντέλο Υβριδικού Συστήματος

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή θα αναπτυχθεί ένα μαθηματικό μοντέλο για τον IEEE 802.11 DCF μηχανισμό πρόσβασης στο κοινό μέσο μετάδοσης, θεωρώντας ταυτόχρονη εκπομπή σταθμών δεδομένων με basic access και σταθμών φωνής (VoIP), με ταυτόχρονα basic access data stream. Το νέο μοντέλο θα υπολογίζει την απόδοση του μηχανισμού DCF, χρησιμοποιώντας τις εξής μετρικές απόδοσης: (α) διεκπεραιωτική ικανότητα (throughput) και (β) μέση καθυστέρηση επιτυχημένης αποστολής πακέτων (average packet delay).

Θα χρησιμοποιηθούν ανώτατες τιμές που χαρακτηρίζουν την καλή ποιότητα επικοινωνίας φωνής και θα υπολογισθεί η χωρητικότητα του ασύρματου δικτύου σε φωνητικές κλήσεις καλής ποιότητας. Θα εξετασθεί η επίδραση σταθμών που μεταφέρουν δεδομένα, καθώς και του ταυτόχρονου data stream των σταθμών φωνής, στην χωρητικότητα φωνής. Το προτεινόμενο μαθηματικό μοντέλο θα επαληθευτεί συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του, με τα αποτελέσματα προσομοιωτή.

9.1 Μοντέλο Ασύρματου Δικτύου

Το υπό μελέτη ασύρματο δίκτυο χρησιμοποιεί τον μηχανισμό Distributed Coordination Function (DCF), ο οποίος ορίζεται από το πρωτόκολλο IEEE 802.11 και έχουν γίνει οι παρακάτω παραδοχές:

9.1.1 Περιγραφή Δικτύου Και Παραδοχές

- (1) Δεν υπάρχουν λάθη κατά τη μετάδοση στο κανάλι και ούτε κρυμμένοι σταθμοί.
- (2) Το δίκτυο λειτουργεί σε συνθήκες κορεσμού, δηλαδή, όλοι οι σταθμοί έχουν πάντα ένα πακέτο έτοιμο για μετάδοση.
- (3) Το δίκτυο αποτελείται από σταθμούς φωνής (voice stations) και από σταθμούς δεδομένων (data stations). Οι σταθμοί φωνής μεταδίδουν και πακέτα φωνής και πακέτα δεδομένων, ενώ οι σταθμοί δεδομένων μεταδίδουν μόνο πακέτα δεδομένων.
- (4) Ένας σταθμός φωνής μεταδίδει πακέτα φωνής και πακέτα δεδομένων. Αφού, λοιπόν, λειτουργεί σε συνθήκες κορεσμού, έχει πάντα ένα πακέτο έτοιμο για μετάδοση, είτε είναι πακέτο φωνής, είτε είναι πακέτο δεδομένων. Οπότε, γίνεται η παραδοχή ότι τα πακέτα φωνής και τα πακέτα δεδομένων, από ένα σταθμό φωνής, στέλνονται εναλλάξ.
- (5) Η καθυστέρηση διάδοσης στο κανάλι (δ) είναι πολύ μικρή και δεν υπολογίζεται. Αυτή η παραδοχή είναι έγκυρη, επειδή, όλοι οι σταθμοί είναι κοντά ο ένας στον άλλο.
- (6) Το μέγεθος των πακέτων δεδομένων είναι σταθερό και ίδιο για όλους τους σταθμούς.
- (7) Όλοι οι σταθμοί φωνής επικοινωνούν μεταξύ τους και μεταδίδουν στον ίδιο ρυθμό μετάδοσης (data rate), χρησιμοποιώντας την ίδια κωδικοποίηση.
- (8) Κάθε VoIP κλήση (voice session) αποτελείται από δύο ασύρματους σταθμούς που επικοινωνούν.

9.1.2 Υπόβαθρο Μαθηματικού Μοντέλου

Το μαθηματικό μοντέλο που παρουσιάζεται σε αυτήν τη μεταπτυχιακή διατριβή βασίζεται: α) στην εργασία του Bianchi [2], που αναλύει την επίδοση του μηχανισμού DCF του πρωτοκόλλου IEEE 802.11, β) στην εργασία του Wu [4], ο οποίος εισάγει την απόρριψη πακέτου, γ) στην εργασία του Ράπτη [6] όπου αναπτύσσονται μετρικές για τη μέση καθυστέρηση μετάδοσης πακέτου, δ) στην εργασία του Αμανατιάδη [1], όπου παρουσιάζεται ένα αναλυτικό μοντέλο για τη χωρητικότητα φωνής, ε) στην εργασία του Καλαθά [5], η οποία μελετά ένα υβριδικό ασύρματο δίκτυο με σταθμούς φωνής και σταθμούς δεδομένων χρησιμοποιώντας το μηχανισμό basic access για όλου τους σταθμούς.

9.2 Υβριδικό Σύστημα

Το νέο υβριδικό σύστημα, που μελετάται στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή, χρησιμοποιεί την πιθανότητα τ εκπομπής ενός πακέτου, την πιθανότητα p σύγκρουσης πακέτων και την κορεσμένη ρυθμαπόδοση S , οι οποίες έχουν υπολογιστεί στο Κεφάλαιο 4. Στη συνέχεια, θα υπολογιστούν α) ο μέσος χρόνος T_s , κατά τον οποίο πραγματοποιείται μια επιτυχημένη μετάδοση πακέτου στο κανάλι, β) ο μέσος χρόνος T_c , κατά τον οποίο συμβαίνει μια σύγκρουση, καθώς και γ) η μέση τιμή των πακέτων l , για ένα υβριδικό σύστημα με σταθμούς που μεταδίδουν πακέτα δεδομένων και σταθμούς που μεταδίδουν πακέτα φωνής και δεδομένων. Συμβολίζονται με N_{data} ο αριθμός των σταθμών που μεταδίδουν μόνο πακέτα δεδομένων και N_{voice} ο αριθμός των σταθμών που μεταδίδουν πακέτα φωνής και πακέτα δεδομένων. Τότε, ισχύει:

$$n = N_{data} + N_{voice} \quad (9.1)$$

Στο προτεινόμενο μοντέλο που παρουσιάζεται, τα πακέτα φωνής, με μέγεθος l_{voice} , και τα πακέτα δεδομένων, με μέγεθος l_{data} , χρησιμοποιούν τον μηχανισμό πρόσβασης στο μέσο basic access του DCF.

