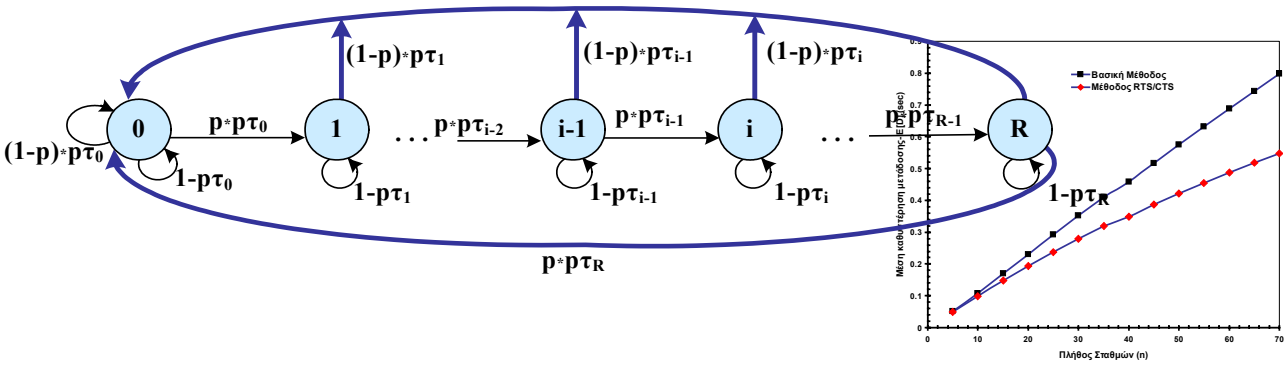
*Πανεπιστήμιο Μακεδονίας*

*Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών στα Πληροφοριακά Συστήματα (MIS)*

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ζιώγου Χρυσοβαλάντου

# «ΑΠΟΔΟΣΗ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ»




***ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:***

***ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ Α. ΟΙΚΟΝΟΜΙΔΗΣ***

**ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2005**

Η παρούσα διπλωματική έγινε κατά το Χειμερινό εξάμηνο 2004-2005 υπό την επίβλεψη του Δρ. Α. Οικονομίδη στα πλαίσια του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών με τίτλο «Πληροφοριακά Συστήματα» του Πανεπιστήμιου Μακεδονίας.

Ζιώγου Χρυσοβαλάντου
ziogou@uom.gr

# *Ευχαριστίες*

Θα ήθελα πρώτα απ΄ όλα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ. Αναστάσιο Οικονομίδη για τις χρήσιμες συμβουλές του και την καθοδήγησή του κατά την διάρκεια της εκπόνησης της μεταπτυχιακής μου εργασίας, καθώς και για την υπομονή που έδειξε απέναντί μου.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Βασίλειο Βίτσα για τα εύστοχα σχόλια και τις πολύτιμες καθοδηγητικές παρατηρήσεις του, χωρίς τον οποίο δεν θα ήταν εφικτή η ολοκλήρωση της διπλωματικής.

*… στον **Θεοδώρου Χρήστο***

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

*Ευχαριστίες* 3

*Πρόλογος* 10

*Κεφάλαιο 1* 11

*Αρχιτεκτονική ασύρματων δικτύων* 11

**1.1 Εισαγωγή** 11

**1.2 Κατηγοριοποίηση Ασύρματων Δικτύων** 12

**1.3 Διαστρωμάτωση του IEEE 802.11** 14

**1.4 Βασικές μονάδες** 16

**1.5 Τοπολογία - Αρχιτεκτονική** 17
1.5.1 Τοπολογία ανεξάρτητων ασύρματων δικτύων 17
1.5.2 Τοπολογία ασύρματων δικτύων υποδομής 18
1.5.3 Σύστημα Διανομής 19
1.5.4 Portal 20

**1.6 Λογικές υπηρεσίες διεπαφών** 21
1.6.1 Υπηρεσίες Σταθμού - Station Service (SS) 23
1.6.2 Υπηρεσίες Συστήματος Διανομής -Distribution system service (DSS) 23

**1.7 Φυσικό Επίπεδο του IEEE 802.11** 24
1.7.1 Φάσμα εκπομπής 25
1.7.2 Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) 25
1.7.3 Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS) 27
1.7.4 Υπέρυθρες ακτίνες 28

**1.8 Πρότυπο IEEE 802.11** 29
1.8.1 IEEE 802.11b 29
1.8.2 IEEE 802.11a 30
1.8.3 IEEE 802.11e 31
1.8.4 IEEE 802.11f 31
1.8.5 IEEE 802.11g 32
1.8.6 IEEE 802.11h 32
1.8.7 IEEE 802.11i 33
1.8.8 Εξέλιξη του 802.11 33
1.8.9 Wireless Fidelity (Wi-Fi) 34

*Κεφάλαιο 2* 36

*Λειτουργική περιγραφή υποεπιπέδου ελέγχου πρόσβασης στο μέσο* 36

**2.1 Πρόσβαση στο μέσο** 37

**2.2 Χρόνοι Αναμονής (Interframe spacing)** 38

**2.3 Τεχνική CSMA/CA** 41
2.3.1 Εικονική Ανίχνευση Φέροντος (virtual carrier sense) 41

**2.4 Κατανεμημένη Λειτουργία Συντονισμού (DCF) 42**
2.4.1 Βασική μέθοδος πρόσβασης 43
2.4.2 Λειτουργία της Βασικής Μεθόδου 43
2.4.3 Παράθυρο διεκδίκησης 45
2.4.4 Μετρητής του χρόνου οπισθοχώρησης 47
2.4.5 Μέθοδος πρόσβασης RTS/CTS 48
2.4.6 Λειτουργία μεθόδου πρόσβασης RTS/CTS 49
2.4.7 Πρόβλημα κρυμμένων σταθμών 50
2.4.8 Αντιμετώπιση αποτυχημένης προσπάθειας μετάδοσης 52

**2.5 Λειτουργία Συντονισμού Σημείου (PCF) 53**

**2.6 Παρεχόμενες Υπηρεσίες του υποεπιπέδου MAC 55**
2.6.1 Ασύγχρονη Υπηρεσία Δεδομένων 55
2.6.2 Υπηρεσίες Ασφάλειας 56
2.6.3 Υπηρεσίες διάταξης MSDU 56

***Κεφάλαιο 3 58***

***Μελέτη ρυθμοαπόδοσης του πρωτοκόλλου 58***

**3.1 Ρυθμοαπόδοση Κορεσμού (Saturation Throughput) 58**

**3.2 Προσέγγιση υπολογισμού της ρυθμοαπόδοσης κορεσμού 60**

**3.3 Πιθανότητα μετάδοσης πακέτων 61**
3.3.1 Ανάλυση Μαρκοβιανού μοντέλου 61
3.3.2 Προσδιορισμός πιθανότητας μετάδοσης πακέτων 67

**3.4 Υπολογισμός Ρυθμοαπόδοσης 69**

**3.5 Πιστοποίηση μαθηματικού μοντέλου 73**

**3.6 Βελτίωση αρχικού μοντέλου 75**
3.6.1 Μοντέλο Μαρκοβιανών ανελίξεων 76
3.6.2 Υπολογισμός ρυθμοαπόδοσης κορεσμού 80
3.6.3 Πιστοποίηση μοντέλου 81
3.6.4 Ρυθμοαπόδοση κορεσμού για την Βασική μέθοδο 82
3.6.5 Ρυθμοαπόδοση κορεσμού για την μέθοδο RTS/CTS 83

**3.7 Διαφορετικές προσεγγίσεις του αρχικού μοντέλου 85**

***Κεφάλαιο 4 86***

***Ανάπτυξη απλοποιημένου μοντέλου Μαρκοβιανών ανελίξεων 86***

**4.1 Λειτουργική περιγραφή και παραδοχές 86**

**4.2 Μονοδιάστατο Μοντέλο Μαρκοβιανών ανελίξεων (χρήση δεσμευμένων πιθανοτήτων) 88**
4.2.1 Περιγραφή της εξέλιξης του σταδίου οπισθοχώρησης 88
4.2.2 Υπολογισμός της πιθανότητας εκπομπής τ 92

**4.3 Μονοδιάστατο μοντέλο Μαρκοβιανών ανελίξεων 97**
4.3.1 Περιγραφή της εξέλιξης του backoff stage συναρτήσει της παραμονής σε ένα στάδιο 97
4.3.2 Υπολογισμός της πιθανότητας εκπομπής τ 103

**4.4 Μέση καθυστέρηση επιτυχούς μετάδοσης πακέτων 105**
4.4.1 Μέσο μήκος χρονοθυρίδας 106

4.4.2 Μέσος αριθμός χρονοθυρίδων επιτυχούς μετάδοσης _____106

**4.5 Πιστοποίηση μονοδιάστατου μοντέλου_____109**

4.5.1 Υπολογισμός της ρυθμοαπόδοσης (μέθοδοι Βασική και RTS/CTS) ___110

4.5.2 Υπολογισμός της μέσης καθυστέρησης επιτυχούς μετάδοσης _____112

**4.6 Συμπεράσματα_____115**

***Βιβλιογραφία _____117***

# ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ-ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Εικόνα 1 - Κατηγοριοποίηση Ασύρματων Δικτύων....13
Εικόνα 2 - IEEE 802.11 protocol stack [20]....15
Εικόνα 3 – Διαστρωμάτωση του προτύπου IEEE 802.11....16
Εικόνα 4 - Ad-hoc λειτουργία....18
Εικόνα 5 - Τοπολογίες BSS και ESS [13]....19
Εικόνα 6 - Σύστημα Διανομής [14]....20
Εικόνα 7 - Πλήρης Αρχιτεκτονική του 802.11 [16]....24
Εικόνα 8 - Wi-Fi trademark....35
Εικόνα 9 - Αρχιτεκτονική του IEEE 802.11....38
Εικόνα 10 - Σχέση μεταξύ των IFS....39
Εικόνα 11 - Βασική μέθοδος μετάδοσης....43
Εικόνα 12 - Λόγος χρήσης του backoff....44
Εικόνα 13 - Παράδειγμα αύξησης του CW [16]....46
Εικόνα 14 - Μείωση του μετρητή οπισθοχώρησης....47
Εικόνα 15 - RTS/CTS τετραμερής χειραψία....49
Εικόνα 16 - Λειτουργία μηχανισμού RTS/CTS....50
Εικόνα 17 - Πρόβλημα κρυμμένων σταθμών....51
Εικόνα 18 - Ενημέρωση NAV ενός κρυμμένου σταθμού....52
Εικόνα 19 - Απόδοση Κορεσμού [22]....59
Εικόνα 20 - Δισδιάστατο Μαρκοβιανό μοντέλο [22]....62
Εικόνα 21 - Μείωση backoff μετρητή....64
Εικόνα 22 - Επιτυχημένη μετάδοση πακέτου....65
Εικόνα 23 - Αποτυχημένη μετάδοση πακέτου (στάδιο 0-m)....66
Εικόνα 24 - Αποτυχημένη μετάδοση πακέτου (στάδιο m)....67
Εικόνα 25 - Ts και Tc για την Βασική μέθοδο πρόσβασης....71
Εικόνα 26 - Ts και Tc της μεθόδου RTS/CTS....72
Εικόνα 27 - Ρυθμοαπόδοση Κορεσμού....74
Εικόνα 28 - Μοντέλο Μαρκοβιανών ανελίξεων (Wu) [24][26]....77
Εικόνα 29- Σύγκριση απόδοσης Βασικής μεθόδου....83
Εικόνα 30 - Σύγκριση απόδοσης μεθόδου RTS/CTS....84
Εικόνα 31 - Μονοδιάστατο Μαρκοβιανό μοντέλο (συνεχών μεταβάσεων)....89
Εικόνα 32 - Μονοδιάσταστο Μαρκοβιανό μοντέλο (παραμονή ανά στάδιο)....98
Εικόνα 33 - Μετάβαση σε περίπτωση σύγκρουσης....99
Εικόνα 34 - Μετάβαση επιτυχημένης μετάδοσης....99
Εικόνα 35 - Μετάβαση στο αρχικό στάδιο από το τελευταίο (i=R)....100
Εικόνα 36 - Κατάσταση παραμονής στο ίδιο στάδιο....100
Εικόνα 37- Σύγκριση απόδοσης Βασικής μεθόδου....111
Εικόνα 38 - Σύγκριση απόδοσης μεθόδου RTS/CTS....112
Εικόνα 39 - Μέση καθυστέρηση μετάδοσης πακέτων....113

# ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1- Κατηγορίες Ασύρματων Δικτύων (Πρότυπο/Τεχνολογία) ..... 12
Πίνακας 2 - Διαθέσιμα κανάλια ανά περιοχή (DSSS) ..... 27
Πίνακας 3 - Διαθέσιμα κανάλια ανά περιοχή (FHSS) ..... 28
Πίνακας 4 - Time Slots και Παράθυρο διεκδίκησης ..... 45
Πίνακας 5 - Παράμετροι πειραμάτων (αρχικό μοντέλο) ..... 73
Πίνακας 6 - Παράμετροι πειραμάτων (βελτιωμένο μοντέλο) ..... 81
Πίνακας 7 - Πίνακας μετάβασης καταστάσεων (αρχικό μονοδιάστατο μοντέλο) ..... 90
Πίνακας 8 - Πίνακας μετάβασης καταστάσεων ..... 101
Πίνακας 9 - Παράμετροι πειραμάτων φυσικού επιπέδου (μονοδιάστατο μοντέλο) .. 109
Πίνακας 10 - Παράμετροι πειραμάτων υποεπιπέδου MAC (μονοδιάστατο μοντέλο) ..... 110

# *Πρόλογος*

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως θέμα την **«Απόδοση πρωτοκόλλου ασύρματων δικτύων»**. Το ενδιαφέρον εστιάζεται στην μελέτη της απόδοσης του πρωτοκόλλου IEEE 802.11 ασύρματων δικτύων και στην περιγραφή της λειτουργίας του υποεπιπέδου Ελέγχου Πρόσβασης στο Μέσο (Medium Access Control - MAC). Επιπρόσθετα της βιβλιογραφικής μελέτης του προτύπου IEEE 802.11, η διπλωματική πραγματεύεται την ανάπτυξη ενός νέου απλοποιημένου Μαρκοβιανού μοντέλου που αναπαριστά την λειτουργία της μετάδοσης πακέτων του υποεπιπέδου MAC. Ακολουθεί το περίγραμμα της διπλωματικής η οποία χωρίζεται σε τέσσερα κεφάλαια.

Το πρώτο κεφάλαιο περιγράφει γενικά την αρχιτεκτονική των ασύρματων δικτύων και τις κατηγορίες των τοπολογιών που μπορούν να υλοποιηθούν με την χρήση ασύρματων δικτύων. Αφού γίνει μια εισαγωγή στα ασύρματα δίκτυα παρουσιάζεται αναλυτικά το πρότυπο IEEE 802.11.

Το δεύτερο κεφάλαιο επικεντρώνεται στο υποεπίπεδο Ελέγχου Πρόσβασης στο Μέσο (MAC), μέσω της λειτουργικής περιγραφής του. Ειδικότερα περιγράφονται οι Λειτουργίες Συντονισμού του προτύπου IEEE 802.11, με έμφαση στην Κατανεμημένη Λειτουργία Συντονισμού (DCF) και τις υπομεθόδους που αυτή διαθέτει (Βασική και RTS/CTS).

Στο τρίτο κεφάλαιο παρατίθεται η ανάλυση της ρυθμοαπόδοσης του προτύπου σε συνθήκες κορεσμού. Η ανάλυση αυτή έγινε με την χρήση δύο βασικών μοντέλων Μαρκοβιανών ανελίξεων, που προτάθηκαν το αρχικό από τον G. Biachi και το δεύτερο από τον H. Wu. Τα αναλυτικά αυτά μοντέλα αποτελούν την βάση για την βιβλιογραφική μελέτη του προτύπου.

Τέλος στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η ανάπτυξη ενός απλοποιημένου μοντέλου Μαρκοβιανών ανελίξεων, που αναπαριστά την λειτουργία του υποεπιπέδου MAC. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται για την εξαγωγή των εξισώσεων της ρυθμοαπόδοσης του προτύπου. Επίσης προσδιορίζονται σύμφωνα με το αναλυτικό μοντέλο οι εξισώσεις για τον υπολογισμό της μέσης καθυστέρησης επιτυχούς μετάδοσης πακέτων.

# *Κεφάλαιο 1*
# *Αρχιτεκτονική ασύρματων δικτύων*

## *1.1 Εισαγωγή*

Τα τελευταία χρόνια όλο και περισσότεροι άνθρωποι έχουν απαιτήσεις για πρόσβαση στο Διαδίκτυο ή σε εταιρικές δικτυωμένες υποδομές, καθώς η πληροφορία είναι βασικό συστατικό πλέον της καθημερινής ζωής. Είναι γεγονός ότι χιλιάδες άνθρωποι χρειάζονται να βρίσκονται στο δίκτυο όλη την ώρα και να ανακτούν την πληροφορία που χρειάζονται μέσω των υπολογιστών διαφορετιών τύπων (laptop, palmtop, notebook), δίχως να είναι ενσύρματα συνδεδεμένοι σε κάποια επικοινωνιακή υποδομή. Συνεπώς γι' αυτούς του κινητούς χρήστες οι ενσύρματες υποδομές δεν αποτελούν καλή λύση. Γι' αυτούς λοιπόν τους χρήστες η λύση είναι οι ασύρματες επικοινωνίες. Ο χώρος της ασύρματης επικοινωνίας και των προτύπων, τα οποία θα την καθορίζουν, εξελίσσεται συνεχώς. Ασύρματα δίκτυα υπάρχουν εδώ και αρκετά χρόνια από διάφορους κατασκευαστές, αλλά η ταχύτητα που προσέφεραν ήταν μικρή στην αρχή και δεν υπήρχε συμβατότητα μεταξύ τους.

Σήμερα είναι διαθέσιμος ένας αριθμός από καινούργιες συσκευές και προϊόντα ασύρματης επικοινωνίας που βασίζονται σε νέες τεχνολογίες και νέα πρότυπα. Τα τελευταία χρόνια οι φορητοί υπολογιστές (laptop, palmtop) είναι διαθέσιμοι και ελκυστικοί για το ευρύ κοινό, αφού έχουν πλέον συγκρίσιμο κόστος, υπολογιστική ισχύ και ποιότητα υπηρεσιών με τους σταθερούς υπολογιστές. Η εξάπλωση των φορητών Η/Υ (laptops) και η ανάγκη για εύκολη σύνδεση σε υπάρχοντα τοπικά δίκτυα και στις υπηρεσίες που αυτά παρέχουν έχουν οδηγήσει στην αλματώδη ανάπτυξη πρωτοκόλλων ασύρματων δικτύων. Η τεχνολογία ασύρματων δικτύων μπορεί να χρησιμοποιηθεί εναλλακτικά και για σταθερούς προσωπικούς υπολογιστές επειδή εξασφαλίζει ευκολία εγκατάστασης, ιδιαίτερα σε χώρους όπου η εγκατάσταση καλωδίων είναι δύσκολη ή μη πρακτική (εγκατάσταση δικτύου για την διάρκεια μίας έκθεσης ή ενός συνεδρίου). Η εγκατάσταση ασύρματου τοπικού δικτύου έχει αυξημένο αρχικό κόστος λόγω του αυξημένου κόστους των συσκευών, μακροχρόνια όμως είναι φθηνότερο από ένα ενσύρματο τοπικό δίκτυο λόγω του μειωμένου

κόστους συντήρησης αφού δεν απαιτεί την εγκατάσταση πρόσθετων καλωδιώσεων σε περίπτωση μετακινήσεων.

Η αποτελεσματική αντιμετώπιση τα τελευταία χρόνια προβλημάτων όπως η ασφάλεια και η μείωση του αρχικού κόστους εγκατάστασης ασύρματων τοπικών δικτύων, σε συνδυασμό με τα παραπάνω πλεονεκτήματα, εξασφαλίζουν την ραγδαία εξάπλωση των ασύρματων τοπικών δικτύων τα επόμενα χρόνια. Όλα αυτά έχουν σαν αποτέλεσμα την έρευνα για την ανάπτυξη προτύπων για την υποστήριξη των ασύρματων επικοινωνιών.

## *1.2 Κατηγοριοποίηση Ασύρματων Δικτύων*

Τα ασύρματα δίκτυα ανάλογα με το εύρος που καλύπτουν μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε :

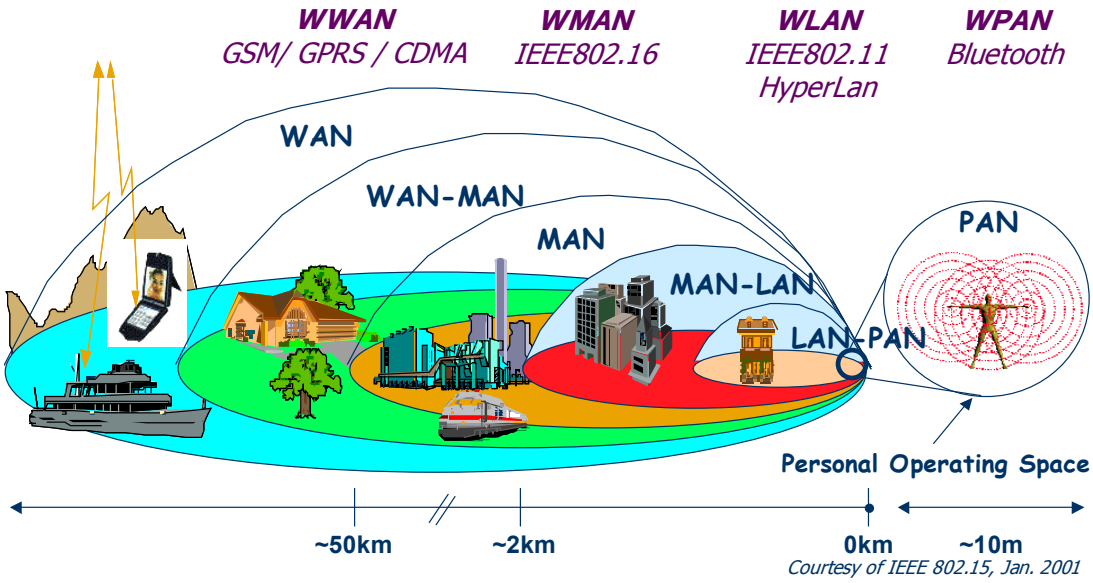
- Ασύρματα Δίκτυα Ευρείας Περιοχής – Wireless WAN
- Ασύρματα Μητροπολιτικά Δίκτυα – Wireless MAN
- Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα Η/Υ – Wireless LAN
- Ασύρματα Προσωπικά Δίκτυα – Wireless PAN

Για κάθε μία από τις παραπάνω κατηγορίες έχουν αναπτυχθεί και οι αντίστοιχες τεχνολογίες και πρότυπα. Ενδεικτικά αναφέρονται στον παρακάτω πίνακα οι αντιστοιχία των κατηγοριών με τις τεχνολογίες :

**Πίνακας 1- Κατηγορίες Ασύρματων Δικτύων (Πρότυπο/Τεχνολογία)**

| **Κατηγορίες** | **Πρότυπο – Τεχνολογία** |
|---|---|
| **WWAN** | GSM, GPRS, CDMA |
| **WMAN** | IEEE 802.16 |
| **WLAN** | IEEE 802.11, HyperLan |
| **WPAN** | Bluetooth |

Η ανάλογη συσχέτιση κατηγορίας με περιοχή που καλύπτει ή κάθε μια παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα.




**Εικόνα 1 - Κατηγοριοποίηση Ασύρματων Δικτύων**

Η τεχνολογία ασύρματων τοπικών δικτύων (Wireless Local Area Network, WLAN) προσφέρει πρόσβαση σε χρήστες που μπορούν να μετακινούνται μέσα σε ένα μικρό χώρο και διαθέτουν ασύρματο τερματικό εξοπλισμό (κατάλληλες κάρτες δικτύου). Πρόκειται λοιπόν κυρίως για τεχνολογία εσωτερικών χώρων (indoor) και πολλαπλής πρόσβασης (point-to-multipoint) [1][7].

Τα πρότυπα για τα Ασύρματα LAN παίζουν σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη των προσωπικών επικοινωνιών. Συγκεκριμένα μία από τις χρήσεις τους είναι η κάλυψη τοπικών περιοχών και η παροχή διασυνδεσιμότητας μεταξύ των ασύρματων PANs και των ασύρματων δικτύων ευρείας περιοχής. Τα τελευταία χρόνια γίνονται σταθερά βήματα προόδου για την βελτίωση της ποιότητας των ασυρμάτων δικτύων με όλο και αυξανόμενες ταχύτητες και νέα πρότυπα από οργανισμούς και συμμαχίες γνωστών εταιρειών. Χαρακτηριστικά είναι τα παραδείγματα του Bluetooth, GPRS (General Packet Radio Service), ενώ σε εξέλιξη βρίσκονται και άλλα δύο πρότυπα. Το ένα αναπτύσσεται στην Ευρώπη από το ETSI (European Telecommunications Standard Institute) και ονομάζεται HIPERLAN (High – Performance European Radio LAN). Το άλλο αναπτύσσεται από την IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) και ονομάζεται 802.11. Και τα δύο αυτά πρότυπα καλύπτουν τις προδιαγραφές για το φυσικό επίπεδο και το υπόεπίπεδο MAC (Medium Access Control).

Το πιο διαδεδομένο πρωτόκολλο ασύρματων τοπικών δικτύων είναι το IEEE 802.11, που αναπτύχθηκε από το Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE). Τα αντίστοιχα πρότυπα που έχουν αναπτυχθεί από Ευρώπη και Ιαπωνία δεν έχουν ευρεία αποδοχή.

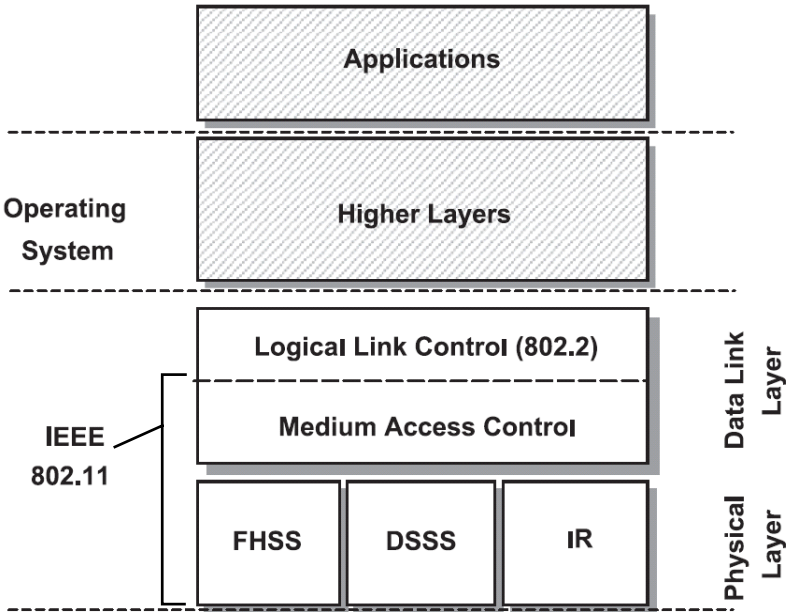
Η Ιαπωνία εισήγαγε το πρότυπο SPDCS ("Small Power Data Communication System), που λειτουργεί στα 2,4Ghz. Η Ιαπωνία έχει αναπτύξει πρότυπα στο φάσμα των 19Ghz - Light Wireless Communications System (LWCS) και στο φάσμα των 30-300GHz - Millimeter Wave Wireless LAN (MWWL).

Στην Ευρώπη γενικά για την ασύρματη επικοινωνία έχει αναπτυχθεί από τον ETSI (European Telecommunications Standards Institute) το πρότυπο Digital European Cordless Telecommunications (DECT), που όμως δεν αποτελεί πρότυπο για LAN, αλλά επικεντρώνεται στην τηλεφωνία και την ISDN πρόσβαση. Για ασύρματα τοπικά δίκτυα αναπτύχθηκε επίσης από τον ETSI/BRAN (Broadband Radio Access Networks) το πρότυπο HIPERLAN (High Performance Radio Local Area Network). Το HIPERLAN Type 1 είναι ένα πρότυπο που σχεδιάστηκε για να παρέχει υψηλής ταχύτητας επικοινωνία (20 Mbit/s) μεταξύ φορητών συσκευών στο εύρος των 5 GHz. Η εξέλιξη του είναι το HIPERLAN/2. Το HIPERLAN/ 2 αποτελεί ένα πρότυπο που παρέχει επικοινωνία μέχρι 54 Mbit/s στο Φυσικό επίπεδο, σε διάφορα δίκτυα συμπεριλαμβανομένων των 3G mobile δίκτυα κορμού, δίκτυα ATM και δίκτυα που βασίζονται στο IP [47] [20].

Στην ακόλουθη ενότητα παρουσιάζεται το πρότυπο της IEEE 802.11 που αποτελεί το πιο σημαντικό, ώριμο και αναπτυσσόμενο πρότυπο Ασύρματων Τοπικών δικτύων.

## *1.3 Διαστρωμάτωση του IEEE 802.11*

Όπως όλα τα πρότυπα 802 της IEEE, έτσι και το 802.11 επικεντρώνεται στα δύο χαμηλότερα επίπεδα του μοντέλου αναφοράς OSI (Open System Interconnection), δηλαδή στο φυσικό επίπεδο (Physical Layer – PHY) και στο υποεπίπεδο MAC (Medium Access Control) του επιπέδου ζεύξης δεδομένων (Data Link Layer), όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.

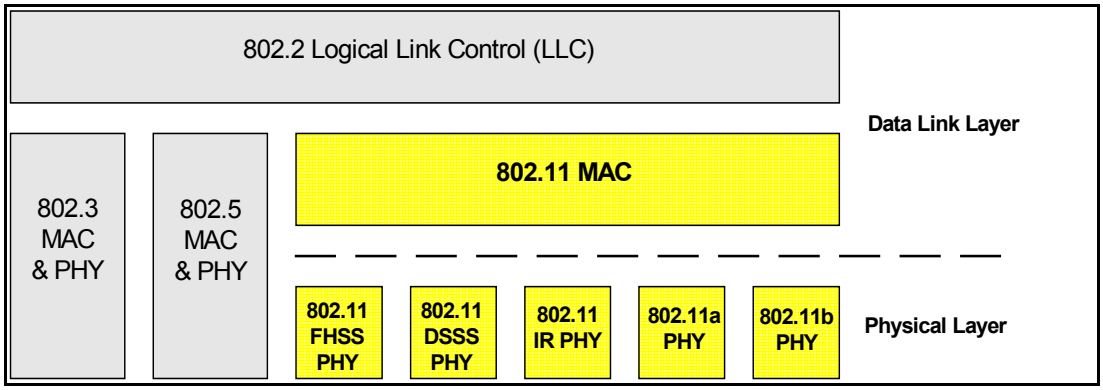



**Εικόνα 2 - IEEE 802.11 protocol stack [20]**

Το άλλο υποεπίπεδο του επιπέδου ζεύξης δεδομένων, δηλαδή το υποεπίπεδο ελέγχου λογικής ζεύξης (Logical Link Control – LLC), είναι αυτό που έχει προτυποποιηθεί ως IEEE 802.2 και χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με όλα τα διαφορετικά MAC της σειράς IEEE 802, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3. Η φιλοσοφία που ακολουθεί το πρότυπο 802.11 είναι η ύπαρξη ενός μόνο MAC που όμως υποστηρίζει περισσότερα του ενός φυσικά επίπεδα. Το υποεπίπεδο ελέγχου λογικής ζεύξης IEEE 802.2 και τα πιο πάνω επίπεδα της στοίβας των πρωτοκόλλων παραμένουν όπως ακριβώς είναι και για τα υπόλοιπα 802 LANs, επιτρέποντας απλές διαδικασίες γεφύρωσης από ασύρματα σε IEEE ενσύρματα δίκτυα (Εικόνα 2 - IEEE 802.11 protocol stack)[6].

Το υποεπίπεδο MAC του 802.11, όπως και το 802.3 Ethernet MAC, πρέπει να υποστηρίζει πολλαπλούς χρήστες σε ένα διαμοιραζόμενο μέσο μετάδοσης. Για να αποφεύγονται οι συγκρούσεις στο ενσύρματο Ethernet, το τερματικό που μεταδίδει και 'ακούει' ταυτόχρονα χρησιμοποιώντας την τεχνική Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) [3]. Στα ασύρματα συστήματα ωστόσο, το τερματικό δεν έχει την δυνατότητα να μεταδώσει και να λάβει ταυτόχρονα, γι' αυτό και δεν μπορεί να ανιχνεύσει μία σύγκρουση. Για τον λόγο αυτό το 802.11 χρησιμοποιεί μία τροποποιημένη τεχνική, που ονομάζεται Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA). Το CSMA/CA επιχειρεί να αποφύγει

τις συγκρούσεις χρησιμοποιώντας σαφή επιβεβαίωση πακέτου (packet acknowledgment - ACK), που σημαίνει ότι ένα πακέτο ACK αποστέλλεται από τον σταθμό του παραλήπτη για να επιβεβαιώσει ότι το πακέτο δεδομένων έχει παραληφθεί ακέραιο. Αυτό θα αποτελέσει θέμα του επόμενου κεφαλαίου.




**Εικόνα 3 – Διαστρωμάτωση του προτύπου IEEE 802.11**

## *1.4 Βασικές μονάδες*

Οι βασικές μονάδες από τις οποίες μπορεί να συσταθεί ένα ασύρματο δίκτυο είναι τέσσερις :

- *Σταθμοί (Stations - STA) :* Οι σταθμοί που ανταλλάσσουν πληροφορία μέσω του ασυρμάτου δικτύου συνήθως είναι φορητές συσκευές (για παράδειγμα laptops), χωρίς όμως αυτό να είναι απαραίτητο.
- *Πομποδέκτης ή Σημείο πρόσβασης (Access Point – AP) :* Το AP είναι η μονάδα που παίζει το ρόλο γέφυρας μεταξύ του ενσύρματου και του ασύρματου δικτύου, μετατρέποντας κατάλληλα τα πλαίσια που ανταλλάσσονται μεταξύ αυτών. Επιτελεί και πολλές άλλες λειτουργίες στο ασύρματο δίκτυο που θα αναφερθούν στη συνέχεια.
- *Ασύρματο μέσο μετάδοσης (Wireless Medium - WM) :* Έχουν οριστεί διάφορα φυσικά στρώματα που χρησιμοποιούν είτε ραδιοσυχνότητες είτε υπέρυθρες ακτίνες για τη μετάδοση των πλαισίων μεταξύ των σταθμών του ασύρματου δικτύου.

- *Σύστημα διανομής (Distribution System - DS) :* Το σύστημα διανομής ενώνει τα διάφορα AP του ίδιου δικτύου, επιτρέποντάς τους να ανταλλάσσουν πλαίσια. Το 802.11 δεν προσδιορίζει τον τρόπο που θα γίνεται αυτό.

Τα είδη του εξοπλισμού όσον αφορά τα συστατικά που απαρτίζουν ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο (WLAN), είναι ο ασύρματος σταθμός και το σημείο πρόσβασης. Ο ασύρματος σταθμός είναι εξοπλισμένος με μία ασύρματη κάρτα δικτύου (Wireless NIC). Ένα AP συνήθως αποτελείται από μία ασύρματη διεπαφή, μία ενσύρματη δικτυακή διεπαφή (πχ 802.3), και λογισμικό που παρέχει τις λειτουργίες γεφύρωσης σύμφωνα με το πρότυπο γεφύρωσης 802.11d. Το AP λειτουργεί ως βασικός σταθμός για το ασύρματο δίκτυο, απ' όπου παρέχεται πρόσβαση για ασύρματους σταθμούς στο ενσύρματο δίκτυο.

Η βασική δομική μονάδα κάθε 802.11 δικτύου αποκαλείται Basic Service Set (BSS) και αποτελείται από μία ομάδα σταθμών που επικοινωνούν μεταξύ τους. Τα όρια του BSS καθορίζονται από την περιοχή ραδιοκάλυψης, που ονομάζεται Basic Service Area (BSA). Ένας σταθμός σε ένα BSS μπορεί να επικοινωνεί με οποιονδήποτε άλλο σταθμό στο ίδιο BSS [1][16].

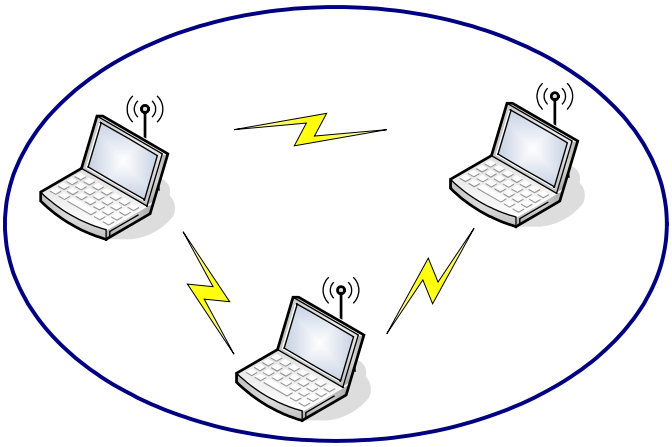
## *1.5 Τοπολογία - Αρχιτεκτονική*

Το IEEE 802.11 υποστηρίζει δύο βασικές τοπολογίες για WLAN : Independent Basic Service Set (IBSS), και το Extended Service Set (ESS). Οι τοπολογίες αυτές υποστηρίζονται μέσω υλοποιήσεων του υποεπιπέδου MAC. Επίσης το πρότυπο 802.11 καθορίζει δύο τρόπους (mode) λειτουργίας για τις τοπολογίες : τον ad-hoc/IBSS και τον Infrastructure mode, οι οποίοι σχηματίζουν ανεξάρτητα δίκτυα (independent networks) και δίκτυα υποδομής (infrastructure networks) αντίστοιχα.

### *1.5.1 Τοπολογία ανεξάρτητων ασύρματων δικτύων*

Σε ένα ανεξάρτητο δίκτυο κάθε σταθμός επικοινωνεί απευθείας με όλους τους υπόλοιπους. Το BSS σε αυτήν την περίπτωση ονομάζεται και IBSS (Independent BSS) ή ad-hoc BSS ή πιο απλά ad-hoc δίκτυο.

Η λογική προσέγγιση του ad-hoc τρόπου λειτουργίας είναι αντίστοιχη με ένα δίκτυο ομότιμων συνδέσεων (peer-to-peer), όπου δεν απαιτείται κάποιος κεντρικός κόμβος να λειτουργεί ως εξυπηρετητής. Τα ασύρματα LAN τοπολογίας IBSS αποτελούνται από ένα πλήθος κόμβων ή ασύρματων σταθμών που επικοινωνούν απευθείας ο ένας με τον άλλο σε ad hoc peer-to-peer βάση, σχηματίζοντας μία τοπολογία πλέγματος (mesh). Γενικά οι ad hoc υλοποιήσεις καλύπτουν μία περιορισμένη περιοχή, δεν έχουν την δυνατότητα σύνδεσης με κάποιο ευρύτερο δίκτυο και συνήθως είναι προσωρινές, δηλαδή δημιουργούνται για κάποιο σκοπό και μετά διαλύονται [13].



**Εικόνα 4 - Ad-hoc λειτουργία**

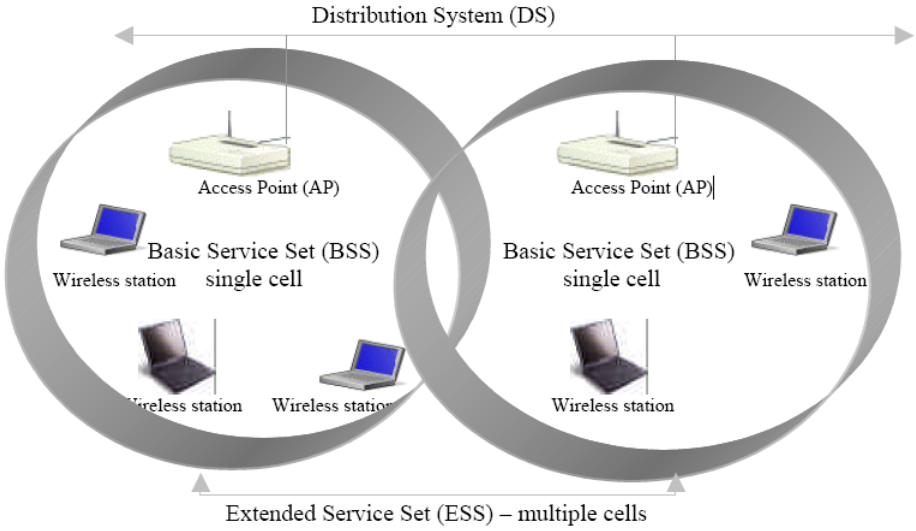
### *1.5.2 Τοπολογία ασύρματων δικτύων υποδομής*

Οι τοπολογίες τύπου υποδομής (infrastructure mode), σχηματίζουν ένα ασύρματο δίκτυο που αποτελείται από τουλάχιστον ένα σημείο πρόσβασης (access point - AP) που συνδέεται σε ενσύρματη υποδομή δικτύου, και από ένα σύνολο ασύρματων τελικών σταθμών. Η διαμόρφωση αυτή είναι το Βασικό Σύνολο Υπηρεσιών (Basic Service Set - BSS).Από την στιγμή που τα περισσότερα εταιρικά WLANs απαιτούν πρόσβαση σε ενσύρματα LAN για τις υπηρεσίες που παρέχουν (file servers, εκτυπωτές, σύνδεση με το Διαδίκτυο), είναι λογικό να λειτουργούν σε infrastructure mode και να βασίζονται στους κόμβους πρόσβασης σημείου (Access Point nodes), οι οποίοι λειτουργούν ως λογικοί εξυπηρετητές για κάθε κελί WLAN ή κανάλι. Η επικοινωνία μεταξύ δύο κόμβων, Α και Β, γίνεται στην πραγματικότητα από τον κόμβο Α προς το AP και μετά από το AP προς τον κόμβο Β. Το AP είναι

απαραίτητο για να παρέχει τις λειτουργίες γεφύρωσης (bridging function) και να συνδέσει πολλαπλά WLAN κελιά, καθώς και να συνδέσεις WLAN κελιά με το ενσύρματο τοπικό δίκτυο της εκάστοτε εταιρείας.

Η τοπολογία Εκτεταμένου Συνόλου υπηρεσιών (Extended Service Set - ESS) υλοποιείται όταν ένα σύνολο από δύο ή περισσότερα BSSs σχηματίζουν ένα ενιαίο υποδίκτυο. Οι διαμορφώσεις τύπου ESS αποτελούνται από πολλαπλά BSS κελιά που μπορούν να συνδεθούν χρησιμοποιώντας ενσύρματο ή ασύρματο κορμό δικτύου. Αυτό δημιουργείται ενώνοντας τα APs των BSSs μέσω ενός ενσύρματου δικτύου κορμού, που ονομάζεται Σύστημα Διανομής (Distribution System –DS). Με αυτόν τον τρόπο είναι εφικτή η επικοινωνία μεταξύ σταθμών που ανήκουν σε διαφορετικά BSSs αλλά στο ίδιο ESS.

Το IEEE 802.11 υποστηρίζει ESS τοπολογίες στις οποίες πολλαπλά κελιά μπορούν να χρησιμοποιήσουν το ίδιο κανάλι ή να χρησιμοποιήσουν διαφορετικά κανάλια για να αυξήσουν το σύνολο της απόδοσής τους [8][12].



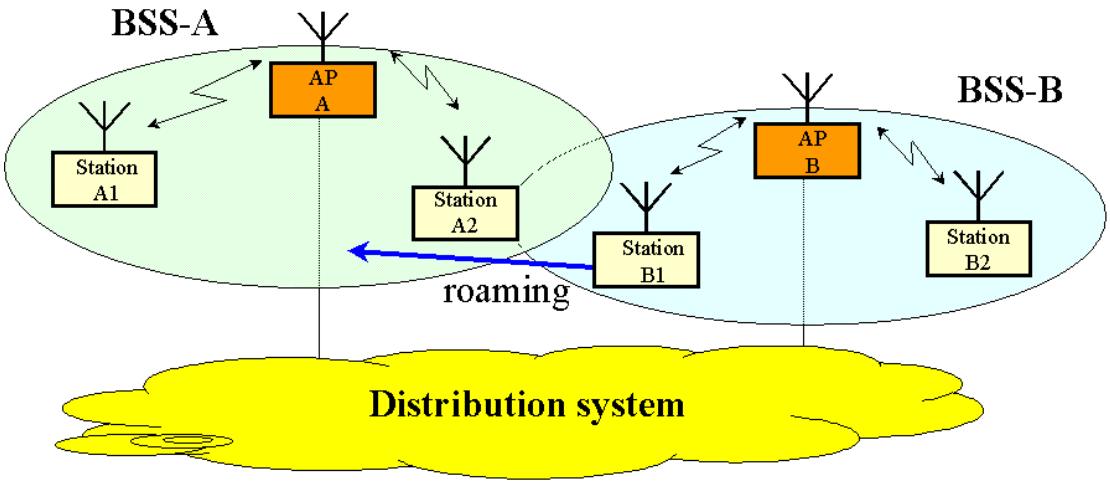

**Εικόνα 5 - Τοπολογίες BSS και ESS [13]**

### *1.5.3 Σύστημα Διανομής*

Ένα 802.11 WLAN βασίζεται σε κυψελωτή αρχιτεκτονική. Κάθε κελί (BSS) είναι συνδεδεμένο σε ένα βασικό σταθμό ή AP. Όλα τα AP είναι συνδεμένα σε ένα σύστημα διανομής (Distribution System - DS) που είναι παρόμοιο με ένα δίκτυο

κορμού, συνήθως Ethernet ή Ασύρματο. Τα συστατικά που έχουν αναφερθεί εμφανίζονται ως ένα 802 σύστημα για τα ανώτερα επίπεδα του μοντέλου OSI και είναι γνωστά ως το Εκτεταμένο σύνολο Υπηρεσιών (ESS).

Το πρότυπο 802.11 καθορίζει το σύστημα διανομής ως ένα στοιχείο που διασυνδέει BSSs μέσα σε ένα ESS με την χρήση συσκευών access point. Το σύστημα διανομής υποστηρίζει τους διάφορους 802.11 τύπους μετακίνησης με την παροχή λογικών υπηρεσιών που είναι απαραίτητες για τον χειρισμό της αντιστοίχισης των διευθύνσεων με τους προορισμούς (address-to-destination mapping) και την διασύνδεση πολλαπλών BSSs. Ένα access point είναι ένας σταθμός με διεύθυνση, που παρέχει μία διεπαφή προς το σύστημα διανομής, για τους σταθμούς που βρίσκονται εντός των διαφόρων BSSs. Τα ανεξάρτητα δίκτυα BSS και ESS δεν είναι ευκρινή στο υποεπίπεδο LLC [14].




**Εικόνα 6 - Σύστημα Διανομής [14]**

## *1.5.4 Portal*

Το πρότυπο 802.11 δεν περιορίζει την σύνθεση ενός συστήματος διανομής, το οποίο μπορεί να είναι συμβατό με το 802 ή μη-συμβατό. Εάν τα πλαίσια δεδομένων χρειάζεται να μεταδοθούν από ή προς ένα μη-συμβατό IEEE 802.11 LAN, τότε τα πλαίσια αυτά, όπως καθορίζεται στο πρότυπο, εισέρχονται και εξέρχονται μέσω ενός λογικού σημείου πρόσβασης που ονομάζεται Portal. Το Portal παρέχει λογική διασύνδεση μεταξύ των υφιστάμενων ενσύρματων τοπικών δικτύων και των 802.11 δικτύων. Όταν ένα σύστημα διανομής αποτελείται από συστατικά τύπου 802, όπως το

802.3 (Ethernet) ή 802.5 (Token Ring), τότε το portal και το access point είναι το ίδιο, και λειτουργεί ως γέφυρα μετάφρασης [14][9].

## *1.6 Λογικές υπηρεσίες διεπαφών*

Η αρχιτεκτονική του 802.11 επιτρέπει στα συστήματα διανομής να μην είναι υποχρεωτικά ίδια με τα υφιστάμενα ενσύρματα LAN. Ένα DS μπορεί να αποτελείται από πολλές διαφορετικές τεχνολογίες. Το IEEE 802.11 δεν περιορίζει το DS στο να βασίζεται είτε στο επίπεδο σύνδεσης δεδομένων είτε στο επίπεδο δικτύου. Επίσης το πρότυπο δεν περιορίζει το DS να είναι κεντροποιημένο ή κατανεμημένο στην υλοποίησή του και γενικά δεν καθορίζονται συγκεκριμένες λεπτομέρειες υλοποίησης. Το IEEE 802.11 καθορίζει τις υπηρεσίες (*services)*.

Οι υπηρεσίες σχετίζονται με διαφορετικά συστατικά της αρχιτεκτονικής. Υπάρχουν δύο κατηγορίες υπηρεσιών : υπηρεσία σταθμού - station service (SS) και υπηρεσία συστήματος διανομής - distribution system service (DSS). Και οι δύο κατηγορίες χρησιμοποιούνται από το υποεπίπεδο ελέγχου πρόσβασης στο μέσο (MAC sublayer).

Το ασύρματο δίκτυο 802.11 προσφέρει εννέα βασικές υπηρεσίες, τρεις από αυτές σχετίζονται με τη μεταφορά δεδομένων και οι υπόλοιπες έξι σχετίζονται με τη διαχείριση. Οι υπηρεσίες αυτές είναι οι εξής :

a) Αυθεντικοποίηση –Authentication

Αν απαιτείται από το διαχειριστή του δικτύου, πρέπει κάθε χρήστης να πιστοποιεί την ταυτότητά του πριν να προχωρήσει στη διαδικασία του association.

b) Συσχέτιση – Association

Απαραίτητη διαδικασία συσχετισμού ενός σταθμού με το AP, προκειμένου να είναι σε θέση να στείλει και να δεχτεί πλαίσια μέσω του ασυρμάτου δικτύου. Όταν ένας σταθμός είναι συσχετισμένος με ένα AP, δημιουργείται τότε μια λογική σχέση μεταξύ τους, ώστε το DS να γνωρίζει που και πώς να παραδώσει δεδομένα σε έναν ασύρματο σταθμό.

c) Αποαυθεντικοποίηση - Deauthentication

Τερματισμός μιας ισχύουσας κατάστασης authentication. Τερματίζει επίσης και το association, εφόσον το authentication είναι προαπαιτούμενο αυτού.

d) Αποσυσχέτιση - Disassociation

Η διαδικασία αυτή αφαιρεί έναν σταθμό από το δίκτυο. Το MAC του 802.11 μπορεί να χειριστεί και σταθμούς που εγκαταλείπουν το δίκτυο χωρίς να κάνουν πρώτα disassociation.

e) Διανομή – Distribution

Η υπηρεσία αυτή είναι απαραίτητη για την παράδοση ενός πλαισίου από το AP στον τελικό προορισμό του. Συνίσταται στον εντοπισμό του παραλήπτη, ώστε να γίνει εφικτή η τελική παράδοση του πλαισίου. Έτσι λαμβάνεται απόφαση αν ένα πλαίσιο πρέπει να σταλεί στο ίδιο BSS ή πρέπει να σταλεί στο DS προς παράδοση σε σταθμό συσχετιζόμενο με άλλο AP.

f) Ενοποίηση – Integration

Η υπηρεσία αυτή παρέχεται από το σύστημα διανομής. Είναι υπεύθυνη για τη διασύνδεση του συστήματος διανομής DS σε ένα δίκτυο διαφορετικό του 802.11. Στην ουσία είναι υπεύθυνη για την μετάφραση των πλαισίων από τον ένα τύπο στον άλλο.

g) Ιδιωτικότητα - Privacy

Λόγω του ασύρματου περιβάλλοντος μετάδοσης έχει οριστεί από το 802.11 μία προαιρετική υπηρεσία κρυπτογράφησης των δεδομένων που ονομάζεται WEP (Wired Equivalent Privacy). Το WEP δεν προσφέρει σε καμία περίπτωση ασφαλής μεταφορά δεδομένων και ήδη μελετάται η αντικατάστασή του.

h) Επανασυσχέτιση – Reassociation

Χρησιμοποιείται από τους κινητούς σταθμούς σε περίπτωση μετακίνησης από μία BSS σε μία άλλη.

i) Παράδοση πλαισίων MAC - MSDU (MAC Service Data Unit) delivery

Η παράδοση των πλαισίων MAC στον τελικό προορισμό τους.

Το σύνολο των υπηρεσιών χωρίζονται σε δύο ομάδες : αυτές που αποτελούν τμήμα κάθε σταθμού (STA) και αυτές που είναι τμήμα ενός συστήματος διανομής. [17][16].

### *1.6.1 Υπηρεσίες Σταθμού - Station Service (SS)*

Οι υπηρεσίες που παρέχονται από τους σταθμούς ονομάζονται Υπηρεσίες Σταθμού (station service – SS). Οι υπηρεσίες αυτές βρίσκονται σε κάθε IEEE 802.11 σταθμό (συμπεριλαμβανομένων των APs, επειδή κάθε AP υλοποιεί και τις λειτουργίες ενός σταθμού). Οι SS καθορίζονται για χρήση από τις οντότητες του υποεπιπέδου MAC. Όλοι οι συμβατοί σταθμοί παρέχουν Υπηρεσίες Σταθμού. Οι SS είναι οι εξής :

a) Αυθεντικοποίηση -Authentication

b) Αποαυθεντικοποίηση - Deauthentication

c) Ιδιωτικότητα - Privacy

d) Παράδοση δεδομένων υπηρεσιών υποεπιπέδου MAC - MSDU (MAC Service Data Unit) delivery

### *1.6.2 Υπηρεσίες Συστήματος Διανομής -Distribution system service (DSS)*

Οι υπηρεσίες που παρέχονται από ένα DS είναι γνωστές ως Υπηρεσίες Συστήματος Διανομής. Οι υπηρεσίες αυτές παρουσιάζονται σχηματικά στην αρχιτεκτονικής του IEEE 802.11 με την μορφή βελών εντός των APs, που υποδεικνύουν ότι οι υπηρεσίες χρησιμοποιούνται για να διασχίσουν λογικά όρια του χώρου των διευθύνσεων και του φυσικού μέσου. Η πραγματική ενσωμάτωση των διαφόρων υπηρεσιών μπορεί να είναι ή να μην είναι εντός του AP.

Οι DSSs παρέχονται από τα συστήματα διανομής. Είναι προσβάσιμες μέσω των σταθμών που επίσης παρέχουν DSSs. Οι σταθμοί που παρέχουν πρόσβαση σε DSS είναι το κάθε AP. Οι DSSs είναι οι εξής:

a) Συσχέτιση - Association

b) Αποσυσχέτιση - Disassociation

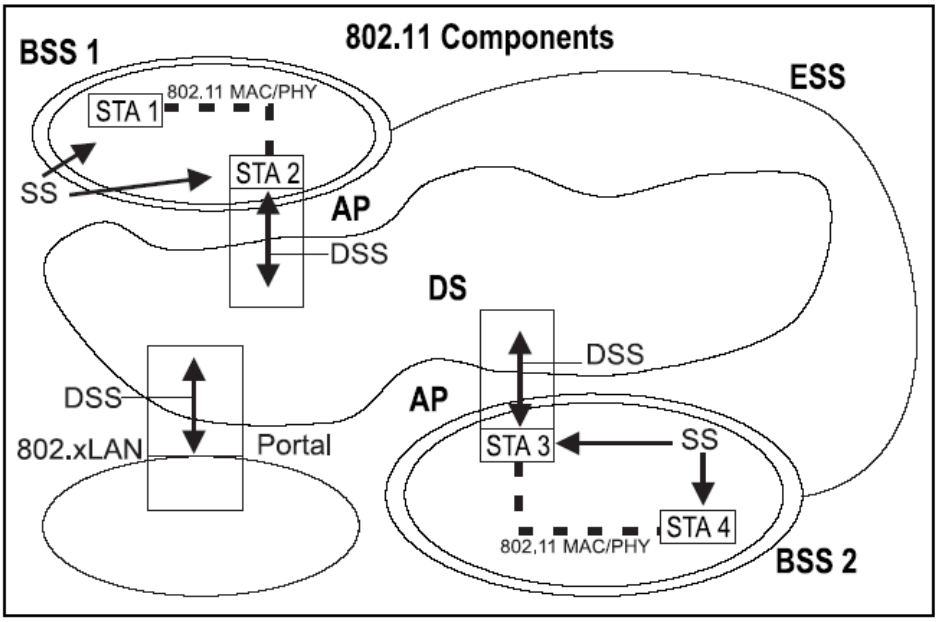
c) Διανομή - Distribution

d) Ενοποίηση - Integration

e) Επανασυσχέτιση - Reassociation

Οι DSS καθορίζονται για χρήση από τις οντότητες του υποεπιπέδου MAC.

Στην παρακάτω εικόνα συνδυάζονται τα συστατικά και οι δύο τύποι των υπηρεσιών για να παρουσιάσουν την πλήρη αρχιτεκτονική ενός IEEE 802.11 ασύρματου τοπικού δικτύου.




**Εικόνα 7 - Πλήρης Αρχιτεκτονική του 802.11 [16]**

## *1.7 Φυσικό Επίπεδο του IEEE 802.11*

Η ασύρματη φυσική επικοινωνία επιτυγχάνεται με τη χρήση ηλεκτρομαγνητικών σημάτων, είτε υπέρυθρων είτε ραδιοκυμάτων. Το πρότυπο 802.11 καθορίζει τρεις τύπους διαμόρφωσης για το φυσικό επίπεδο :

- Direct Sequence Spread Spectrum – DDSS (Εξάπλωση Φάσματος Ευθείας Ακολουθίας).
- Frequency Hopping Spread Spectrum - FHSS (Εξάπλωση Φάσματος και Εναλλαγή Συχνότητας).

Και στις δύο υποστηρίζονται ρυθμοί μετάδοσης 1 και 2Mbps στην ζώνη συχνοτήτων 2.4 – 2.4835GHz.

- Infrared (Υπέρυθρες Ακτίνες) σε μήκη κύματος μεταξύ 850 και 950 nm. με ρυθμούς μετάδοσης 1 και 2 Mbps.

Λόγω όμως σοβαρών μειονεκτημάτων που παρουσιάζει η επικοινωνία με υπέρυθρες ( η ακτίνα εμβέλειας είναι μικρή και επιπλέον οι πομποδέκτες πρέπει να βρίσκονται σε οπτική επαφή – Line of Sight), προτιμούνται στην πλειονότητα των περιπτώσεων τα ραδιοκύματα [11][5].

### *1.7.1 Φάσμα εκπομπής*

Τα πιο κοινά WLANs λειτουργούν στη μη αδειοδοτημένηπεριοχή συχνοτήτων ISM (Industrial, Scientificand, Medical) των 2,4 GHz και στην UNII (Unlicensed National Information Infrastructure) μπάντα των 5 GHz. Οι διεθνείς προδιαγραφές για την ραδιομετάδοση καθορίζουν λειτουργία μέσα στην ζώνη συχνοτήτων 2,4MHz ISM. Αυτή η ζώνη συχνοτήτων έχει αναγνωριστεί από τους διεθνείς οργανισμούς τυποποίησης όπως τον FCC (USA), τον ETSI (Ευρώπη) και τον MKK(Ιαπωνία) για ραδιοεκπομπές χωρίς να απαιτείται ειδική άδεια (unlicenced band). Επομένως τα προϊόντα που βασίζονται στο 802.11 δεν απαιτούν ειδική άδεια για να χρησιμοποιηθούν. Η ζώνη αυτή είναι μία μη αδειοδοτημένη ζώνη για χρήση ISM (Industrial, Scientific and Medical), δηλαδή όχι για εμπορική εκμετάλλευση.

Το IEEE 802.11b λειτουργεί στη ζώνη 2,4 -2.4835 GHz. Ενώ το πρότυπο IEEE 802.11a χρησιμοποιεί την περιοχή των 5 GHzUNII. Αυτή η περιοχή έχει εύρος 300 MHzκαι είναι χωρισμένη σε δύο υποπεριοχές. Η χαμηλότερη υποπεριοχή επεκτείνεται από 5,15 MHzως 5,35 MHz. Η ανώτερη υποπεριοχή είναι από 5.725 MHzως 5.825 MHz. Οι συσκευές που λειτουργούν στην μπάντα UNII πρέπει να ικανοποιούν συγκεκριμένους περιορισμούς για την ακτινοβολούμενη ισχύ. Στην Ευρώπη η χαμηλότερη υποπεριοχή χρησιμοποιείται από το πρότυπο HiperLAN και μόνο στην ανώτερη υποπεριοχή μπορούν να λειτουργήσουν δίκτυα 802.11.

### *1.7.2 Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)*

Η τεχνική Direct Sequence χωρίζει την μπάντα των 2.4 GHz σε 14 κανάλια με εύρος 5 MHz το κάθε ένα. Το κανάλι 1 έχει κεντρική συχνότητα τα 2,412 GHz τα

υπόλοιπα ακολουθούν κάθε 5 MHz. Στην πράξη κάθε κανάλι καταλαμβάνει περίπου 22 MHz εύρος, γύρω από την κεντρική του συχνότητα. Σε σχέση με τη Frequency Hopping τεχνική μετάδοσης απαιτεί περισσότερη ενέργεια για να επιτύχει παρόμοια διέλευση, όμως το μεγάλο πλεονέκτημά της είναι ότι μπορεί εύκολα να αναβαθμιστεί για την επίτευξη υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης. Γειτονικά κανάλια υπερκαλύπτονται εν μέρει και μόνο τρία δεν υπερκαλύπτονται. Τα δεδομένα στέλνονται μέσω ενός καναλιού χωρίς εναλλαγή σε άλλα κανάλια. Τα δεδομένα του χρήστη μορφοποιούνται από ένα και μόνο προκαθορισμένο σήμα. Ο παραλήπτης γνωρίζει το σήμα και μπορεί να ανακτήσει τα αρχικά δεδομένα. Συγκεκριμένα η τεχνική DSSS αντικαθιστά κάθε bit πληροφορίας με μία σειρά από bits που ονομάζεται spreading code (κώδικας εξάπλωσης). Τα bits του spreading code κατά σύμβαση ονομάζονται chips. Τα chips μεταδίδονται σε πολύ υψηλότερο ρυθμό από τα αρχικά bits πληροφορίας και έτσι το φάσμα του μεταδιδόμενου σήματος «απλώνεται». Για παράδειγμα αν αντικαθίσταται κάθε bit με μια ακολουθία από 10 chips το τελικό σήμα θα καταλαμβάνει 10 φορές μεγαλύτερο φασματικό εύρος από το αρχικό. Υποθέτουμε πάντα ότι ο χρόνος μετάδοσης bits είναι ο ίδιος και στις δύο περιπτώσεις, δηλαδή ότι τα 10 chips πρέπει να μεταδοθούν στον ίδιο χρόνο με το αρχικό bit. Ο αριθμός των chips που κωδικοποιούν κάθε bit ονομάζεται και processing gain (κέρδος επεξεργασίας) ή και spreading ratio (παράγοντας εξάπλωσης).

Αυτή η τεχνική έχει λοιπόν το χαρακτηριστικό ότι διευρύνει το φάσμα του προς μετάδοση σήματος, μειώνοντας ταυτόχρονα το πλάτος του, δηλαδή απλώνει την ισχύ του σήματος σε πολύ μεγαλύτερο φασματικό εύρος. Ο δέκτης εκτελεί την αντίστροφη διαδικασία, δηλαδή εξάγει τα αρχικά bits πληροφορίας, δημιουργώντας ξανά ένα σήμα στενής ζώνης. Για να το κάνει αυτό πρέπει να γνωρίζει το spreading code που χρησιμοποίησε ο πομπός. Ένα πλεονέκτημα της τεχνικής αυτής είναι η ανοχή σε παρεμβολές στενής ζώνης, καθώς και μεγαλύτερη ασφάλεια, εφόσον το «απλωμένο» σήμα μοιάζει σαν απλός θόρυβος σε πομπό που λαμβάνει μόνο σήμα στενής ζώνης. [2][6][10][15].

Σε κάθε χώρα επιτρέπεται η χρήση συγκεκριμένων καναλιών. Στον Πίνακας 2 φαίνονται τα κανάλια που χρησιμοποιούνται σε διάφορες γεωγραφικές περιοχές.

**Πίνακας 2 - Διαθέσιμα κανάλια ανά περιοχή (DSSS)**

| Περιοχή / Υπεύθυνη Αρχή | Επιτρεπόμενα Κανάλια |
|---|---|
| ΗΠΑ / FCC – Καναδάς / IC | 1 έως 11 (2,412 – 2,462 GHz) |
| Ευρώπη (εκτός Γαλλίας & Ισπανίας) / ETSI | 1 έως 13 (2,412 – 2,472 GHz) |
| Γαλλία | 10 έως 13 (2,457 – 2,472 GHz) |
| Ισπανία | 10 έως 11 (2,457 – 2,462 GHz) |
| Ιαπωνία / MKK | 14 (2,484 GHz) |

### *1.7.3 Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS)*

Η τεχνική Frequency Hopping χρησιμοποιήθηκε ευρέως σε εμπορικά προϊόντα. Πλεονεκτήματά του έναντι του εναλλακτικού Direct Sequence φυσικού στρώματος, αποτελούν τα απλούστερα και φθηνότερα ηλεκτρονικά για την υλοποίηση των ανάλογων συσκευών, η χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας και η δυνατότητα συνύπαρξης πολλών τέτοιων δικτύων στην ίδια περιοχή χωρίς να επηρεάζεται η συνολική διέλευση.

Όσον αφορά την μετάδοση, η τεχνική FHSS βασίζεται στην ιδέα της αλλαγής της φέρουσας ενός σήματος (subchannel) μέσα σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων και σύμφωνα με μια συγκεκριμένη ψευδοτυχαία ακολουθία (hopping pattern). Μοιάζει με την κλασσική FDMA (Frequency Division Multiple Access), με τη διαφορά ότι κάθε χρήστης χρησιμοποιεί διάφορες φέρουσες ανάλογα με το hopping pattern του. Για να επιτευχθεί επικοινωνία μεταξύ πομπού και δέκτη πρέπει ο δέκτης να γνωρίζει το hopping pattern του πομπού και να υπάρχει καλός συγχρονισμός μεταξύ τους.

Πλεονέκτημα της τεχνικής αυτής είναι η δυνατότητα συνύπαρξης διαφορετικών ασυρμάτων δικτύων, αρκεί τα hopping patterns τους να είναι διαφορετικά, δηλαδή σε κάθε χρονική στιγμή κάθε σύστημα να μεταδίδει σε διαφορετική φέρουσα. Τότε τα hopping patterns ονομάζονται ορθογώνια και η συνολική διέλευση μεγιστοποιείται.
Ένα ακόμη πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα συνύπαρξης με χρήστες που εκπέμπουν σήματα στενής ζώνης. Αν η εκπομπή γίνεται με αρκετά μεγάλη ισχύ τότε η παρεμβολή από το Frequency Hopping σύστημα σε αυτούς είναι μικρή. Αλλά και η δική τους παρεμβολή στο Frequency Hopping σύστημα είναι μικρή, εφόσον μπλοκάρουν μία μόνο φέρουσα από όσες αυτό χρησιμοποιεί. Το αποτέλεσμα είναι

κατά την εκπομπή να χάνονται κάποια πακέτα λόγω της παρεμβολής, αλλά να μην διακόπτεται πλήρως η επικοινωνία.

Στις ΗΠΑ και στην Ευρώπη οι αρμόδιοι οργανισμοί έχουν θεσπίσει διαφορετικούς περιορισμούς για τα συστήματα Frequency Hopping. Για παράδειγμα, στις ΗΠΑ η FCC απαιτεί τουλάχιστον 75 διαφορετικά κανάλια (hopping channels) ενώ η Ευρωπαϊκή ETSI μόλις 20, περιορίζοντας όμως περισσότερο την ακτινοβολούμενη ισχύ. Τελικά, για να ικανοποιεί ένα προϊόν τις προδιαγραφές και της FCC και της ETSI πρέπει να ικανοποιεί τις αυστηρότερες από αυτές σε κάθε τομέα (στο παραπάνω παράδειγμα δηλαδή ένα σύστημα πρέπει να έχει τουλάχιστον 75 hopping channels και να ικανοποιεί και τους αυστηρούς περιορισμούς ισχύος της ETSI).

Η τεχνική του FHSS διαιρεί την ISM μπάντα των 2,4 GHz σε κανάλια εύρους 1 MHz. Διαφορετικά κανάλια είναι διαθέσιμα για χρήση σε διάφορες χώρες, όπως φαίνεται στον Πίνακας 3

**Πίνακας 3 - Διαθέσιμα κανάλια ανά περιοχή (FHSS)**

| Περιοχή / Υπεύθυνη Αρχή | Επιτρεπόμενα Κανάλια | Αριθμός hopping patterns / ομάδα |
|---|---|---|
| ΗΠΑ / FCC – Καναδάς / IC | 2 έως 79 (2,402 – 2,479 GHz) | 26 |
| Ευρώπη (εκτός Γαλλίας & Ισπανίας) / ETSI | 2 έως 79 (2,402 – 2,479 GHz) | 26 |
| Γαλλία | 48 έως 82 (2,448 – 2,482 GHz) | 27 |
| Ισπανία | 47 έως 73 (2,447 – 2,473 GHz) | 35 |
| Ιαπωνία / MKK | 73 έως 95 (2,473 – 2,495 GHz) | 13 |

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι τεχνικές FHSS και DSSS είναι ουσιαστικά διαφορετικοί μηχανισμοί στην επεξεργασία σημάτων και δεν μπορούν να συνυπάρξουν και να συνεργαστούν [2][6][10].

### *1.7.4 Υπέρυθρες ακτίνες*

Η τεχνική των υπέρυθρων ακτίνων (Infrared – IR) δεν χρησιμοποιείται ιδιαίτερα. Η λειτουργία της βασίζεται στην εκπομπή παλμών διάρκειας 250 nsec, που παράγονται από τα LEDs (Light Emitting Diode) του πομπού. Η ακτίνα λειτουργίας

του μπορεί να φτάσει περίπου τα 20 μέτρα, σε ελεύθερο φυσικά οπτικό πεδίο. Άλλη περίπτωση είναι η ανάκλαση των υπέρυθρων ακτίνων από κατάλληλη επιφάνεια, για παράδειγμα η οροφή του δωματίου, ώστε να επιτευχθεί κάλυψη μιας συγκεκριμένης περιοχής.

## *1.8 Πρότυπο IEEE 802.11*

Σήμερα τα ασύρματα δίκτυα που βασίζονται στην οικογένεια προτύπων IEEE 802.11 είναι τα πλέον διαδεδομένα, ενώ κυκλοφορεί μεγάλη ποικιλία σχετικών προϊόντων στην αγορά. Γενικότερα το πρότυπο αυτό θέτει το πλαίσιο για μια προτυποποιημένη ασύρματη δικτυακή επικοινωνία ευρείας ζώνης. Στην συνέχεια δίδεται συνοπτική περιγραφή του 802.11 πρωτοκόλλου, η οποία επεκτείνεται και στις τροποποιήσεις του (μέλη της οικογένειας του 802.11).

Το IEEE 802.11 αποτελεί το πιο ώριμο ασύρματο πρωτόκολλο στην ζώνη των 2.4 GHz για τις ασύρματες επικοινωνίες τοπικών δικτύων, το οποίο έχει δοκιμαστεί και αναπτυχθεί για χρόνια σε περιβάλλοντα εταιρικά, ιδιωτικά και δημόσια. Ο καθορισμός του IEEE 802.11 ξεκίνησε το 1990 και η πρώτη έκδοση του ήταν σχεδόν έτοιμη στα μέσα του 1996. Το 1997, η IEEE πιστοποίησε την αρχική προδιαγραφή 802.11, το οποίο αποτέλεσε το πρώτο διεθνές εγκεκριμένο πρότυπο για ασύρματα τοπικά δίκτυα. Η πρώτη έκδοση του 802.11 παρείχε ρυθμούς μετάδοσης των 1–2 Mbps χρησιμοποιώντας υπέρυθρη ακτινοβολία ή διαμόρφωση FHSS / DSSS σε ραδιοκύματα και βασικές μεθόδους σήμανσης και υπηρεσίες. Το βασικό μειονέκτημα της έκδοσης αυτής ήταν η περιορισμένη απόδοση. Το 1999, η IEEE βελτίωσε το 802.11 με το πρότυπο 802.11b, που μπορεί να υποστηρίξει ταχύτητες μέχρι 11 Mbps, συγκρίσιμη με το ενσύρματο 10 Mbps Ethernet (10BaseT). Η βασική αρχιτεκτονική και οι υπηρεσίες του 802.11b καθορίζονται από το αρχικό πρότυπο 802.11, ενώ αλλαγές υπάρχουν μόνο στο φυσικό επίπεδο. [6][13]

### ***1.8.1 IEEE 802.11b***

Όπως προαναφέρθηκε το 1999 η IEEE ανακοίνωσε μία βελτίωση του 802.11, το 802.11b. Η βασική βελτίωση του 802.11b ήταν ότι το φυσικό επίπεδο μπορούσε να υποστηρίξει ταχύτητες των 5.5 και 11 Mbps. Επειδή τα συστήματα 802.11 που

χρησιμοποιούν τεχνική Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS) δεν επιτρεπόταν να υποστηρίξουν μεγαλύτερες ταχύτητες λόγω κανονιστικού πλαισίου της FCC, επιλέχθηκε η τεχνική Direct Sequence Spread Spectrum - DSSS ως η μοναδική τεχνική για το φυσικό επίπεδο του προτύπου. Με αυτό τον περιορισμό το 802.11b είναι συμβατό προς τα πίσω μόνο με συστήματα του 802.11 που λειτουργούν με βάση την τεχνική DSSS, και δεν είναι συμβατό με συστήματα 802.11 που χρησιμοποιούν FHSS.

Το 802.11b παρέχει 11 Mbps σε απόσταση μέχρι 300–400 m σε εξωτερικούς χώρους και 30–50 m σε εσωτερικούς χώρους με χαμηλό θόρυβο. Για να υποστηρίξει περιβάλλοντα με θόρυβο και να επεκτείνει το εύρος, το 802.11b χρησιμοποιεί δυναμική μείωση του ρυθμού μετάδοσης. Όταν ο σταθμός μετακινείται πέρα του βέλτιστου εύρους ή εάν υπάρξουν παρεμβολές τότε μειώνεται η ταχύτητα μετάδοσης σε 5.5, 2, και τελικά σε 1 Mbps. Αντίστροφα όταν ο σταθμός επιτρέψει εντός του επιτρεπτού εύρους ή η πηγή των παρεμβολών εξαφανιστεί τότε η σύνδεση αυτόματα θα βελτιωθεί. [18][20]

### ***1.8.2 IEEE 802.11a***

Η IEEE αναγνωρίζοντας ότι οι χρήστες θα απαιτούσαν ταχύτητες υψηλότερες από 11 Mb/s, εξέδωσε το 1999 το πρότυπο IEEE 802.11a, το οποίο είναι βελτιστοποιημένο για υψηλή απόδοση στα εσωτερικά περιβάλλοντα. Παρέχει ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων μέχρι 54 Mbps, ενώ χρησιμοποιεί την μπάντα των 5GHz. Το 802.11a βασίζεται στην τεχνική πολυπλεξίας OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing / Ορθογωνική Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας). Η βασική ιδέα πίσω από την OFDM είναι η διαίρεση ενός κύριου υψηλού ρυθμού σε πολλούς μικρότερους ρυθμούς και η χρήση αυτών για την αποστολή των δεδομένων ταυτόχρονα. Όλα τα «αργά» κανάλια πολυπλέκονται τελικά σε ένα «γρήγορο» κανάλι και μεταδίδονται. Με την ορθογονοποίηση λύνεται το πρόβλημα της σπατάλης του εύρους ζώνης, προκειμένου να διαχωρίσουμε τα κανάλια μεταξύ τους.

Το πρότυπο απαιτεί τα συμβατά συστήματα να υποστηρίζουν διαμόρφωση φάσης 90 μοιρών 2, 4 και 16 επιπέδων για κάθε κανάλι. Αυτά αντιστοιχούν σε ταχύτητες 6, 12, και 24 Mb/s αντίστοιχα. Στις ΗΠΑ έχει κρατηθεί συγκεκριμένο τμήμα της μπάντας των 5 GHz για χρήση από ασύρματα δίκτυα 802.11a. Συνολικά είναι διαθέσιμα 12 κανάλια των 20 MHz.

Τα πρότυπα 802.11a και 802.11b πρέπει να είναι σε θέση να λειτουργήσουν παράλληλα στο τοπικό LAN δεδομένου ότι χρησιμοποιούν την ίδια MAC και λειτουργούν σε διαφορετικές περιοχές συχνότητας. Παρ' όλα αυτά οι διαφορές στη διάδοση μπορούν να κάνουν απαραίτητο τον επαναπροσδιορισμό των περιοχών κάλυψης τους. [19][9]

### *1.8.3 IEEE 802.11e*

Το πρότυπο 802.11e παρέχει εγγυήσεις για ποιότητα υπηρεσίας. Στην ουσία το πρότυπο αυτό παρέχει λειτουργίες Quality of Service (QoS), με εισαγωγή προτεραιοτήτων στα πακέτα των δικτύων 802.11, για μεταδώσεις VoIP και streaming media. Η πραγματοποίηση αυτού του στόχου θα απαιτήσει συνεννόηση μεταξύ σταθμών και Access Points, αλλά και από τον διαχειριστή του δικτύου.

Στα WLAN, όπως και στην περίπτωση των LAN η ποιότητα υπηρεσιών από άκρη σε άκρη δεν είναι εξασφαλισμένη. Οι διαθέσιμοι αλγόριθμοι πρόσβασης στο μέσο DCF και PCF, που θα αναλυθούν στο επόμενο κεφάλαιο δεν υποστηρίζουν μηχανισμούς QoS. Την λύση έρχεται να δώσει ο αλγόριθμος πρόσβασης στο μέσο που ονομάζεται Enhanced DCF (EDCF). Ο σκοπός του είναι να προσφέρει πρόσβαση στο μέσο είτε με ανταγωνισμό είτε χωρίς ανταγωνισμό μεταξύ των σταθμών, προσφέροντας ταυτόχρονα έναν μηχανισμό προτεραιοτήτων. Παράλληλα χρησιμοποιεί στοιχεία από DCF και PCF και διατηρεί τη συμβατότητα. Ένα BSS που υποστηρίζει το πρότυπο IEEE 802.11e ονομάζεται QoS supporting BSS. [9][23]

### *1.8.4 IEEE 802.11f*

Το πρότυπο 802.11f ανακοινώθηκε τον Ιούλιο του 2003 και στόχο έχει να βελτιώσει τον μηχανισμό handover. Το handover είναι ένα πρόβλημα το οποίο εμφανίζεται στις κινητές επικοινωνίες και προκύπτει κατά τη μετακίνηση ενός χρήστη από ένα AP στο οποίο είναι αρχικά «ασύρματα» συνδεδεμένος στην σύνδεσή του σε ένα άλλο AP. Η διαδικασία αποσύνδεσης ενός ασύρματου χρήστη από ένα AP και η σύνδεση με ένα άλλο ονομάζεται "handover". Κατά το handover ενός κινητού χρήστη, διακόπτονται οι οποιεσδήποτε ενεργές συνδέσεις του και όσα πακέτα φτάνουν στη συνέχεια στο προηγούμενο AP του χάνονται, εφόσον η φυσική σύνδεση

έχει διακοπεί. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί επιτυχώς επαναφορά των ενεργών συνδέσεων του χρήστη, ώστε να είναι δυνατή η δρομολόγηση πακέτων από και προς τη νέα τοποθεσία του σταθμού, έχουν προταθεί αρκετοί μηχανισμοί οι οποίοι βοηθούν / στηρίζουν το handover των κινητών χρηστών.