Σε αυτό το υβριδικό μοντέλο, τα πακέτα δεδομένων έχουν διαφορετικό μέγεθος από τα πακέτα φωνής. Γενικά, το μέγεθος, από ένα πακέτο δεδομένων, είναι μεγαλύτερο από ένα πακέτο φωνής. Στους υπολογισμούς που γίνονται στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή, χρησιμοποιείται η τιμή 8184 bits για τα πακέτα δεδομένων, ώστε να μπορούν να συγκριθούν τα αποτελέσματα, με αυτά που παρουσιάζονται στην εργασία του Καλαθά [5]. Το μέγεθος των πακέτων φωνής εξαρτάται από το κωδικοποιητή που χρησιμοποιείται κάθε φορά. Για παράδειγμα, στον κωδικοποιητή G.711, με παραγωγή πακέτων κάθε 20ms, το μέγεθος των πακέτων φωνής είναι 160 bytes, Πίνακας 9.2.

Σε μια σύγκρουση εμπλέκονται δύο ή περισσότερα πακέτα. Η πιθανότητα να συγκρούονται τρία ή περισσότερα πακέτα θεωρείται ότι είναι πολύ μικρή και μπορεί να παραβλεφτεί. Για αυτό, γίνεται η παραδοχή, ότι σε κάθε σύγκρουση εμπλέκονται μόνο δύο πακέτα. Για να υπολογιστεί η διάρκεια της σύγκρουσης, θα πρέπει να εξεταστεί αν στη σύγκρουση συμμετέχει τουλάχιστον ένα πακέτο δεδομένων. Σ' αυτήν την περίπτωση, και γνωρίζοντας ότι τα πακέτα δεδομένων είναι μεγαλύτερα από τα πακέτα φωνής, η διάρκεια μιας σύγκρουσης υπολογίζεται χρησιμοποιώντας ως δεδομένο το φορτίο των πακέτων δεδομένων l_{data} .

Ο αριθμός των ζευγαριών των σταθμών φωνής CM_{voice} μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$CM_{voice} = \binom{N_{voice}}{2} = \frac{N_{voice}!}{2!(N_{voice}-2)!} \quad (9.2)$$

Επίσης, ο αριθμός των ζευγαριών όλων των σταθμών CM μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$CM = \binom{n}{2} = \frac{n!}{2!(n-2)!} \quad (9.3)$$

Από τις εξισώσεις (9.2) και (9.3), η πιθανότητα P_{voice} , όπου σε μια σύγκρουση συμμετέχουν δύο σταθμοί φωνής, μπορεί να υπολογιστεί από:

$$P_{voice} = \frac{CM_{voice}}{CM} \quad (9.4)$$

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

$$P_{data} = 1 - P_{voice} \quad (9.5)$$

Αν ένα πακέτο μεταδοθεί επιτυχώς, η πιθανότητα PS_{voice} να είναι αυτή η μετάδοση από ένα σταθμό φωνής είναι:

$$PS_{voice} = N_{voice}/n \quad (9.6)$$

Αν ένα πακέτο μεταδίδεται επιτυχώς, με PS_{data} συμβολίζεται η πιθανότητα το μεταδιδόμενο πακέτο να είναι πακέτο δεδομένων και υπολογίζεται από:

$$PS_{data} = 1 - PS_{voice} \quad (9.7)$$

Η κεφαλίδα των πακέτων φωνής, λόγω των πρωτοκόλλων RTP , UDP και IP , υπολογίζεται:

$$RTPUDPIP = RTP + UDP + IP \quad (9.8)$$

Στη σχέση (9.8), το RTP αναφέρεται στην κεφαλίδα του πακέτου, λόγω του Real-time Transport Protocol, το UDP αναφέρεται στη κεφαλίδα του πακέτου, λόγω του User Datagram Protocol και το IP αναφέρεται στη κεφαλίδα του πακέτου, λόγω του Internet Protocol.

Ας είναι T_C^{voice} , η χρονική διάρκεια της σύγκρουσης δύο σταθμών φωνής, οι οποίοι μεταδίδουν εκείνη τη στιγμή πακέτα φωνής και T_C^{data} η χρονική διάρκεια της σύγκρουσης που εμπεριέχει τουλάχιστον ένα πακέτο δεδομένων, ανεξάρτητα από ποιον σταθμό μεταδόθηκε. Δηλαδή, αν σε μια σύγκρουση εμπλέκονται ένας σταθμός φωνής και ένας σταθμός δεδομένων, ή δύο σταθμοί φωνής και τουλάχιστον ένας από αυτούς μεταδίδει πακέτο δεδομένων, τότε η χρονική διάρκεια της σύγκρουσης είναι T_C^{data} .

$$T_C^{data} = DIFS + H + l_{data}/C + SIFS + ACK \quad (9.9)$$

$$T_C^{voice} = DIFS + H + RTPUDPIP/C + l_{voice}/C + SIFS + ACK \quad (9.10)$$

όπου C είναι ο ρυθμός μετάδοσης και H είναι η κεφαλίδα του πακέτου, Πίνακας 9.1.

Ας είναι T_S^{data} η χρονική διάρκεια όπου το μέσο είναι απασχολημένο κατά τη διάρκεια μιας επιτυχημένης μεταφοράς πακέτου δεδομένων και T_S^{voice} η χρονική διάρκεια όπου το μέσο είναι απασχολημένο κατά τη διάρκεια μιας επιτυχημένης μεταφοράς πακέτου φωνής. Οι χρόνοι T_S^{data} και T_S^{voice} μπορούν να υπολογιστούν ως:

$$T_S^{data} = DIFS + H + l_{data}/C + SIFS + ACK \quad (9.11)$$

$$T_S^{voice} = DIFS + H + RTPUDPIP/C + l_{voice}/C + SIFS + ACK \quad (9.12)$$

Έχει γίνει η παραδοχή, ότι ένας σταθμός φωνής μεταδίδει πακέτα φωνής και πακέτα δεδομένων εναλλάξ. Οπότε, είναι σαφές ότι τα πακέτα φωνής μεταδίδονται από ένα σταθμό φωνής, με πιθανότητα $p_v = 0.5$. Το ίδιο συμβαίνει και για τα πακέτα δεδομένων και η πιθανότητα μετάδοσής τους είναι $p_d = 0.5$, δηλαδή, είναι ίση με την πιθανότητα μετάδοσης των πακέτων φωνής.