Το πρότυπο, που είναι ακόμα γνωστό και σαν IAPP (Inter Access Point Protocol), ορίζει την διαδικασία handover, ανάλογα με τα είδη κινητικότητας. Έτσι προσδιορίζει την επικοινωνία των APs ενός IEEE 802.11 ESS. Εφαρμόζεται σε ένα Σύστημα Διανομής (Distribution System - DS) το οποίο υποστηρίζει ένα ασύρματο δίκτυο 802.11. Σκοπός του είναι προσφέρει έναν τρόπο ώστε τα APs από διαφορετικούς κατασκευαστές να μπορούν να επικοινωνήσουν μεταξύ τους, προκειμένου να εκτελούνται σωστά οι λειτουργίες του DS. Επομένως το πρότυπο καθορίζει την πληροφορία η οποία πρέπει να ανταλλάσσεται ανάμεσα στα APs καθώς και με διαχειριστικές οντότητες σε ανώτερα δικτυακά επίπεδα. [9][43]

### ***1.8.5 IEEE 802.11g***

Το πρότυπο IEEE 802.11g αποτελεί μία επέκταση του IEEE 802.11b. Όπως το IEEE 802.11a, το IEEE 802.11g επεκτείνει το Φυσικό επίπεδο του μοντέλου OSI του 802.11b και επιτυγχάνει ταχύτητες μετάδοσης μεγαλύτερες των 22 Mb/s, θεωριτικά μέχρι 54 Mbps. Ωστόσο το IEEE 802.11g έχει δύο πλεονεκτήματα σε σχέση με το 802.11a: λειτουργεί στα 2.4-GHz band, και είναι συμβατό προς τα πίσω με τα υπάρχοντα εγκατεστημένα προϊόντα 802.11b. Για να επιτευχθεί η συμβατότητα το IEEE 802.11g μειώνει τον ρυθμό μετάδοσης στα 11 Mbps, ενώ το IEEE 802.11a χρησιμοποιεί την ραδιοσυχνότητα των 5-GHz και γι' αυτό δεν είναι συμβατό με συσκευές 802.11b. Το IEEE 802.11g έχει καθοριστεί από το 802.11g Task Group, που συγκροτήθηκε το Σεπτέμβριο του 2000 και αποτελείται πάνω από 100 μέλη από διάφορες εταιρείες και ακαδημαϊκά ιδρύματα. Το IEEE 802.11g ανακοινώθηκε τον Ιούλιο του 2003. [43]

### ***1.8.6 IEEE 802.11h***

Η ομάδα εργασίας προσπαθεί να εισάγει στο 802.11a την δυνατότητα για καλύτερο έλεγχο συγκρούσεων, καθώς και την λειτουργία Transmit Power Control (TPC) και Dynamic Frequency Selection (DFS). Μια συσκευή θα επιλέγει αυτόματα

την ελάχιστη αναγκαία ισχύ εκπομπής, πριν ξεκινήσει οποιαδήποτε ανταλλαγή δεδομένων. Επίσης θα επιλέγει αυτόματα σε ποια συχνότητα θα λειτουργήσει, αναλόγως την χρήση της κάθε συχνότητας στον περιβάλλοντα χώρο.

### *1.8.7 IEEE 802.11i*

Πρόκειται για το πρότυπο που μελετά θέματα ασφαλείας στα WLAN. Είναι σαφές ότι τα ενσύρματα LAN είναι πιο ασφαλή από ότι τα ασύρματα και αυτό οφείλεται στους παρακάτω δύο λόγους :

- Στα WLAN το ασύρματο μέσο μετάδοσης έχει συγκεκριμένες δυνατότητες απόδοσης και εμφανίζει σημαντικές και μεγάλες διαφορές συγκρινόμενο με το ενσύρματο κανάλι των LANs. Κάτι τέτοιο οφείλεται στην ασύρματη φύση του καναλιού και στο ότι παρουσιάζει μεγάλες μεταβολές με το πέρασμα του χρόνου.
- Ο οποιοσδήποτε μπορεί να έχει πρόσβαση στο κανάλι μετάδοσης (αέρας), κάτι που δεν ισχύει στα ενσύρματα δίκτυα.

Οι αλγόριθμοι κρυπτογράφησης που χρησιμοποιούνται σήμερα, όπως ο WEP (Wired Equivalent Privacy), ο WPA (Wi-Fi Protected Access) και IP SEC παρουσιάζουν κάποια προβλήματα. Η ομάδα εργασίας του 802.11i θα προσπαθήσει να αντικαταστήσει το WEP και την υποστήριξή του σε συσκευές, αρχικά με την δημιουργία ανώτερου πρωτοκόλλου ασφαλείας προς τα πίσω συμβατό με το WEP, και τελικά με την πλήρη κατάργησή του. Επίσης η ομάδα εργασίας προσανατολίζεται στην δημιουργία του προτύπου IEEE 802.11i (Extensible Authentication Protocol-EAP, Advanced Encryption Standard-AES, Temporal Key Integrity Protocol-TKIP, Robust Security Network-RSN) [44].

### *1.8.8 Εξέλιξη του 802.11*

Η μεγάλη αποδοχή του IEEE 802.11/802.11b αρχικοποίησε την δημιουργία νέων εκδόσεων και βελτιώσεων του αρχικού προτύπου. Διάφορες IEEE ομάδες εργασίας έχουν στόχο να βελτιώσουν συγκεκριμένες περιοχές του προτύπου 802.11. Παρακάτω παρατίθενται ενδεικτικά κάποιες από τις ενεργές ομάδες εργασίας.

802.11n : Αναφορικά με την ταχύτητα μετάδοσης που αποτελεί ίσως ένα από τα συγκρίσιμα μειονεκτήματα με τις ενσύρματες επικοινωνίες, έχει συσταθεί η ομάδα εργασίας 802.11n που ως στόχο έχει να προτείνει τροποποιήσεις στο φυσικό επίπεδο και στο υποεπίπεδο MAC, ώστε η μέγιστη ταχύτητα μετάδοσης να είναι πάνω από 100 Mbps.

802.11m : Η ομάδα εργασίας 802.11m έχει ως στόχο να καταγράφει τις αλλαγές που γίνονται στα πρότυπα της οικογένειας 802.11 και να συντηρεί πληροφορίες γενικά με τις αλλαγές που έχουν πραγματοποιηθεί σε αυτά. Επίσης η ομάδα 802.11m καταγράφει πληροφορίες για την κατάσταση και την έκδοση των υποπροτύπων.

802.11p : Η ομάδα εργασία 802.11p έχει ως στόχο την τροποποίηση του 802.11 ώστε να υποστηρίζεται η επικοινωνία μεταξύ οχημάτων και σταθερών σημείων που μετακινούνται με μεγάλες ταχύτητες (200 χλμ/ώρα) και επικοινωνούν σε αποστάσεις μέχρι και 1000μέτρα.

802.11j : Η ομάδα εργασία 802.11j εργάζεται ώστε να υπάρξει διαδικτύωση μεταξύ των προτύπων της οικογένειας IEEE 802.11 και του προτύπου HiperLan2 [20][43].

### *1.8.9 Wireless Fidelity (Wi-Fi)*

Στο εμπόριο υπάρχει μια πληθώρα από προϊόντα εταιριών που υλοποιούν με κάποιο τρόπο κάποιο μέρος του πρωτοκόλλου 802.11b(Access Points, clients, routers, VoIP terminals, cameras κτλ). Για να διασφαλιστεί η συμβατότητα λειτουργίας όλων των 802.11b συσκευών δημιουργήθηκε η WECA(Wireless Ethernet Compatibility Alliance), που πρόκειται για μια οργάνωση που εξετάζει και πιστοποιεί την συμβατότητα των 802.11 συσκευών και έχει σαν μέλη της κατασκευαστές ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, παροχείς υπηρεσιών WLAN, κατασκευαστές υπολογιστών και λογισμικού. Μερικές από τις εταιρίες που μετέχουν είναι οι 3Com, Aironet, Apple, Breezecom, Cabletron, Compaq, Dell, Fujitsu, IBM, Intersil, Lucent Technologies, No Wires Needed, Nokia, Samsung, Symbol Technologies, Wayport, Zoom. Στην ουσία πρόκειται για μια πολύ σημαντική πρωτοβουλία, καθώς ένα wireless δίκτυο μπορεί να αποτελείται από συσκευές διαφορετικών εταιριών. Μια πιστοποιημένη από την WECA συσκευή, έχει την εγγύηση ότι θα μπορεί να συνεργαστεί με άλλο ασύρματο ή όχι υλικό, που ακολουθεί το πρότυπο 802.11b για

τον συγκεκριμένο τύπο συσκευής (π.χ. ένα Access Point πρέπει να μπορεί να συνδεθεί με οποιονδήποτε client, αλλά και να μπορεί να δεχτεί και μια Ethernet σύνδεση) [44]. Η WECA έχει θεσπίσει το Wireless Fidelity (Wi-Fi) πρότυπο και σε κάθε συσκευή που περνάει επιτυχώς όλες τις δοκιμές συμβατότητας, απονέμεται η «σφραγίδα συμβατότητας», όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.

**Εικόνα 8 - Wi-Fi trademark**

Αυτή η σφραγίδα δίνει στους καταναλωτές την εγγύηση ότι, τα προϊόντα Wi-Fi που την φέρουν, θα μπορούν να λειτουργούν μεταξύ τους. Παρόλα αυτά όμως, δεν αποτελεί ένα τεχνολογικό στάνταρ. Είναι απλά μια εγγύηση συμβατότητας μεταξύ προϊόντων [45] [46]. Το Wireless Fidelity αποτελεί έναν μη κερδοσκοπικό διεθνή οργανισμό, ο οποίος έχει ως μέλη τους κατασκευαστές προϊόντων 802.11b. Τα μέλη του ανέρχονται σήμερα γύρω στα 200 και έχει πιστοποιήσει 865 προϊόντα από την αρχή λειτουργίας του. Η πιστοποίηση Wi-Fi σε μία συσκευή αποτελεί κατά συνέπεια μία εγγύηση για τον αγοραστή για την διαλειτουργικότητα της συσκευής. Επίσης επειδή πλέον όλοι οι κατασκευαστές φροντίζουν ώστε τα προϊόντα τους να επιτυγχάνουν την πιστοποίηση, έχει επικρατήσει να αναφερόμαστε στο πρότυπο IEEE 802.11 με τον όρο Wi-Fi. Ακόμη η ασύρματη επικοινωνία μεταξύ συσκευών που λαμβάνει χώρα σε συγκεκριμένες συχνότητες ραδιοκυμάτων και υπακούει στο πρότυπο IEEE 802.11 λέγεται Wi-Fi επικοινωνία.

# *Κεφάλαιο 2*
# *Λειτουργική περιγραφή υποεπιπέδου ελέγχου πρόσβασης στο μέσο*

Το υποεπίπεδο ελέγχου πρόσβασης στο μέσο MAC του IEEE 802.11 είναι ίσως το πιο σημαντικό κομμάτι της προτυποποίησης. Υποστηρίζει όλα τα φυσικά στρώματα και προσφέρει υπηρεσίες αξιόπιστης μεταφοράς δεδομένων και πρόσβασης στο μέσο στα ανώτερα στρώματα. Οι διαφοροποιήσεις του από το αντίστοιχο MAC των ενσύρματων δικτύων οφείλονται στις ιδιαιτερότητες του ασύρματου μέσου μετάδοσης που χρησιμοποιείται στο φυσικό επίπεδο.

Οι λειτουργίες και οι υπηρεσίες που παρέχει το υποεπίπεδο ελέγχου πρόσβασης στο μέσο (MAC sublayer) καθορίζονται στο πρότυπο IEEE 802.11. Γενικά στα ασύρματα δίκτυα το υποεπίπεδο MAC πρέπει να υποστηρίζει πολλαπλές υλοποιήσεις του Φυσικού Επιπέδου και υλοποιήσεις που να διαθέτουν διαφορετικά χαρακτηριστικά ανίχνευσης μέσου (Medium Sense). Μία από τις βασικές λειτουργίες του υποεπιπέδου MAC είναι να επιτρέπει την επικάλυψη πολλαπλών δικτύων στην ίδια περιοχή και στο ίδιο χώρο του καναλιού. Αυτό σημαίνει ότι διαθέτει μηχανισμούς διαμοιρασμού του μέσου και επαναχρησιμοποίησης του φυσικού μέσου μετάδοσης. Κάποιες από τις βασικές απαιτήσεις που ικανοποιεί το υποεπιπέδου MAC είναι οι εξής :

- Να μπορεί να προσαρμόζεται σε παρεμβολές
- Να διαθέτει μηχανισμούς που να χειρίζονται το πρόβλημα των Κρυμμένων Κόμβων
- Πρόβλεψη για Time Bounded Υπηρεσίες
- Πρόβλεψη για ιδιωτικότητα και έλεγχο πρόσβασης

Σαν μηχανισμός πρόσβασης στο μέσο έχει επιλεχτεί η τεχνική CSMA (Carrier Sense Multiple Access), ενώ για την διαχείριση των συγκρούσεων επιλέχτηκε ο μηχανισμός αποφυγής συγκρούσεων CA (Collision Avoidance). Επιπλέον η αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων μεταξύ των διαφόρων σταθμών δυσχεραίνεται ακόμα

περισσότερο εξαιτίας του ασύρματου φυσικού μέσου. Για να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα που προκύπτουν λόγω της φύσης του μέσου μετάδοσης το υποεπίπεδο MAC προσφέρει τους κατάλληλους μηχανισμούς, όπως η θετική επιβεβαίωση (positive acknowledgment) κάθε πλαισίου και την ανταλλαγή πλαισίων RTS (Request To Send) και CTS (Clear To Send) πριν την μετάδοση κάποιου πλαισίου. Η θετική επιβεβαίωση χρησιμοποιείται για να ενημερώσει τον αποστολέα για την επιτυχή λήψη ενός πλαισίου, ενώ τα πλαίσια RTS/CTS αντιμετωπίζουν το πρόβλημα των κρυμέννω σταθμών. Στην συνέχεια του κεφαλαίου παρουσιάζονται οι παραπάνω μηχανισμοί.

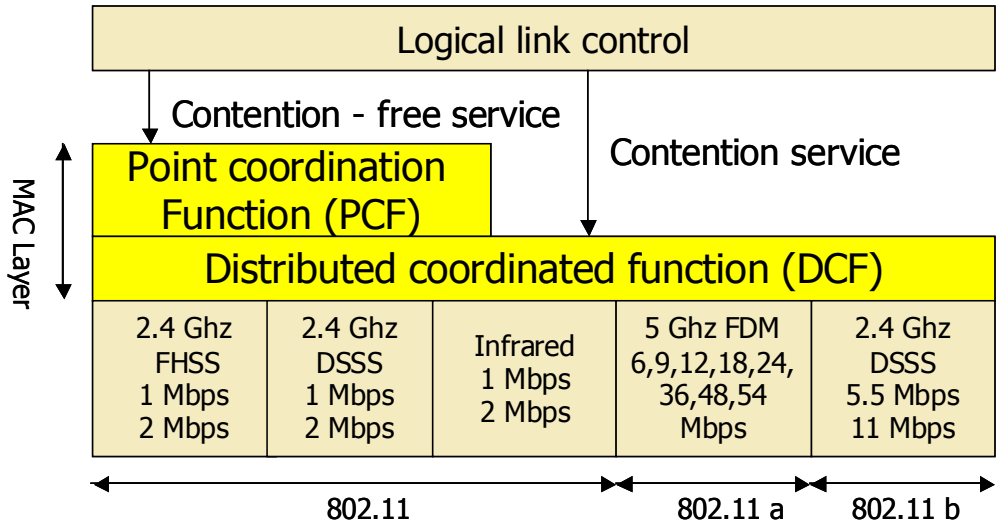
## *2.1 Πρόσβαση στο μέσο*

Όπως αναφέρθηκε ήδη ο μηχανισμός πρόσβασης στο μέσο που χρησιμοποιείται από το 802.11 MAC είναι ο CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance). Η αρχιτεκτονική του υποπεδιπέδου MAC περιγράφεται από δύο λειτουργίες συντονισμού (coordination function). Μία λογική λειτουργία συντονισμού καθορίζει το πότε ένας σταθμός που λειτουργεί σε ένα basic service set (BSS) μπορεί να μεταδώσει και να λάβει μονάδες δεδομένων του πρωτοκόλλου (protocol data units -PDUs) μέσω του ασύρματου μέσου μετάδοσης (wireless medium -WM).

Η λειτουργία συντονισμού σε ένα BSS έχει υποχρεωτικά μία κατανεμημένη λειτουργία συντονισμού (distributed coordination function -DCF) και μπορεί προεραιτικά να έχει μία λειτουργία συντονισμού σημείου (point coordination function - PCF).

Στο πρωτόκολλο 802.11 ο βασικός μηχανισμός που ελέγχει την πρόσβαση στο μέσο ονομάζεται Κατανεμημένη Λειτουργία Συντονισμού – Distributed Coordination Function (DCF). Η DCF είναι ένας μηχανισμός τυχαίας πρόσβασης, που βασίζεται στην τεχνική CSMA/CA. Η επανεκπομπή των πακέτων που έχουν συγκρουστεί πραγματοποιείται σύμφωνα με τους κανόνες του binary exponential backoff (Εκθετικός Δυαδικός αλγόριθμος οπισθοχώρησης). Η DCF αποτελεί την βασική μέθοδο πρόσβασης και μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο σε ad-hoc τοπολογίες, όσο και σε τοπολογίες τύπου υποδομής. Διαθέτει δύο βασικές υπομεθόδους την Βασική και

την RTS/CTS, οι οποίες θα αναλυθούν σε ξεχωριστή ενότητα στην συνέχεια του κεφαλαίου.




**Εικόνα 9 - Αρχιτεκτονική του IEEE 802.11**

Μία τρίτη επιλογή που περιγράφεται από το πρότυπο 802.11e, το οποίο συμπληρώνει το MAC υπόστρωμα του 802.11 και ορίζει έναν επιπλέον μηχανισμό ελέγχου πρόσβασης μέσω του αλγορίθμου υβριδικής λειτουργίας συντονισμού (Hybrid Coordination Function - HCF). Ο αλγόριθμος DCF είναι κατάλληλος για εξυπηρέτηση ασύγχρονης κίνησης, ενώ ο PCF είναι κατάλληλος για σύγχρονη κίνηση. Ο HCF εισάγει ένα σχήμα προτεραιοτήτων για να προσφέρει συγκεκριμένη ποιότητα υπηρεσίας (Quality of Service – QoS) [23] [17].

## *2.2 Χρόνοι Αναμονής (Interframe spacing)*

Οι παραπάνω αλγόριθμοι χρησιμοποιούν διάφορες χρονικές περιόδους για τον έλεγχο της πρόσβασης στο μέσο. Γενικά, κάθε σταθμός που θέλει να μεταδώσει κάποιο πλαίσιο πρέπει πρώτα να περιμένει ένα ορισμένο χρονικό διάστημα και αν δεν ανιχνεύσει άλλη μετάδοση σε αυτό τότε να προχωρήσει στο επόμενο βήμα για την απόκτηση του μέσου. Το χρονικό αυτό διάστημα διαφέρει ανάλογα με τον αλγόριθμο που χρησιμοποιείται (DCF ή PCF). Το χρονικό διάστημα αυτό ποικίλει ανάλογα με τον τύπο του πλαισίου που πρόκειται να μεταδοθεί. Το χρονικό διάστημα αναμονής

μεταξύ της μετάδοσης των πλαισίων ονομάζεται Inter Frame Space - IFS. Υπάρχουν τέσσερις τύποι IFS που παρέχουν επίπεδα προτεραιότητας για την πρόσβαση στο ασύρματο μέσο, που είναι τα εξής :

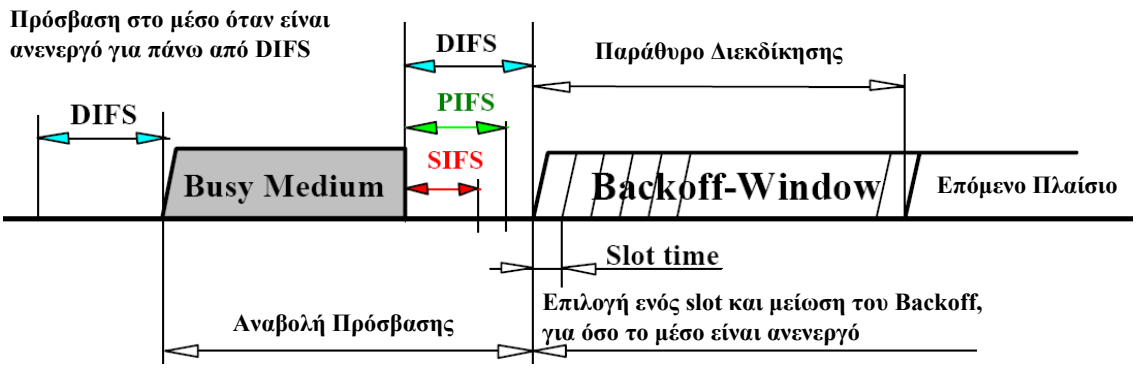
a) SIFS - short interframe space

b) PIFS - PCF interframe space

c) DIFS - DCF interframe space

d) EIFS - extended interframe space

Τα IFSs είναι ανεξάρτητα από το bit rate του σταθμού. Ο χρόνος του IFS καθορίζεται ως χρονικά κενά στο μέσο και είναι σταθερός για κάθε υλοποίηση του Φυσικού Επιπέδου. Οι τιμές του IFS καθορίζονται από τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε Φυσικού επιπέδου. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η σχέση που έχουν τα IFS.




**Εικόνα 10 - Σχέση μεταξύ των IFS**

- *Short Interframe Space (SIFS)* : Ο μικρότερος χρόνος αναμονής. Χρησιμοποιείται για μεταδόσεις μέγιστης προτεραιότητας, όπως είναι τα πλαίσια ελέγχου και οι επιβεβαιώσεις.
- *PCF Interframe Space (PIFS)* : Μεγαλύτερο χρονικό διάστημα από το SIFS κατά ένα slot time και χρησιμοποιείται από τον αλγόριθμο PCF. Οι σταθμοί περιμένουν PIFS χρόνο πριν μεταδώσουν κατά την περίοδο που την πρόσβαση στο μέσο ελέγχει ο κεντρικός αυτός αλγόριθμος (περίοδος χωρίς ανταγωνισμό - contention – free period), αποκτώντας προτεραιότητα έναντι αυτών που προσπαθούν να μεταδώσουν με χρήση του DCF.
- DCF Interframe Space (DIFS) : Ο μικρότερος χρόνος αναμονής για λειτουργία με βάση τον αλγόριθμο DCF (περίοδος με ανταγωνισμό -

contention period). Μεγαλύτερος σε διάρκεια από τους δύο προηγούμενους χρόνους, συν ένα time slot από το PIFS.

- Extended Interframe Space (EIFS) : Ο μέγιστος χρόνος αναμονής και χρησιμοποιείται όταν συμβεί κάποιο σφάλμα κατά την μετάδοση του πλαισίου. Το Extended IFS (EIFS) χρησιμοποιείται από έναν σταθμό που έχει παραλάβει ένα πακέτο που δεν μπορεί να καταλάβει. Το EIFS απαιτείται για να αποτρέψει τον σταθμό από το να συγκρουστεί με κάποιο πακέτο που ανήκει στην τρέχουσα σύνδεση. Στην διάρκεια του συμπεριλαμβάνεται η διάρκεια ενός SIFS + ACK και ύστερα αρχίζει να μετρά ο χρόνος για το DIFS.

Για παράδειγμα όταν ο αποστολέας αποστείλει ένα πλαίσιο δεδομένων αναμένει από τον παραλήπτη ένα πλαίσιο επιβεβαίωσης. Το Short Inter Frame Space (SIFS) χρησιμοποιείται για να καθορίσει τον χρόνο που μεσολαβεί μεταξύ της παραλαβής ενός πλαισίου και της αποστολής του αντίστοιχου ACK από τον παραλήπτη (Fragment-ACK). Εφόσον κανένας άλλος σταθμός δεν θα μπορέσει να ανιχνεύσει το κανάλι ανενεργό για περισσότερο από ένα DIFS ή PIFS, γι' αυτό και ο παραλήπτης του πακέτου παίρνει προτεραιότητα για την αποστολή του πλαισίου ACK. Η τιμή για το 802.11 FHSS PHY είναι σταθερή και είναι 28 ms, χρόνος που είναι αρκετός για ένας σταθμός που μεταδίδει να μπορεί να αλλάξει σε receive mode και να μπορεί να αποκωδικοποιήσει τα εισερχόμενα πακέτα.

Το Point Coordination IFS (PIFS) χρησιμοποιείται από το Access Point για να αποκτήσει πρόσβαση στο μέσο πριν από κάθε άλλο σταθμό. Η τιμή του για παράδειγμα όταν χρησιμοποιείται το FHSS είναι SIFS + Slot Time, 78 ms, εφόσον μία χρονοθυρίδα είναι 50ms (η χρονοθυρίδα (slot time) αποτελεί το βασικό χρονικό διάστημα στο οποίο υποδιαιρείται το παράθυρο διεκδίκησης και περιγράφεται στην συνέχεια).

Το Distributed IFS (DIFS) είναι το inter frame space που χρησιμοποιείται από έναν σταθμό που θέλει να ξεκινήσει μία νέα μετάδοση με την μέθοδο DCF, και υπολογίζεται όπως το PIFS συν μία χρονοθυρίδα (slot time), πχ 128 ms για το FHSS PHY [10][12].

Από τα παραπάνω είναι προφανές ότι κάθε σταθμός πρέπει να έχει τη δυνατότητα να ανιχνεύει αν υπάρχει κάποια άλλη μετάδοση σε εξέλιξη πριν αρχίσει να μεταδίδει αυτός. Για τον σκοπό λοιπόν αυτό ο μηχανισμός ανίχνευσης φέροντος που χρησιμοποιείται παρουσιάζεται αναλυτικά στην επόμενη ενότητα.

## *2.3 Τεχνική CSMA/CA*

Όπως προαναφέρθηκε στην αρχή του κεφαλαίου, ο μηχανισμός πρόσβασης στο μέσο που έχει επιλεχτεί στα ασύρματα δίκτυα είναι ο μηχανισμός Πολλαπλής πρόσβασης μέσω ανίχνευσης φέροντος σήματος (Carrier Sense Multiple Access - CSMA). Λόγω της φύσης του φυσικού μέσου μετάδοσης για τον χειρισμό των συγκρούσεων αντί για το μηχανισμό ανίχνευσης συγκρούσεων CD (Collision Detection) που χρησιμοποιείται στο 802.3 επιλέχτηκε ο μηχανισμός αποφυγής συγκρούσεων CA (Collision Avoidance) [5]. Αιτία για την επιλογή αυτή είναι η αδυναμία του δέκτη να αντιλαμβάνεται την κατάσταση του ασύρματου μέσου την χρονική στιγμή που μεταδίδει κάποια πληροφορία. Επομένως, το φαινόμενο της σύγκρουσης (που λαμβάνει χώρα όταν δυο ή περισσότεροι σταθμοί μεταδίδουν την ίδια ακριβώς χρονική στιγμή) γίνεται αντιληπτό από τους σταθμούς εργασίας μόνο εκ του αποτελέσματος που είναι φυσικά η μη παράδοση των πακέτων της πληροφορίας. Ο μηχανισμός CSMA/CA υλοποιεί την αποφυγή σύγκρουσης με την χρήση μεγάλων παραθύρων διεκδίκησης, τα οποία μειώνουν την πιθανότητα σύγκρουσης. [15]

Το CSMA/CA λειτουργεί ως εξής: ο σταθμός που επιθυμεί να μεταδώσει ανιχνεύει το μέσο και αν διαπιστώσει ότι το μέσο δεν χρησιμοποιείται εκπέμπει. Διαφορετικά εάν το μέσο ανιχνευτεί ως κατειλημμένο περιμένει να γίνει ανενεργό και μετά από ένα χρονικό διάστημα ίσο με DIFS εκπέμπει. Εάν το πλαίσιο φτάσει στον προορισμό του ανέπαφο, ο παραλήπτης στέλνει ένα πλαίσιο επιβεβαίωσης (ACK) στον αρχικό σταθμό (αποστολέα) και ολοκληρώνεται η διαδικασία μετάδοσης. Αν το ACK δεν ανιχνευτεί από τον αρχικό σταθμό, ο σταθμός θεωρεί ότι έγινε σύγκρουση και η διαδικασία ξαναρχίζει. Η χρήση του μηχανισμού CSMA/CA μειώνει την πιθανότητα σύγκρουσης μέσω της διαδικασίας τυχαίας οπισθοχώρησης (backoff), η οποία περιγράφεται σε ακόλουθη ενότητα.

### *2.3.1 Εικονική Ανίχνευση Φέροντος (virtual carrier sense)*

Είναι γνωστό πως στα ενσύρματα δίκτυα ο τρόπος λειτουργίας του μηχανισμού ανίχνευσης φέροντος είναι σχετικά απλός. Κάθε σταθμός παρακολουθεί το μέσο μετάδοσης και αν εντοπίσει σήμα συγκεκριμένης ισχύος καταλαβαίνει ότι

κάποια μετάδοση πλαισίου βρίσκεται σε εξέλιξη. Όταν όμως το μέσο μετάδοσης γίνει ασύρματο τότε αυτός ο μηχανισμός δεν είναι επαρκής. Το πρότυπο 802.11 προβλέπει και έναν δεύτερο μηχανισμό ανίχνευσης φέροντος που λειτουργεί στο υποεπίπεδο MAC, ο οποίος συμπληρώνει τον μηχανισμό ανίχνευσης του Φυσικού επιπέδου και αντιμετωπίζει το πρόβλημα των κρυμμένων σταθμών.

Ο εικονικός μηχανισμός ανίχνευσης φέροντος (virtual carrier sensing) χρησιμοποιεί έναν μετρητή χρόνου που ονομάζεται NAV (Network Allocation Vector). Στην ουσία πρόκειται για μια δομή δεδομένων, η οποία κατασκευάζεται με βάση τα όσα «ακούν» οι διάφοροι σταθμοί του δικτύου από μεταδόσεις πλαισίων RTS/CTS τα οποία περιλαμβάνουν την διάρκεια μιας μετάδοσης. Αυτός ο μετρητής συμπεριλαμβάνεται στα περισσότερα πλαίσια που ανταλλάσσονται. Κάθε σταθμός θέτει το πεδίο αυτό ίσο με το χρόνο που θέλει να κρατήσει δεσμευμένο το μέσο μετάδοσης, όταν αποκτήσει πρόσβαση στο μέσο. Οι υπόλοιποι σταθμοί βλέποντας ότι το πεδίο NAV είναι μη μηδενικό καταλαβαίνουν ότι το μέσο είναι δεσμευμένο και αρχικοποιούν έναν αντίστροφο τοπικό μετρητή με αρχική τιμή ίση με NAV, αν η τιμή του NAV είναι μεγαλύτερη από την υπάρχουσα τιμή του τοπικού μετρητή αυτού. Με την χρήση του NAV οι σταθμοί μπορούν να επιτελέσουν συγκεκριμένες ενέργειες χωρίς να χάσουν τον έλεγχο του μέσου μετάδοσης. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι η αποστολή ενός πλαισίου με χρήση του μηχανισμού RTS/CTS, ο οποίος περιγράφεται σε ακόλουθη ενότητα. [1][14]

## *2.4 Κατανεμημένη Λειτουργία Συντονισμού (DCF)*

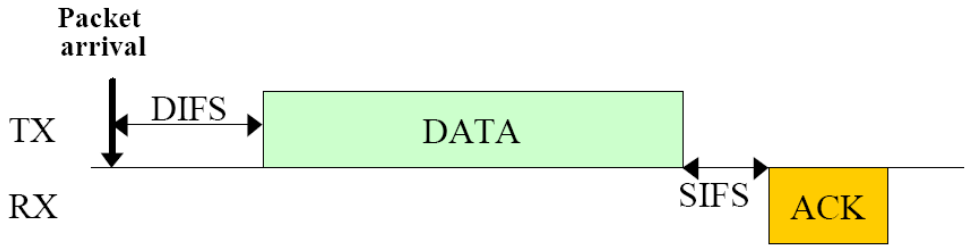
Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται η λειτουργία DCF, που χρησιμοποιείται για να επιτευχθεί η πρόσβαση στο μέσο και δίδεται έμφαση στην αντιμετώπιση μιας αποτυχημένης προσπάθειας μετάδοσης, ενώ εισάγεται η έννοια του παραθύρου διεκδίκησης, που αντιμετωπίζει την περίπτωση που περισσότεροι του ενός σταθμοί διεκδικούν τον έλεγχο του μέσου.

Στο 802.11 ο βασικός μηχανισμός πρόσβασης στο μέσο ονομάζεται Κατανεμημένη Λειτουργία Συντονισμού (distributed coordination function - DCF). Ο μηχανισμός αυτός βασίζεται στην τεχνική CSMA/CA και περιγράφει δύο υπομεθόδους για την υλοποίηση της μετάδοσης των πακέτων. Οι μέθοδοι αυτοί είναι

η Βασικής μέθοδος πρόσβασης (Basic Access method) και η request-to-send/clear-to-send (RTS/CTS).

### *2.4.1 Βασική μέθοδος πρόσβασης*

Ο εξ ορισμού μηχανισμός που χρησιμοποιείται στην DCF είναι μία διμερής χειραψία για την μετάδοση δεδομένων, που αποτελούν την Βασική μέθοδο πρόσβασης. Ο μηχανισμός αυτός χαρακτηρίζεται από την άμεση μετάδοση μίας θετικής επιβεβαίωσης από τον σταθμό προορισμού, σε κάθε επιτυχή λήψη πλαισίου από τον σταθμό αποστολής. Η σαφής μετάδοση της επιβεβαίωσης είναι απαραίτητη για το ασύρματο μέσο, καθώς ο αποστολέας δεν μπορεί να καθορίσει εάν το πακέτο έχει ληφθεί με επιτυχία με την ακρόαση της δικιάς του μετάδοσης.




**Εικόνα 11 - Βασική μέθοδος μετάδοσης**

Η βασική ιδέα της μεθόδου είναι ότι τα δεδομένα και το πλαίσιο επιβεβαίωσης διαχωρίζονται από ένα ξεχωριστό inter frame space. Το IFS που χρησιμοποιείται είναι τύπου SIFS, με αποτέλεσμα κάποιος τρίτος σταθμός, εκτός του αποστολέα και του παραλήπτη, να μην μπορεί να ανιχνεύσει το κανάλι ανενεργό για διάστημα ίσο με ένα DIFS, αφού το SIFS είναι μικρότερο του DIFS. Αυτό σημαίνει ότι κανένας τρίτος δεν μπορεί να μεταδώσει, αφού προϋπόθεση για την μετάδοση είναι η ανίχνευση του μέσου ως ανενεργό για διάστημα μεγαλύτερο από DIFS.

### *2.4.2 Λειτουργία της Βασικής Μεθόδου*

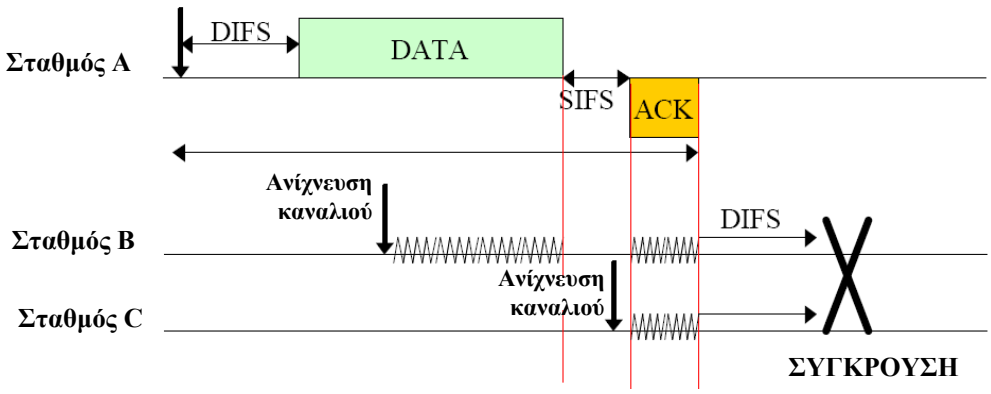
Ένας σταθμός που έχει ένα νέο πακέτο προς μετάδοση παρακολουθεί την δραστηριότητα του καναλιού. Εάν το κανάλι είναι ανενεργό για περισσότερο ή ίσο χρονικό διάστημα με ένα distributed interframe space (DIFS), τότε ο σταθμός

μεταδίδει. Διαφορετικά εάν το κανάλι ανιχνευτεί κατειλημμένο, αμέσως ή κατά την διάρκεια ενός DIFS, ο σταθμός συνεχίζει να παρακολουθεί το κανάλι μέχρι να βρεθεί ανενεργό για ένα DIFS.

Σε αυτή την περίπτωση ο σταθμός ξεκινάει τη διαδικασία της δυαδικής εκθετικής υποχώρησης (binary exponential backoff) για να καθορίσει πόσο θα είναι το επιπλέον χρονικό διάστημα αναμονής. Αυτό γίνεται επιλέγοντας τυχαία μια χρονοθυρίδα του παραθύρου διεκδίκησης (contention window). Αφού περάσει και αυτό το τελευταίο χρονικό διάστημα, ο σταθμός μεταδίδει το πλαίσιο που θέλει. Η χρήση του χρόνου υποχώρησης είναι το χαρακτηριστικό που υλοποιεί την Αποφυγή Σύγκρουσης του πρωτοκόλλου, που ελαχιστοποιεί την πιθανότητα σύγκρουσης.

Επιπρόσθετα για να αποφευχθεί η δέσμευση του καναλιού από την μετάδοση πακέτων που προέρχονται από τον ίδιο σταθμό, ο σταθμός πρέπει να περιμένει για έναν τυχαίο χρόνο υποχώρησης, ακόμα και εάν το μέσο ανιχνευτεί ανενεργό για περισσότερο χρόνο από το DIFS, αμέσως μετά την επιτυχή αποστολή ενός πακέτου.[22]

Ο βασικός λόγος που χρησιμοποιείται η τεχνική της οπισθοχώρησης είναι για να αποφευχθούν οι συγκρούσεις. Στην Εικόνα 12 παρουσιάζεται η περίπτωση όπου δεν υπάρχει ο χρόνος οπισθοχώρησης (backoff time). Αυτό που παρατηρείται είναι όταν το κανάλι ανιχνευτεί κατειλημμένο τότε οι υπόλοιποι σταθμοί αναβάλουν την μετάδοση. Όμως μόλις το κανάλι ανιχνευτεί ως ανενεργό για περισσότερο από ένα DIFS, τότε οι σταθμοί που θέλουν να μεταδώσουν δεδομένα αρχίζουν αμέσως μετά την εκπομπή με αποτέλεσμα να προκαλούνται συγκρούσεις με μεγάλη πιθανότητα.




**Εικόνα 12 - Λόγος χρήσης του backoff**

### *2.4.3 Παράθυρο διεκδίκησης*

Ο χρόνος που ακολουθεί αμέσως μετά ένα ανενεργό DIFS τεμαχίζεται σε χρονοθυρίδες (slot) και ο σταθμός επιτρέπεται να μεταδώσει μόνο στην αρχή κάθε χρονοθυρίδας. Το μέγεθος της χρονοθυρίδας είναι ίσο με τον χρόνο που χρειάζεται από οποιοδήποτε σταθμό να ανιχνεύσει την μετάδοση ενός πακέτου από έναν άλλο σταθμό. Το παράθυρο διεκδίκησης (contention window) χωρίζεται σε χρονοθυρίδες (slot times) που η διάρκειά τους εξαρτάται από το φυσικό επίπεδο. Κάθε σταθμός διαλέγει μια χρονοθυρίδα και περιμένει τη σειρά του πριν επιχειρήσει να αποκτήσει πρόσβαση στο μέσο μετάδοσης. Η επιλογή γίνεται τυχαία, με χρήση μιας διαδικασίας που ονομάζεται δυαδική εκθετική οπισθοχώρηση. Αν περισσότεροι του ενός σταθμοί διεκδικούν τον έλεγχο του μέσου, νικητής θα αναδειχθεί αυτός που θα επιλέξει την μικρότερη χρονοθυρίδα. Για λόγους αποδοτικότητας η DCF χρησιμοποιεί μία κλίμακα οπισθοχώρησης διακριτού χρόνου (discrete-time backoff scale).

Κάθε σταθμός επιλέγει μία χρονοθυρίδα από το παράθυρο διεκδίκησης, το οποίο αυξάνεται όσο αποτυγχάνει η επιθυμητή μετάδοση πλαισίου. Υπενθυμίζεται ότι η μετάδοση θεωρείται αποτυχημένη αν δεν ληφθεί έγκαιρα επιβεβαίωση. Το εύρος τιμών από το οποίο καλείται να επιλέξει τυχαία ο κάθε σταθμός είναι ένας αριθμός από 0 εώς $2^i$-1. Κάθε φορά που η μετάδοση αποτυγχάνει το παράθυρο διεκδίκησης διπλασιάζεται. Αυτό γίνεται μέχρι να φτάσει σε μία μέγιστη τιμή, οπότε δεν μεγαλώνει άλλο. Το παράθυρο διεκδίκησης επανέρχεται στην ελάχιστη τιμή του μετά από κάθε επιτυχημένη μετάδοση ή από απόρριψη του προς μετάδοση πλαισίου. Κάθε φυσικό επίπεδο χρησιμοποιεί δικές του παραμέτρους για την παραπάνω διαδικασία [7][40].

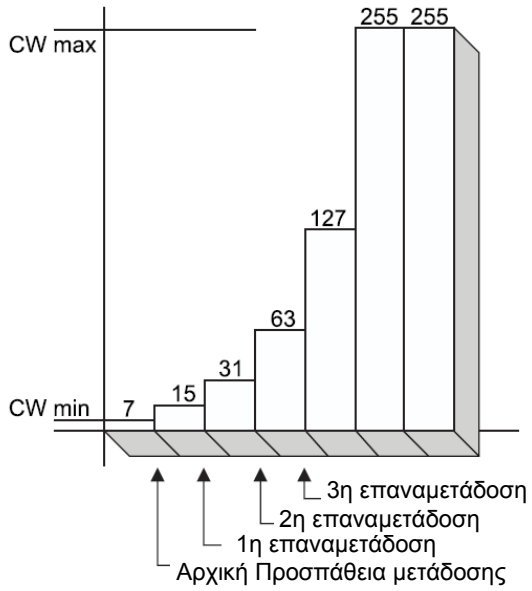
| Φυσικό επίπεδο | Χρονοθυρίδα | Ελάχιστο Παράθυρο Διεκδίκησης | Μέγιστο Παράθυρο Διεκδίκησης |
|---|---|---|---|
| **FHSS** | 50 μs | 16 (0..15) | 1024 (0..1023) |
| **DSSS** | 20 μs | 32 (0..31) | 1024 (0..1023) |
| **IR** | 8 μs | 64 (0..63) | 1024 (0..1023) |

**Πίνακας 4 - Time Slots και Παράθυρο διεκδίκησης**

Όπως φαίνεται και στον παραπάνω πίνακα, η χρονοθυρίδα εξαρτάται από το φυσικό επίπεδο και είναι το άθροισμα τριών χρόνων :

- Χρόνος μετάβασης (propagation delay)
- RX_TX_Turnaround_Time: χρόνος που απαιτείται για έναν σταθμό να αλλάξει την κατάστασή του, από κατάσταση παραλαβής σε κατάσταση αποστολής
- Busy detect time : χρόνος που χρειάζεται για να ενημερωθεί το υποεπίπεδο MAC για την ανίχνευση κάποιας μετάδοσης

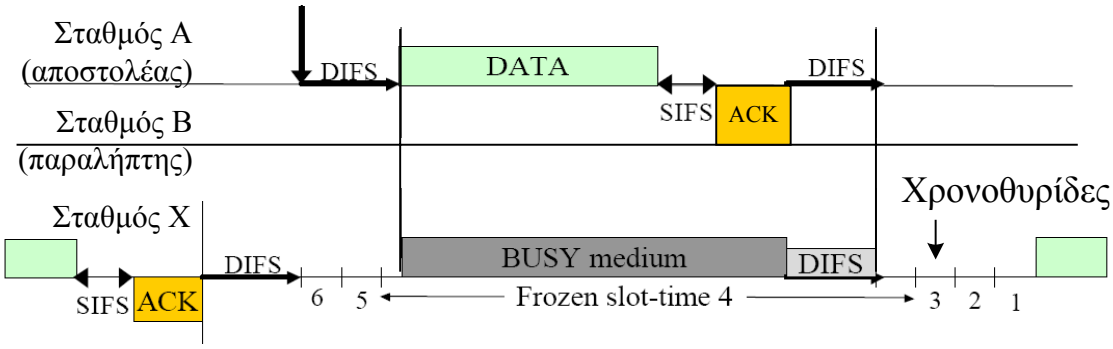
Όπως προαναφέρθηκε η DCF υιοθετεί έναν εκθετικό μηχανισμό οπισθοχώρησης (exponential backoff scheme). Σε κάθε μετάδοση πακέτου ο χρόνος οπισθοχώρησης επιλέγεται ομοιόμορφα από το εύρος (0, w-1). Το w είναι το μέγεθος του παραθύρου διεκδίκησης. Κατά την αρχική προσπάθεια μετάδοσης το παράθυρο διεκδίκησης είναι ίσο με την ελάχιστη τιμή που μπορεί να έχει, δηλαδή το ελάχιστο παράθυρο διεκδίκησης. Ύστερα από κάθε αποτυχημένη μετάδοση, η τιμή του διπλασιάζεται, μέχρι η τιμή του να φτάσει την τιμή για το μέγιστο παράθυρο διεκδίκησης. Οι τιμές *CWmin* και *CWmax* καθορίζονται από το πρότυπο και εξαρτώνται από το φυσικό μέσο. Ένα παράδειγμα την εκθετικής αύξησης της τιμής του παράθυρου διεκδίκησης παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα.




**Εικόνα 13 - Παράδειγμα αύξησης του CW [16]**

### *2.4.4 Μετρητής του χρόνου οπισθοχώρησης*

Ο μετρητής του χρόνου οπισθοχώρησης (backoff time counter) μειώνεται όσο το κανάλι ανιχνεύεται ανενεργό, 'παγώνει' όταν ανιχνεύεται μία μετάδοση και ενεργοποιείται όταν το κανάλι ανιχνεύεται ανενεργό για πάνω από ένα DIFS. Ένας σταθμός που θέλει να μεταδώσει εάν ανιχνεύσει ότι το κανάλι είναι κατειλημμένο, ξεκινά την διαδικασία οπισθοχώρησης, επιλέγοντας μία τυχαία τιμή για τον μετρητή οπισθοχώρησης. Ο σταθμός αυτός μπορεί να μεταδώσει μόνο όταν ο μετρητής οπισθοχώρησης γίνει ίσος με το μηδέν και ελευθερωθεί το κανάλι. Σε περίπτωση που ένας σταθμός θέλει να μεταδώσει και βρει το κανάλι ανενεργό για παραπάνω από DIFS, τότε μεταδίδει χωρίς να ξεκινήσει την διαδικασία οπισθοχώρησης.




**Εικόνα 14 - Μείωση του μετρητή οπισθοχώρησης**

Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζεται η λειτουργία της βασικής μεθόδου πρόσβασης και η ανάλογη συμπεριφορά της μείωσης του μετρητή οπισθοχώρησης. Τρεις σταθμοί Α,Β και Χ μοιράζονται το ίδιο ασύρματο κανάλι. Στο τέλος κάθε μετάδοσης που κάνει ο σταθμός Χ, περιμένει για ένα DIFS και μετά επιλέγει το χρόνο οπισθοχώρησης, ίσο με 6 για το παράδειγμα της Εικόνα 14 , πριν να μεταδώσει το επόμενο πακέτο. Υποθέτουμε ότι το πρώτο πακέτο του σταθμού Α φτάνει στον χρόνο που υποδεικνύεται με το βέλος στην Εικόνα 14. Ύστερα από ένα DIFS, το πακέτο μεταδίδεται. Σημειώνεται ότι η μετάδοση του πακέτου Α συμβαίνει στο μέσο μιας χρονοθυρίδας που αντιστοιχεί σε μία τιμή οπισθοχώρησης για τον σταθμό Χ, ίση με 4. Αποτέλεσμα της μετάδοσης είναι το κανάλι να ανιχνευτεί κατειλημμένο από τον σταθμό Χ και να παγώσει ο μετρητής στην τιμή 4. Ο μετρητής του σταθμού Χ θα μειωθεί μόνο όταν το κανάλι ανιχνευτεί ανενεργό για ένα DIFS.

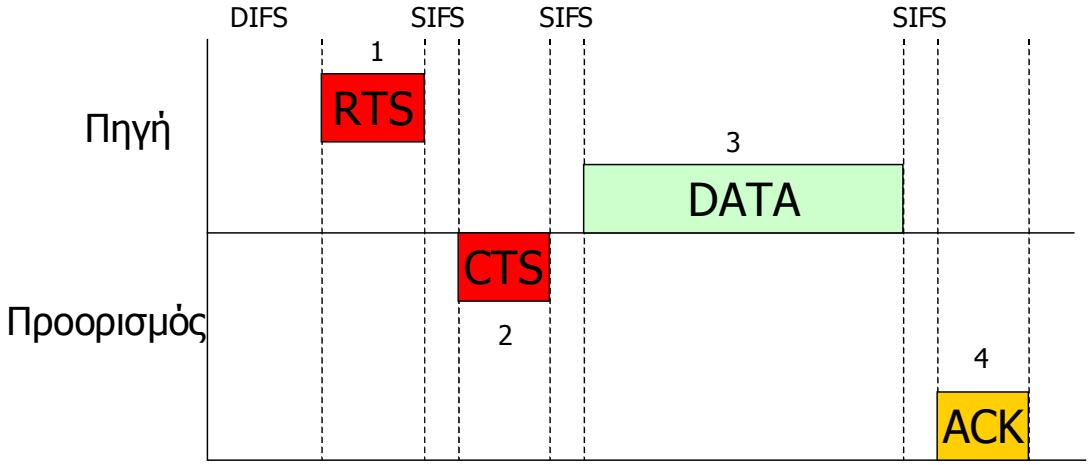
Από την στιγμή που το CSMA/CA δεν στηρίζεται στην ικανότητα των σταθμών να ανιχνεύσουν μία σύγκρουση με το να ακούσουν την ίδια τους την μετάδοση, μία επιβεβαίωση παραλαβής μεταδίδεται από τον σταθμό προορισμού B που ενημερώνει τον αποστολέα (σταθμό A) για την επιτυχή λήψη του πακέτου. Το ACK μεταδίδεται αμέσως μετά το τέλος του πακέτου και ενός SIFS. Καθώς το SIFS (συν την καθυστέρηση διάδοσης) είναι μικρότερο από ένα DIFS, κανένας άλλος σταθμός δεν μπορεί να ανιχνεύσει το κανάλι ως ανενεργό μέχρι το τέλος του ACK. Εάν ο σταθμός αποστολής δεν παραλάβει την επιβεβαίωση μέσα σε ένα χρονικό διάστημα (ACK_Timeout), ή εάν ανιχνεύσει την μετάδοση κάποιου άλλου πακέτου στο κανάλι, τότε ξαναπρογραμματίζει την μετάδοση του πακέτου σύμφωνα με τους κανόνες οπισθοχώρησης. [22][41]

### *2.4.5 Μέθοδος πρόσβασης RTS/CTS*

Η δεύτερη υπομέθοδος της DCF χρησιμοποιεί τον μηχανισμό RTS/CTS για να διασφαλιστεί ότι μία συγκεκριμένη ανταλλαγή πλαισίων θα γίνει χωρίς διακοπή από μετάδοση τρίτου σταθμού. Αυτός ο μηχανισμός διαφοροποιεί την διαδικασία αποστολής πλαισίου που αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, εισάγοντας δύο επιπλέον πλαίσια, τα RTS (Ready To Send) και CTS (Clear To Send). Προστατεύοντας την ανταλλαγή πλαισίων, ο μηχανισμός RTS/CTS βελτιώνει την απόδοση της χρήσης του ασύρματου δικτύου σε περιπτώσεις μεγάλου φόρτου εξαιτίας της ύπαρξης πολλών τερματικών και αντιμετωπίζει το πρόβλημα των κρυμμένων σταθμών. Η προστασία των πλαισίων γίνεται με την ύπαρξη της χρονικής διάρκειας της μετάδοσης μέσα στο πλαίσιο RTS και CTS, βάση της οποίας ενημερώνεται ο NAV στους σταθμούς που δεν συμμετέχουν στην μετάδοση. Το πρόβλημα το κρυμμένων σταθμών αναφέρεται στην έλλειψη πλήρους επικοινωνίας μεταξύ όλων των σταθμών που βρίσκονται στο δίκτυο. Η μέθοδος RTS/CTS εάν χρησιμοποιείται χωρίς λόγο, έχει το ακριβώς αντίθετο αποτέλεσμα, εφόσον προσθέτει επιπλέον φορτίο στο ασύρματο δίκτυο.

Η μέθοδος RTS/CTS είναι προαιρετική και χρησιμοποιεί τετραμερή χειραψία για την αποστολή των δεδομένων. Πριν από την μετάδοση του πλαισίου, ο σταθμός που λειτουργεί σε RTS/CTS mode “δεσμεύει” το κανάλι αποστέλλοντας ένα ειδικού σκοπού μικρό πλαίσιο Request-To-Send (αίτηση για αποστολή). Ο σταθμός προορισμού επιβεβαιώνει την λήψη του RTS πλαισίου με την αποστολή ενός

πλαισίου Clear-To-Send, μετά από το οποίο μπορεί να αρχίσει η κανονική μετάδοση δεδομένων με την ανάλογη απόκριση σε ACK.




**Εικόνα 15 - RTS/CTS τετραμερής χειραψία**

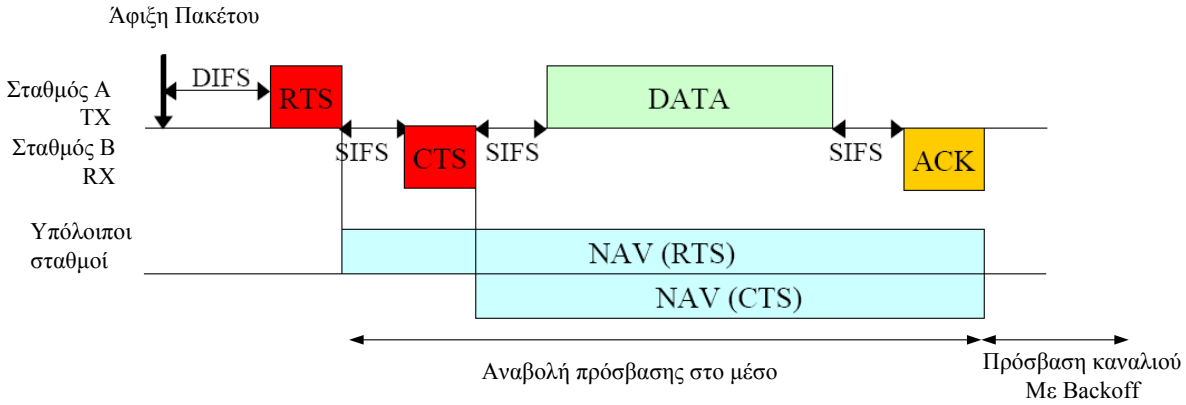
Όταν χρησιμοποιείται η μέθοδος RTS/CTS σύγκρουση μπορεί να συμβεί μόνο στο πλαίσιο RTS, και ανιχνεύεται από την έλλειψη της απόκρισης του CTS. Για τον λόγο αυτό ο μηχανισμός RTS/CTS επιτρέπει την αύξηση της απόδοσης του συστήματος με την μείωση της διάρκειας της κάθε σύγκρουσης όταν μεταδίδονται μεγάλα πλαίσια δεδομένων.

Στην συνέχεια περιγράφεται η λειτουργία της μεθόδου RTS/CTS και η αντιμετώπιση του προβλήματος των κρυμμένων σταθμών.

### *2.4.6 Λειτουργία μεθόδου πρόσβασης RTS/CTS*

Όταν ένας σταθμός θέλει να μεταδώσει ένα πακέτο, τότε περιμένει μέχρι το κανάλι να ανιχνευτεί ανενεργό για ένα DIFS, σύμφωνα με τους κανόνες backoff που αναλύθηκαν στην προηγούμενη ενότητα, και μετά αντί του πλαισίου δεδομένων στέλνει ένα προκαταρτικό ειδικού σκοπού πλαίσιο που ονομάζεται 'αίτηση για αποστολή' (request to send - RTS). Ο σταθμός προορισμού ανιχνεύει το πλαίσιο RTS, και αποκρίνεται ύστερα από ένα SIFS, με ένα πλαίσιο που ονομάζεται 'επιτρέπεται η αποστολή' (clear to send - CTS). Ό σταθμός αποστολέας επιτρέπεται να μεταδώσει τα δεδομένα του μόνο εάν παραλάβει σωστά το πλαίσιο CTS.

Τα πλαίσια RTS και CTS έχουν πληροφορίες για την χρονική διάρκεια που απαιτείται για να μεταδοθεί το πακέτου. Οι πληροφορίες αυτές διαβάζονται από οποιαδήποτε σταθμό βρίσκεται στο ίδιο κανάλι, που με την σειρά του ενημερώνει το Network Allocation Vector (NAV) που περιέχει πληροφορίες σχετικές με την χρονική περιόδο για την οποία το κανάλι θα παραμένει κατειλημμένο. Για το λόγο αυτό, όταν ένας σταθμός είναι 'κρυμμένος' είτε από τον αποστολέα είτε από τον παραλήπτη, ανιχνεύοντας μόνο ένα από τα πλαίσια RTS και CTS, μπορεί να καθυστερήσει την μετάδοσή του και να αποφύγει έτσι την σύγκρουση.



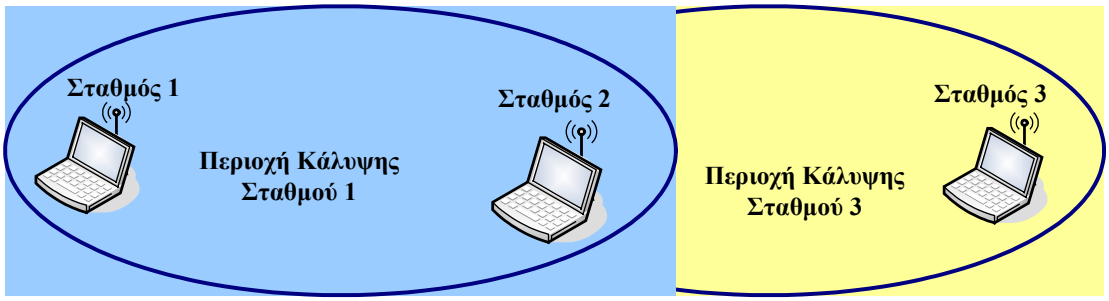

**Εικόνα 16 - Λειτουργία μηχανισμού RTS/CTS**

Ο μηχανισμός RTS/CTS είναι πολύ αποτελεσματικός σε όρους απόδοσης συστήματος, ειδικά όταν υπάρχουν μεγάλα πλαίσια δεδομένων, καθώς μειώνει το μέγεθος των πλαισίων που εμπλέκονται στην διαδικασία της σύγκρουσης. Είναι γεγονός, ότι εάν θεωρηθεί ότι το δίκτυο λειτουργεί σε ιδανικές συνθήκες για όλους τους σταθμούς, τότε μία σύγκρουση μπορεί να συμβεί μόνο όταν δύο ή περισσότερα πακέτα μεταδοθούν μέσα στην ίδια χρονοθυρίδα. Εάν και οι δύο σταθμοί που θέλουν να μεταδώσουν χρησιμοποιούν τον μηχανισμό RTS/CTS, τότε η σύγκρουση μπορεί να συμβεί μόνο στα πλαίσια RTS, και μπορεί να ανιχνευτεί σύντομα από τους εμπλεκόμενους σταθμούς λόγω της έλλειψης των πλαισίων CTS [32][39].

### *2.4.7 Πρόβλημα κρυμμένων σταθμών*

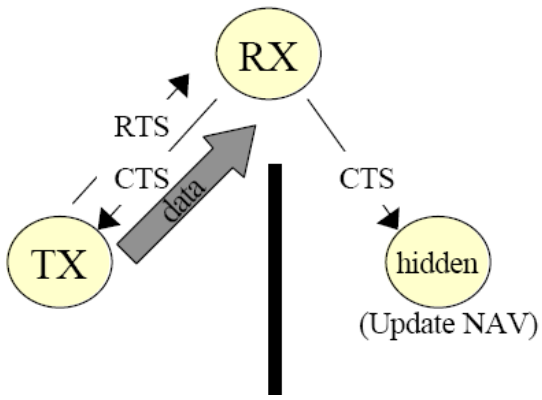
Ο μηχανισμός RTS/CTS αντιμετωπίζει αποτελεσματικά το πρόβλημα ύπαρξης κρυμμένου σταθμού (hidden node). Το πρόβλημα αυτό προκύπτει όταν δύο σταθμοί

αντιδιαμετρικά ενός σημείου πρόσβασης, μπορούν και οι δυο να λάβουν δεδομένα από το σημείο πρόσβασης, αλλά δεν μπορούν να επικοινωνήσουν μεταξύ τους, συνήθως λόγω ύπαρξης θορύβου ή κάποιου φυσικού εμποδίου. Το ίδιο πρόβλημα μπορεί να προκύψει και όταν δεν χρησιμοποιείται AP, δηλαδή σε ad-hoc τοπολογίες, όπως στην παρακάτω εικόνα.




**Εικόνα 17 - Πρόβλημα κρυμμένων σταθμών**

Ο σταθμός 1 δεν γνωρίζει την ύπαρξη του Σταθμού 3, εφόσον αυτός είναι έξω από την περιοχή κάλυψής του. Το ίδιο συμβαίνει και με τον Σταθμό 3, ο οποίος δεν γνωρίζει την ύπαρξη του Σταθμού 1, για τον ίδιο λόγο με την προηγούμενη περίπτωση. Ο Σταθμός 2 βρίσκεται στην κοινή περιοχή κάλυψης των Σταθμών 1 και 3 και συνεπώς μπορεί να ανταλλάσσει πλαίσια και με τους δύο. Το πρόβλημα δημιουργείται στην περίπτωση που ένας από τους σταθμούς 1 και 3 ξεκινά να μεταδίδει προς τον Σταθμό 2 και ο άλλος επειδή δεν 'ακούει' την μετάδοση επιχειρεί να στείλει δεδομένα και αυτός. Το αποτέλεσμα είναι η δημιουργία συγκρούσεων και τα πλαίσια που έχουν αποσταλεί να χάνονται. Αυτή η περίπτωση μπορεί να αντιμετωπιστεί μέσω του μηχανισμού RTS/CTS. Σύμφωνα με αυτόν, ο Σταθμός 2 θα εκπέμψει ένα πλαίσιο CTS σε απάντηση του RTS που θα του έχει στείλει νωρίτερα ο Σταθμός 1. Αυτό το πλαίσιο CTS θα το λάβει και ο Σταθμός 3, καθώς ο Σταθμός 2 είναι εντός της εμβέλειάς του και έτσι θα αποφύγει να μεταδώσει και αυτός κάποιο πλαίσιο που θα προκαλούσε σύγκρουση.




**Εικόνα 18 - Ενημέρωση NAV ενός κρυμμένου σταθμού**

Η ύπαρξη ενός κρυμμένου σταθμού μπορεί να προκαλέσει σύγκρουση σε οποιοδήποτε στάδιο της διαδικασίας αποστολή ή λήψης δεδομένων. Η ανταλλαγή των πλαισίων RTS και CTS πριν από την πραγματική μετάδοση των πλαισίων δεδομένων είναι ένα από τα μέσα διανομής πληροφοριών κράτησης για το μέσο. Κάθε σταθμός που δεν συμμετέχει στην μετάδοση των δεδομένων ενημερώνεται μέσω των πλαισίων αυτών για το χρονικό διάστημα που θα είναι κατειλημμένο το κανάλι. Όλοι οι σταθμοί που λαμβάνουν ένα RTS ή ένα CTS, ενημερώνουν τον δείκτη εικονικής ανίχνευσης φέροντος, που ονομάζεται NAV (Network Allocation Vector) όποτε αναβάλουν την ανίχνευση του καναλιού για την διάρκεια που αναφέρεται στο NAV. Η λειτουργία του NAV περιγράφτηκε στην ενότητα 2.3.1.

Ο μηχανισμός RTS/CTS ενεργοποιείται αυτόματα όταν το μέγεθος ενός πλαισίου είναι μεγαλύτερο από το RTS threshold για να διασφαλίσει την ομαλή αποστολή μεγάλων πλαισίων. Επίσης λόγω του μικρού μεγέθους των πλαισίων του RTS και του CTS, η μέθοδος μειώνει τον πρόσθετο φόρτο των συγκρούσεων. [8][16]

### *2.4.8 Αντιμετώπιση αποτυχημένης προσπάθειας μετάδοσης*

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο προσδιορισμό του εάν έχει συμβεί κάποια σύγκρουση κατά τη μετάδοση είναι ευθύνη του αποστολέα. Σε περίπτωση που η αποστολή ενός πλαισίου δεν ολοκληρωθεί κανονικά ο αποστολέας πρέπει να το ξαναστείλει. Για τον έλεγχο της διαδικασίας αυτής κάθε πλαίσιο έχει έναν μετρητή (retry counter - RC) συσχετισμένο με αυτό, με αρχική τιμή 0. Κάθε φορά που το πλαίσιο αυτό επαναμεταδίδεται ο RC που του αντιστοιχεί αυξάνεται κατά 1. Αν ο

μετρητής ξεπεράσει κάποιο προκαθορισμένο όριο (retry count limit), το πλαίσιο απορρίπτεται.

Κάθε σταθμός διακρίνει τα πλαίσια σε short και long. Όταν χρησιμοποιείται η Βασική μέθοδος υπάρχουν μόνο short πλαίσια ενώ όταν χρησιμοποιείται η μέθοδος RTS/CTS έχουμε πλαίσια long. Ο σταθμός διατηρεί δύο μετρητές, τους station short retry count (SSRC) και τον station long retry count (SLRC). Κάθε φορά που η μετάδοση ενός πλαισίου αποτυγχάνει ο αντίστοιχος μετρητής αυξάνεται. Οι μετρητές αυτοί μηδενίζονται σε συγκεκριμένες περιπτώσεις. Για τον SSRC αυτές είναι :

- Λήψη CTS πλαισίου σε απάντηση ενός RTS.
- Λήψη πλαισίου ACK μετά από μη κατακερματισμένη μετάδοση πλαισίου.
- Λήψη broadcast ή multicast πλαισίου.

Αντίστοιχα, ο SLRC μηδενίζεται στις ακόλουθες περιπτώσεις :

- Λήψη πλαισίου ACK για πλαίσιο μεγαλύτερο του RTS threshold.
- Λήψη broadcast ή multicast πλαισίου.

Οι τιμές που παίρνουν οι μετρητές SSRC και SLRC καθορίζονται από το πρότυπο. Ο μετρητής SSRC χρησιμοποιείται όταν τα πλαίσια που έχουν μήκος μικρότερο από το RTS threshold [17].

## 2.5 *Λειτουργία Συντονισμού Σημείου (PCF)*

Όπως προαναφέρθηκε στο πρότυπο ορίζεται και μία προαιρετική λειτουργία συντονισμού, που ονομάζεται Λειτουργία συντονισμού σημείου - Point Coordination Function (PCF). Η PCF χρησιμοποιείται για υπηρεσίες κρίσιμες ως προς τον χρόνο απόκρισης και υλοποιείται μόνο σε τοπολογίες τύπου υποδομής, όπου η πρόσβαση ελέγχεται από ένα κεντρικό Σημείο Πρόσβασης (AP). Η αρχιτεκτονική του υποεπιπέδου MAC παρέχει την PCF μέσω των υπηρεσιών της DCF. Η μέθοδος PCF είναι η εναλλακτική λύση στο πρόβλημα του ελέγχου της πρόσβασης στο μέσο. Η συγκεκριμένη μέθοδος δεν χρησιμοποιείται ιδιαίτερα στα προϊόντα που κυκλοφορούν στην αγορά, ενώ οι κατασκευαστές δεν είναι υποχρεωμένοι να τον υποστηρίξουν, αφού αποτελεί προαιρετικό μέρος του προτύπου 802.11. Επιπλέον, εφόσον απαιτεί κεντρικό έλεγχο από κάποιο AP, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο σε infrastructure δίκτυα.

Η μέθοδος πρόσβασης PCF χρησιμοποιεί έναν συντονιστή σημείου (point coordinator - PC), που λειτουργεί στο access point, ώστε να καθορίσει ποιος σταθμός έχει το δικαίωμα να μεταδώσει. Η λειτουργία της στην πραγματικότητα είναι αυτή της εκλογής, με τον PC να έχει τον ρόλο του εκλέκτορα. Η λειτουργία της PCF μπορεί να χρειάζεται επιπρόσθετο συντονισμό που θα επιτρέπει την αποδοτική λειτουργία σε περιπτώσεις όπου διάφορα BSSs λειτουργούν στο ίδιο κανάλι με επικαλυπτόμενο φυσικό χώρο.

Η PCF χρησιμοποιεί έναν μηχανισμό εικονικής ανίχνευσης μέσου που υποστηρίζεται από έναν μηχανισμό πρόσβασης με προτεραιότητες. Η PCF διανέμει πληροφορίες προκειμένου να αποκτήσει τον έλεγχο του μέσου με την χρήση του network allocation vector (NAV) στους σταθμούς. Επιπλέον όλες οι εκπομπές πλαισίων με την χρήση της PCF χρησιμοποιούν ένα interframe space (IFS) που είναι μικρότερο από το IFS των πλαισίων που εκπέμπονται μέσω της DCF. Η χρήση μικρότερου IFS υπονοεί ότι η point-coordinated κίνηση θα έχει προτεραιότητα πρόσβασης στο μέσο σε σχέση με την μέθοδο DCF. Για να διασφαλιστεί περισσότερο ότι ο έλεγχος του μέσου θα μείνει στο AP κατά την contention - free period, όλοι οι χρόνοι αναμονής που χρησιμοποιούνται είναι SIFS ή PIFS. Ο χρόνος αναμονής από το AP για να επιβεβαιωθεί το πλαίσιο που έστειλε είναι ίσος με τον PIFS ενώ όλοι οι υπόλοιποι χρόνοι αναμονής είναι ίσοι με SIFS.

Η πρόσβαση με προτεραιότητα που παρέχεται από την PCF μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να δημιουργήσει μία μέθοδο πρόσβασης χωρίς ανταγωνισμό (contention-free - CF). Ο PC ελέγχει τις μεταδόσεις των πλαισίων των σταθμών για να ελαττώσει την συμφόρηση για δεδομένο χρονική περίοδο.

Οι μέθοδοι DCF και PCF μπορούν να συνυπάρξουν, με την έννοια ότι μπορούν να λειτουργήσουν ταυτόχρονα μέσα σε έναν BSS. Όταν ο PC λειτουργεί σε ένα BSS οι δύο μέθοδοι εναλλάσσονται. Σκοπός της PCF είναι να προσφέρει πρόσβαση στο μέσο χωρίς ανταγωνισμό μεταξύ των σταθμών (contention - free medium access). Υλοποιείται χρησιμοποιώντας την υποδομή της DCF, προσθέτοντας επιπλέον λειτουργικότητα. Η χρήση της συνεπάγεται τη δημιουργία χρονικών περιόδων χωρίς ανταγωνισμό (contention - free periods), ενώ κατά τον υπόλοιπο χρόνο η πρόσβαση ελέγχεται κανονικά από την DCF (contention periods). Υπάρχει δυνατότητα καθορισμού της σχέσης των δύο παραπάνω χρονικών περιόδων ανάλογα με τη χρήση του δικτύου. Αυτές οι περίοδοι επαναλαμβάνονται διαδοχικά, ενώ η διάρκειά τους κάθε φορά ονομάζεται contention - free repetition interval. Η διάρκεια

της contention - free period πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με το χρόνο που απαιτείται να μεταδοθεί και να επιβεβαιωθεί ένα πλαίσιο μεγίστου μεγέθους. Σε περίπτωση που η contention period δεν τελειώσει όταν πρέπει να αρχίσει η contention - free period, η δεύτερη έχει μειωμένη διάρκεια. Κατά τη διάρκεια του contention - free period η διαδικασία πρόσβασης στο μέσο για τους σταθμούς ελέγχεται από το AP. Το AP που τρέχει την PCF μπορεί να διακόψει νωρίτερα την contention - free period για οποιοδήποτε λόγο [2][6][23].

## *2.6 Παρεχόμενες Υπηρεσίες του υποεπιπέδου MAC*

Το υποεπίπεδο MAC παρέχει διάφορες υπηρεσίες προκειμένου να διαχειριστεί την αυθεντικοποίηση, την ιδιωτικότητα και την μεταφορά δεδομένων. Οι υπηρεσίες αυτές ομαδοποιούνται σε τρεις κατηγορίες : Ασύγχρονη Υπηρεσία δεδομένων, Υπηρεσίες Ασφάλειας και Υπηρεσίες διάταξης των Μονάδων Δεδομένων των υπηρεσιών του MAC (MAC Service Data Units - MSDUs).

### *2.6.1 Ασύγχρονη Υπηρεσία Δεδομένων*

Η υπηρεσία αυτή παρέχει σε ομότιμες οντότητες του LLC (Logical Link Control) την δυνατότητα να ανταλλάσσουν MSDUs. Για να υποστηρίξει το τοπικό υποεπίπεδο MAC την υπηρεσία αυτή, χρησιμοποιεί τις υπηρεσίες του Φυσικού επιπέδου για να μεταδώσει ένα MSDU σε μία ομότιμη MAC οντότητα, όπου θα παραδοθεί τελικά στο ομότιμο LLC. Αυτού του είδους ασύγχρονη μετάδοση πραγματοποιείται χωρίς να έχει προηγηθεί η αποκατάσταση σύνδεσης (connectionless basis). Δεν υπάρχει κάποια εγγύηση ότι τα δεδομένα θα μεταφερθούν με επιτυχία. Οι Broadcast και οι multicast μεταδόσεις είναι τμήμα της ασύγχρονης υπηρεσίας δεδομένων που παρέχει το MAC. Λόγω των χαρακτηριστικών του ασύρματου μέσου μετάδοσης, τα δεδομένα που μεταδίδονται με broadcast και multicast μπορεί να έχουν χαμηλότερη ποιότητα υπηρεσιών, σε σχέση με τα unicast MSDUs. Όλοι οι σταθμοί υποστηρίζουν την ασύγχρονη υπηρεσία δεδομένων. [10][16]

Εξαιτίας της λειτουργίας ορισμένων διαδικασιών του MAC μπορεί να χρειαστεί η διάταξη σε σωστή σειρά των δεδομένων. Η ασύγχρονη υπηρεσία

δεδομένων διαθέτει δύο κλάσεις υπηρεσιών. Με την επιλογή της επιθυμητής κλάσης, κάθε οντότητα LLC που αρχικοποιεί την μεταφορά MSDUs έχει την δυνατότητα να καθορίσει εάν επιτρέπεται η όχι η αναδιάταξη αυτών των MSDUs.

### *2.6.2 Υπηρεσίες Ασφάλειας*

Οι υπηρεσίες ασφάλειας στο IEEE 802.11 παρέχονται από την υπηρεσία αυθεντικοποίησης και τον μηχανισμό Wired Equivalent Privacy (WEP). Εξ ορισμού τα δεδομένα μεταφέρονται χωρίς κάποια κωδικοποίηση, επιτρέποντας οποιαδήποτε συσκευή συμβατή με 802.11 να μπορεί να υποκλέψει κίνηση που βρίσκεται στο ίδιο εύρος με αυτή. Ο μηχανισμός του WEP κρυπτογραφεί τα δεδομένα πριν από την αποστολή του χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο 40-bit κρυπτογράφησης, γνωστό ως RC4. Ένα κοινό κλειδί χρησιμοποιείται για την κρυπτογράφηση και την αποκρυπτογράφηση.

Ο σκοπός των υπηρεσιών ασφάλειας περιορίζονται στην ανταλλαγή δεδομένων από σταθμό σε σταθμό. Η υπηρεσία ιδιωτικότητας που παρέχει η υλοποίηση του IEEE 802.11 WEP είναι η κρυπτογράφηση των MSDU. Ο μηχανισμός WEP αποτελεί μία λογική υπηρεσία που βρίσκεται στο υποεπίπεδο MAC sublayer. Η πραγματική υλοποίηση της υπηρεσίας του WEP είναι διαφανή για το LLC και τα υπόλοιπα επίπεδα πάνω από το υποεπίπεδο MAC. Οι υπηρεσίες ασφάλειας που παρέχονται από το WEP στο IEEE 802.11 είναι οι εξής:

a) Εμπιστευτικότητα

b) Αυθεντικοποίηση

c) Έλεγχο πρόσβασης σε συνδυασμό με την διαχείριση του επιπέδου

Κατά την διάρκεια της αυθεντικοποίησης τα εμπλεκόμενα μέρη ανταλλάσσουν ένα κοινό κλειδί, που καθορίζεται για κάθε AP και τους σταθμούς που χειρίζεται αυτό.

### *2.6.3 Υπηρεσίες διάταξης MSDU*

Οι υπηρεσίες που παρέχονται από το υποεπίπεδο MAC επιτρέπουν και σε κάποιες περιπτώσεις απαιτούν την αναδιάταξη των MSDUs. Το MAC δεν αναδιατάσσει σκόπιμα τα δεδομένα, εκτός εάν είναι απαραίτητο για να βελτιώσει την πιθανότητα επιτυχούς παράδοσης με βάση την τρέχουσα λειτουργία (“power

management”) του σταθμού του παραλήπτη. Η μοναδική επίδραση που έχει αυτή η αναδιάταξη είναι μία αλλαγή στην σειρά παράδοσης των broadcast και των multicast MSDUs που ξεκινούν από έναν σταθμό. Εάν τα πρωτόκολλα μεγαλύτερων επιπέδων δεν επιτρέπουν την πιθανή αναδιάταξη τότε θα πρέπει να καθοριστεί η χρήση της ανάλογη κλάσης την ασύγχρονης υπηρεσίας δεδομένων.

# *Κεφάλαιο 3*
# *Μελέτη ρυθμοαπόδοσης του πρωτοκόλλου*

Για την μελέτη της απόδοσης του πρωτοκόλλου μας ενδιαφέρει ο υπολογισμός της Ρυθμοαπόδοσης Κορεσμού (Saturation Throughput). Ο υπολογισμός αυτός επιτυγχάνεται με την χρήση αναλυτικού μοντέλου και ενός μοντέλου προσομοίωσης. Το αρχικό αναλυτικό μοντέλο που θα αναλυθεί στην συνέχεια παρουσιάστηκε το 2000 από τον Giuseppe Bianchi και υπολογίζει την απόδοση μέσω του προσδιορισμού των πιθανοτήτων μετάδοσης και σύγκρουσης. Το αναλυτικό αυτό μοντέλο αποτελείται από ένα Δισδιάστατο Μαρκοβιανό μοντέλο με το οποίο περιγράφεται η εξέλιξη του παράθυρου διεκδίκησης και η συμπεριφορά του μετρητή οπισθοχώρησης (backoff counter).

Με βάση αυτό το μοντέλο προτάθηκε ένα σύνολο από παρόμοια αναλυτικά μοντέλα που είχαν ως στόχο να το βελτιώσουν και να υπολογίσουν με μεγαλύτερη ακρίβεια την ρυθμοαπόδοση του πρωτοκόλλου. Ένα από τα αναλυτικά αυτά μοντέλα είναι αυτό που προτάθηκε το 2001 από τους Haitao Wu, Yonh Peng, Keping Long και Shiduan Cheng, το οποίο παρέχει μεγαλύτερη ακρίβεια. Το μοντέλο αυτό θα αναλυθεί στην συνέχεια και θα γίνει μία σύγκριση των αποτελεσμάτων σε σχέση με το πρώτο μοντέλο του G. Bianchi.