Τώρα, από τις εξισώσεις (9.4) έως και (9.12) μπορούν να υπολογιστούν οι χρόνοι T_S και T_C :

$$T_S = PS_{data} \cdot T_S^{data} + PS_{voice}(p_v \cdot T_S^{voice} + p_d \cdot T_S^{data}) \quad (9.13)$$

$$T_C = P_{data} \cdot T_C^{data} + P_{voice} \cdot (p_v^2 \cdot T_C^{voice} + (1 - p_v^2) \cdot T_C^{data}) \quad (9.14)$$

Η μέση τιμή του φορτίου ενός πακέτου, που μεταδίδεται επιτυχώς είναι:

$$l = PS_{voice} \cdot (p_v \cdot l_{voice} + p_d \cdot l_{data}) + PS_{data} \cdot l_{data} \quad (9.15)$$

9.3 Χωρητικότητα Φωνής

Χωρητικότητα φωνής είναι ο μέγιστος αριθμός των συνεδριών φωνής που μπορούν να πραγματοποιούνται ταυτόχρονα στο ασύρματο δίκτυο χωρίς να υποβαθμιστεί η ποιότητα.

Χρησιμοποιώντας την ρυθμαπόδοση κορεσμού S , όπως δίνεται από το Κεφάλαιο 4 και τις εξισώσεις (9.6), (9.13) και (9.14), η ρυθμαπόδοση S_{voice} όλων των σταθμών φωνής μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$S_{voice} = \frac{PS_{voice}(p_v \cdot l_{voice} + p_d \cdot l_{data}) P_{tr} P_s}{(1-P_{tr})\sigma + P_{tr} P_s T_s + P_{tr}(1-P_s)T_c} \quad (9.16)$$

Και ξεχωριστά, η ρυθμαπόδοση S_{Vvoice} όλων των σταθμών φωνής, μόνο για τα πακέτα φωνής και η ρυθμαπόδοση S_{Vdata} όλων των σταθμών φωνής, μόνο για τα πακέτα δεδομένων από τις σχέσεις (9.17) και (9.18).

$$S_{Vvoice} = \frac{p_v \cdot PS_{voice} P_{tr} P_s l_{voice}}{(1-P_{tr})\sigma + P_{tr} P_s T_s + P_{tr}(1-P_s)T_c} \quad (9.17)$$

$$S_{Vdata} = \frac{p_d \cdot PS_{voice} P_{tr} P_s l_{data}}{(1-P_{tr})\sigma + P_{tr} P_s T_s + P_{tr}(1-P_s)T_c} \quad (9.18)$$

Για να υπολογιστεί η ρυθμαπόδοση κορεσμού S_{Vvoice}^{single} που αφορά τα πακέτα φωνής για ένα μόνο σταθμό φωνής, η ρυθμαπόδοση S_{Vvoice} διαιρείται με τον αριθμό των σταθμών φωνής N_{voice} :

$$S_{Vvoice}^{single} = S_{Vvoice} / N_{voice} \quad (9.19)$$

Ομοίως, η ρυθμαπόδοση κορεσμού S_{Vdata}^{single} , που αφορά τα πακέτα δεδομένων για ένα μόνο σταθμό φωνής, υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$S_{Vdata}^{single} = S_{Vdata} / N_{voice} \quad (9.20)$$

Στόχος της παρούσης μεταπτυχιακής διατριβής είναι ο υπολογισμός της χωρητικότητας φωνής, όταν επικρατούν συνθήκες κορεσμού στο ασύρματο δίκτυο. Η χωρητικότητα φωνής, λοιπόν, πρέπει να είναι ίση ή και μεγαλύτερη του ορίου S_{limit} :

$$S_{Vvoice}^{single} \geq S_{limit} \quad (9.21)$$

Αν η τιμή της ρυθμαπόδοσης S_{voice}^{single} υπερβαίνει αυτό το όριο, τότε η ποιότητα της μεταδιδόμενης φωνής από τον σταθμό είναι αποδεκτή. Το όριο της ρυθμαπόδοσης S_{limit} υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$S_{limit} = l_{voice}/T_{pck} \quad (9.22)$$

όπου T_{pck} είναι το χρονικό διάστημα που απαιτείται για να παραχθεί ένα νέο πακέτο φωνής (packetization interval).

Εναλλακτικά, η χωρητικότητα φωνής μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τη μέση καθυστέρηση πακέτων $E[D]$. Συγκεκριμένα, η χωρητικότητα φωνής, στις εργασίες των Βούρκα [5] και Καλαθά [5], υπολογίζεται στο σημείο όπου η μέση καθυστέρηση είναι μικρότερη ή ίση με το διάστημα παραγωγής πακέτων T_{pck} :

$$E[D] \leq T_{pck} \quad (9.23)$$

Η μέση καθυστέρηση των πακέτων $E[D]$ αφορά όλα τα πακέτα, από όλους τους σταθμούς. Συγκεκριμένα, η μέση καθυστέρηση υπολογίζει το μέσο χρόνο που απαιτείται για να αποσταλεί ένα πακέτο από ένα σταθμό, ανεξάρτητα από το αν ο σταθμός είναι σταθμός φωνής ή σταθμός δεδομένων, και στην περίπτωση σταθμών φωνής, ανεξάρτητα από το αν το πακέτο που μεταδίδεται είναι πακέτο φωνής ή πακέτο δεδομένων.