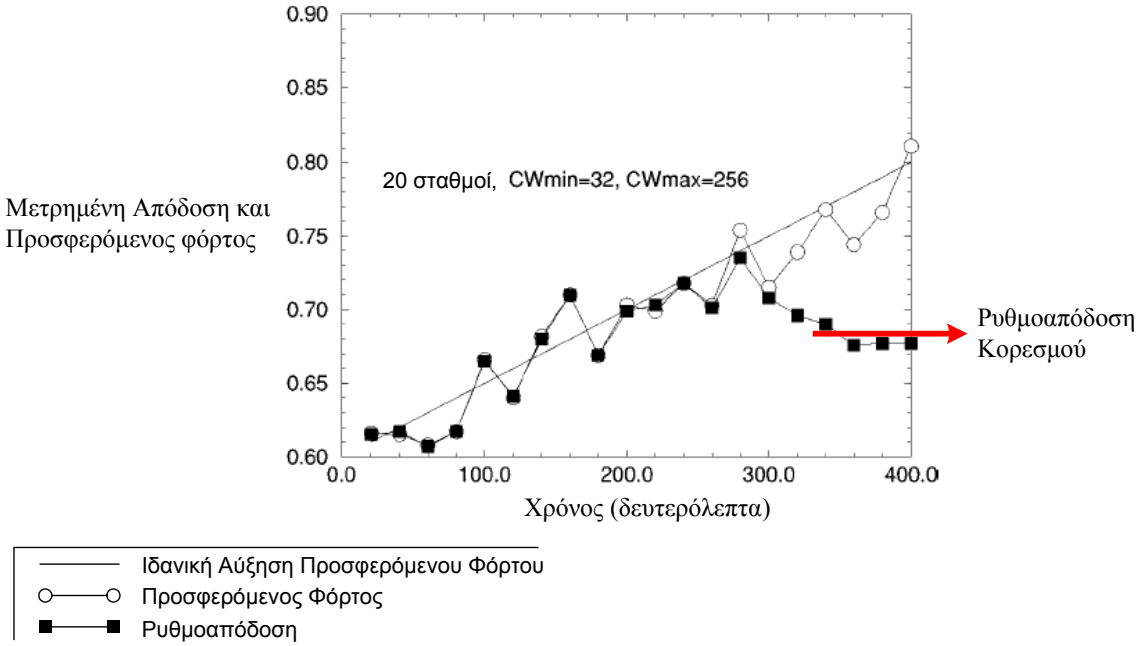
## *3.1 Ρυθμοαπόδοση Κορεσμού (Saturation Throughput)*

Για την μελέτη αρχικά της απόδοσης χρειαζόμαστε ένα μέγεθος που να μπορεί να υπολογιστεί με αναλυτικό τρόπο. Στην ανάλυση που ακολουθεί επικεντρωνόμαστε στην Ρυθμοαπόδοση Κορεσμού (Saturation Throughput), που αποτελεί ένα βασικό μέγεθος μέτρησης. Ορίζεται ως το όριο στο οποίο φτάνει η απόδοση του συστήματος καθώς αυξάνεται ο φόρτος και αναπαριστά τον μέγιστο φόρτο στο οποίο μπορεί να ανταποκριθεί το σύστημα σε σταθερές συνθήκες.

Είναι γνωστό ότι διάφοροι μηχανισμοί τυχαίας πρόσβασης παρουσιάζουν ασταθή συμπεριφορά. Συγκεκριμένα καθώς ο φόρτος αυξάνεται, η απόδοση αυξάνεται μέχρι μία μέγιστη τιμή, η οποία ονομάζεται Μέγιστη Ρυθμοαπόδοση

("maximum throughput"). Ωστόσο εάν ο φόρτος συνεχίσει να αυξάνεται η απόδοση του συστήματος θα μειωθεί σημαντικά. Αυτό πρακτικά καταλήγει στο να μην μπορεί το σύστημα να λειτουργήσει με την μέγιστη ρυθμοαπόδοση για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα. Γι' αυτό τον λόγο το μέγεθος αυτό δεν χρησιμοποιείται για την μελέτη της απόδοσης του μηχανισμού πρόσβασης, καθώς η χρήση του μεγέθους αυτού θα μπορούσε να μας οδηγήσει σε λάθος συμπεράσματα.

Το πρωτόκολλο 802.11 είναι γνωστό ότι παρουσιάζει κάποιας μορφής αστάθεια στην λειτουργία του. Για να απεικονιστεί η ασταθής συμπεριφορά του 802.11 έγιναν ένα σύνολο από δοκιμές με την χρήση μοντέλων προσομοίωσης στις οποίες ο προσφερόμενος φόρτος αυξάνεται γραμμικά σε σχέση με τον χρόνο προσομοίωσης. Το αποτέλεσμα των προσομοιώσεων παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα.[21][37]




**Εικόνα 19 - Απόδοση Κορεσμού [22]**

Τα αποτελέσματα που εμφανίζονται στην παραπάνω εικόνα προέκυψαν από την προσομοίωση της λειτουργίας 20 σταθμών. Η ευθεία γραμμή αναπαριστά τον ιδανικό προσφερόμενο φόρτο, κανονικοποιημένο σε σχέση με την χωρητικότητα του καναλιού. Ο πραγματικός προσφερόμενος φόρτος δημιουργήθηκε σύμφωνα με την κατανομή Poisson. Το μέγεθος των πακέτων ήταν σταθερό (8184 bits) ενώ ο ρυθμός άφιξης μεταβαλλόταν κατά την διάρκεια της προσομοίωσης για να είναι όσο το

δυνατόν πιο κοντά στον ιδανικό προσφερόμενο φόρτο. Στο σχήμα παρουσιάζονται ο προσφερόμενος φόρτος και η ρυθμοαπόδοση του συστήματος. Οι μετρήσεις έγιναν σε διαστήματα των 20 δευτερολέπτων και κανονικοποιήθηκαν σε σχέση με τον ρυθμό του καναλιού.

Από το διάγραμμα παρατηρείται ότι η ρυθμοαπόδοση ακολουθεί τον πραγματικό προσφερόμενο φόρτο για τα πρώτα 260 δευτερόλεπτα της προσομοίωσης, ενώ πέφτει στην τιμή 0.68 στο δεύτερο τμήμα της προσομοίωσης. Η τιμή που μετράται μετά την πτώση αυτή ονομάζεται απόδοση κορεσμού και αναπαριστά την απόδοση του συστήματος σε συνθήκες υπερφόρτωσης. Σημειώνεται ότι κατά την διάρκεια της προσομοίωσης η στιγμιαία απόδοση προσωρινά αυξάνεται πάνω από την τιμή κορεσμού (μέχρι 0.74 για το παραπάνω παράδειγμα), όμως τελικά μειώνεται και σταθεροποιείται στην τιμή κορεσμού. Σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται το γέμισμα των ουρών αναμονής.

## *3.2 Προσέγγιση υπολογισμού της ρυθμοαπόδοσης κορεσμού*

Για να υπολογιστεί αναλυτικά η απόδοση κορεσμού θα πρέπει να γίνουν κάποιες παραδοχές ως προς την λειτουργία του συστήματος. Συγκεκριμένα θεωρούμε ότι υπάρχουν ιδανικές συνθήκες στο κανάλι επικοινωνίας, δηλαδή δεν υπάρχουν κρυμμένοι σταθμοί και δεν υπάρχουν λάθη στο κανάλι. Στην ανάλυση που ακολουθεί, υποθέτουμε ότι υπάρχει ένα σταθερό πλήθος σταθμών και ο κάθε σταθμός έχει πάντα ένα διαθέσιμο πακέτο προς μετάδοση. Με άλλα λόγια η λειτουργία γίνεται σε συνθήκες κορεσμού, δηλαδή η ουρά μετάδοσης του κάθε σταθμού θεωρείται ότι ποτέ δεν είναι άδεια.[22][27]

Η ανάλυση χωρίζεται σε δύο τμήματα. Στο πρώτο παρατίθεται η μελέτη της συμπεριφοράς ενός σταθμού με την χρήση ενός Μαρκοβιανού μοντέλου (Markov model), και υπολογίζουμε την σταθερή πιθανότητα (stationary probability) που έχει ένας σταθμός, να μεταδώσει ένα πακέτο γενικά σε μία χρονοθυρίδα. Η πιθανότητα αυτή δεν εξαρτάται από τον μηχανισμό πρόσβασης που χρησιμοποιείται (Βασική μέθοδος ή RTS/CTS). Στο δεύτερο τμήμα παρουσιάζονται τα γεγονότα που μπορούν να συμβούν σε μία τυχαία χρονοθυρίδα και παρατίθεται ο υπολογισμός της ρυθμοαπόδοσης κορεσμού για τις δύο μεθόδους πρόσβασης στο μέσο.

## *3.3 Πιθανότητα μετάδοσης πακέτων*

Θεωρούμε ότι υπάρχει σταθερό πλήθος *n* σταθμών που ανταγωνίζονται. Σε συνθήκες κορεσμού κάθε σταθμός ύστερα από κάθε επιτυχημένη μετάδοση έχει πάντα ένα πακέτο έτοιμο προς μετάδοση. Κάθε πακέτο πριν μεταδοθεί θα πρέπει να περιμένει ένα τυχαίο χρόνο οπισθοχώρησης (backoff time).

Όπως προαναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο ο χρόνος που ακολουθεί αμέσως μετά από ένα DIFS διαιρείται σε διαστήματα που ονομάζονται χρονοθυρίδες *σ*. Οι χρονοθυρίδες δεν είναι φυσικά καθορισμένες στο κανάλι, αλλά λογικά αναγνωρίσιμες από τους σταθμούς. Ο κάθε σταθμός μπορεί να μεταδώσει μόνο στην αρχή κάθε χρονοθυρίδας, το μέγεθος της οποίας ορίζεται ως ο ελάχιστος χρόνος που απαιτείται ώστε ο κάθε σταθμός να ανιχνεύσει ότι γίνεται μετάδοση πακέτων από κάποιον άλλο σταθμό.

Στην συνέχεια αναλύεται το δισδιάστατο Μαρκοβιανό μοντέλο που αναπαριστά την εξέλιξη του σταδίου οπισθοχώρησης συναρτήσει του παράθυρου διεκδίκησης.

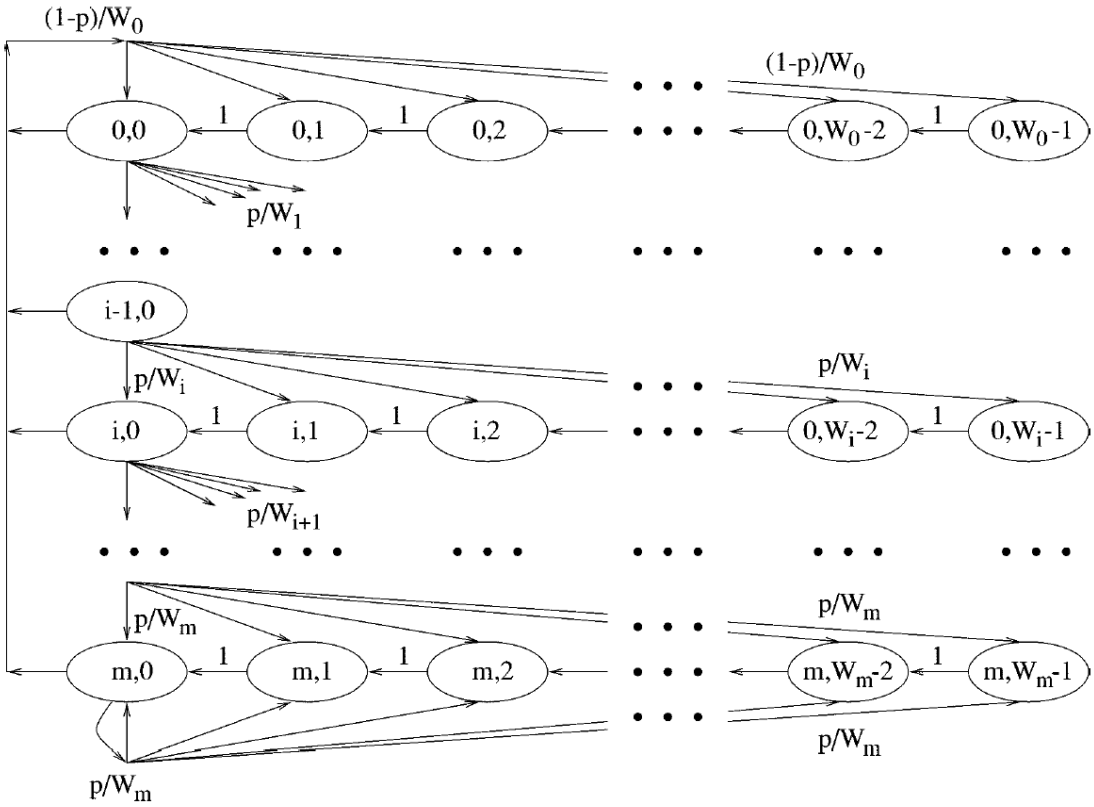
### ***3.3.1 Ανάλυση Μαρκοβιανού μοντέλου***

Έστω ότι *b(t)* είναι η στοχαστική διαδικασία που αναπαριστά τον μετρητή του χρόνου οπισθοχώρησης (backoff time counter) για ένα δεδομένο σταθμό. Για την μείωση του μετρητή χρησιμοποιείται μία ακέραια κλίμακα διακριτών τιμών, όπου το *t* και το *t+1* αντιστοιχεί στην αρχή δύο διαδοχικών χρονοθυρίδων. Η διακριτού χρόνου κλίμακα δεν σχετίζεται άμεσα με τον χρόνο του συστήματος. Όπως φαίνεται και από το μοντέλο, η μείωση του μετρητή σταματά όταν το κανάλι είναι κατειλημμένο και γι' αυτό το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών χρονοθυρίδων μπορεί να είναι μεγαλύτερο από το μέγεθος μίας χρονοθυρίδας *σ*, καθώς μπορεί να παρεμβληθεί η μετάδοση ενός πακέτου. Ο όρος χρονοθυρίδα αναφέρεται είτε στην σταθερή τιμή *σ*, είτε στο μεταβλητό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών μειώσεων του μετρητή οπισθοχώρησης που περιλαμβάνει την μετάδοση πακέτου. Στην συνέχεια ως χρονοθυρίδα θα αναφερόμαστε στον δεύτερο ορισμό που σχετίζεται με την μείωση του μετρητή.

Από την στιγμή που η τιμή του μετρητή οπισθοχώρησης κάθε σταθμού εξαρτάται και από το ιστορικό της μετάδοσης που έχει κάνει, η στοχαστική

διαδικασία *b(t)* δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ως Μαρκοβιανή. Ωστόσο ορίζουμε για ευκολία $W=CW_{min}$. Έστω ότι *m* είναι το μέγιστο στάδιο οπισθοχώρησης (maximum backoff stage), η τιμή του οποίου είναι $CW_{max}=2^m W$. Επιπλέον υιοθετούμε την σημειογραφία $W_i=2^i W$, όπου το $i \in (0,m)$ και ονομάζεται στάδιο οπισθοχώρησης (backoff stage). Έστω ότι *s(t)* είναι η στοχαστική διαδικασία που αναπαριστά το στάδιο οπισθοχώρησης *(0, ... ,m)* του σταθμού στην χρονική στιγμή *t*.

Η βασική προσέγγιση του μοντέλου είναι ότι σε κάθε προσπάθεια μετάδοσης και ανεξάρτητα από το πλήθος των αναμεταδώσεων που έχει υποστεί, κάθε πακέτο συγκρούεται με σταθερή και ανεξάρτητη πιθανότητα *p*. Το *p* θα αναφέρεται ως δεσμευμένη πιθανότητα σύγκρουσης, με την έννοια ότι αυτή είναι η πιθανότητα σύγκρουσης ενός πακέτου που μεταδίδεται στο κανάλι. Από την στιγμή που υποθέτουμε την ανεξαρτησία και το *p* υποτίθεται ότι είναι μία σταθερή τιμή, είναι δυνατόν να μοντελοποιήσουμε την δισδιάστατη διαδικασία *{b(t),s(t)}* με ένα Μαρκοβιανό μοντέλο διακριτού χρόνου, το οποία παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα.




**Εικόνα 20 - Δισδιάστατο Μαρκοβιανό μοντέλο [22]**

Σε αυτό το Μαρκοβιανό μοντέλο η κάθετη διάσταση αναπαριστά την εξέλιξη του σταδίου οπισθοχώρησης, ενώ η οριζόντια την μείωση του μετρητή του χρόνου οπισθοχώρησης. Παρακάτω παρατίθενται οι μη-μηδενικές ενός βήματος πιθανότητες μετάβασης (transition probabilities).

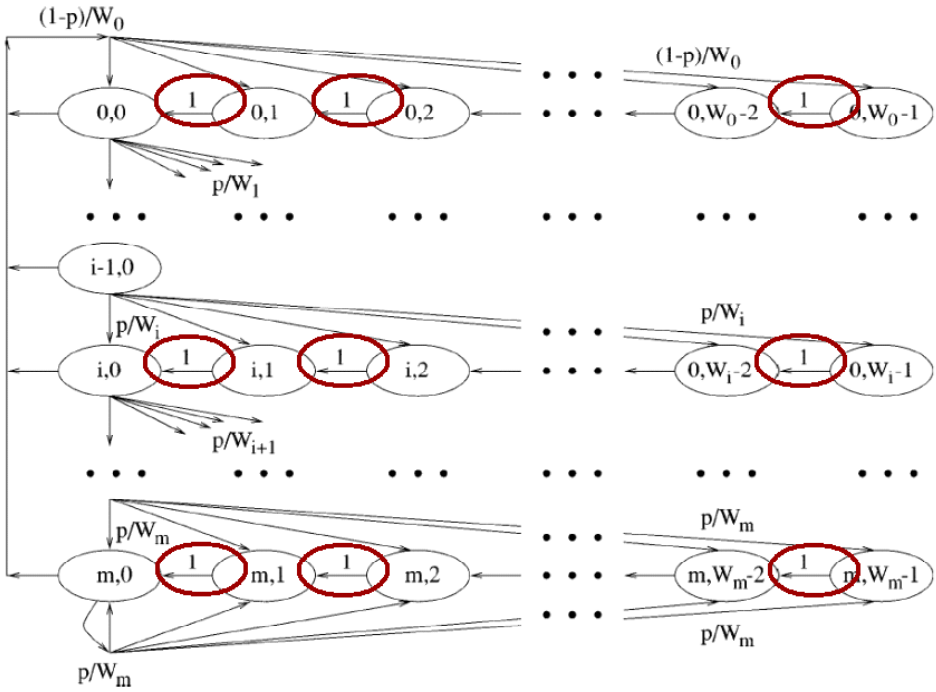
$$\begin{cases} P\{i,k \mid i,k+1\} = 1 & ,k \in [0, W_i - 2] \quad i \in [0,m] \\ P\{0,k \mid i,0\} = (1-p)/W_0 & ,k \in [0, W_0 - 1] \quad i \in [0,m] \\ P\{i,k \mid i-1,0\} = p/W_i & ,k \in [0, W_i - 1] \quad i \in [1,m] \\ P\{m,k \mid m,0\} = p/W_m & ,k \in [0, W_m - 1] \end{cases} \tag{3.1}$$

Στις παραπάνω εξισώσεις υιοθετείται σύντομη σημειογραφία για την περιγραφή των πιθανοτήτων μετάβασης. Η εκτεταμένη μορφή των οποίων είναι η ακόλουθη:

$$P\{i_1,k_1 | i_0,k_0\} = P\{s(t+1) = i_1, b(t+1) = k_1 \mid s(t) = i_0, b(t) = k_0\} \tag{3.2}$$

Αυτές οι εξισώσεις μπορούν να περιγράψουν πλήρως την εξέλιξη του σταδίου οπισθοχώρησης και του παράθυρου διεκδίκησης. Από τον υπολογισμό των καταστάσεων του συστήματος προκύπτει ένα σύνολο από σχέσεις που θα χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της πιθανότητας μετάδοσης *τ*. Στην συνέχεια αναλύονται οι εξισώσεις αυτές και οι καταστάσεις που περιγράφουν.

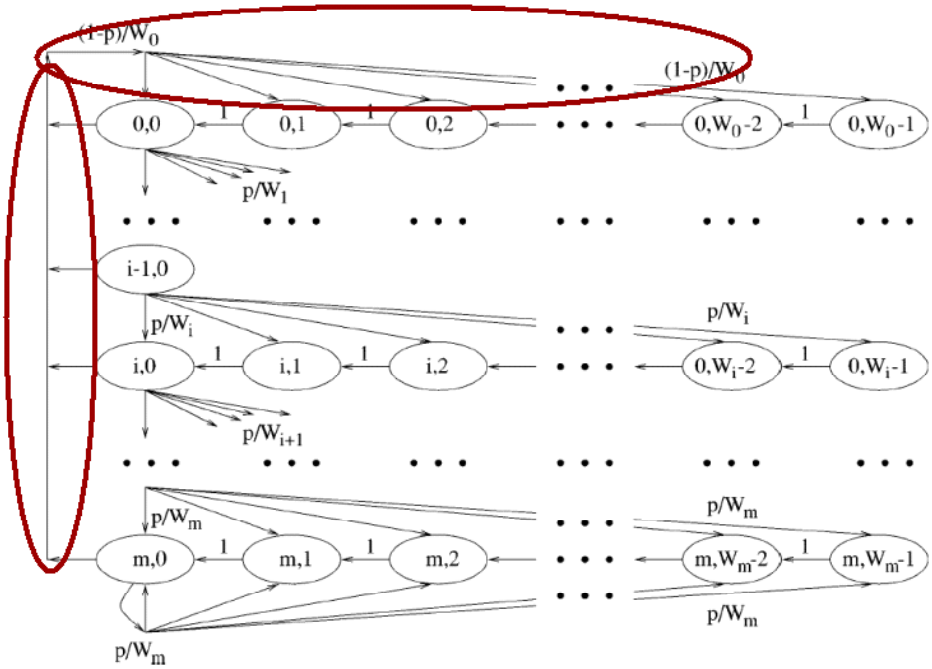
Η πρώτη εξίσωση στο (1) αναπαριστά την πιθανότητα που έχει ο μετρητής οπισθοχώρησης να μειωθεί. Οι σχετικές μεταβάσεις είναι σημειωμένες στην Εικόνα 21 Το μοντέλο παρουσιάζει ότι ο μετρητής μειώνεται πάντα στην αρχή κάθε χρονοθυριδας, δηλαδή ο μετρητής μειώνεται κατά 1 ανεξάρτητα από την κατάσταση στην οποία βρίσκεται η χρονοθυρίδα. Αυτό σημαίνει ότι δεν εξετάζεται εάν το κανάλι είναι ανενεργό ή κατειλημμένο για να μειωθεί ο μετρητής οπισθοχώρησης.




**Εικόνα 21 - Μείωση backoff μετρητή**

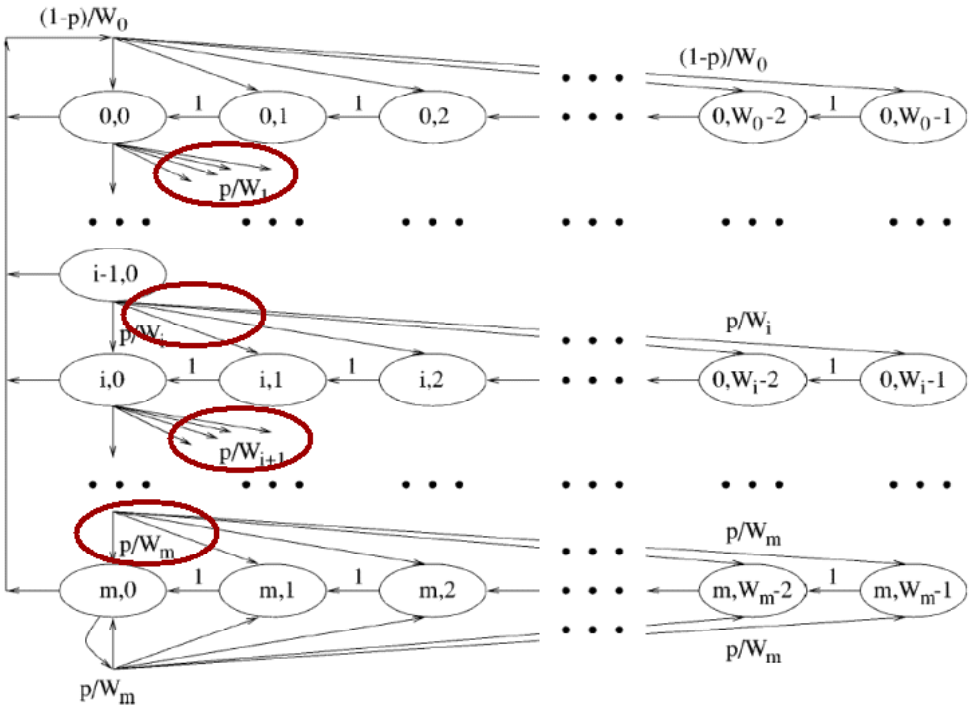
Στην κατάσταση {i,0} γίνεται η αποστολή του πακέτου, αφού η τιμή του μετρητή οπισθοχώρησης έχει μηδενιστεί. Το πακέτο είτε θα συγκρουστεί και θα αυξηθεί το στάδιο οπισθοχώρησης είτε θα μεταδοθεί με επιτυχία οπότε το επόμενο πακέτο θα ξεκινήσει από το στάδιο 0.

Η δεύτερη εξίσωση αναπαριστά το γεγονός ότι ένα νέο πακέτο μετά από μία επιτυχημένη μετάδοση ξεκινά από το στάδιο οπισθοχώρησης 0, ενώ ο backoff μετρητής αρχικά επιλέγεται ομοιόμορφα από το εύρος $(0,W_0-1)$. Οι σχετικές μεταβάσεις είναι σημειωμένες στην Εικόνα 22. Το $p$ όπως προαναφέρθηκε είναι η πιθανότητα αποτυχίας, δηλαδή η πιθανότητα να συγκρουστεί το πακέτο. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται σε ποιες μεταβάσεις αντιστοιχεί η δεύτερη εξίσωση.




**Εικόνα 22 - Επιτυχημένη μετάδοση πακέτου**

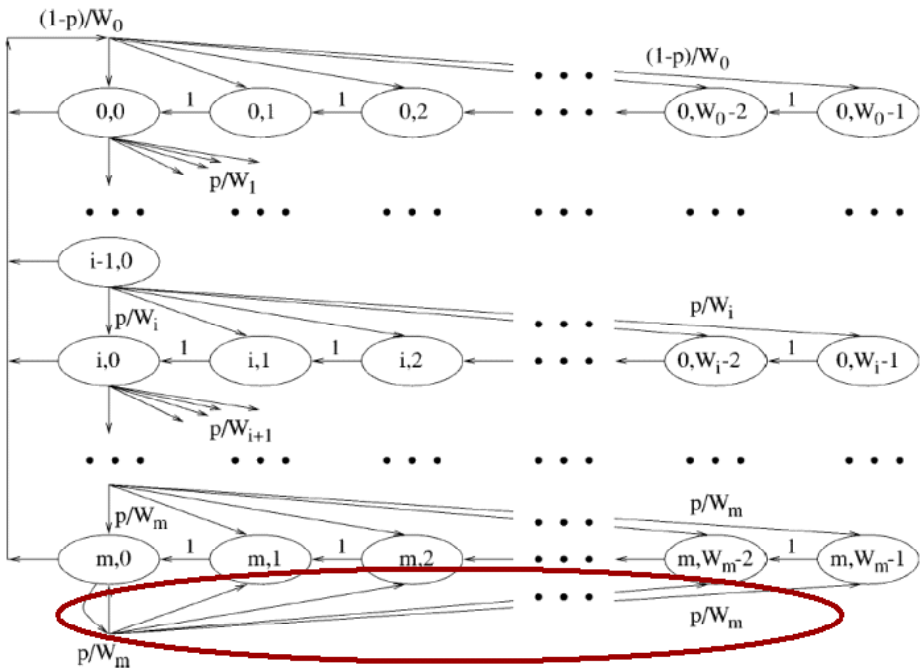
Οι δύο τελευταίες εξισώσεις μοντελοποιούν το σύστημα ύστερα από μία αποτυχημένη μετάδοση. Συγκεκριμένα η τρίτη εξίσωση του (1), ερμηνεύει το γεγονός ότι όταν ένα πακέτο μεταδοθεί με αποτυχία στο στάδιο *i-1* , τότε το backoff στάδιο αυξάνεται (Εικόνα 23). Στην κατάσταση {i-1,0} γίνεται προσπάθεια μετάδοσης του πακέτου. Επίσης αναφορικά με τον backoff μετρητή, επιλέγεται μία νέα αρχική backoff τιμή από το εύρος $(0,W_i)$.




**Εικόνα 23 - Αποτυχημένη μετάδοση πακέτου (στάδιο 0-m)**

Η τέταρτη εξίσωση στο (1) μοντελοποιεί το γεγονός της αποτυχημένης αποστολής όταν το backoff στάδιο έχει φτάσει στην μέγιστη τιμή *m*. Οι σχετικές μεταβάσεις είναι σημειωμένες στην Εικόνα 24. Στην περίπτωση που η μετάδοση από το στάδιο *m* είναι αποτυχημένη, τότε δεν υπάρχει αύξηση του σταδίου, η διαδικασία παραμένει στο ίδιο στάδιο. Αυτό που τροποποιείται είναι ο μετρητής του χρόνου οπισθοχώρησης, για τον οποίο επιλέγεται τυχαία μία νέα τιμή από το εύρος $(0,W_m-1)$.

Πρακτικά το σύστημα παραμένει στην κατάσταση αυτή μέχρι να γίνει μία επιτυχημένη μετάδοση του πακέτου, χωρίς να περιγράφεται η απόρριψη του πακέτου ύστερα από κάποιες αποτυχημένες προσπάθειες. Πρακτικά αυτό που περιγράφεται είναι ότι το πακέτο θα μεταδίδεται όσες φορές χρειαστεί για να μεταδοθεί επιτυχώς, χωρίς να υπάρχει κάποιο μέγιστο όριο στις προσπάθειες μετάδοσης.




**Εικόνα 24 - Αποτυχημένη μετάδοση πακέτου (στάδιο m)**

## *3.3.2 Προσδιορισμός πιθανότητας μετάδοσης πακέτων*

Έστω ότι $b_{i,k}$ είναι η σταθερή κατανομή της κατάσταση του Μαρκοβιανού μοντέλου. Η λύση του συστήματος δίνει τις παρακάτω σχέσεις

$$b_{i-1,0} \cdot p = b_{i,0} \rightarrow b_{i,0} = p^i b_{0,0} \quad 0 < i < m \tag{3.3}$$

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

$$b_{i,k} = \frac{W_i - k}{W_i} b_{i,0} \qquad i \in (0,m), \qquad k \in (0, W_i - 1) \tag{3.5}$$

Από τις σχέσεις (3.3) (3.4) και (3.5), όλες οι τιμές για το $b_{i,k}$ μπορούν να εκφραστούν συναρτήσει της τιμής του $b_{0,0}$ και την πιθανότητας σύγκρουσης $p$. Τέλος το $b_{0,0}$ προσδιορίζεται εφαρμόζοντας την συνθήκη κανονικοποίησης :

$$1=\sum_{i=0}^{m}\sum_{k=0}^{Wi-1}b_{i,k}=\sum_{i=0}^{m}b_{i,0}\sum_{k=0}^{Wi-1}\frac{W_i-k}{W_i}=\sum_{i=0}^{m}b_{i,0}\frac{W_i+1}{2}=$$

$$=\frac{b_{0,0}}{2}\left[W\left(\sum_{i=0}^{m-1}(2p)^i+\frac{(2p)^m}{1-p}\right)+\frac{1}{1-p}\right] \qquad (3.6)$$

η οποία τελικά καταλήγει στην :

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

Στη συνέχεια θα υπολογιστεί η πιθανότητα που έχει ένας σταθμός να μεταδώσει σε ένα τυχαία επιλεγμένο slot time. Κάθε σταθμός μπορεί να μεταδώσει μόνο όταν ο μετρητής οπισθοχώρησης είναι ίσος με το μηδέν, ανεξάρτητα από το στάδιο στο οποίο βρίσκεται. Παρατηρώντας της λειτουργία που περιγράφεται από το μοντέλο, η πιθανότητα μετάδοσης είναι ουσιαστικά το άθροισμα των καταστάσεων $b_{i,0}$ για όλα τα στάδια οπισθοχώρησης *(0..m)*. Η εξίσωση της πιθανότητας $\tau$ δίδεται από την παρακάτω σχέση :

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

Γενικά η πιθανότητα $\tau$ εξαρτάται από την δεσμευμένη πιθανότητα $p$, που θα υπολογισθεί στην συνέχεια. Για να βρεθεί η τιμή του $p$ είναι αρκετό να παρατηρήσει κανείς, ότι η πιθανότητα που έχει ένας σταθμός να συγκρουστεί είναι ίση με την πιθανότητα σε μία χρονοθυρίδα να μεταδώσει ταυτόχρονα και κάποιος από τους υπόλοιπους σταθμούς. Η βασική υπόθεση της ανεξαρτησίας που αναφέρθηκε πιο πάνω υπονοεί ότι κάθε μετάδοση βλέπει το σύστημα στην ίδια κατάσταση, δηλαδή στην σταθερή κατάσταση ισορροπίας (steady state). Σε κατάσταση ισορροπίας κάθε σταθμός από τους *n-1* που απομένουν μεταδίδει ένα πακέτο με πιθανότητα $\tau$. Αυτό σημαίνει ότι η πιθανότητα σύγκρουσης είναι :

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

Οι εξισώσεις (3.8) και (3.9) αναπαριστούν ένα μη γραμμικό σύστημα με δύο αγνώστους, το οποίο μπορεί να λυθεί με την χρήση αναλυτικών μεθόδων. Το σύστημα αυτό έχει μία μοναδική λύση. Εάν αντιστρέψουμε την (3.9), για να την εκφράσουμε ως προς την πιθανότητα μετάδοσης έχουμε :

$$\tau^*(p) = 1 - (1-\mathrm{p})^{1/(\mathrm{n}-1)} \tag{3.10}$$

Η εξίσωση αυτή είναι μία συνεχής και αύξουσα συνάρτηση στο εύρος $p \in (0,1)$ , η οποία ξεκινά από $\tau^*(0)=0$ και αυξάνει μέχρι $\tau^*(1)=1$ . Αντίστοιχα η (3.8) είναι φθίνουσα και συνεχής συνάρτηση στο εύρος $\tau \in (0,1)$, ο οποία ξεκινά από $p(0)=1$ και μειώνεται μέχρι $p(1)=0$. Όμως η (3.8) είναι αόριστη για την τιμή ½. Για να αποδείξουμε την συνέχεια της συνάρτησης στην τιμή ½ παρατηρούμε ότι η $\tau(p)$ μπορεί να γραφτεί ως εξής :

$$\tau(p) = \frac{2}{1 + W + p \cdot W \cdot \sum_{i=0}^{m-1} (2 \cdot p)^i} \tag{3.11}$$

Επομένως για ½ η τιμή της $\tau(p)$ είναι :

$$\tau(p) = \frac{2}{1 + W + m \cdot W / 2}$$

Η $\tau(p)$ είναι μία μονότονη φθίνουσα συνάρτηση που ξεκινά από $\tau(0) = 2/(W+1)$ και μειώνεται μέχρι το $\tau(1)=2/(1+2^m W)$ . Η μοναδική λύση αποδεικνύεται εάν παρατηρήσουμε ότι $\tau(0) > \tau^*(0)$ και $\tau(1) < \tau^*(1)$.

## *3.4 Υπολογισμός Ρυθμοαπόδοσης*

Η ρυθμοαπόδοση $S$ του συστήματος ορίζεται ως το κλάσμα του χρόνου που το κανάλι χρησιμοποιείται για την επιτυχή μετάδοση ωφέλιμων δεδομένων (payload bits). Για να υπολογίσουμε το $S$, χρειάζεται να αναλύσουμε το τι συμβαίνει σε ένα τυχαίο επιλεγμένα slot time. Έστω ότι $P_{tr}$ είναι η πιθανότητα να υπάρχει τουλάχιστον

μία μετάδοση στην συγκεκριμένη επιλεγμένη χρονοθυρίδα. Από την στιγμή που $n$ σταθμοί ανταγωνίζονται για την πρόσβαση στο κανάλι, και κάθε ένας μεταδίδει με πιθανότητα $\tau$ τότε η πιθανότητα να υπάρχει τουλάχιστον μία μετάδοση δίδεται από τον τύπο :

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

Η πιθανότητα $P_s$ που έχει μία μετάδοση να είναι επιτυχημένη, δίδεται από την πιθανότητα να μεταδώσει ακριβώς ένας σταθμός στο κανάλι, σε σχέση με το γεγονός ότι τουλάχιστον ένα σταθμός μεταδίδει.

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

Στο σημείο αυτό μπορούμε να υπολογίσουμε την ρυθμοαπόδοση $S$ ως την αναλογία :

$$S = \frac{E\,[\text{Ωφέλιμο φορτίο δεδομένων που μεταδίδονται σε μία χρονοθυρίδα}]}{E\,[\text{μήκος μιας χρονοθυρίδας}]} \tag{3.14}$$

Έστω ότι $E[P]$ είναι το μέσο μέγεθος του ωφέλιμου φορτίου των δεδομένων κάθε πακέτου. Ο μέσος όρος του ωφέλιμου φορτίου δεδομένων που μεταδίδονται με επιτυχία σε μία χρονοθυρίδα είναι ίσος με $P_{tr}P_sE[P]$ , εφόσον μία επιτυχημένη μετάδοση πραγματοποιείται με πιθανότητα $P_{tr}P_s$ .

Το μέσο μήκος μίας χρονοθυρίδας μπορεί να υπολογιστεί εάν προσδιοριστεί η πιθανότητα που μια χρονοθυρίδα είναι άδεια, η πιθανότητα να περιέχει μια πετυχημένη μετάδοση και η πιθανότητα να περιέχει μία σύγκρουση. Οι τρεις αυτοί όροι υπολογίζονται ως εξής :

- Πιθανότητα να είναι άδεια : $(1-P_{tr})$
- Πιθανότητα να περιέχει μία πετυχημένη μετάδοση : $P_{tr}P_s$
- Πιθανότητα να περιέχει μία σύγκρουση : $P_{tr}(1-P_s)$

Στη συνέχεια απαιτείται ο προσδιορισμός των αντίστοιχων χρόνων που συμβολίζονται ως εξής : $\sigma$ (διάρκεια της άδειας χρονοθυρίδας), $T_s$ (μέσος χρόνος που το κανάλι είναι κατειλημμένο από μια πετυχημένη μετάδοση ), $T_c$ (μέσος χρόνος που το κανάλι ανιχνεύεται κατειλημμένο από τους σταθμούς κατά την διάρκεια μιας σύγκρουσης). Επομένως η (3.14) γίνεται :

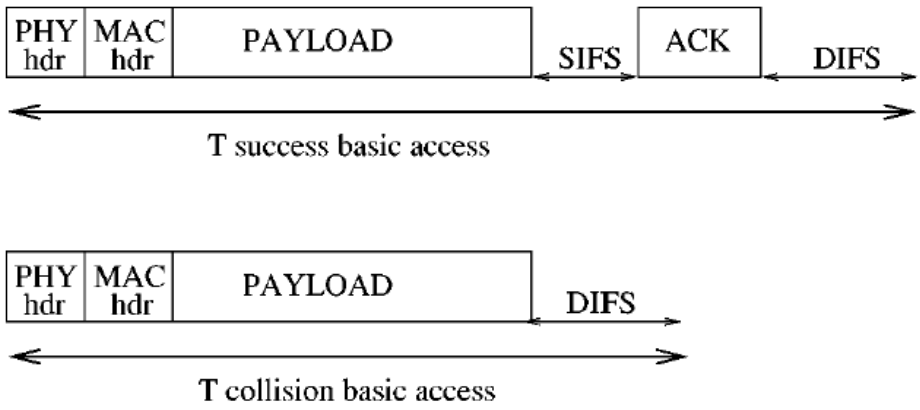
$$S = \frac{P_s P_{tr} E[P]}{(1-P_{tr})\sigma + P_{tr} P_s T_s + P_{tr}(1-P_s)T_c} \tag{3.15}$$

Οι τιμές των $T_{tr}$, $T_s$, $E[P]$ και $\sigma$ πρέπει να εκφραστούν στην ίδια μονάδα του χρόνου.

Η έκφραση της ρυθμοαπόδοσης έχει προσδιοριστεί χωρίς να αναφέρεται ο μηχανισμός πρόσβασης στο μέσο (Βασική ή RTS/CTS). Στην συνέχεια υπολογίζεται η ρυθμοαπόδοση για συγκεκριμένο μηχανισμό πρόσβασης. Αυτό που αλλάζει στους δύο μηχανισμούς είναι οι χρόνοι $T_s$ και $T_c$.

Για να προσδιοριστούν οι δύο χρόνοι πρέπει να συμπεριληφθεί στον υπολογισμό το μέγεθος της κεφαλίδας $H$ ενός πακέτου και η καθυστέρηση διάδοσης στο μέσο $\delta$. Η κεφαλίδα αποτελείται από την κεφαλίδα του Φυσικού επιπέδου και υποεπιπέδου MAC. Επομένως για την κεφαλίδα έχουμε $H= PHY_{hdr} + MAC_{hdr}$ .

Αρχικά θα υπολογίσουμε του χρόνους $T_s$ και $T_c$ για το σύστημα που χρησιμοποιεί την Βασική μέθοδο πρόσβασης της DCF. Οι χρόνοι αυτοί προκύπτουν από την λειτουργία της μεθόδου και σχηματικά παρουσιάζονται στο ακόλουθο σχήμα.



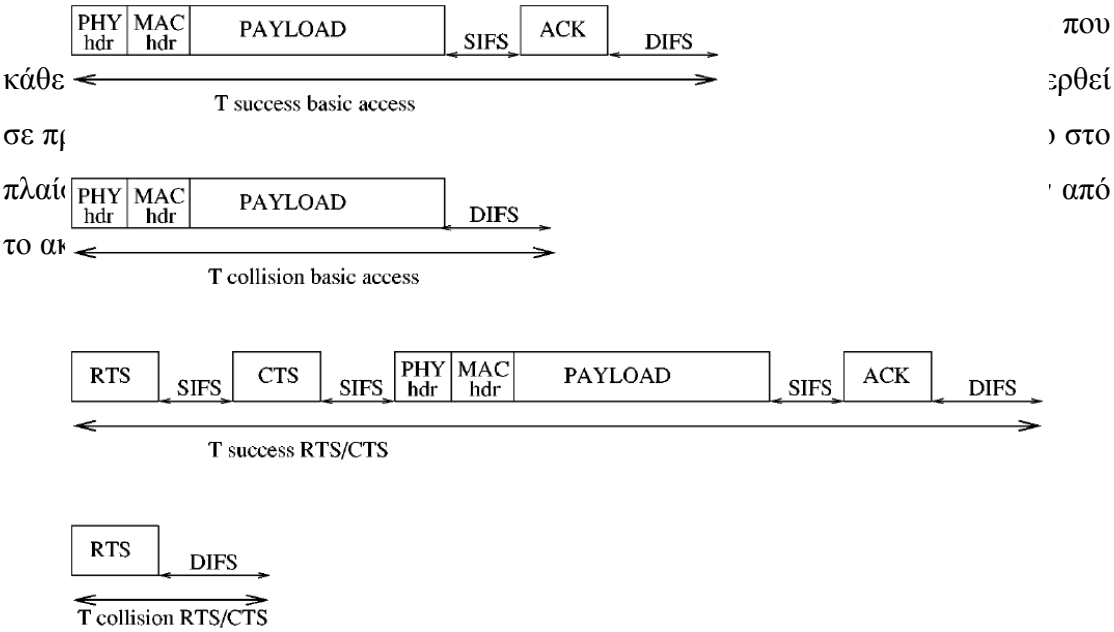

**Εικόνα 25 - Ts και Tc για την Βασική μέθοδο πρόσβασης**

Όπως φαίνεται και στο Εικόνα 25 για την βασική μέθοδο έχουμε :

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

Το *E[P*]* είναι το μέγεθος του μεγαλύτερου πακέτου που μπορεί να εμπλακεί σε μία σύγκρουση. Στην περίπτωση που τα πακέτα έχουν το ίδιο μέγεθος, τότε *E[P*]= E[P]= P*. Στην γενική περίπτωση το μέγεθος του ωφέλιμου φορτίου δεδομένων κάθε πακέτου που συγκρούεται είναι μία τυχαία ανεξάρτητη μεταβλητή $P_i$.

Το $T_c$ είναι η χρονική περίοδος κατά την οποία το κανάλι ανιχνεύεται ως κατειλημμένο από τους σταθμούς που δεν συμμετέχουν στην σύγκρουση, αγνοώντας το γεγονός ότι οι δύο ή περισσότεροι σταθμοί που συμμετέχουν στην σύγκρουση, πριν να ανιχνεύσουν το κανάλι ξανά πρέπει να περιμένουν να περάσει το χρονικό διάστημα ACK Timeout. Για τους σταθμούς αυτούς, το $T_c$ είναι μεγαλύτερο από αυτό που έχει υπολογιστεί, γεγονός που ισχύει και για τις δύο μεθόδους πρόσβασης της DCF. Απλά εδώ γίνεται μία προσέγγιση γι' αυτό και δεν λαμβάνεται υπόψη ότι ο χρόνος $T_c$ αυτών των σταθμών είναι διαφορετικός.




**Εικόνα 26 - Ts και Tc της μεθόδου RTS/CTS**

Από το σχήμα προκύπτει ότι :

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

Στον χρόνο σύγκρουσης $T_c^{rts}$ συμπεριλαμβάνεται μόνο το μέγεθος του πλαισίου RTS. Επομένως στην περίπτωση της μεθόδου RTS/CTS η ρυθμοαπόδοση εξαρτάται μόνο από το μέσο μέγεθος των πακέτων ν μέσο όρο της κατανομής του μεγέθους του πακέτου. Ενώ στην Βασική μέθοδο η ρυθμοαπόδοση εξαρτάται και από το μέγεθος του μεγαλύτερου πακέτου που μπορεί να εμπλακεί σε μία σύγκρουση.

## *3.5 Πιστοποίηση μαθηματικού μοντέλου*

Η πιστοποίηση του αναλυτικού μοντέλου έγινε συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του με τα αποτελέσματα ενός προσομοιωτή. Το μοντέλο προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκε είναι γραμμένο σε C++ και ακολουθεί την λειτουργία του πρωτοκόλλου 802.11 για κάθε ανεξάρτητο σταθμό που μεταδίδει. Οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται για την ανάκτηση των αριθμητικών αποτελεσμάτων, τόσο για το αναλυτικό μοντέλο όσο και για το μοντέλο προσομοίωσης παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.[22]

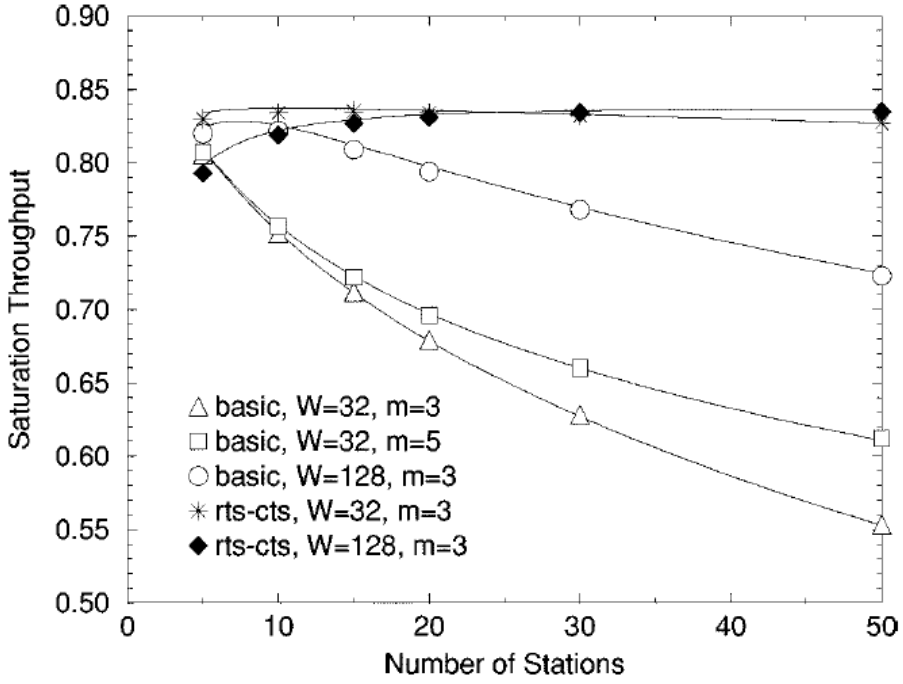
**Πίνακας 5 - Παράμετροι πειραμάτων (αρχικό μοντέλο)**

| Χαρακτηριστικό | Τιμή |
|---|---|
| Packet payload | 8184 bits |
| MAC header | 272 bits |
| PHY header | 128 bits |
| ACK | 112 bits + PHY header |
| RTS | 160 bits + PHY header |
| CTS | 112 bits + PHY header |
| Channel Bit rate | 1 Mbit/s |
| Propagation Delay | 1 μs |
| Slot time | 50 μs |

| | |
|---|---|
| SIFS | 28 μs |
| DIFS | 128 μs |
| ACK_Timeout | 300 μs |
| CTS_Timeout | 300 μs |

Οι τιμές του συστήματος είναι αυτές που καθορίζονται από το πρότυπο 802.11 για το frequency hopping spread spectrum (FHSS) Φυσικό επίπεδο. Το bit rate του καναλιού είναι ίσο με 1 Mbit/s. Το μέγεθος του πλαισίου είναι σύμφωνα με αυτό που επίσης καθορίζει το πρότυπο για το MAC καθώς και η κεφαλίδα του Φυσικού επιπέδου. Οι τιμές του ACK_Timeout και CTS_Timeout που παρουσιάζονται στον παραπάνω πίνακα χρησιμοποιούνται μονο στο μοντέλο προσομοίωσης και δεν καθορίζονται στο πρότυπο. Οι αριθμητικές τιμές που επιλέχθηκαν είναι αρκετά μεγάλες ώστε να συμπεριλαμβάνουν ένα SIFS, την μετάδοση του ACK και την καθυστέρηση επιστροφής (round trip delay).[38][41]

Στα πειράματα της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκε σταθερό μέγεθος πακέτου 8184 bits, που είναι το ένα τέταρτο του μέγιστου MPDU που καθορίζεται για το FHSS PHY, ενώ είναι το μέγιστο μέγεθος για το DSSS PHY. Στο ακόλουθο διάγραμμα παρουσιάζεται η απόδοση κορεσμού του πρωτοκόλλου σε σχέση με το πλήθος των σταθμών.




**Εικόνα 27 - Ρυθμοαπόδοση Κορεσμού**

Στο διάγραμμα (Εικόνα 27) τα αποτελέσματα του αναλυτικού μοντέλου αναπαριστώνται με την γραμμή, ενώ τα αποτελέσματα του μοντέλου προσομοίωσης είναι αυτά που αναπαριστώνται με τα σημεία. Από το διάγραμμα παρατηρούμε υπάρχει μεγάλη ακρίβεια μεταξύ των αποτελεσμάτων προσομοίωσης και των αποτελεσμάτων του αναλυτικού μοντέλου, τόσο για την Βασική μέθοδο πρόσβασης όσο και για την μέθοδο RTS/CTS. Αμελητέες διαφορές υπάρχουν όταν είναι μικρός ο αριθμός των σταθμών (μικρότερος από 5).

Από το διάγραμμα φαίνεται ότι η Βασική μέθοδος πρόσβασης έχει μεγάλη εξάρτηση από το πλήθος των σταθμών του δικτύου. Συγκεκριμένα παρατηρείται ότι στις περισσότερες περιπτώσεις όσο αυξάνεται το μέγεθος του δικτύου τόσο μειώνεται η απόδοσή του. Η μόνη εν μέρει εξαίρεση αποτελεί η περίπτωση όπου το $W=128$. Όταν το παράθυρο διεκδίκησης έχει τόσο μεγάλη αρχική τιμή τότε η απόδοση είναι συγκρίσιμη σε δίκτυα που έχουν 5 ή 10 σταθμούς, αν και μειώνεται καθώς αυξάνεται το μέγεθος του δικτύου. Το ίδιο διάγραμμα παρουσιάζει ότι αυτή η μείωση της ρυθμοαπόδοσης δεν συμβαίνει καθώς αυξάνεται το πλήθος $n$, όταν χρησιμοποιείται η μέθοδος RTS/CTS. Μάλιστα η απόδοση είναι πρακτικά σταθερή για $W=32$, και βελτιώνεται με την αύξηση των σταθμών όταν $W=128$.

## *3.6 Βελτίωση αρχικού μοντέλου*

Το αναλυτικό μοντέλο G. Bianchi που παρουσιάστηκε προσεγγίζει με αρκετή πιστότητα την λειτουργία του προτύπου. Όμως έχει μία παράληψη αναφορικά με το μέγιστο αριθμό των επαναμεταδόσεων που μπορεί να υποστεί ένα πακέτο. Όπως περιγράφτηκε στο αναλυτικό μοντέλο, ένα πακέτο θα μεταδίδεται έως ότου να μεταδοθεί με επιτυχία. Αυτό σημαίνει ότι δεν καθορίζεται μέγιστος αριθμός επαναμεταδόσεων. Η τιμή του παραθύρου διεκδίκησης αυξάνεται μέχρι κάποια μέγιστη τιμή. Όταν το πλαίσιο φτάσει στο τελευταίο στάδιο το παράθυρο διεκδίκησης παραμένει σταθερό για όσες αποτυχημένες επαναμεταδόσεις υποστεί το πλαίσιο. Επομένως το βασικό πρόβλημα που παρουσιάζει το αναλυτικό μοντέλο του G. Bianchi είναι ότι δεν καθορίζει ένα μέγιστο πλήθος προσπαθειών μετάδοσης για κάθε πακέτο. Το γεγονός αυτό παρατηρήθηκε το 2001 από τους Haitao Wu, Yonh Peng, Keping Long και Shiduan Cheng, οι οποίοι πρότειναν ένα βελτιωμένο Μαρκοβιανό

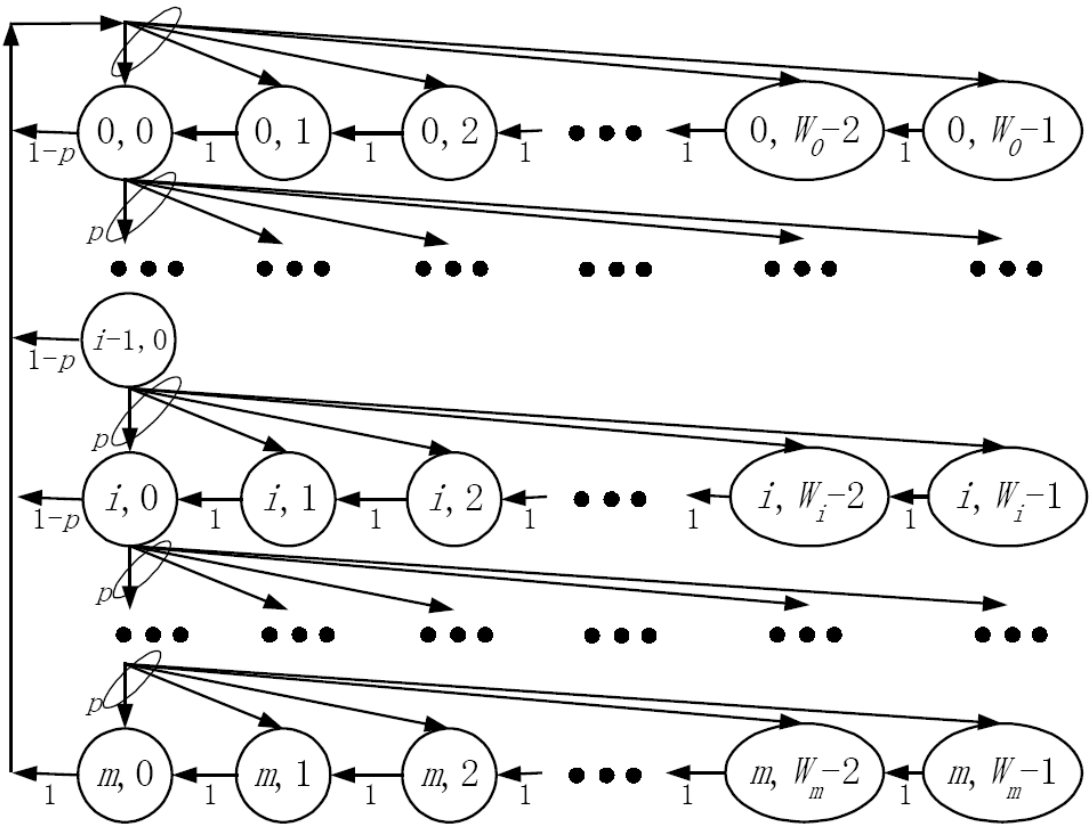
μοντέλο που συμπεριλαμβάνει έναν μέγιστο αριθμό επαναμεταδόσεων, μετά από τον οποίο το πακέτο απορρίπτεται. Το νέο αυτό μοντέλο όπως θα δούμε στην συνέχεια παρέχει μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματά του. Στο αρχικό μοντέλο έχει υπερεκτιμηθεί η ρυθμοαπόδοση κορεσμού του πρωτοκόλλου. Το βελτιωμένο αυτό μοντέλο θα παρουσιαστεί εν συντομία στην συνέχεια.

Για να διορθωθεί το πρόβλημα του αρχικού μοντέλου πρακτικά τροποποιήθηκε η λειτουργία του τελευταίου σταδίου στο Μαρκοβιανό μοντέλο. Το εύρος του παράθυρου διεκδίκησης ύστερα από ένα στάδιο οπισθοχώρησης παραμένει σταθερό, μέχρι το στάδιο να φτάσει την μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή, που είναι και το μέγιστο πλήθος των επαναμεταδόσεων, Όταν ένα πακέτο φτάσει στο τελευταίο στάδιο τότε μπορεί να μεταδοθεί για μία τελευταία φορά. Εάν η μετάδοση είναι αποτυχημένη τότε το πακέτο θα απορριφθεί, δηλαδή θα αφαιρεθεί από την κεφαλή της ουράς προς μετάδοση και θα ξεκινήσει η διαδικασία οπισθοχώρησης για την μετάδοση ενός νέου πακέτου. Με την αντιμετώπιση αυτή μειώνεται πρακτικά ο χρόνος μετάδοση πακέτων, καθώς το πλήθος των επαναμεταδόσεων είναι καθορισμένο και δεν μπορεί να υπερβεί τα όρια που έχει τεθεί εξ αρχής.

Το βελτιωμένο αυτό μοντέλο Μαρκοβιανών ανελίξεων περιγράφεται στην συνέχεια. Το πλήθος των παραμέτρων και η βασική λειτουργία παραμένει ίδια με το αρχικό μοντέλο. Το δίκτυο βρίσκεται σε συνθήκες κορεσμού, ενώ υπάρχει σταθερό πλήθος σταθμών. Στην συνέχεια γίνεται αναφορά στο βελτιωμένο μοντέλο και υπολογίζεται η σταθερή πιθανότητα μετάδοσης $\tau$ , καθώς και η απόδοση για τις δύο μεθόδους πρόσβασης, Βασική και RTS/CTS.

### *3.6.1 Μοντέλο Μαρκοβιανών ανελίξεων*

Θεωρούμε ότι υπάρχει σταθερός αριθμός $n$ σταθμών που ανταγωνίζονται. Έστω ότι b(t) είναι η στοχαστική διαδικασία που αναπαριστά το μέγεθος του backoff για το παραθύρο διεκδίκησης για έναν συγκεκριμένο σταθμό στην χρονοθυρίδα $t$. Η βασική προσέγγιση του μοντέλου είναι ότι η πιθανότητα $p$ που έχει ένα πακέτο να συγκρουστεί είναι ανεξάρτητη από την κατάσταση $s(t)$ του σταθμού. Για τον λόγο αυτό η δισδιάστατη διαδικασία $\{s(t),b(t)\}$ αποτελεί ένα διακριτού χρόνου Μαρκοβιανό μοντέλο.




**Εικόνα 28 - Μοντέλο Μαρκοβιανών ανελίξεων (Wu) [24][26]**

Η παρακάτω ανάλυση χρησιμοποιεί τις παραμέτρους για το Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) PHY του 802.11. Οι παράμετροι αυτοί χρησιμοποιούνται για την ανάλυση του μοντέλου, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάποια άλλη υλοποίηση του φυσικού επιπέδου που ορίζεται από το πρότυπο 802.11. Στο DSSS το $CW_{min}$ και το $CW_{max}$ είναι ίσο με 31 και 1023 αντίστοιχα. Επομένως για το παραπάνω μοντέλο έχουμε :

$$\begin{cases} W_i = 2^i W & , i \le m' \\ W_i = 2^{m'} W & , i > m' \end{cases} \tag{3.18}$$

όπου $W=(CW_{min}+1)$ και $2^{m'}W=(CW_{max}+1)$, άρα για το DSSS το m' = 5.

Αντίθετα με το αρχικό μοντέλο εδώ το $m$ αναπαριστά το μέγιστο στάδιο οπισθοχώρησης. Όπως καθορίζεται και στο πρότυπο η τιμή αυτή μπορεί να είναι

μεγαλύτερη του *m'*, ενώ το παράθυρο διεκδίκησης θα παραμείνει σταθερό μετά από αυτό όπως προκύπτει και από την εξίσωση (3.18).[25][26]

Στην πραγματικότητα το *m* αναφέρεται στο μέγιστο πλήθος των επαναμεταδόσεων που μπορεί να υποστεί ένα πακέτο. Όταν ξεπεραστεί το πλήθος αυτό τότε το πακέτο απορρίπτεται και η διαδικασία ξεκινά από το στάδιο 0 με ένα νέο πακέτο. Το μέγιστο πλήθος των επαναμεταδόσεων είναι διαφορετικό για τα πλαίσια δεδομένων και τα πλαίσια RTS, για τις παραπάνω παραμέτρους είναι 5 για τον SSRC και 7 για τον μετρητή SLRC αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές είναι σύμφωνα με το πρότυπο και ο λόγος που συμβαίνει αυτό περιγράφηκε αναλυτικά στην ενότητα (Ενότητα 2.4.8 Αντιμετώπιση αποτυχημένης προσπάθειας μετάδοσης). Στο αρχικό μοντέλο αυτό δεν λαμβάνεται υπ' όψιν. Η βασική διαφορά μεταξύ των δύο Μαρκοβιανών μοντέλων είναι το τελευταίο στάδιο, όπου παρατηρούμε ότι η διαδικασία τροποποιείται. Το βελτιωμένο μοντέλο ακολουθεί πιο πιστά το πρότυπο. Σε αυτό το μοντέλο οι μη μηδενικές ενός βήματος πιθανότητες μετάβασης είναι οι εξής :

$$\begin{cases} P\{i,k \mid i,k+1\} = 1 & ,k \in [0, W_i - 2] \quad i \in [0,m] \\ P\{0,k \mid i,0\} = (1-p)/W_0 & ,k \in [0, W_0 - 1] \quad i \in [0,m-1] \\ P\{i,k \mid i-1,0\} = p/W_i & ,k \in [0, W_i - 1] \quad i \in [1,m] \\ P\{0,k \mid m,0\} = 1/W_0 & ,k \in [0, W_m - 1] \end{cases} \tag{3.19}$$

Εν συντομία οι πιθανότητες μετάβασης αντιστοιχούν : 1) μείωση του μετρητή οπισθοχώρησης, 2) μετά από επιτυχή μετάδοση, ο μετρητής οπισθοχώρησης ξεκινά από το στάδιο 0, 3) μετά από αποτυχημένη μετάδοση το backoff στάδιο αυξάνεται, 4) στο μέγιστο στάδιο οπισθοχώρησης, το παράθυρο διεκδίκησης επανέλθει στις αρχικές του συνθήκες εάν η μετάδοση είναι αποτυχημένη ή θα ξεκινήσει το στάδιο οπισθοχώρησης για ένα νέο πακέτο εάν η μετάδοση είναι επιτυχημένη.

Έστω ότι $b_{i,k}$ είναι η κατανομή ισορροπίας για την Μαρκοβιανή ανέλιξη. Παρατηρείται ότι :

$$b_{i-1,0} * p = b_{i,0} \quad ,0 \le i \le m \tag{3.20}$$

από το οποίο προκύπτει :

$$b_{i-1,0} = p^i b_{0,0} \quad ,0 \le i \le m \tag{3.21}$$

Από την στιγμή που η αλυσίδα είναι κανονική, για κάθε $k \in (0, W_i\text{-}1)$ έχουμε :

$$b_{i,k} = \frac{W_i - k}{W_i} \begin{cases} (1-p)\sum_{j=0}^{m-1} b_{j,0} + b_{m,0} & i = 0 \\ pb_{i-1,0} & 0 < i \le m \end{cases} \tag{3.22}$$

Η οποία απλοποιείται ως εξής :

$$b_{i,k} = \frac{W_i - k}{W_i} b_{i,0} \quad i \in (0,m), \qquad k \in (0, W_i - 1) \tag{3.23}$$

Εφαρμόζοντας την συνθήκη κανονικοποίησης για την κατανομή ισορροπίας έχουμε :

$$1 = \sum_{i=0}^{m} \sum_{k=0}^{W_i - 1} b_{i,k} = \sum_{i=0}^{m} b_{i,0} \sum_{k=0}^{W_i - 1} \frac{W_i - k}{W_i} = \sum_{i=0}^{m} b_{i,0} \frac{W_i + 1}{2} \tag{3.24}$$

Με την χρήση της εξίσωσης (3.18) καταλήγουμε να υπολογίσουμε το $b_{0,0}$ ως εξής :

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

Στο σημείο αυτό μπορεί να υπολογιστεί η πιθανότητα $\tau$, που έχει ένας σταθμός να μεταδώσει σε μία τυχαία επιλεγμένη χρονοθυρίδα.

$$\tau = \sum_{i=0}^{m} b_{i,0} = \frac{1-p^{m+1}}{1-p} b_{0,0} \tag{3.26}$$

όπου το $b_{0,0}$ μπορεί να ληφθεί από την (3.25).

Σε κατάσταση ισορροπίας ένα σταθμός μεταδίδει ένα πακέτο με πιθανότητα $\tau$, επομένως η πιθανότητα σύγκρουσης προκύπτει από την παρακάτω εξίσωση η οποία έχει αναλυθεί στην περιγραφή του αρχικού μοντέλου:

$$p = 1-(1-\tau)^{n-1} \tag{3.27}$$

Οι εξισώσεις (3.25)(3.26) και (3.27) αναπαριστούν ένα μη γραμμικό σύστημα με δύο αγνώστους το $\tau$ και το $p$ , το οποίο μπορεί να λυθεί με την χρήση αριθμητικών μεθόδων.

Από την στιγμή που οι μεταβάσεις των Μαρκοβιανών ανελίξεων είναι διαφορετικές από το αρχικό μοντέλο, τα αποτελέσματα που προκύπτουν για το $b_{0,0}$ είναι διαφορετικά, όποτε είναι διαφορετικές και οι τιμές των πιθανοτήτων μετάδοσης και σύγκρουσης.

### *3.6.2 Υπολογισμός ρυθμοαπόδοσης κορεσμού*

Για να υπολογιστεί η απόδοση κορεσμού S χρησιμοποιούνται οι σχέσεις που αναφέρθηκαν στο αρχικό μοντέλο με μία μικρή διαφοροποίηση για τους χρόνους σύγκρουσης. Ο υπολογισμός των $P_{tr}$, $P_s$, $E[P]$ παραμένει ίδιος. Η διαφορά είναι στους χρόνους σύγκρουσης για τις δύο μεθόδους πρόσβασης οι οποίοι υπολογίζονται ως εξής :

$$\begin{cases} T_s^{bas} = DIFS + H + E[P] + SIFS + \delta + ACK + \delta \\ T_c^{bas} = DIFS + H + E[P^*] + SIFS + \delta + ACK + \delta \end{cases} \tag{3.28}$$

Όπου E[P*] είναι το μέγιστο μέγεθος που μπορεί να συμμετάσχει σε μία σύγκρουση. Στον υπολογισμό των χρόνων αυτών λαμβάνεται υπ' όψιν και η επίδραση που έχει το ACK Timeout.

Για να υπολογίσουμε του χρόνους $T_s^{rts}$ και $T_c^{rts}$ της μεθόδου RTS/CTS υποθέτουμε ότι όλοι οι σταθμοί χρησιμοποιούν αυτή την μέθοδο για την εκπομπή των πλαισίων δεδομένων, για λόγους απλότητας.

$$\begin{cases} T_s^{rts} = DIFS + RTS + SIFS + \delta + \mathrm{CTS} + \mathrm{SIFS} \\ + \delta + H + E[P] + SIFS + \delta + \mathrm{ACK} + \delta \\ T_c^{\mathrm{rts}} = DIFS + RTS + SIFS + \delta + \mathrm{CTS} + \delta \end{cases} \tag{3.29}$$

Η διαφορά στον χρόνο $T_c^{rts}$ μεταξύ των δύο αναλυτικών μοντέλων είναι ότι στο μοντέλο του Wu συμπεριλαμβάνεται και η διάρκεια ενός EIFS, που απαιτείται καθώς οι σταθμοί έχουν πρέπει να αφήσουν κατάλληλο χρονικό διάστημα, τουλάχιστον όσο ένα ACK, και μετά να αρχίσουν να υπολογίζουν το χρόνο του DIFS. (Οι χρόνοι DIFS EIFS καθώς και η χρησιμότητάς τους περιγράφονται αναλυτικά στην Ενότητα 2.2). Ο λόγος που είναι τροποποιημένοι οι χρόνοι $T_c^{bas}$ και $T_c^{rts}$ είναι ότι προσεγγίζεται πιο ορθά η λειτουργία που περιγράφεται από το πρότυπο 802.11.

### *3.6.3 Πιστοποίηση μοντέλου*

Τα παρακάτω αποτελέσματα αποτελούν μια σύγκριση του αρχικού μοντέλου και βελτιωμένου μοντέλου. Υπολογίζεται η ρυθμοαπόδοση κορεσμού σε συνθήκες κορεσμού και πως αυτή τροποποιείται όταν αυξάνεται το πλήθος των σταθμών του δικτύου και κατά συνέπεια αυξάνεται και η πιθανότητα σύγκρουσης. Για την σύγκριση των αποτελεσμάτων των αναλυτικών μοντέλων με ένα μοντέλο προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκε ο προσομοιωτής NS-2. Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται περιγράφονται στο παρακάτω πίνακα, και αφορούν την DSSS. [24]

**Πίνακας 6 - Παράμετροι πειραμάτων (βελτιωμένο μοντέλο)**

| Χαρακτηριστικό | Τιμή |
|---|---|
| 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 | 1 Mbit/s |
| Propagation Delay | 1 μs |
| Slot time | 20 μs |
| SIFS | 10 μs |
| DIFS | 50 μs |

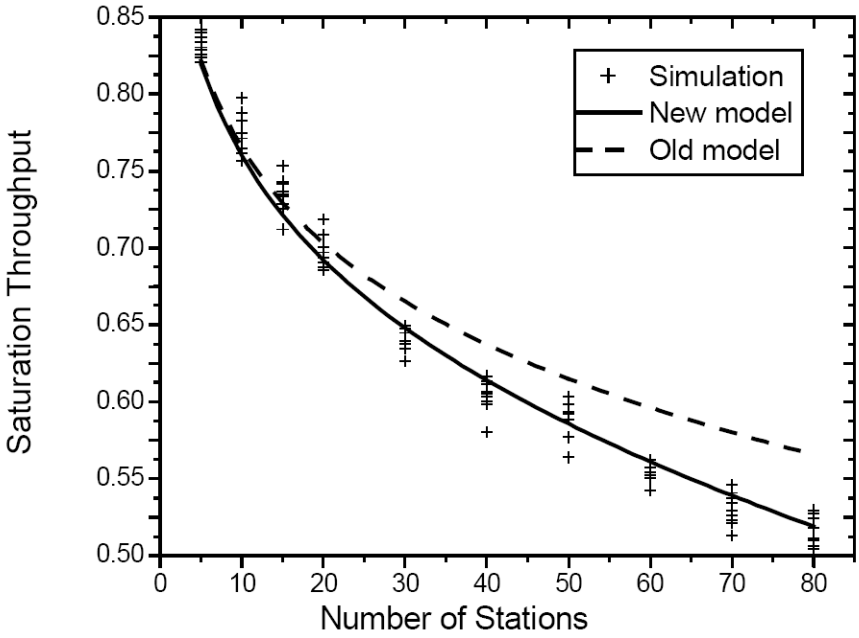
Η διαφορά με τις παραμέτρους του πρηγούμενου μοντέλου είναι ότι χρησιμοποιείται διαφορετική τεχνική μετάδοσης στο Φυσικό επίπεδο. Στο μοντέλο του Bianchi χρησιμοποιείται η FHSS, ενώ στο μοντέλου του Wu χρησιμοποιείται η DSSS. Οι διαφορές είναι στο μέγεθος των κεφαλίδων PHY και MAC, της χρονοθυρίδας, του SIFS και του DIFS.

Επίσης το ωφέλιμο φορτίο δεδομένων του πακέτου είναι στο πρώτο μοντέλο 8184 bits, ενώ στο μοντέλο του Wu 8224 bits. Υποθέτουμε ότι τα δεδομένα της εφαρμογής είναι 1000bytes, το IP header και το UDP header είναι 20 και 8 bytes, οπότε το packet payload στο υποεπίπεδο MAC είναι 1028 bytes.

Οι εξισώσεις του Μαρκοβιανού μοντέλου είναι ανεξάρτητες από τις παραμέτρους, γι' αυτό και δεν έχει σημασία ο καθορισμός διαφορετικών παραμέτρων για το Φυσικό επίπεδο που θα επιλεγεί.

### *3.6.4 Ρυθμοαπόδοση κορεσμού για την Βασική μέθοδο*

Πρώτα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της βασικής μεθόδου πρόσβασης, στην ακόλουθη εικόνα.



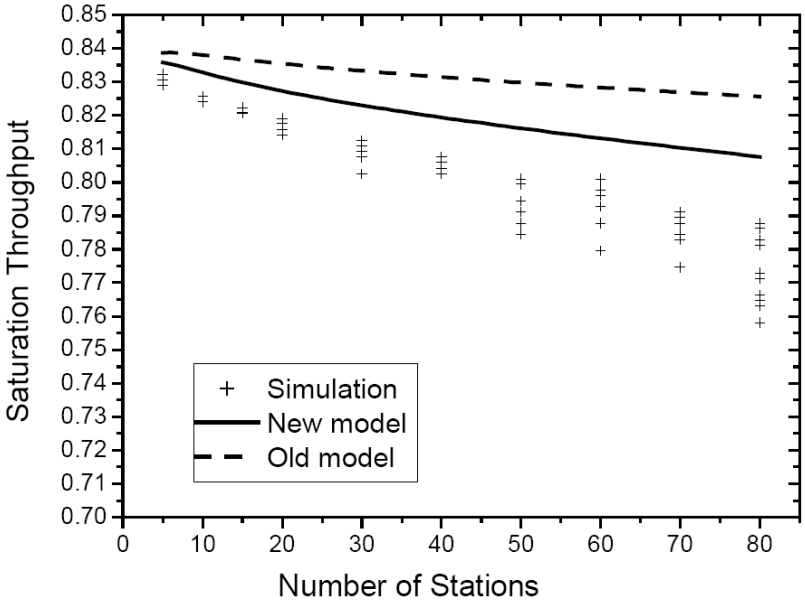

**Εικόνα 29- Σύγκριση απόδοσης Βασικής μεθόδου**

Η ετικέτα '*new model'* χρησιμοποιήθηκε για να περιγράψει το μοντέλο του Wu, ενώ η ετικέτα '*old model'* για να αναπαραστήσει το μοντέλο του Bianchi. Το βελτιωμένο αναλυτικό μοντέλο από ότι φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα είναι πιο ακριβές. Για σταθερό αριθμό σταθμών εκτελούνται 10 προσομοιώσεις, χρησιμοποιώντας διαφορετικό seed. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αναπαριστώνται με το σύμβολο '+'. Το αρχικό μοντέλο υπερεκτιμά την απόδοση του 802.11 επειδή δεν λαμβάνει υπ' όψιν το όριο των επαναμεταδόσεων στις μεταβάσεις του Μαρκοβιανού μοντέλου.

Σε αντίθεση τα αποτελέσματα του βελτιωμένου μοντέλου είναι πιο κοντά στα αποτελέσματα της προσομοίωσης, ιδιαίτερα όταν αυξάνεται το πλήθος των σταθμών στο δίκτυο. Αυτό συμβαίνει επειδή στο Μαρκοβιανό μοντέλο έχουμε κάνει την παραδοχή ότι η πιθανότητα $p$ είναι ανεξάρτητη από την κατάσταση $s(t)$ του σταθμού.

### *3.6.5 Ρυθμοαπόδοση κορεσμού για την μέθοδο RTS/CTS*

Τα αποτελέσματα της σύγκρισης για την μέθοδο πρόσβασης RTS/CTS είναι παρόμοια με αυτά της βασικής μεθόδου, τα οποία παρουσιάζονται στην ακόλουθη εικόνα.




**Εικόνα 30 - Σύγκριση απόδοσης μεθόδου RTS/CTS**

Σημειώνεται ότι ο κάθετος άξονας της Εικόνα 30 είναι διαφορετικός από αυτόν της Εικόνα 29. Από αυτό το διάγραμμα φαίνεται ότι η μέθοδος RTS/CTS είναι χρήσιμη για την εξουδετέρωση της μείωσης της απόδοσης εξαιτίας των συγκρούσεων, της οποίας η πιθανότητα αυξάνεται καθώς αυξάνεται και το πλήθος των σταθμών του δικτύου. Τα αποτελέσματα αυτά προκύπτουν επειδή το μέγεθος των ωφέλιμων δεδομένων του πακέτου, 1028bytes, είναι αρκετά μεγάλο ώστε να εξουδετερώνει τον πρόσθετο φόρτο που εισάγεται από την μέθοδο RTS/CTS.

Παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αποκλίνουν από τις τιμές του αναλυτικού μοντέλου, γεγονός που σημαίνει ότι και για αυτό το μοντέλο η ρυθμοαπόδοση έχει υπερεκτιμηθεί, σε σχέση με την προσομοίωση. Η διαφορά στα αποτελέσματα οφείλεται στο ότι στο δίκτυο υπάρχουν πακέτα δρομολόγησης, τα οποία μεταδίδονται με broadcast, οπότε δεν χρησιμοποιούν την μέθοδο RTS/CTS. Τέλος παρατηρούμε ότι και για αυτή την μέθοδο ότι το αρχικό μοντέλο είχε υπερεκτιμήσει την απόδοση, σε σχέση με το μοντέλο του Wu.

## *3.7 Διαφορετικές προσεγγίσεις του αρχικού μοντέλου*

Στις προηγούμενες ενότητες αναλύθηκαν δύο βασικά μοντέλα που υπολογίζουν την απόδοση κορεσμού του IEEE 802.11. Τα μοντέλα αυτά αποτέλεσαν την βάση για την ανάπτυξη άλλων που σαν στόχο είχαν την βελτίωση του αρχικού με την χρήση διαφορετικών παραδοχών ή συμπεριλαμβάνοντας πρόσθετες λεπτομέρειες μοντελοποίησης. Είναι γεγονός ότι έχουν αναπτυχθεί από το βασικό μοντέλο :

- Προσαρμογές σε διαφορετικές παραλλαγές για το backoff [34]
- Διαφορετικά συστήματα από το IEEE 802.11 DCF [28][30][31]
- Βελτιώσεις του βασικού μοντέλου εκτιμώντας διάφορες υποθέσεις (πχ πιο ρεαλιστική μοντελοποίηση του 'παγώματος' του μετρητή[39][36]
- Εκτίμηση συμπληρωματικών διαφορών για τις λεπτομέρειες του μοντέλου όπως :
  - –k-ary exponential backoff
  - –Πολλαπλές κλάσεις κίνησης [23]
  - –Κανάλι με λάθη
  - –Κρυμμένοι σταθμοί

Επιπρόσθετα με την μελέτη της απόδοσης του 802.11, ένα πλήθος από εργασίες πραγματοποιήθηκαν που υπολογίζουν την καθυστέρηση του πρωτοκόλλου, πλέον την απόδοσης. [29][33]

Τα μοντέλα που παρουσιάστηκαν χρησιμοποιούν την ίδια προσέγγιση όσο αφορά την μοντελοποίηση της λειτουργία που περιγράφεται στο πρότυπο, δηλαδή ένα δισδιάστατο μοντέλο Μαρκοβιανων ανελίξεων. Η προσέγγιση αυτή είναι αρκετά πολύπλοκη καθώς η όλη διαδικασία περιγράφεται χρησιμοποιώντας παραμέτρους που πρέπει να ενημερώνονται από τις δύο διαστάσεις του μοντέλου. Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζεται μια απλοποιημένη προσέγγιση που χρησιμοποιεί ένα μονοδιάστατο μοντέλο αντί του δισδιάστατου και αντικαθιστά ένα μεγάλο μέρος του υπολογισμού των παραμέτρων με στοιχειώδη ορίσματα πιθανοτήτων.