Έχει γίνει η παραδοχή, ότι ένας σταθμός φωνής μεταδίδει πακέτα φωνής και δεδομένων εναλλάξ. Οπότε, αν η μέση καθυστέρηση πακέτου είναι $E[D]$, τότε, για το κάθε πακέτο φωνής θα πρέπει να ισχύει:

$$2 \cdot E[D] \leq T_{pck} \quad (9.24)$$

ώστε η ποιότητα φωνής να διατηρείται σε ικανοποιητικά επίπεδα. Στην σχέση (9.24) είναι $2 \cdot E[D]$ και αυτό, γιατί, το πακέτο φωνής καθυστερεί κατά το διπλάσιο να μεταδοθεί, διότι κάθε φορά μεταδίδεται πριν από αυτό ένα πακέτο δεδομένων.

9.4 Ανάλυση Αποτελεσμάτων

Οι τιμές των αποτελεσμάτων, που απεικονίζονται στα επόμενα διαγράμματα, έχουν ληφθεί χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους του συστήματος του φυσικού επιπέδου DSSS (Direct Spread Sequence Spectrum), το οποίο χρησιμοποιείται στο πρότυπο IEEE 802.11b. Αυτές οι τιμές των παραμέτρων απεικονίζονται στον Πίνακα 9.1.

Παράμετροι	Τιμές
Data packet	8184 bits
Slot, σ	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 1Mbps +PHY at 1Mbps
MAC layer header	224 bits
H (packet header)	224 bits MAC data at 1Mbps +PHY at 1Mbps
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

Πίνακας 9.1. Οι παράμετροι για το DSSS.

Επίσης, οι παράμετροι για τους κωδικοποιητές που χρησιμοποιούνται, G.711, G.729 και G.723.1, αναγράφονται στον Πίνακα 9.2.

Για να επικυρωθεί το προτεινόμενο μαθηματικό μοντέλο, τα αναλυτικά αποτελέσματα συγκρίνονται με αποτελέσματα προσομοίωσης. Σε όλα τα διαγράμματα, οι τιμές των αναλυτικών αποτελεσμάτων απεικονίζονται με γραμμές, ενώ οι τιμές των προσομοιώσεων με σύμβολα. Τα αποτελέσματα από το μαθηματικό μοντέλο και από τις

προσομοιώσεις συμπίπτουν. Αυτό αποδεικνύει ότι το προτεινόμενο αναλυτικό μοντέλο είναι αξιόπιστο. Σε κάθε περίπτωση, οι διαφορές ανάμεσα στα αποτελέσματα του αναλυτικού μοντέλου και των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης είναι μικρότερες από 0.5%.

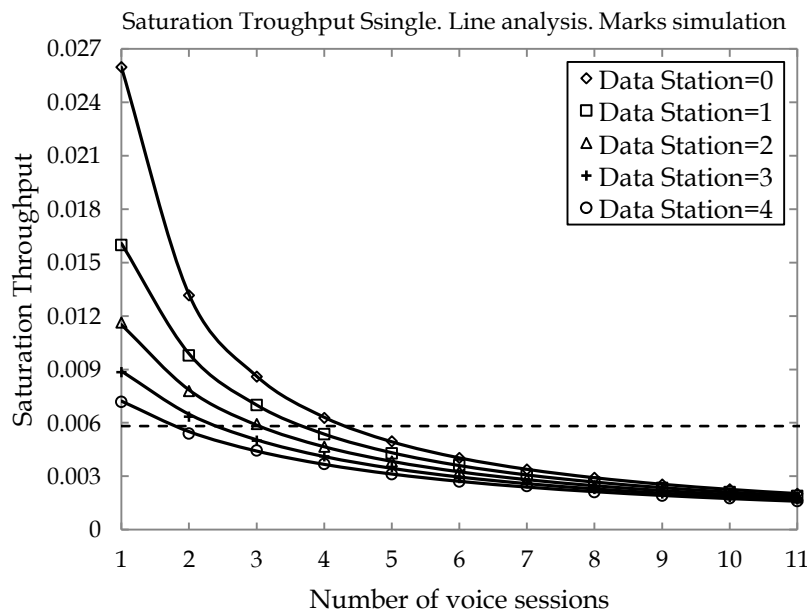
Παράμετροι	Τιμές
Voice codec	G.711
Interval	20 ms
Packet payload	160 bytes
Voice codec	G.729
Interval	20 ms
Packet payload	20 bytes
Voice codec	G.723.1
Interval	30 ms
Packet payload	24 bytes
Voice codec	G.723.1
Interval	60 ms
Packet payload	48 bytes

Πίνακας 9.2. Οι παράμετροι των κωδικοποιητών: G.711, G.729, G.723.1

Το Διάγραμμα 9.1 αναπαριστά τη ρυθμαπόδοση για τα πακέτα φωνής, για ένα μόνο σταθμό φωνής S_{voice}^{single} , ως συνάρτηση των συνεδριών φωνής και για διαφορετικές τιμές σταθμών δεδομένων, για τον κωδικοποιητή G.711. Το διάστημα παραγωγής πακέτων (packetization interval) είναι 20 ms, οπότε το φορτίο των πακέτων φωνής διαμορφώνεται στα 160 bytes, Πίνακας 9.2. Η οριζόντια γραμμή στο διάγραμμα είναι η τιμή για το όριο S_{limit} , το οποίο υπολογίζεται από τη σχέση (9.22) και είναι ίσο με 0.005818. Η χωρητικότητα φωνής υπολογίζεται στο σημείο όπου η ρυθμαπόδοση κορεσμού, για το συγκεκριμένο διάστημα παραγωγής πακέτων, συναντά την οριζόντια γραμμή και τα αποτελέσματά της αναγράφεται στον Πίνακα 9.3.

Το πρώτο συμπέρασμα από τα αποτελέσματα της χωρητικότητας φωνής, για τον κωδικοποιητή G.711, Πίνακας 9.3, είναι ότι για κάθε σταθμό δεδομένων που προστίθεται στο υβριδικό σύστημα, η χωρητικότητα μειώνεται κατά μια συνεδρία

φωνής (voice session), σχεδόν για όλες τις περιπτώσεις. Επίσης, όταν δεν υπάρχει κανένας σταθμός δεδομένων, η χωρητικότητα φωνής είναι τέσσερις συνεδρίες φωνής, σε αντίθεση με τα αποτελέσματα του Καλαθά [5] που είναι 12. Αυτή η μεγάλη μείωση οφείλεται στο γεγονός ότι στο προτεινόμενο μοντέλο οι σταθμοί φωνής μεταδίδουν και πακέτα δεδομένων, με αποτέλεσμα να μειώνεται η ρυθμαπόδοση των πακέτων φωνής, και κατά συνέπεια και η χωρητικότητα φωνής. Τέλος, η μεγάλη διαφορά στις χωρητικότητες, ανάμεσα στα δύο μοντέλα, οφείλεται και στο ότι τα πακέτα δεδομένων έχουν μεγαλύτερο μέγεθος φορτίου από τα πακέτα φωνής.