# *Κεφάλαιο 4*
# *Ανάπτυξη απλοποιημένου μοντέλου Μαρκοβιανών ανελίξεων*

Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναλύθηκαν δύο βασικά μοντέλα που υπολογίζουν την απόδοση κορεσμού του IEEE 802.11 για την Κατανεμημένη Συνάρτηση Συντονισμού (DCF). Τα μοντέλα αυτά αποτέλεσαν την βάση για την ανάπτυξη άλλων που σαν στόχο είχαν την βελτίωση των αρχικών.

Στην συνέχεια αναπτύσσεται μια απλοποιημένη προσέγγιση μοντελοποίησης της λειτουργίας της Κατανεμημένης Συνάρτησης Συντονισμού, η οποία βασίζεται στην χρήση ενός μονοδιάστατου Μαρκοβιανού μοντέλου. Η εναλλακτική αυτή προσέγγιση χρησιμοποιεί μονοδιάστατες Μαρκοβιανές ανελίξεις, αντί για δισδιάστατες Μαρκοβιανές ανελίξεις. Το μοντέλο αυτό είναι γενικό ώστε να μπορούν να περιγραφούν διαφορετικοί μηχανισμοί οπισθοχώρησης, σε αντίθεση με το μοντέλο του Wu το οποίο πρέπει να τροποποιηθεί και να υπολογίζει διαφορετικό Μαρκοβιανό μοντέλο αν αλλάξει ο μηχανισμός οπισθοχώρησης.

Το παρόν κεφάλαιο αποτελείται από τρία τμήματα. Στο πρώτο αναπτύσσεται ένα βασικό μονοδιάστατο μοντέλο Μαρκοβιανών ανελίξεων, που περιγράφει ένα σύστημα συνεχών μεταβάσεων. Στο δεύτερο τμήμα παρουσιάζεται ένα μονοδιάστατο Μαρκοβιανό μοντέλο στις μεταβάσεις του οποίου συμπεριλαμβάνεται η διάρκεια παραμονής σε κάθε στάδιο οπισθοχώρησης. Τέλος στο τρίτο τμήμα παρουσιάζεται ο προσδιορισμός της μέσης καθυστέρησης επιτυχούς μετάδοσης πακέτων, όπως προκύπτει από το μονοδιάστατο Μαρκοβιανό μοντέλο.

## *4.1 Λειτουργική περιγραφή και παραδοχές*

Τα δισδιάστατα Μαρκοβιανά μοντέλα που περιγράφτηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, το αρχικό του G. Bianchi και το βελτιωμένο του Wu, υπολογίζουν την ρυθμοαπόδοση της DCF κάνοντας κάποιες βασικές υποθέσεις για τις συνθήκες

λειτουργίας του δικτύου. Τα αναλυτικά αυτά μοντέλα για να υπολογίζουν την ρυθμοαπόδοση υποθέτουν ότι το κανάλι βρίσκεται σε ιδανικές συνθήκες, δηλαδή δεν υπάρχουν λάθη στην μετάδοση και δεν υπάρχουν κρυμμένοι σταθμοί. Επίσης υποθέτουν ότι υπάρχει ένας σταθερός αριθμός σταθμών οι οποίοι βρίσκονται σε συνθήκες κορεσμού, δηλαδή όλοι οι σταθμοί έχουν πάντα ένα πακέτο έτοιμο προς μετάδοση.

Η λειτουργία του αναλυτικού μοντέλου βασίζεται σε διακριτή χρονική κλίμακα, η οποία δεν είναι ομοιόμορφη και συνεχής στον χρόνο. Συγκεκριμένα το μέγεθος μιας χρονοθυρίδας εξαρτάται από τα γεγονότα που συμβαίνουν στο κανάλι. Όταν το κανάλι είναι ανενεργό, η διάρκεια μιας χρονοθυρίδας ισούται με το σταθερό μέγεθος σ, το οποίο προσδιορίζεται στο πρότυπο. Αντίθετα όταν το κανάλι είναι κατειλημμένο εξαιτίας μιας μετάδοσης ή μιας σύγκρουσης, τότε μία χρονοθυρίδα διαρκεί μέχρι να ολοκληρωθεί η μετάδοση και το κανάλι να ανιχνευτεί ανενεργό για τουλάχιστον ένα DIFS.

Η βασική προσέγγιση που κάνει εφικτή την ανάπτυξη των μοντέλων που έχουν περιγραφεί, είναι η υπόθεση της σταθερής και ανεξάρτητης πιθανότητας σύγκρουσης $p$ που έχει ένα πακέτο που μεταδίδεται από κάθε σταθμό, ανεξάρτητα από το πλήθος των επαναμεταδόσεων που έχει υποστεί το πακέτο, δηλαδή το συσσωρευμένο στάδιο οπισθοχώρησης. Η προσέγγιση αυτή όπως έχει προαναφερθεί, παρέχει ακριβή αναλυτικά αποτελέσματα σε σχέση με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Μία πρόσθετη υπόθεση που γίνεται για τα μονοδιάστατα μοντέλα που παρατίθενται στην συνέχεια, είναι ότι ο μετρητής οπισθοχώρησης μειώνεται μετά από το ‘πάγωμα’, λόγω της ανίχνευσης του κατειλημμένου καναλιού. Ωστόσο το τελικό πρότυπο του 802.11 καθορίζει μία διαφορετική συμπεριφορά για τον μετρητή οπισθοχώρησης, ο οποίος μειώνεται μόνο όταν η χρονοθυρίδα είναι ανενεργή. Η παράμετρος αυτή λαμβάνεται υπόψη στην ανάπτυξη του μοντέλου που ακολουθεί.

## *4.2 Μονοδιάστατο Μοντέλο Μαρκοβιανών ανελίξεων (χρήση δεσμευμένων πιθανοτήτων)*

Το μοντέλο που αναλύεται στην συνέχεια περιγράφει την εξέλιξη του σταδίου οπισθοχώρησης. Με τον όρο 'στάδιο οπισθοχώρησης' αναφερόμαστε στον αριθμό των επαναμεταδόσεων που έχει υποστεί ένα πακέτο που βρίσκεται στην αρχή της ουράς. Έστω ότι με R αναπαρίσταται το μέγιστο πλήθος των επαναμεταδόσεων που μπορεί να υποστεί ένα πακέτο πριν απορριφθεί, άρα αν i είναι το στάδιο οπισθοχώρησης ενός σταθμού, $i \in (0,..,R)$.

Έστω ότι $(Tx)$ είναι το γεγονός της εκπομπής ενός πακέτου σε μία τυχαία χρονοθυρίδα από έναν σταθμό, και έστω ότι $(s=i)$ είναι το γεγονός ο σταθμός βρίσκεται στο στάδιο $i \in (0,..,R)$. Μας ενδιαφέρει να υπολογίσουμε την ανεξάρτητη πιθανότητα $\tau=P(Tx)$ που έχει ο σταθμός να μεταδώσει σε ένα τυχαίο slot.

Η steady state πιθανότητα (ή limiting state probability) του μονοδιάστατου Markov (Εικόνα 31) ή διαφορετικά η λύση του παρακάτω συστήματος προσδιορίζει την πιθανότητα που έχει ένας σταθμός να βρίσκεται σε ένα στάδιο $i \in (0,..,R)$, δεδομένου ότι έχει μεταδώσει, δηλαδή την δεσμευμένη πιθανότητα $P(s=i|Tx)$.

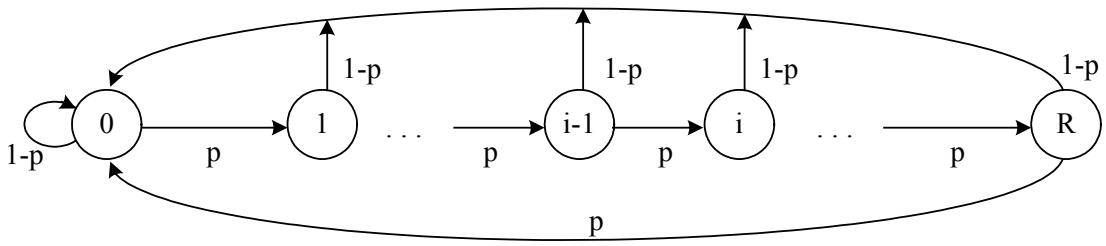
### *4.2.1 Περιγραφή της εξέλιξης του σταδίου οπισθοχώρησης*

Όταν ένας σταθμός που βρίσκεται στο στάδιο οπισθοχώρησης 0, θέλει να μεταδώσει ένα πακέτο, επιλέγει μία τυχαία τιμή $b_0$, ομοιόμορφα κατανεμημένη στο εύρος $(0, CW_0)$. Εάν το πακέτο συγκρουστεί, η επόμενη τιμή $b_1$, που θα προκύψει στο στάδιο 1, θα επιλεγεί από διαφορετικό εύρος $(0, CW_1)$. Γενικά καθώς αυξάνεται το στάδιο οπισθοχώρησης το εύρος από το οποίο επιλέγεται η τιμή το $b_i$ διπλασιάζεται. Το $CW_i$ δίδεται από :

$$CW_i = min(2^i(CW_{min}+1)-1), CW_{max}) \ , \ i=0,1,...,R \qquad (4.1)$$

Η δεσμευμένη πιθανότητα $P(s=i|Tx)$ περιγράφει την πιθανότητα ενός σταθμού να βρίσκεται στο στάδιο i $(s=i)$ δεδομένου ότι έχει μεταδώσει $(Tx)$. Η

πιθανότητα αυτή αποτελεί την steady-state κατανομή ενός διακριτού χρόνου μοντέλου Μαρκοβιανών ανελίξεων *s(k)*, και περιγράφει την εξέλιξη του σταδίου οπισθοχώρησης κατά την μετάδοση *k* ενός σταθμού.




**Εικόνα 31 - Μονοδιάστατο Μαρκοβιανό μοντέλο (συνεχών μεταβάσεων)**

Το παραπάνω Μαρκοβιανό μοντέλο αναπαριστά την εξέλιξη του σταδίου οπισθοχώρησης. Παρακάτω παρατίθενται οι μη-μηδενικές ενός βήματος πιθανότητες μετάβασης (transition probabilities).

$$\begin{cases} P(s(k+1)=i \mid s(k)=i-1)=p & ,i \in (1,R) \\ P(s(k+1)=0 \mid s(k)=i)=1-p & ,i \in (0,R-1) \\ P(s(k+1)=0 \mid s(k)=R)=1 & ,i=R \end{cases} \tag{4.2}$$

Σύμφωνα με αυτές τις πιθανότητες μετάβασης μπορεί να γίνει η πλήρης περιγραφή του συστήματος, οι οποίες πιθανότητες θα χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό της πιθανότητας μετάδοσης *τ*. Στην συνέχεια αναλύονται οι εξισώσεις αυτές και οι καταστάσεις που περιγράφουν.

Η πρώτη εξίσωση περιγράφει το γεγονός της αποτυχημένης μετάδοσης ενός πακέτου, δηλαδή την πιθανότητα μετάβασης από την κατάσταση {k} στην επόμενη κατάσταση {k+1}.

$$P(s(k+1)=i \mid s(k)=i-1)=p \qquad ,i \in (1,R) \tag{4.3}$$

Η πιθανότητα αυτή είναι ίση με *p*, δηλαδή εάν κατά την εκπομπή του πακέτου γίνει σύγκρουση τότε θα αυξηθεί το στάδιο οπισθοχώρησης.

Η δεύτερη εξίσωση περιγράφει το γεγονός της επιτυχημένης μετάδοσης του πακέτου και την μετάβαση από το στάδιο *i*, στο αρχικό στάδιο, το στάδιο 0.

$$P(s(k+1)=0 \mid s(k)=i)=1-p \qquad , i \in (0, R-1) \qquad (4.4)$$

Η πιθανότητα αυτή είναι ίση με *1-p*, δηλαδή η πιθανότητα που έχει ένα πακέτο που μεταδόθηκε να μην συγκρουστεί.

Τέλος η τρίτη εξίσωση περιγράφει την μετάβαση στο αρχικό στάδιο όταν το πακέτο φτάσει στο τελευταίο στάδιο R.

$$P(s(k+1)=0 \mid s(k)=R)=1 \qquad , i = R \qquad (4.5)$$

Σε αυτή την περίπτωση πάντα η διαδικασία ξαναξεκινά από το στάδιο 0, ανεξάρτητα από την σύγκρουση ή όχι του πακέτου. Όπως έχει ήδη αναφερθεί το *R* είναι ο μέγιστος αριθμός των επαναμεταδώσεων που μπορεί να υποστεί ένα πακέτο. Όταν φτάσει στο στάδιο *R* θα μεταδοθεί για τελευταία φορά. Εάν η μετάδοση αυτή είναι επιτυχημένη τότε θα ξεκινήσει η διαδικασία από την αρχή με ένα νέο πακέτο, εφόσον βρισκόμαστε σε συνθήκες κορεσμού και πάντα υπάρχει ένα πακέτο έτοιμο προς μετάδοση. Σε περίπτωση που η μετάδοση είναι αποτυχημένη, δηλαδή το πακέτο συγκρουστεί, τότε το πακέτο απορρίπτεται, αφαιρείται από την κορυφή της ουράς και η διαδικασία ξεκινά με ένα νέο πακέτο.

Η τιμή του *s(k)* μπορεί να προσδιοριστεί από τον υπολογισμό της steady state πιθανότητας, η οποία αναλύεται στην συνέχεια. Το διάγραμμα μετάβασης καταστάσεων (state transition diagram) μπορεί να αναπαρασταθεί από τον πίνακα μετάβασης καταστάσεων (state transition matrix M), όπου η πιθανότητα να μεταβούμε από την κατάσταση *i-1* στην κατάσταση *i* δίδεται από το στοιχείο $m_{i-1,i}$ .

**Πίνακας 7 - Πίνακας μετάβασης καταστάσεων (αρχικό μονοδιάστατο μοντέλο)**

| i-1/i | **0** | **1** | **…** | **i** | **…** | **R-1** | **R** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **0** | (1-p) | p | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **1** | (1-p) | 0 | p | … | 0 | 0 | 0 |
| **…** | (1-p) | 0 | 0 | p | 0 | 0 | 0 |
| **I** | (1-p) | 0 | 0 | … | 0 | 0 | 0 |
| **…** | (1-p) | 0 | 0 | 0 | 0 | p | 0 |
| **R-1** | (1-p) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | p |
| **R** | (1-p)+p | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Για να υπολογίσουμε την steady state πιθανότητα (ή limiting state probability) του συστήματος αρκεί να υπολογίσουμε το steady state διάνυσμα κατανομής S= [s(0),s(1), s(2), ..., s(R)], χρησιμοποιώντας πολλαπλασιασμό πινάκων [35] :

S=S*M

Από τον πολλαπλασιασμό πινάκων προκύπτουν οι ακόλουθες εξισώσεις :

$$s(0) = \sum_{i=0}^{R} \left[(1-p)\cdot s(i)\right] + p\cdot s(R) \tag{4.6}$$

$$s(i) = p\cdot s(i-1) \Rightarrow s(i) = p^{i}\cdot s(0) \quad ,\mathrm{i} = 1..\mathrm{R} \tag{4.7}$$

Επιπρόσθετα των εξισώσεων που προκύπτουν από τις μεταβάσεις των καταστάσεων, έχουμε την εξίσωση της συνθήκης κανονικοποίησης (normalization condition) :

$$\sum_{i=0}^{R} s(i) = 1 \quad ,\mathrm{i} \in (1,\mathrm{R}) \tag{4.8}$$

Οι εξισώσεις (4.6) (4.7) και (4.8) αποτελούν ένα μη γραμμικό σύστημα εξισώσεων, η επίλυση του οποίου παρατίθεται αναλυτικά στην συνέχεια.

Για την επίλυση του συστήματος αυτού αρχικά αντικαθιστούμε στην (4.6) την (4.7) για να προσδιορίσουμε την τιμή του *s(0)*.

$$s(0) = \sum_{i=0}^{R} \left[(1-p)\cdot s(i)\right] + p\cdot s(R) \Rightarrow s(0) = (1-p)\sum_{i=0}^{R} s(i) + p^{R+1}\cdot s(0) \tag{4.9}$$

Στη συνέχεια χρησιμοποιούμε την (4.8), οπότε η (4.9) μετασχηματίζεται ως εξής :

$$s(0) = (1-p)\sum_{i=0}^{R} s(i) + p^{R+1} \cdot s(0) \Rightarrow s(0) = (1-p) + p^{R+1} \cdot s(0) \Rightarrow s(0) = \frac{1-p}{1-p^{R+1}} \quad (4.10)$$

Εάν αντικαταστήσουμε την (4.10) στην (4.7) έχουμε :

$$s(i) = p^{i} \cdot s(0) \Rightarrow s(i) = p^{i} \cdot \frac{1-p}{1-p^{R+1}} \quad ,\mathrm{i} = 1..\mathrm{R} \quad (4.11)$$

Η γενίκευση των παραπάνω καταλήγει στην σχέση (4.12) που αποτελεί την γενική λύση του συστήματος.

$$s(i) = \frac{(1-p) \cdot p^{i}}{1-p^{R+1}} \quad ,i \in (0, R) \quad (4.12)$$

Ο υπολογισμός της steady-state πιθανότητας περιγράφει την δεσμευμένη πιθανότητα *P(s=i|Tx)* η οποία χρησιμοποιείται στον προσδιορισμό της πιθανότητας μετάδοσης *τ*, όπως περιγράφεται στην ακόλουθη ενότητα.

### *4.2.2 Υπολογισμός της πιθανότητας εκπομπής τ*

Στην παρούσα ενότητα υπολογίζουμε την πιθανότητα τ=*P(Tx)* που έχει ένας σταθμός να εκπέμψει με επιτυχία σε μία τυχαία χρονοθυρίδα (slot time). Ο υπολογισμός αυτός γίνεται με την χρήση του θεωρήματος του Bayes [42], το οποίο εκφράζει μία δεσμευμένη πιθανότητα συναρτήσει των ανεξάρτητών πιθανοτήτων της. Στην προηγούμενη ενότητα (4.2.1) υπολογίστηκε από το μονοδιάστατο μοντέλο Μαρκοβιανών ανελίξεων, η σχέση που περιγράφει την δεσμευμένη πιθανότητα *P(s=i|Tx)*, δηλαδή την πιθανότητα που έχει ένας σταθμός να βρίσκεται στο στάδιο i (s=i) δεδομένου ότι έχει εκπέμψει. Ο στόχος είναι να προσδιορίσουμε την πιθανότητα εκπομπής *τ*. Εφαρμόζοντας το θεώρημα του Bayes έχουμε την ακόλουθη σχέση [42] :

$$P(s=i \mid Tx) = \frac{P(Tx \mid s=i) \cdot P(s=i)}{P(Tx)} \tag{4.13}$$

Οι πιθανότητες της παραπάνω σχέσης ορίζονται ως εξής :

- *P(Tx|s=i)* : Η δεσμευμένη πιθανότητα που έχει ένας σταθμός να εκπέμψει δεδομένου ότι βρίσκεται στο στάδιο i (s=i)
- *P(s=i)* : Η ανεξάρτητη πιθανότητα που έχει ένας σταθμός να βρίσκεται στο στάδιο i (s=i)

Η (4.13) μετασχηματίζεται και ως :

$$P(Tx) \cdot \frac{P(s=i \mid Tx)}{P(Tx \mid s=i)} = P(s=i) \tag{4.14}$$

Εφόσον η παραπάνω ισχύει για κάθε $i \in (0,..,R)$ , άρα η (4.14) ισχύει και για το άθροισμα :

$$P(Tx) \cdot \sum_{i=0}^{R} \frac{P(s=i \mid Tx)}{P(Tx \mid s=i)} = \sum_{i=0}^{R} P(s=i) = 1 \tag{4.15}$$

Από την (4.15) προκύπτει ότι ανεξάρτητη πιθανότητα $\tau$ υπολογίζεται :

$$\tau = P(Tx) = \frac{1}{\sum_{i=0}^{R} \frac{P(s=i \mid Tx)}{P(Tx \mid s=i)}} \tag{4.16}$$

Αυτό που λείπει για τον προσδιορισμό της πιθανότητας εκπομπής $\tau$ είναι η πιθανότητα *P(Tx|s=i)* που αποτελεί την δεσμευμένη πιθανότητα που έχει ένας σταθμός να εκπέμψει δεδομένου ότι βρίσκεται στο στάδιο i *(s=i)*. Η πιθανότητα αυτή μπορεί να υπολογιστεί διαιρώντας τον μέσο αριθμό των χρονοθυρίδων που περιλαμβάνουν μια εκπομπή ενώ ο σταθμός βρίσκεται στο στάδιο *i*, με το μέσο πλήθος των χρονοθυρίδων που χρησιμοποιούνται γενικά από έναν σταθμό που βρίσκεται στο στάδιο *i*.

$$P(Tx \mid s=i) = \frac{\text{Μέσος αριθμός time-slots κατά την κατάσταση εκπομπής}}{\text{Μέσος αριθμός time-slots που χρησιμοποιούνται στο στάδιο i}} \quad (4.17)$$

Εξαιτίας της κλίμακας του χρόνου (διακριτή και ακέραια) ο μέσος αριθμός των χρονοθυρίδων που χρησιμοποιούνται από έναν σταθμό κατά των εκπομπή ενός πακέτου, είναι ακριβώς ένα.

Για να υπολογίσουμε τον μέσο αριθμό των χρονοθυρίδων που δαπανώνται γενικά στο στάδιο *i (s=i)* θα προσδιορίσουμε την πιθανότητα μείωσης του μετρητή οπισθοχώρησης και το μέσο πλήθος των χρονοθυρίδων που επιλέγονται στο εκάστοτε στάδιο. Έστω ότι $W_i$ είναι το παράθυρο διεκδίκησης ενώ βρισκόμαστε στο στάδιο οπισθοχώρησης *i*, με την ακολουθία $W_i$ , $i \in (0,..,R)$ να μπορεί να είναι μία γενική ακολουθία. Καθώς ο σταθμός μπαίνει στο στάδιο *i* , επιλέγεται μία τυχαία τιμή για την οπισθοχώρηση, στο εύρος $(0, W_i-1)$, σύμφωνα με την ομοιόμορφη κατανομή. Ο μέσος αριθμός των χρονοθυρίδων του σταδίου για την ομοιόμορφη κατανομή είναι :

$$A[b_i] = \frac{Wi-1}{2} \quad (4.18)$$

Η επιλογή του παραθύρου διεκδίκησης στο τρέχον μοντέλο γίνεται σύμφωνα με την ομοιόμορφη κατανομή. Όμως η επιλογή αυτή διατηρείται γενικευμένη, με την έννοια ότι υπάρχει η δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε κατανομή.

Έστω ότι *α* είναι η πιθανότητα που έχει ένας σταθμός να μειώσει τον μετρητή οπισθοχώρησης κατά την διάρκεια μιας χρονοθυρίδας. Η τιμή *α* εξαρτάται από την παραδοχή που χρησιμοποιείται για την μοντελοποίηση του 'παγώματος' της οπισθοχώρησης. Για παράδειγμα στο αρχικό μοντέλο του Bianchi, ο μετρητής μειώνεται στην αρχή κάθε χρονοθυρίδας ανεξάρτητα από το περιεχόμενο της, οπότε το $\alpha=1$. Σε διαφορετικές προσεγγίσεις που ο μετρητής οπισθοχώρησης μειώνεται μόνο όταν η χρονοθυρίδα είναι ανενεργή, το $\alpha = 1-p$ [34][36]. Από την στιγμή που p είναι η πιθανότητα να είναι κατειλημμένο το κανάλι λόγω σύγκρουσης, το $1-p$ είναι η πιθανότητα το κανάλι να μην είναι κατειλημμένο λόγω σύγκρουσης, δηλαδή να είναι ανενεργό. Ο μέσος αριθμός των χρονοθυρίδων που χρησιμοποιούνται σε κάθε τιμή του μετρητή οπισθοχώρησης ισούται με $1/\alpha$. Η σχέση υπολογισμού της πιθανότητας να εκπέμψει ένας σταθμός όταν είναι στο στάδιο i (4.17) μετασχηματίζεται ως εξής:

$$P(Tx \mid s = i) = \frac{1}{1 + E[b_i]} \tag{4.19}$$

όπου το $E[b_i]$ αναπαριστά τον μέσο αριθμό των χρονοθυρίδων που χρησιμοποιούνται ανά στάδιο και ισούται με :

$$E[b_i] = \frac{1}{a} \cdot A[b_i] \tag{4.20}$$

Τελικά από τα παραπάνω προκύπτει ότι η δεσμευμένη πιθανότητα που έχει ένας σταθμός να εκπέμψει δεδομένου ότι βρίσκεται στο στάδιο i, *P(Tx|s=i)*, καταλήγει σε :

$$P(Tx \mid s = i) = \frac{1}{1 + E[b_i]} = \frac{1}{1 + \frac{1}{a} \cdot \frac{Wi - 1}{2}} = \frac{2 \cdot a}{Wi - 1 + 2 \cdot a} \tag{4.21}$$

Στο σημείο αυτό μπορούμε να υπολογίσουμε την πιθανότητα εκπομπής, εφόσον έχουν προσδιοριστεί τα δύο ορίσματα. Αντικαθιστώντας την (4.19) και (4.21) στην (4.18) έχουμε :

$$\tau = P(Tx) = \frac{1}{\sum_{i=0}^{R} \frac{P(s = i \mid Tx)}{P(Tx \mid s = i)}} = \frac{1}{\sum_{i=0}^{R} \frac{(1-p) \cdot p^i}{1 - p^{R+1}} \cdot \frac{1}{\frac{2 \cdot a}{Wi - 1 + 2 \cdot a}}} =$$

$$= \frac{2 \cdot a}{\frac{(1-p)}{1 - p^{R+1}} \cdot \sum_{i=0}^{R} p^i \cdot (Wi - 1 + 2 \cdot a)} \tag{4.22}$$

Άρα η πιθανότητα εκπομπής προσδιορίζεται από την ακόλουθη σχέση :

$$\tau = \frac{2 \cdot a}{\frac{1-p}{1-p^{R+1}} \cdot \sum_{\kappa=0}^{R} p^k \cdot (W_k - 1 + 2 \cdot a)} \tag{4.23}$$

Εάν αναπτυχθεί περαιτέρω η σχέση υπολογισμού της πιθανότητας εκπομπής, θα καταλήξει στην αρχική σχέση που δίδεται από το δισδιάστατο βελτιωμένο μοντέλο που αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Το μοντέλο που μόλις αναλύθηκε περιγράφει ένα σύστημα όπου γίνονται συνεχώς μεταβάσεις μεταξύ των καταστάσεων. Το μοντέλο δεν συμπεριλαμβάνει την παραμονή του σταθμού σε κάθε στάδιο, αλλά υπολογίζει εκ των υστέρων την δεσμευμένη πιθανότητα *P(Tx|s=i)*. Η πιθανότητα αυτή αναπαριστά τον χρόνο παραμονής, ο οποίος διαφέρει από στάδιο σε στάδιο. Η διαφορά αυτή οφείλεται στο ότι τροποποιείται το εύρος από το οποίο επιλέγεται ο μετρητής οπισθοχώρησης για το παράθυρο διεκδίκησης.

Στην συνέχεια περιγράφεται μία απλοποιημένη προσέγγιση του αρχικού δισδιάστατου μοντέλου, το οποίο αντιμετωπίζει πιο πιστά την λειτουργία του προτύπου, σε σχέση με το μονοδιάστατο μοντέλο που περιγράφηκε στην παρούσα ενότητα.

## *4.3 Μονοδιάστατο μοντέλο Μαρκοβιανών ανελίξεων*

Εδώ αναπαρίσταται ένα νέο μοντέλο που περιγράφει την εξέλιξη του σταδίου οπισθοχώρησης. Με τον όρο 'στάδιο οπισθοχώρησης' αναφερόμαστε στον αριθμό των επαναμεταδόσεων που έχει υποστεί ένα πακέτο που βρίσκεται στην αρχή της ουράς.

Έστω ότι *(Tx)* είναι το γεγονός ένας σταθμός να εκπέμψει ένα πακέτο σε μία τυχαία χρονοθυρίδα, και έστω ότι *(s=i)* είναι το γεγονός όπου ο σταθμός βρίσκεται στο στάδιο $i \in (0,..,R)$ . Όπως και στο προηγούμενο μονοδιάστατο μοντέλο, μας ενδιαφέρει να υπολογίσουμε την ανεξάρτητη πιθανότητα $\tau=P(Tx)$ που έχει ο σταθμός μα εκπέμψει σε ένα τυχαίο slot.

Η βασική διαφορά του μοντέλου που αναπαρίσταται εδώ σε σχέση με αυτό που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα, είναι ότι παράλληλα με την εξέλιξη του σταδίου περιγράφεται και η παραμονή σε ένα στάδιο, δηλαδή το πλήθος των χρονοθυρίδων που χρησιμοποιούνται σε κάθε στάδιο. Το πλήθος αυτό αποτελεί ουσιαστικά την καθυστέρηση που υπάρχει σε κάθε στάδιο και αναπαρίσταται από την δεσμευμένη πιθανότητα $P(Tx|s=i)$. Η παραμονή αυτή είναι διαφορετική σε κάθε στάδιο, αφού το παράθυρο διεκδίκησης αυξάνεται στα μεγαλύτερα στάδια. Το μοντέλο της προηγούμενης ενότητας περιγράφει μόνο την μετάβαση από στάδιο σε στάδιο, υπολογίζοντας την παραμονή σε κάθε στάδιο ανεξάρτητα από το μοντέλο Μαρκοβιανών ανελίξεων, δηλαδή την δεσμευμένη πιθανότητα $P(Tx|s=i)$. Το Μαρκοβιανό μοντέλο που αναπτύσσεται στην συνέχεια σχετίζεται με την ανεξάρτητη πιθανότητα $P(s=i)$.

Στην συνέχεια παρατίθεται η ανάλυση του μοντέλου, όπου χρησιμοποιούμε για λόγους απλότητας του ίδιους συμβολισμούς για χαρακτηριστικά που είναι κοινά και στα δύο μοντέλα.

### ***4.3.1 Περιγραφή της εξέλιξης του backoff stage συναρτήσει της παραμονής σε ένα στάδιο***

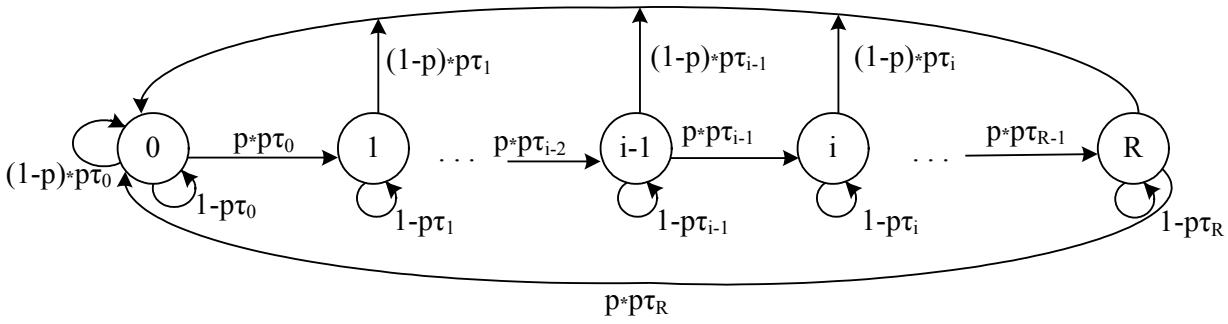
Η εξέλιξη του σταδίου ακολουθεί τις ίδιες παραδοχές με το προηγούμενο μονοδιάστατο μοντέλο, δηλαδή ένας σταθμός που βρίσκεται στο στάδιο

οπισθοχώρησης $i$, και για να εκπέμψει ένα πακέτο θα επιλέξει μία τυχαία τιμή $b_i$, ομοιόμορφα κατανεμημένη στο εύρος $(0, CW_i)$.

Η κατάσταση {i} περιγράφει την κατάσταση ενός σταθμού όταν βρίσκεται στο στάδιο $i$ $(s=i)$. Η πιθανότητα $P(s=i)$ υπολογίζεται από την steady-state κατανομή ενός διακριτού χρόνου μοντέλο Μαρκοβιανών ανελίξεων s(k). Το μονοδιάστατο αυτό μοντέλο περιγράφει την εξέλιξη του σταδίου οπισθοχώρησης.

Η παραμονή σε ένα στάδιο συμπεριλαμβάνει την μείωση του μετρητή οπισθοχώρησης, που αναπαρίσταται από την πιθανότητα $1\text{-}p\tau_i$. Η πιθανότητα μείωσης του μετρητή και η εκπομπή από το στάδιο $i$ περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα (4.2.2) και ισούται με την δεσμευμένη πιθανότητα $P(Tx|s=i)$. Η πιθανότητα $p\tau_i$ είναι διαφορετική από στάδιο σε στάδιο και τροποποιείται σύμφωνα με το μέγεθος του παραθύρου διεκδίκησης $(0, CW_i)$.

Το παρακάνω μονοδιάστατο Μαρκοβιανό μοντέλο αναπαριστά την εξέλιξη του σταδίου οπισθοχώρησης.




**Εικόνα 32 - Μονοδιάσταστο Μαρκοβιανό μοντέλο (παραμονή ανά στάδιο)**

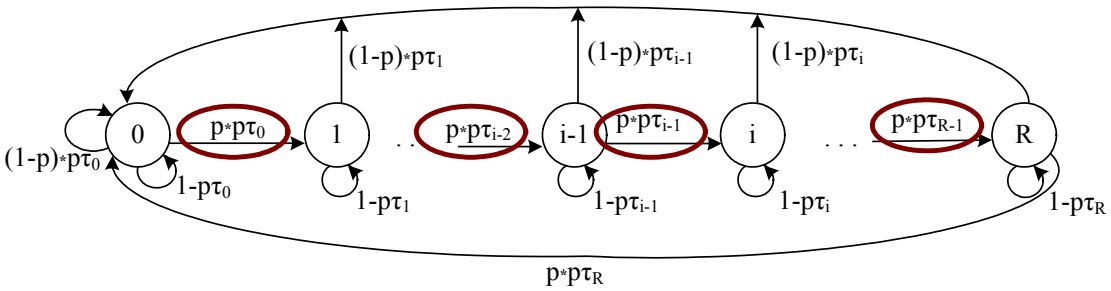
Παρακάτω παρατίθενται οι μη-μηδενικές ενός βήματος πιθανότητες μετάβασης (transition probability).

$$\begin{cases} P(s(k+1)=i \mid s(k)=i-1) = p * p\tau_{\mathrm{i}} & , i \in (1,R) \\ P(s(k+1)=0 \mid s(k)=i) = (1-p) * p\tau_{\mathrm{i}} & , i \in (0,R-1) \\ P(s(k+1)=0 \mid s(k)=R) = p\tau_R & , i = R \\ P(s(k+1)=i \mid s(k)=i) = 1 - p\tau_{\mathrm{i}} & , i \in (0,R) \end{cases} \tag{4.24}$$

Σύμφωνα με αυτές τις πιθανότητες μετάβασης μπορεί να γίνει η πλήρης περιγραφή του συστήματος, οι οποίες πιθανότητες θα χρησιμοποιηθούν για τον

προσδιορισμό της πιθανότητας εκπομπής $\tau$. Στην συνέχεια αναλύονται οι εξισώσεις αυτές και οι αντίστοιχες καταστάσεις.

Η πρώτη εξίσωση περιγράφει την πιθανότητα που έχει ένα πακέτο να μεταβεί από την κατάσταση που βρίσκεται σε επόμενο στάδιο.

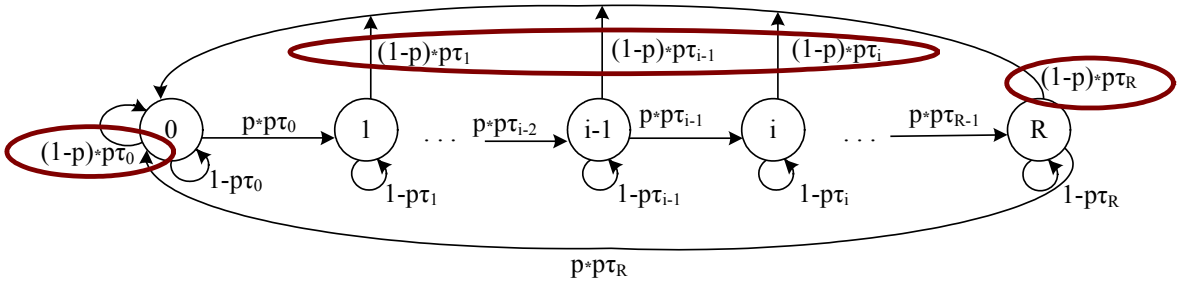



**Εικόνα 33 - Μετάβαση σε περίπτωση σύγκρουσης**

$$P(s(k+1)=i \mid s(k)=i-1) = p * p\tau_{\mathrm{i}} \qquad , i \in (1,R) \qquad (4.25)$$

Η πιθανότητα αυτή είναι ίση με $p*p\tau_i$, δηλαδή εάν γίνει μετάδοση $(p\tau_i)$ και το πακέτο συγκρουστεί $(p)$, τότε θα αυξηθεί το στάδιο οπισθοχώρησης.

Η δεύτερη εξίσωση περιγράφει το γεγονός της επιτυχημένης μετάδοσης του πακέτου και την μετάβαση από το στάδιο $i$, στο αρχικό στάδιο, το στάδιο 0.



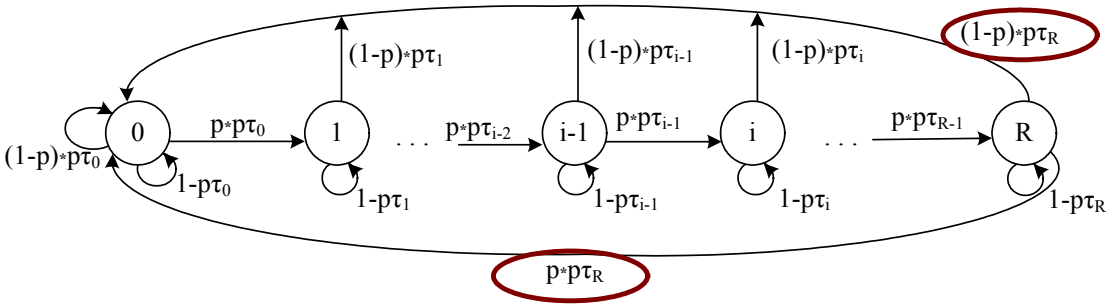

**Εικόνα 34 - Μετάβαση επιτυχημένης μετάδοσης**

$$P(s(k+1)=0 \mid s(k)=i) = (1-p) * p\tau_{\mathrm{i}} \qquad , i \in (0,R-1) \qquad (4.26)$$

Η πιθανότητα μετάβασης από το στάδιο $i$ στο στάδιο $0$ είναι ίση με $(1-p)*p\tau_i$, δηλαδή η πιθανότητα που έχει ένα πακέτο να μεταδοθεί και να μην συγκρουστεί. Σε αυτή

την περίπτωση από όποιο στάδιο και να βρίσκεται το πακέτο αφού θα μεταδοθεί με επιτυχία, η διαδικασία ξεκινά με ένα νέο πακέτο, γι' αυτό και γίνεται μετάβαση στο στάδιο 0.

Η τρίτη εξίσωση περιγράφει την μετάβαση στο αρχικό στάδιο όταν το πακέτο φτάσει στο τελευταίο στάδιο R.