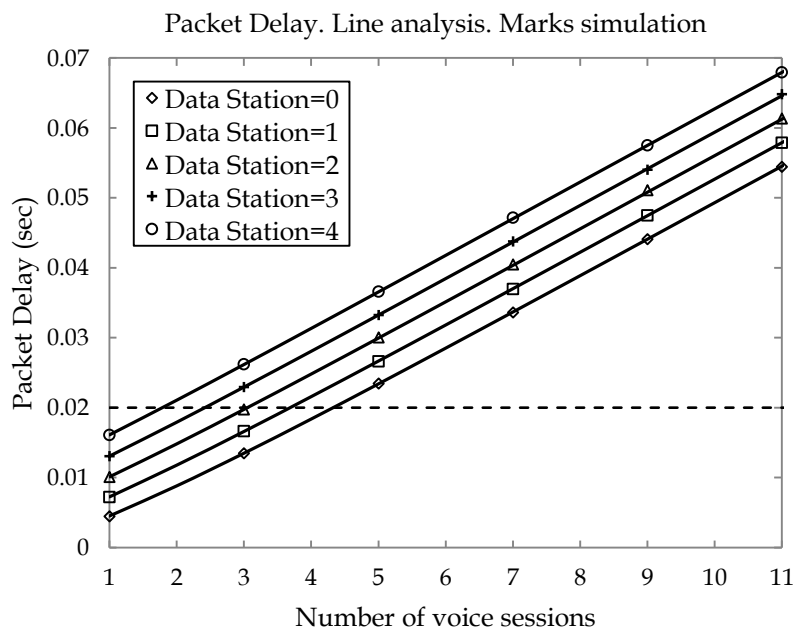
Διάγραμμα 9.1. Χωρητικότητα φωνής για τον G.711 κωδικοποιητή, με διάστημα παραγωγής πακέτων 20ms.

Data stations	Voice sessions Kalathas [5]	Voice sessions New model
0	12	4
1	11	3
2	10	3
3	9	2
4	8	1

Πίνακας 9.3. Χωρητικότητα φωνής για τον G.711 κωδικοποιητή.

Το Διάγραμμα 9.2 αναπαριστά τη μέση καθυστέρηση πακέτων $E[D]$ ως συνάρτηση των συνεδριών φωνής, για διαφορετικές τιμές σταθμών δεδομένων και ο κωδικοποιητής που χρησιμοποιήθηκε είναι ο G.711. Όπως και στο Διάγραμμα 9.1, το διάστημα παραγωγής πακέτων είναι 20 ms και το φορτίο των πακέτων φωνής είναι 160 bytes. Η οριζόντια γραμμή του διαγράμματος έχει την τιμή του διαστήματος παραγωγής πακέτων T_{pck} . Τα αποτελέσματα της χωρητικότητας φωνής έχουν υπολογιστεί στο σημείο όπου η μέση καθυστέρηση συναντά την οριζόντια γραμμή και αναγράφονται στον Πίνακα 9.4.

Τα αποτελέσματα είναι ακριβώς τα ίδια με αυτά που υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας τη ρυθμαπόδοση κορεσμού για ένα σταθμό φωνής S_{Vvoice}^{single} . Συνεπώς, αφού έχουν εξαχθεί τα ίδια αποτελέσματα από δύο διαφορετικές υπολογιστικές μεθόδους, τότε το προτεινόμενο μοντέλο θεωρείται αξιόπιστο.

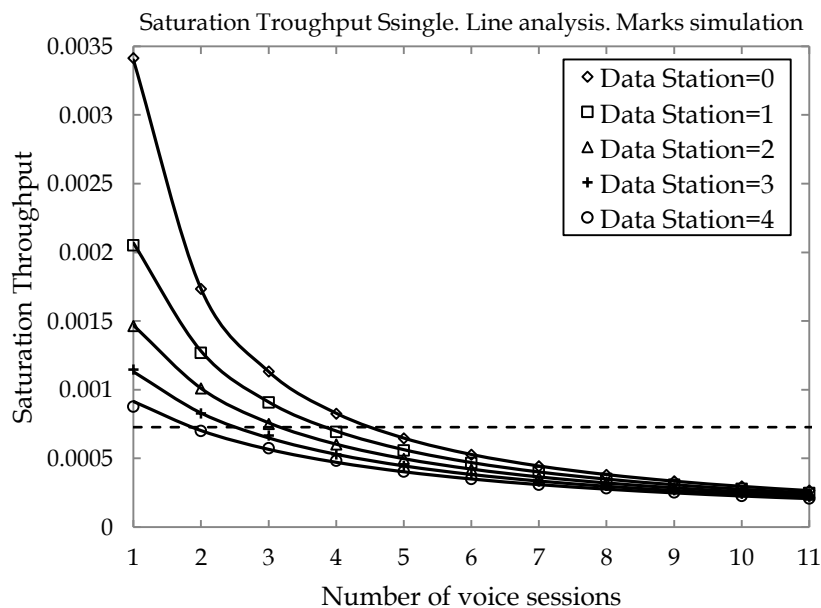


Διάγραμμα 9.2. Χωρητικότητα φωνής (από μέση καθυστέρηση) για τον G.711 κωδικοποιητή, με διάστημα παραγωγής πακέτων 20ms.

Data stations	Voice sessions Kalathas [5]	Voice sessions New model
0	13	4
1	12	3
2	10	3
3	9	2
4	8	1

Πίνακας 9.4. Χωρητικότητα φωνής, από τη μέση καθυστέρηση, για τον G.711 κωδικοποιητή, με διάστημα παραγωγής πακέτων 20ms.

Το Διάγραμμα 9.3 απεικονίζει τη ρυθμαπόδοση για τα πακέτα φωνής, για ένα μόνο σταθμό φωνής $S_{\text{voice}}^{\text{single}}$, ως συνάρτηση των συνεδριών φωνής και για διαφορετικές τιμές σταθμών δεδομένων, για τον κωδικοποιητή G.729. Το διάστημα παραγωγής πακέτων είναι 20 ms και το φορτίο των πακέτων φωνής είναι 20 bytes. Η χωρητικότητα φωνής υπολογίζεται στο σημείο όπου η ρυθμαπόδοση κορεσμού, για το συγκεκριμένο διάστημα παραγωγής πακέτων, συναντά την οριζόντια γραμμή, η οποία έχει την τιμή του ορίου S_{limit} . Το S_{limit} υπολογίζεται από τη σχέση (9.22) και είναι ίσο με 0.00072727. Η χωρητικότητα φωνής, για τη συγκεκριμένη περίπτωση, αναγράφεται στον Πίνακα 9.5.

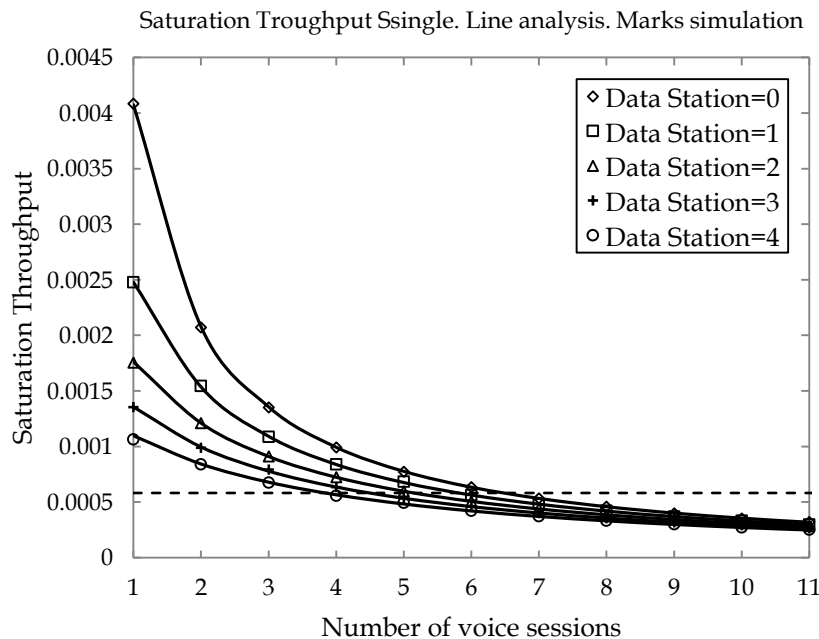


Διάγραμμα 9.3. Χωρητικότητα φωνής για τον G.729 κωδικοποιητή, με διάστημα παραγωγής πακέτων 20ms.

Data stations	Voice sessions Kalathas [5]	Voice sessions New model
0	14	4
1	13	3
2	12	3
3	10	2
4	9	1

Πίνακας 9.5. Χωρητικότητα φωνής για τον G.729 κωδικοποιητή

Όσον αφορά τα αποτελέσματα του Καλαθά, για τις περιπτώσεις των κωδικοποιητών G.711 και G.729, παρατηρείται ότι στον δεύτερο κωδικοποιητή η χωρητικότητα φωνής είναι αυξημένη κατά μια ή δύο συνεδρίες φωνής, Πίνακες 9.3 και 9.5, σε αντίθεση με το προτεινόμενο μοντέλο, όπου τα αποτελέσματα της χωρητικότητας είναι ίδια για τις δύο περιπτώσεις. Ο κωδικοποιητής G.729, στο μοντέλο του Καλαθά [5], αποφέρει καλύτερα αποτελέσματα στη χωρητικότητα, όχι επειδή έχει μικρότερο μέγεθος φορτίου για τα πακέτα φωνής, από ότι ο G.711, αλλά γιατί μειώνεται το όριο S_{limit} . Το φορτίο επηρεάζει άμεσα τη ρυθμαπόδοση, όμως η χωρητικότητα φωνής εξαρτάται και από το όριο S_{limit} .

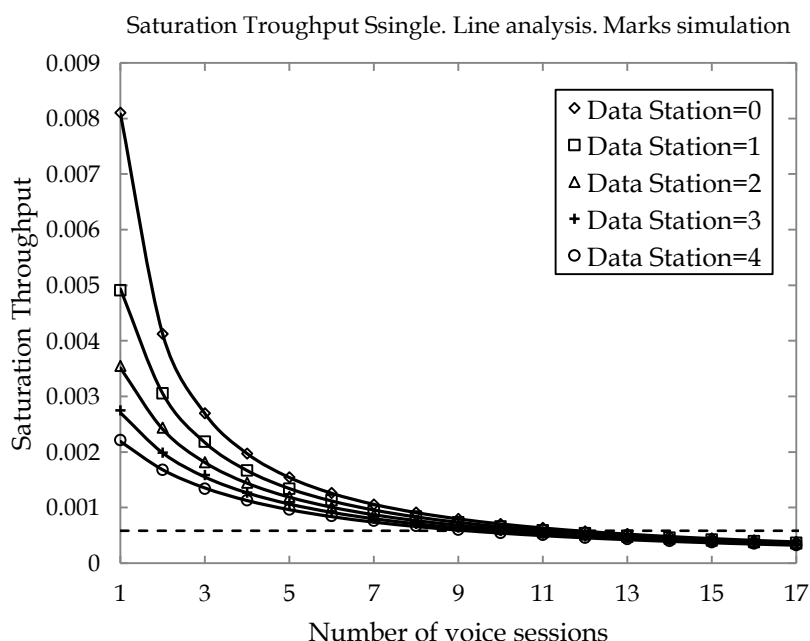


Διάγραμμα 9.4. Χωρητικότητα φωνής για τον G.723.1 κωδικοποιητή, με διάστημα παραγωγής πακέτων 30ms.

Data stations	Voice sessions Kalathas [5]	Voice sessions New model
0	20	6
1	19	5
2	18	5
3	16	4
4	15	3

Πίνακας 9.6. Χωρητικότητα φωνής για τον G.723.1 κωδικοποιητή, με διάστημα παραγωγής πακέτων 30ms

Στο προτεινόμενο μοντέλο, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι δύο κωδικοποιητές δίνουν ίδια αποτελέσματα, Πίνακες 9.3 και 9.5. Αυτό οφείλεται στο ότι αλλάζει το φορτίο για τα πακέτα φωνής και αυτή η αλλαγή έχει επίπτωση στη ρυθμαπόδοση για τα πακέτα φωνής, για ένα μόνο σταθμό φωνής S_{voice}^{single} . Όμως, αλλάζει και το όριο S_{limit} , και τελικά δεν υπάρχει κάποια αυξομείωση στη χωρητικότητα.



Διάγραμμα 9.5. Χωρητικότητα φωνής για τον G.723.1 κωδικοποιητή, με διάστημα παραγωγής πακέτων 60ms.

Το Διάγραμμα 9.4 αναπαριστά τη ρυθμαπόδοση για τα πακέτα φωνής, για ένα μόνο σταθμό φωνής S_{voice}^{single} , ως συνάρτηση των συνεδριών φωνής και για διαφορετικές τιμές σταθμών δεδομένων, χρησιμοποιώντας τον κωδικοποιητή G.723.1, με διάστημα παραγωγής πακέτων 30 ms και φορτίο πακέτων φωνής 24 bytes. Η χωρητικότητα

φωνής υπολογίζεται στο σημείο όπου η ρυθμαπόδοση κορεσμού, για το συγκεκριμένο διάστημα παραγωγής πακέτων, συναντά την οριζόντια γραμμή με τιμή S_{limit} , η οποία είναι ίση με 0.00058182. Η χωρητικότητα φωνής αναγράφεται στον Πίνακα 9.6.

Το Διάγραμμα 9.5 απεικονίζει τη ρυθμαπόδοση για τα πακέτα φωνής, για ένα μόνο σταθμό φωνής S_{voice}^{single} , ως συνάρτηση των συνεδριών φωνής και για διαφορετικές τιμές σταθμών δεδομένων, για τον κωδικοποιητή φωνής G.723.1 και για διάστημα παραγωγής πακέτων 60 ms και φορτίο πακέτων φωνής ίσο με 48 bytes. Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, η οριζόντια γραμμή στο διάγραμμα είναι η τιμή για το όριο S_{limit} , το οποίο υπολογίζεται από τη σχέση (9.22) και είναι ίσο με 0.00058182. Η χωρητικότητα φωνής υπολογίζεται στο σημείο όπου η ρυθμαπόδοση κορεσμού, για το συγκεκριμένο διάστημα παραγωγής πακέτων, συναντά την οριζόντια γραμμή και τα αποτελέσματά της αναγράφεται στον Πίνακα 9.7.

Data stations	Voice sessions Kalathas [5]	Voice sessions New model
0	35	11
1	34	11
2	33	10
3	32	9
4	31	9

Πίνακας 9.7. Χωρητικότητα φωνής για τον G.723.1 κωδικοποιητή, με διάστημα παραγωγής πακέτων 60ms

Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων του κωδικοποιητή G.723.1 και για διαστήματα παραγωγής πακέτων 30 ms και 60 ms, Πίνακες 9.6 και 9.7, προκύπτει ότι τα αποτελέσματα της χωρητικότητας φωνής είναι μεγαλύτερα όταν το διάστημα είναι 60 ms. Να σημειωθεί ότι και στις δύο περιπτώσεις το όριο S_{limit} είναι ίδιο και το μόνο που αλλάζει για τον υπολογισμό της χωρητικότητας είναι το φορτίο των πακέτων δεδομένων. Δηλαδή, η αύξηση του φορτίου, από τα 24 bytes στα 48 bytes, προκαλεί αύξηση στη ρυθμαπόδοση, αλλά και στη χωρητικότητα φωνής. Για παράδειγμα, όταν δεν υπάρχουν σταθμοί δεδομένων στο υβριδικό σύστημα, η χωρητικότητα φωνής από 6 voice sessions, αυξάνεται στα 11.

Η παραπάνω σύγκριση οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η αύξηση του φορτίου των πακέτων φωνής συντελεί θετικά στην αύξηση της χωρητικότητας φωνής. Αλλά η χωρητικότητα

εξαρτάται και από το όριο S_{limit} . Ας γίνει σύγκριση των κωδικοποιητών G.729, με διάστημα παραγωγής πακέτων 20ms, και G.723.1, με διάστημα 30ms, Πίνακες 9.5 και 9.6. Ο G.723.1, για κανένα σταθμό δεδομένων, δίνει χωρητικότητα φωνής 6 voice sessions, ενώ ο G.729 δίνει 4 voice sessions. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί ως εξής: Όπως φαίνεται και από τα Διαγράμματα 9.1 και 9.3, ο κωδικοποιητής G.723.1 αυξάνει ελαφρώς τη ρυθμαπόδοση κορεσμού για ένα μόνο σταθμό φωνής S_{voice}^{single} . Αυτό συμβαίνει επειδή ο G.723.1 έχει μεγαλύτερο φορτίο φωνής από τον G.711. Αυτή η μικρή αύξηση της ρυθμαπόδοσης επηρεάζει τα αποτελέσματα της χωρητικότητας, αλλά πρέπει να εξεταστεί και η τιμή S_{limit} . Για τον κωδικοποιητή G.723.1 το όριο S_{limit} είναι μικρότερο από ότι στον G.711 και επειδή η ρυθμαπόδοση του G.723.1 είναι μεγαλύτερη, δικαιολογείται και η αύξηση της χωρητικότητας φωνής.

Κεφάλαιο 10

Επίλογος

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή έχει γίνει μαθηματική μοντελοποίηση της διαδικασίας DCF του πρωτοκόλλου IEEE 802.11 για ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLANs), που περιλαμβάνουν σταθμούς δεδομένων με basic access και σταθμούς φωνής (VoIP) με basic access, οι οποίοι εκτός από φωνή μεταδίδουν ταυτόχρονα και δεδομένα. Το μοντέλο που αναπτύχθηκε μετρά τη διεκπεραιωτική ικανότητα (throughput) των σταθμών φωνής και τη μέση καθυστέρηση των πακέτων (average packet delay).

Το προτεινόμενο μαθηματικό μοντέλο είναι απλό, επειδή υπολογίζει τη ρυθμαπόδοση κορεσμού και τη μέση καθυστέρηση πακέτων, χωρίς ιδιαίτερα πολύπλοκους μαθηματικούς τύπους. Επίσης, το μοντέλο είναι ακριβές, διότι τα αποτελέσματά του συγκρίθηκαν για την ακρίβεια τους με αυτά ενός προσομοιωτή. Όλα τα διαγράμματα απεικονίζουν με συνεχείς γραμμές τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από το αναλυτικό μοντέλο και με σύμβολα τα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν.

Για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων του προτεινόμενου μοντέλου μελετήθηκε η συμπεριφορά τριών κωδικοποιητών φωνής (G.711, G.729, G.723.1). Χρησιμοποιήθηκαν συγκεκριμένοι παράμετροι αυτών των κωδικοποιητών ώστε να δοκιμαστεί το

προτεινόμενο μοντέλο για διαφορετικά φορτία πακέτων φωνής (voice payload) και διαφορετικά μεγέθη διαστημάτων παραγωγής πακέτων (packetization interval).

10.1 Συμπεράσματα

Στο υβριδικό σύστημα που μελετήθηκε, οι σταθμοί φωνής μεταδίδουν πακέτα φωνής και δεδομένων. Συγκρίνοντάς το με το υβριδικό σύστημα του Καλαθά [5], όπου οι σταθμοί φωνής μεταδίδουν μόνο πακέτα φωνής, η ρυθμαπόδοση της φωνής μειώνεται. Αυτό συμβαίνει, επειδή, στο υβριδικό σύστημα που μελετήθηκε, η ρυθμαπόδοση των σταθμών φωνής μοιράζεται στη ρυθμαπόδοση φωνής και στη ρυθμαπόδοση των δεδομένων. Το πόσο μειώνεται η ρυθμαπόδοση φωνής εξαρτάται άμεσα από το φορτίο των πακέτων φωνής, αλλά και από το φορτίο των πακέτων δεδομένων. Συνέπεια της μείωσης της ρυθμαπόδοσης είναι και η μείωση της χωρητικότητας φωνής.

Επίσης, η χωρητικότητα φωνής επηρεάζεται από το πλήθος των σταθμών δεδομένων. Συγκεκριμένα, η χωρητικότητα μειώνεται κατά μια συνεδρία φωνής (voice session), σχεδόν για όλες τις περιπτώσεις, για κάθε σταθμό δεδομένων που προστίθεται στο υβριδικό σύστημα.

Τελικά, όπως φάνηκε και από την ανάλυση των αποτελεσμάτων, η χωρητικότητα φωνής συνδέεται με το φορτίο των πακέτων φωνής (voice payload) και με το διάστημα παραγωγής πακέτων (packetization interval). Διαπιστώθηκε ότι όταν το φορτίο των πακέτων φωνής αυξάνεται, τότε αυξάνεται και η χωρητικότητα. Επίσης, τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν ότι η αύξηση του διαστήματος παραγωγής πακέτων συντελεί θετικά στο μέγεθος της χωρητικότητας. Να σημειωθεί ότι και το φορτίο των πακέτων δεδομένων επηρεάζει την τιμή της χωρητικότητας φωνής, όμως επειδή είναι σταθερό βγαίνουν συμπεράσματα μόνο για τις μεταβολές των φορτίων των πακέτων φωνής και των διαστημάτων παραγωγής πακέτων.

10.2 Προτάσεις Για Εξέλιξη Της Έρευνας

Το προτεινόμενο μοντέλο που αναλύθηκε στη μεταπτυχιακή διατριβή μπορεί να τροποποιηθεί ώστε να παραχθούν επιπρόσθετα αποτελέσματα της χωρητικότητας φωνής και της μέσης καθυστέρησης για διάφορα σενάρια ασύρματων δικτύων. Για παράδειγμα, στο υβριδικό σύστημα που μελετήθηκε, υπάρχει η δυνατότητα, ο

μηχανισμός διάδοσης στο μέσο να αλλάξει από basic access σε RTS/CTS, για τους σταθμούς φωνής ή τους σταθμούς δεδομένων ή και για τους δύο. Τα αποτελέσματα θα μπορούσαν να συγκριθούν με αυτά τις παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής. Επίσης, προσφέρεται να γίνει περαιτέρω μελέτη για την επίδραση που θα είχε το φορτίο των πακέτων δεδομένων στη χωρητικότητα φωνής, αν δεν διατηρούσε σταθερή τιμή και τελικά, ποιος θα ήταν ο κατάλληλος μηχανισμός πρόσβασης στο μέσο, Basic Access ή RTS/CTS, που θα οδηγούσε στη βέλτιστη χωρητικότητα φωνής.

Βιβλιογραφία

- [01] 1. 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, 10/2007.
- [02] 2. 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
- [03] 3. B. P. Chatzimisios, A.C. Boucouvalas and V. Vitsas, 'IEEE 802.11 packet delay – a finite retry limit analysis', Proc. of the IEEE Global Telecommunications Conference (Globecom) 2003, Dec. 1-5, 2003, pp. 950-954
- [04] 4. 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
- [05] 5. N. Kalathas, V.Vitsas and D.Kleftouris, 'Calculating Voice Capacity in IEEE 802.11 WLANs Under Basic Access Data Traffic, in Proc of 9th IEEE/IET International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing, July 23-25, 2014, MMU, UK, pp. 727-732
- [06] 6. B. P. Raptis - V. Vitsas - K. Paparrizos, "Packet Delay Metrics for IEEE 802.11 Distributed Coordination Function", Mobile Netw Appl, 05 December 2008
- [07] 7. D. V. Vourkas, and V.Vitsas, "Analytical modelling of voice capacity under data traffic in 802.11 WLANs", 8th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing, CSNDSP 2012, Poznan, Poland, July 18 – 20, 2012, pp. 1-6.