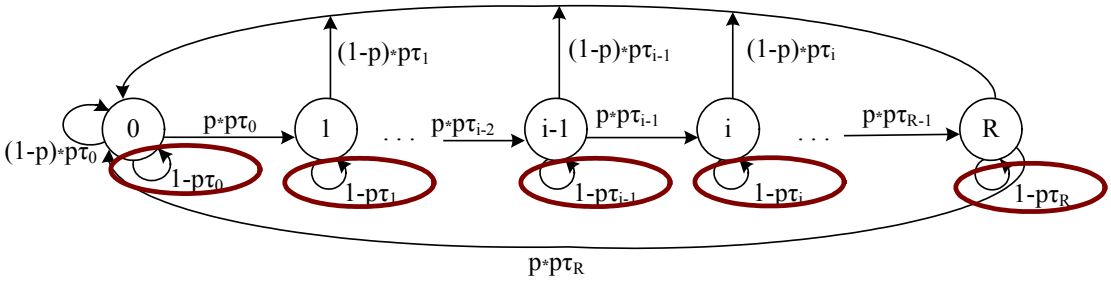



**Εικόνα 35 - Μετάβαση στο αρχικό στάδιο από το τελευταίο (i=R)**

$$P(s(k+1)=0 \mid s(k)=R) = (1-p)\cdot p\tau_R + p\cdot p\tau_R = p\tau_R \quad , i=R \qquad (4.27)$$

Όταν η διαδικασία βρίσκεται στο τελευταίο στάδιο *R*, πραγματοποιείται μία τελευταία εκπομπή, ανεξάρτητα από το αποτέλεσμα της εκπομπής, είτε γίνει σύγκρουση είτε όχι, ο μετρητής μηδενίζεται και η διαδικασία ξεκινά για ένα νέο πακέτο από το στάδιο 0. Γι' αυτό το λόγο και η πιθανότητα μετάβασης από το τελευταίο στάδιο R στο 0 είναι 1.

Η τέταρτη και τελευταία κατάσταση περιγράφει το γεγονός της παραμονής στο ίδιο στάδιο, δηλαδή να μην γίνει μετάδοση.




**Εικόνα 36 - Κατάσταση παραμονής στο ίδιο στάδιο**

$$P(s(k+1)=i \mid s(k)=i) = 1-p\tau_i \qquad , i\in(0,R) \qquad (4.28)$$

Ο σταθμός παραμένει στην κατάσταση {i} εάν ο μετρητής οπισθοχώρησης είναι μεγαλύτερος του 0. Η παραμονή στην ίδια κατάσταση ουσιαστικά περιγράφει την μείωση του μετρητή, χωρίς να γίνει εκπομπή και η πιθανότητα παραμονής ισούται με : 1- $p\tau_i$.

Η πιθανότητα ένας σταθμός που βρίσκεται στο στάδιο *i* να εκπέμψει είναι $p\tau_i$, και εκφράζεται από την ακόλουθη σχέση, η οποία αναλύθηκε στην προηγούμενη ενότητα :

$$p\tau_{\mathrm{i}} = P(Tx \mid s = i) = \frac{1}{1 + E[b_i]} \tag{4.29}$$

Η τιμή της κατάστασης *s(k)* μπορεί να προσδιοριστεί από τον υπολογισμό της steady state πιθανότητας, η οποία αναλύεται στην συνέχεια. Το διάγραμμα μετάβασης καταστάσεων (state transition diagram) μπορεί να αναπαρασταθεί από τον πίνακα μετάβασης καταστάσεων (state transition matrix M), όπου η πιθανότητα να μεταβούμε από την κατάσταση *i-1* στην κατάσταση *i* δίδεται από το στοιχείο $m_{i-1,i}$ .

**Πίνακας 8 - Πίνακας μετάβασης καταστάσεων**

| i-1 /i | **0** | **1** | **…** | **i** | **i+1** | **…** | **R-1** | **R** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **0** | (1-p) *$p\tau_0$+(1-$p\tau_0$) | p*$p\tau_0$ | … | 0 | 0 | … | 0 | 0 |
| **1** | (1-p) *$p\tau_1$ | 1-$p\tau_1$ | … | 0 | 0 | … | 0 | 0 |
| **…** | … | … | … | … | … | … | … | … |
| **i** | (1-p) *$p\tau_i$ | 0 | .. | 1-$p\tau_i$ | p*$p\tau_i$ | … | 0 | 0 |
| **…** | … | … | … | … | … | … | … | … |
| **R-1** | (1-p) *$p\tau_{R-1}$ | 0 | … | 0 | 0 | … | 1-$p\tau_{R-1}$ | p*$p\tau_{R-1}$ |
| **R** | $p\tau_R$ | 0 | … | 0 | 0 | … | 0 | 1-$p\tau_R$ |

Για να υπολογίσουμε την steady state πιθανότητα (ή limiting state probabilities) του συστήματος αρκεί να υπολογίσουμε τον steady state διάνυσμα κατανομής S= [s(0),s(1), s(2), ..., s(R)], χρησιμοποιώντας πολλαπλασιασμό πινάκων [35] :

S=S*M

Από τον πολλαπλασιασμό πινάκων προκύπτουν οι ακόλουθες εξισώσεις :

$$s(0) = \sum_{i=0}^{R} \left[ (1-p) \cdot p\tau_i \cdot s(i) \right] + p \cdot p\tau_R \cdot s(R) \tag{4.30}$$

$$s(i) = p \cdot p\tau_{(i-1)} \cdot s(i-1) + (1 - p\tau_i) \cdot s(i) \Rightarrow s(i) = \frac{p^i \cdot p\tau_0}{p\tau_i} \cdot s(0) \quad ,\mathrm{i} = 1..\mathrm{R} \tag{4.31}$$

Επιπρόσθετα των εξισώσεων που προκύπτουν από τις μεταβάσεις των καταστάσεων, έχουμε την εξίσωση της συνθήκης κανονικοποίησης (normalization condition) :

$$\sum_{i=0}^{R} s(i) = 1 \quad ,\mathrm{i} \in (1, \mathrm{R}) \tag{4.32}$$

Οι εξισώσεις (4.30) (4.31) και (4.32) αποτελούν ένα μη γραμμικό σύστημα εξισώσεων, η επίλυση του οποίου παρατίθεται αναλυτικά στην συνέχεια.

Για την επίλυση του συστήματος αυτού αρχικά αντικαθιστούμε στην (4.32) την (4.31) για να προσδιορίσουμε την τιμή του *s(0)*, οπότε η (4.32) μετασχηματίζεται ως εξής :

$$\sum_{i=0}^{R} s(i) = 1 \Rightarrow \sum_{i=0}^{R} \frac{p^i \cdot p\tau_0}{p\tau_i} \cdot s(0) = 1 \Rightarrow \mathrm{s}(0) \cdot p\tau_0 \cdot \sum_{i=0}^{R} p^i \cdot \frac{1}{p\tau_i} = 1 \Rightarrow$$

$$s(0) = \frac{1}{p\tau_0 \cdot \sum_{i=0}^{R} \left[ p^i \cdot \frac{1}{p\tau_i} \right]} \tag{4.33}$$

Όπως έχει προαναφερθεί η κατάσταση *s(i)* περιγράφει την πιθανότητα *P(s=i)*, αντικαθιστώντας την (4.33) στην (4.31) έχουμε :

$$P(s=i) = \frac{p^i \cdot p\tau_0}{p\tau_i} \cdot s(0) \Rightarrow P(s=i) = \frac{p}{p\tau_i} \cdot \frac{1}{\sum_{j=0}^{R}\left[p^j \cdot \frac{1}{p\tau_j}\right]} \quad ,\mathrm{i} = 1..\mathrm{R} \qquad (4.34)$$

Ο υπολογισμός της steady-state πιθανότητας *P(s=i)* χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της πιθανότητας εκπομπής *τ*, η οποία περιγράφεται στην ακόλουθη ενότητα.

### *4.3.2 Υπολογισμός της πιθανότητας εκπομπής τ*

Θεωρούμε ότι η πιθανότητα εκπομπής *τ* είναι το άθροισμα της πιθανότητας του να βρίσκεται ο μετρητής οπισθοχώρησης στο στάδιο *(s=i)* επί την δεσμευμένη πιθανότητα *P(Tx|s=i)*. Άρα η ανεξάρτητη πιθανότητα *τ* που έχει ένας σταθμός να εκπέμψει υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση :

$$\tau = P(Tx) = \sum_{i=0}^{R} P(s=i) \cdot P(Tx \mid s=i) \quad ,i \in (0,R) \qquad (4.35)$$

Η πιθανότητα *P(s=i)* αποτελεί την επίλυση του Μαρκοβιανού μοντέλου που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα και υπολογίζεται από την σχέση (4.34). Ενώ η πιθανότητα $P(Tx|s=i) = p\tau_i$ αναλύθηκε στον αρχικό μονοδιάστατο μοντέλο και υπολογίζεται από την σχέση (4.29). Εφόσον όλοι οι παράμετροι είναι γνωστοί μπορούμε να υπολογίσουμε την πιθανότητα εκπομπής *τ*, σύμφωνα με την εξίσωση (4.35).

Για να υπολογίσουμε την πιθανότητα μετάδοσης αντικαθιστούμε την (4.34) στην (4.35) :

$$\tau = P(Tx) = \sum_{i=0}^{R} P(s=i) \cdot P(Tx \mid s=i) =$$

$$= \sum_{i=0}^{R} \frac{p^i}{p\tau_i \cdot \sum_{j=0}^{R}\left[p^j \cdot \frac{1}{p\tau_j}\right]} \cdot p\tau_i = \sum_{i=0}^{R} p^i \cdot \frac{1}{\sum_{j=0}^{R}\left[p^j \cdot \frac{1}{p\tau_j}\right]} \qquad (4.36)$$

Στην συνέχεια αντικαθιστούμε το $p\tau_j$ από την (4.29) στην (4.36) έχουμε :

$$P(Tx) = \tau = \sum_{i=0}^{R} p^i \cdot \frac{1}{\sum_{j=0}^{R}\left[p^j \cdot \frac{1}{\frac{1}{1+E[b_j]}}\right]} = \sum_{i=0}^{R} p^i \cdot \frac{1}{\sum_{j=0}^{R}\left[p^j \cdot \frac{(W_j - 1 + 2\cdot a)}{2\cdot\alpha}\right]} =$$

$$\sum_{i=0}^{R} p^i \cdot \frac{2\cdot a}{\sum_{j=0}^{R}\left[p^j \cdot (W_j - 1 + 2\cdot a)\right]} = \frac{2\cdot a}{\sum_{j=0}^{R}\left[p^j \cdot (W_j - 1 + 2\cdot a)\right]} \cdot \frac{(1-p^{R+1})}{(1-p)}$$

Επομένως όπως προκύπτει από τα παραπάνω η πιθανότητα μετάδοσης προσδιορίζεται από την ακόλουθη σχέση :

$$\tau = \frac{2\cdot a}{\sum_{j=0}^{R}\left[p^j \cdot (W_j - 1 + 2\cdot a)\right]} \cdot \frac{(1-p^{R+1})}{(1-p)} \quad , j \in (0, R) \qquad (4.37)$$

Εάν αναπτυχθεί περαιτέρω η σχέση υπολογισμού της πιθανότητας εκπομπής, παρατηρούμε ότι καταλήγει στην αρχική σχέση (3.26) που δίδεται για το δισδιάστατο βελτιωμένο μοντέλο που αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Γενικά η πιθανότητα $\tau$ εξαρτάται από την δεσμευμένη πιθανότητα $p$, που είναι η πιθανότητα σύγκρουσης και έχει αναλυθεί ήδη ο τρόπος υπολογισμού της στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η τιμή του $p$ , ισούται με την πιθανότητα που έχει ένας σταθμός να εκπέμψει σε μία χρονοθυρίδα και να εκπέμψει κάποιος από τους υπόλοιπους *n-1* σταθμούς. Η πιθανότητα αυτή δίδεται από την σχέση:

$$p = 1 - (1-\tau)^{n-1} \qquad (4.38)$$

Οι εξισώσεις (4.37) και (4.38) αναπαριστούν ένα μη γραμμικό σύστημα με δύο αγνώστους, το οποίο μπορεί να λυθεί με την χρήση αναλυτικών μεθόδων.

Παρατηρούμε ότι από τα δύο μονοδιάστατα μοντέλα Μαρκοβιανών ανελίξεων καταλήγουμε στην ίδια σχέση για τον προσδιορισμό της πιθανότητας εκπομπής τ. Αυτό που τα διαφοροποιεί είναι ότι στο πρώτο υπολογίζεται ανεξάρτητα η παραμονή σε κάθε στάδιο, ενώ στο δεύτερο το μονοδιάστατο μοντέλο περιγράφει με μεγαλύτερη ακρίβεια την λειτουργία του πρωτοκόλλου.

Στην συνέχεια μας ενδιαφέρει να προσδιορίσουμε τις σχέσεις που περιγράφουν την μέση καθυστέρηση μετάδοσης πακέτων, σύμφωνα με το Μαρκοβιανό μοντέλο που αναλύθηκε παραπάνω. Ο προσδιορισμός της πιθανότητας εκπομής γίνεται πιο απλά με την χρήση του 2$^{ου}$ μονοδιάστατου μοντέλου και γι' αυτό και υπολογίζουμε την μέση καθυστέρηση σύμφωνα με αυτό το μοντέλο.

## *4.4 Μέση καθυστέρηση επιτυχούς μετάδοσης πακέτων*

Η μέση καθυστέρηση για ένα πακέτο που έχει μεταδοθεί με επιτυχία ορίζεται ως το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί από την στιγμή που το πακέτο θα βρεθεί στην κορυφή της MAC ουράς, έτοιμο προς μετάδοση, μέχρι να την λήψη της επιβεβαίωσης γι' αυτό το πακέτο από τον παραλήπτη. Εάν το πακέτο απορριφθεί επειδή έχει φτάσει το όριο των προσπαθειών μετάδοσης (retry limit), ο χρόνος της καθυστέρησης για αυτό το πακέτο δεν θα συμπεριληφθεί στον υπολογισμό της μέσης καθυστέρησης. Έστω ότι *D* είναι η τυχαία μεταβλητή που αναπαριστά την καθυστέρηση του πακέτου και *E[D]* είναι η μέση τιμής της.

Για να προσδιορίσουμε την μέση καθυστέρηση πρέπει να γνωρίζουμε το πλήθος των χρονοθυρίδων που δαπανώνται μέχρι να γίνει επιτυχής μετάδοση του πακέτου και το μήκος μιας χρονοθυρίδας [29][33]. Η μέση καθυστέρηση δίδεται από την σχέση :

$$E[D]=E[STx]*E[slot] \tag{4.39}$$

Όπου :

- E[STx] : ο μέσος αριθμώς των χρονοθυρίδων που απαιτούνται για να μεταδοθεί επιτυχώς ένα πακέτο
- E[slot] : το μέσο μήκος μιας χρονοθυρίδας

### *4.4.1 Μέσο μήκος χρονοθυρίδας*

Το μέσο μήκος μιας χρονοθυρίδας έχει αναλυθεί κατά τον υπολογισμό της απόδοσης κορεσμού στο προηγούμενο κεφάλαιο και εκφράζεται ως εξής :

$$E[slot] = (1 - P_{tr}) \cdot \sigma + P_{tr} \cdot P_s + P_{tr} \cdot (1 - P_s) \cdot T_c \qquad (4.40)$$

Όπου

- Ptr : Πιθανότητα ένας σταθμός να μεταδώσει
- Ps : Πιθανότητα ένας σταθμός να μεταδώσει με επιτυχία
- Ts : Ο χρόνος που διαρκεί μία επιτυχής μετάδοση
- Tc : Ο χρόνος που διαρκεί μία σύγκρουση
- σ : Το μέγεθος μιας κενής χρονοθυρίδας (όπως καθορίζεται από το πρότυπο)

Ο προσδιορισμός των πιθανοτήτων και των αντίστοιχων χρόνων έχει αναλυθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο.

### *4.4.2 Μέσος αριθμός χρονοθυρίδων επιτυχούς μετάδοσης*

Για τον υπολογισμό της μέσης καθυστέρησης των πακέτων χρησιμοποιείται το μονοδιάστατο Μαρκοβιανό μοντέλο που αναλύθηκε στην προηγούμενη ενότητα, το οποίο περιλαμβάνει τον χρόνο παραμονής στις καταστάσεις του. Ο προσδιορισμός των χρονοθυρίδων που χρησιμοποιούνται σε ένα στάδιο *i*, προϋποθέτει ότι το πακέτο δεν θα απορριφθεί τελικά και ότι έχει ήδη συγκρουστεί *i* φορές. Ο αριθμός των χρονοθυρίδων που χρησιμοποιούνται, ώστε ένα πακέτο που βρίσκεται στο στάδιο *i* να μεταδοθεί τελικά επιτυχώς εκφράζεται ως εξής :

$$\mathrm{STx} = S_{slots}(i) \cdot \frac{(1 - P(drop \mid s = i)) \cdot p^i}{1 - p_{drop}} \qquad (4.41)$$

Όπου :

- $p_{drop}$ : Πιθανότητα το πακέτο να απορριφθεί

- $p^i$ : Η πιθανότητα που έχει ένα πακέτο να συγκρουστεί *i* φορές και να φτάσει στο στάδιο *i*
- P(drop|s=i) : Πιθανότητα που έχει ένα πακέτο που βρίσκεται στο stage *i* να απορριφθεί
- $S_{slots}(i)$ : Το σύνολο των χρονοθυρίδων που χρησιμοποιήθηκαν στο στάδιο *i*

Ο μέσος αριθμός των χρονοθυρίδων είναι το άθροισμα των χρονοθυρίδων για όλα τα στάδια :

$$\mathrm{E[STx]} = \sum_{i=0}^{R} \frac{S_{slots}(i) \cdot (1 - P(drop \mid s = i)) \cdot p^i}{1 - p_{drop}} \tag{4.42}$$

Από το Μαρκοβιανό μοντέλο της ενότητας 4.3.1, παρατηρούμε ότι ένα πακέτο μπορεί να απορριφθεί μόνο εάν από την κατάσταση {R} συγκρουστεί [36][33]. Η πιθανότητα απόρριψης ενός πακέτου $p_{drop}$ ορίζεται ως η πιθανότητα που έχει το πακέτο να απορριφθεί όταν φτάσει το μέγιστο όριο επαναμεταδόσεων (στάδιο R) και ισούται με:

$$\mathrm{p_{drop}} = \mathrm{p}^{\mathrm{R+1}} \tag{4.43}$$

Το πακέτο απορρίπτεται ουσιαστικά αφού έχει συγκρουστεί R+1 φορές, δηλαδή φτάνει στο τελευταίο στάδιο οπισθοχώρησης και συγκρούεται για τελευταία φορά. Σύμφωνα με αυτό τον ορισμό η πιθανότητα που έχει ένα πακέτο να μην απορριφθεί ισούται με :

$$1 - \mathrm{p_{drop}} = 1 - \mathrm{p}^{\mathrm{R+1}} \tag{4.44}$$

Η πιθανότητα αυτή αναφέρεται γενικά σε ένα πακέτο και είναι ανεξάρτητη από το στάδιο στο οποίο βρίσκεται το πακέτο αυτό. Επίσης για να μεταδωθούν τα υπόλοιπα πακέτα πρέπει πρώτα να ολοκληρωθεί η διαδικασία για το πρώτο πακέτο της ουράς αναμονής (με επιτυχή ή αποτυχημένη μετάδοση), άρα η πιθανότητα $p_{drop}$ εκφράζει την χειρότερη περίπτωση που θα περιμένει το επόμενο πακέτο που βρίσκεται στην ουρά αναμονής.

Ένα πακέτο που βρίσκεται στο στάδιο *i* θα απορριφθεί εάν φτάσει μέχρι το τελευταίο στάδιο R (συγκρουστεί R-i φορές) και συγκρουστεί και κατά την τελευταία προσπάθεια μετάδοσης. Η δεσμευμένη πιθανότητα *P(drop|s=i)* είναι η πιθανότητα απόρριψης ενός πακέτου δεδομένου ότι βρίσκεται στο στάδιο *i* και ισούται με :

$$\mathrm{P(drop \mid s = i) = p^{R+1-i}} \tag{4.45}$$

Η πιθανότητα ένα πακέτο που βρίσκεται στο στάδιο i να μην απορριφθεί είναι :

$$\mathrm{1 - P(drop \mid s = i)} \tag{4.46}$$

Για τον υπολογισμό των χρονοθυρίδων που δαπανήθηκαν σε ένα στάδιο θα χρησιμοποιήσουμε την σχέση που υπολογίσαμε στην προηγούμενη ενότητα 4.2.2. Όπως έχει αναφερθεί το πλήθος τον χρονοθυρίδων που απαιτούνται για να γίνει μια προσπάθεια μετάδοσης είναι $E[b_i]$ και για να γίνει η μετάδοση απαιτείται άλλη μία χρονοθυρίδα, άρα έχουμε :

$$\mathrm{S_{slots}(i) = 1 + E[b_i] = 1 + \frac{1}{a} \cdot \frac{W_i - 1}{2} = \frac{W_i - 1 + 2 \cdot a}{2 \cdot a}} \tag{4.47}$$

Στο σημείο αυτό μπορούμε να προσδιορίσουμε τον μέσο αριθμός των χρονοθυρίδων επιτυχούς μετάδοσης. Στην σχέση (4.42) αντικαθιστούμε τις (4.44) και (4.47) :

$$\mathrm{E[STx]} = \sum_{i=0}^{R} \frac{S_{slots}(i) \cdot (1 - P(drop \mid s = i)) \cdot p^i}{1 - p_{drop}} = \sum_{i=0}^{R} \frac{\frac{W_i - 1 + 2 \cdot a}{2 \cdot a} \cdot (1 - p^{R+1-i}) \cdot p^i}{1 - p^{R+1}} \tag{4.48}$$

Στο σημείο αυτό μπορούμε να προσδιορίσουμε την μέση καθυστέρηση *E[D]* η οποία δίδεται από την σχέση :

$$\mathrm{E[D] = E[STx] \cdot E[slot]} = \left( \sum_{i=0}^{R} \frac{(W_i - 1 + 2 \cdot a) \cdot (1 - p^{R+1-i}) \cdot p^i}{(2 \cdot a) \cdot (1 - p^{R+1})} \right) \cdot \mathrm{E[slot]} \tag{4.49}$$

Η παραπάνω σχέση της μέσης καθυστέρησης επιτυχούς μετάδοσης πακέτων λαμβάνει υπ' όψη μόνο τα πακέτα που έχουν παραληφθεί σωστά, δηλαδή τα πακέτα που δεν απορρίπτονται.

## *4.5 Πιστοποίηση μονοδιάστατου μοντέλου*

Για την πιστοποίηση του μονοδιάστατου Μαρκοβιανού μοντέλου που αναλύθηκε στην προηγούμενη ενότητα χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο προσομοίωσης που αναπτύχθηκε σε MATLAB. Η πιστοποίηση έγινε συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του αναλυτικού μοντέλου με τα αποτελέσματα του μοντέλου προσομοίωσης.

Αρχικά το μονοδιάστατο μοντέλο πιστοποιείται με τον υπολογισμό της ρυθμοαπόδοσης κορεσμού σε σχέση με την αύξηση του πλήθους των σταθμών του δικτύου. Στη συνέχεια το μοντέλο πιστοποιείται για την μέση καθυστέρηση επιτυχούς μετάδοση πακέτων. Οι παράμετροι για την πιστοποίηση του μοντέλου περιγράφονται στο παρακάτω πίνακα.

**Πίνακας 9 - Παράμετροι πειραμάτων φυσικού επιπέδου (μονοδιάστατο μοντέλο)**

| Χαρακτηριστικό | Τιμή |
|---|---|
| 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 | 1 Mbit/s |
| Propagation Delay | 1 μs |
| Slot time | 20 μs |
| SIFS | 10 μs |
| DIFS | 50 μs |

Οι τιμές του παραπάνω πίνακα αφορούν το φυσικό επίπεδο και καθορίζονται από το πρότυπο 802.11 για το direct sequence spread spectrum (DSSS) Φυσικό επίπεδο. Οι παράμετροι για το υποεπίπεδο MAC είναι :

**Πίνακας 10 - Παράμετροι πειραμάτων υποεπιπέδου MAC (μονοδιάστατο μοντέλο)**

| Χαρακτηριστικό | Τιμή |
|---|---|
| Ελάχιστο παράθυρο διεκδίκησης, $CW_{min}$ | 32 |
| Μέγιστο παράθυρο διεκδίκησης, $CW_{max}$ | 1024 |
| Πλήθος επαναμεταδόσεων (SSRC), $m$ | 6 |

### *4.5.1 Υπολογισμός της ρυθμοαπόδοσης (μέθοδοι Βασική και RTS/CTS)*

Η σχέση (4.37) χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της πιθανότητας μετάδοσης. Για την πιστοποίηση του μοντέλου θεωρούμε ότι η πιθανότητα μείωσης, $\alpha$, του μετρητή οπισθοχώρησης είναι 1, οπότε η σχέση (4.37) μετασχηματίζεται ως εξής:

$$\tau = \frac{2}{\sum_{j=0}^{R}\left[p^{j}\cdot(W_j+1)\right]}\cdot\frac{(1-p^{R+1})}{(1-p)} \quad , j\in(0,R) \tag{4.50}$$

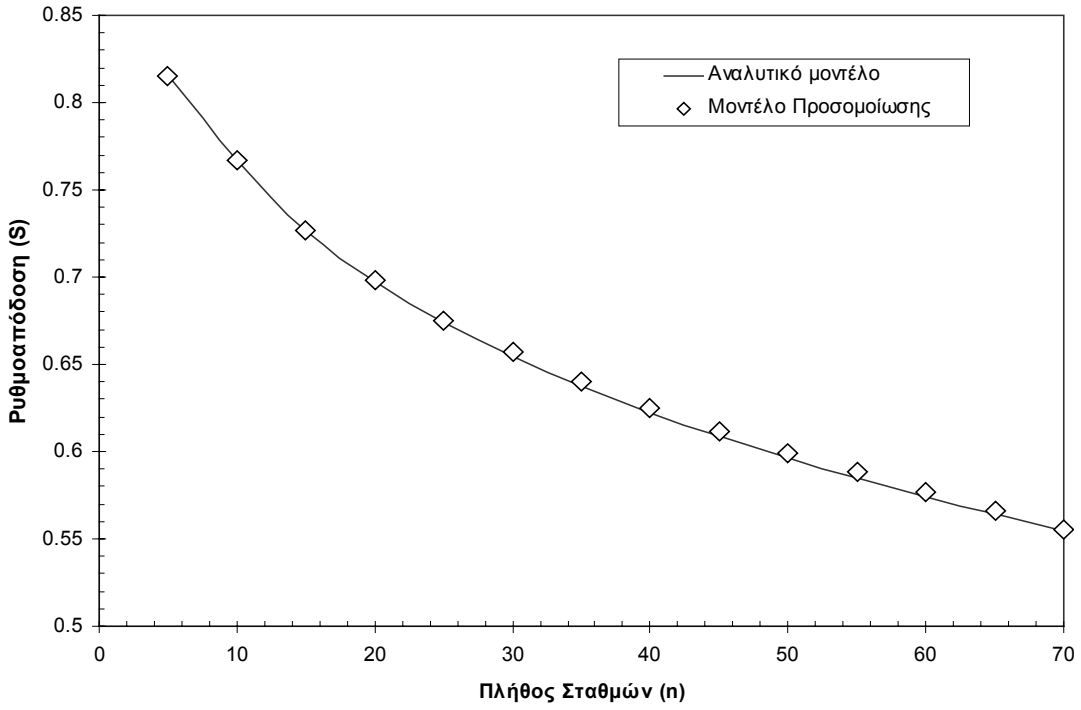
Η σχέση (4.50), εάν αντικαταστήσουμε σε αυτήν την σχέση υπολογισμού του παραθύρου διεκδίκησης (3.18), μετασχηματίζεται ως εξής :

$$\tau = \begin{cases} \dfrac{2(1-2p)(1-p^{m+1})}{\mathrm{W}\cdot(1-(2p)^{m+1})\cdot(1-p)+(1-2p)\cdot(1-p^{m+1})} & , m\le m' \\[2ex] \dfrac{2(1-2p)(1-p^{m+1})}{\mathrm{W}\cdot(1-(2p)^{m'+1})\cdot(1-p)+(1-2p)\cdot(1-p^{m+1})+W\cdot 2^{m'}\cdot p^{m'}\cdot(1-2p)\cdot(1-p^{m-m'})} & , m>m' \end{cases} \tag{4.51}$$

Για να υπολογιστεί η ρυθμοαπόδοση χρησιμοποιήθηκε η σχέση (3.15), που αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο για τα δύο μονοδιάστατα μοντέλα (Bianchi και Wu). Ενώ οι χρόνοι $T_s$ και $T_c$ υπολογίζονται από τις σχέσεις (3.28) και (3.29) αντίστοιχα, όπως αυτές υπολογίζονται για το δισδιάστατο μοντέλου του Wu.

Οι εξισώσεις του Μαρκοβιανού μοντέλου είναι ανεξάρτητες από τις παραμέτρους, γι' αυτό και δεν έχει σημασία ο καθορισμός διαφορετικών παραμέτρων

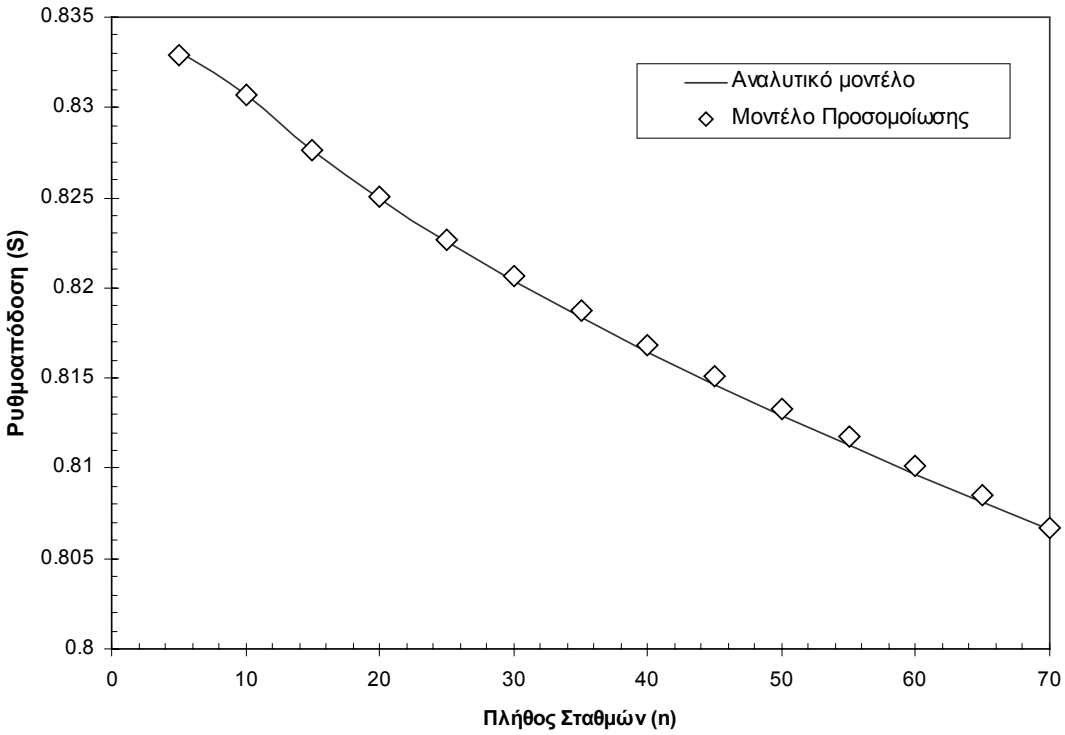
για το Φυσικό επίπεδο που θα επιλεγεί. Η παρακάτω εικόνα πιστοποιεί το αναλυτικό μοντέλο για την ρυθμοαπόδοση κορεσμού S της βασικής μεθόδου πρόσβασης.




**Εικόνα 37- Σύγκριση απόδοσης Βασικής μεθόδου**

Η ευθεία είναι τα αποτελέσματα του αναλυτικού μοντέλου, ενώ τα σημεία ('◊') είναι τα αποτελέσματα του μοντέλου προσομοίωσης. Τα σημεία του μοντέλου προσομοίωσης βρίσκονται πάνω στην ευθεία, γεγονός που πιστοποιεί την ακρίβεια και ορθότητα του αναλυτικού μοντέλου.

Η πιστοποίηση του μοντέλου για την μέθοδο πρόσβασης RTS/CTS είναι παρόμοια με αυτά της βασικής μεθόδου, τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται στην ακόλουθη εικόνα.




**Εικόνα 38 - Σύγκριση απόδοσης μεθόδου RTS/CTS**

Σημειώνεται ότι ο κάθετος άξονας της Εικόνα 38 είναι διαφορετικός από αυτόν της Εικόνα 37. Η κλίμακα αν και είναι μικρή το μοντέλο υπολογίζει την ρυθμοαπόδοση με μεγάλη ακρίβεια. Παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συγκλίνουν με τις τιμές του αναλυτικού μοντέλου, γεγονός που σημαίνει ότι και για αυτή την μέθοδο το αναλυτικό μοντέλο είναι ακριβές.

### *4.5.2 Υπολογισμός της μέσης καθυστέρησης επιτυχούς μετάδοσης*

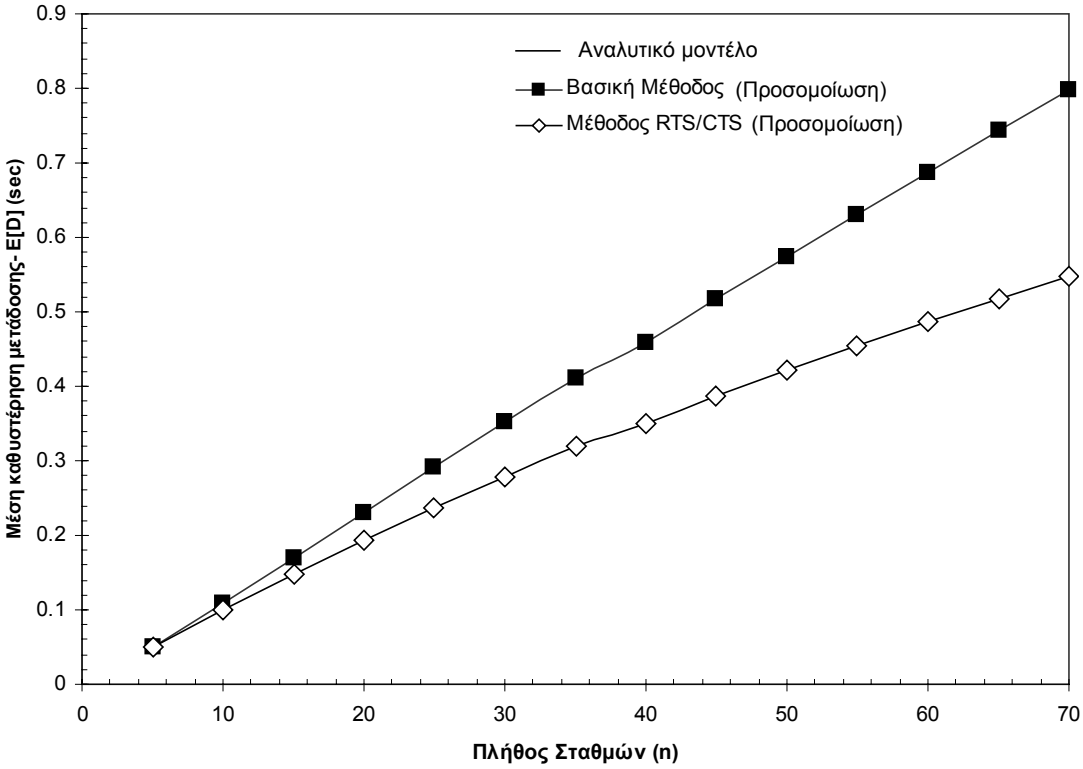
Η πιστοποίηση του αναλυτικού μοντέλου έγινε και για την μέση καθυστέρηση επιτυχούς μετάδοσης πακέτων. Για να υπολογίσουμε την μέση καθυστέρηση χρησιμοποιούμε την σχέση (4.49). Όπως για τον υπολογισμό της ρυθμοαπόδοσης, και εδώ θεωρούμε ότι η πιθανότητα μείωσης του μετρητή είναι 1, όποτε η (4.48) μετασχηματίζεται ως εξής :

$$\mathrm{E[STx]} = \sum_{i=0}^{R} \frac{\frac{W_i + 1}{2} \cdot (1 - p^{R+1-i}) \cdot p^i}{1 - p^{R+1}} \tag{4.53}$$

Εάν αντικαταστήσουμε το $W_i$ στην (4.53), σύμφωνα με την (3.18), έχουμε :

$$E[STx] = \begin{cases} \dfrac{W \cdot (1-(2p)^{m+1}) \cdot (1-p) + (1-2p)(1-p^{m+1})}{2 \cdot (1-2p) \cdot (1-p) \cdot (1-p^{m+1})} - \dfrac{p^{m+1}}{1-p^{m+1}} \cdot \sum_{i=0}^{m} \dfrac{Wi+1}{2} & , m \le m' \\ \dfrac{\mathrm{W} \cdot (1-(2p)^{m'+1}) \cdot (1-p) + (1-2p) \cdot (1-p^{m+1}) + W \cdot 2^{m'} \cdot p^{m'+1} \cdot (1-2p) \cdot (1-p^{m-m'})}{2 \cdot (1-2p) \cdot (1-p) \cdot (1-p^{m+1})} \\ - \dfrac{p^{m+1}}{1-p^{m+1}} \cdot \sum_{i=0}^{m} \dfrac{Wi+1}{2} & , m > m' \end{cases} \quad (4.54)$$

Για την πιστοποίηση του μοντέλου χρησιμοποιούμε τις ίδιες παραμέτρους που χρησιμοποιήσαμε στο υπολογισμό της ρυθμοαπόδοσης. Η πιστοποίηση του μοντέλου παρουσιάζεται στην ακόλουθη εικόνα.




**Εικόνα 39 - Μέση καθυστέρηση μετάδοσης πακέτων**

Με ευθεία γραμμή αναπαριστώνται οι τιμές του αναλυτικού μοντέλου, ενώ τα σημεία πάνω στις καμπύλες αναπαριστούν τα αποτελέσματα των μοντέλων προσομοίωσης για τις δύο μεθόδου πρόσβασης. Όπως παρατηρούμε τα αποτελέσματα του μοντέλου προσομοίωσης συμπίπτουν με αυτά του αναλυτικού μοντέλου, γεγονός που πιστοποιεί την ακρίβεια του Μαρκοβιανού μοντέλου και για την μέση καθυστέρηση επιτυχούς μετάδοσης πακέτων.

## *4.6 Συμπεράσματα*

Η ανάπτυξη ενός μονοδιάστατου Μαρκοβιανού μοντέλου παρέχει πλεονεκτήματα όσον αφορά την απλότητα και την ευελιξία που παρέχει. Το νέο μονοδιάστατο μοντέλο είναι πιο απλό καθώς διαχωρίζει πλήρως την διαδικασία ενημέρωσης του σταδίου οπισθοχώρησης από την ενημέρωση του μετρητή οπισθοχώρησης. Το μοντέλο που προτάθηκε πλεονεκτεί έναντι των δισδιάστατων μοντέλων επειδή υπολογίζει γρήγορα και πιο κατανοητά την πιθανότητα μετάδοσης, η οποία χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό την ρυθμοαπόδοσης κορεσμού. Επιπλέον το μοντέλο υπολογίζει την μέση καθυστέρηση επιτυχούς μετάδοσης πακέτων. Επίσης το μοντέλο εκτός από απλότητα υιοθετώντας κάποιες νέες παραδοχές, αναπαριστά πιο πιστά την λειτουργία που περιγράφεται από το πρότυπο, με αποτέλεσμα να είναι πιο ακριβές.

Το μοντέλο κάνει πιο ρεαλιστικές υποθέσεις σε σχέση με το αρχικό μοντέλο του Bianchi, στο οποίο δεν υπήρχε μέγιστο πλήθος επαναμεταδόσεων πακέτων, με αποτέλεσμα να υπερεκτιμάται η ρυθμοαπόδοση κορεσμού. Το γεγονός αυτό παρατηρήθηκε από το Wu, ο οποίος εισήγαγε την παράμετρο αυτή στο δισδιάστατο μοντέλο του. Το προτεινόμενο μονοδιάστατο μοντέλο χρησιμοποιεί την παράμετρο του μέγιστου πλήθους επαναμεταδόσεων, ώστε να εξάγει πιο ακριβή αποτελέσματα.

Μία άλλη υπόθεση που γίνεται και στα δύο δισδιάστατα μοντέλα, είναι ότι η μείωση του μετρητή οπισθοχώρησης γίνεται ανεξάρτητα με την κατάσταση του καναλιού. Δηλαδή ο μετρητής μειώνεται ακόμη και όταν το κανάλι είναι κατειλημμένο. Η υπόθεση αυτή δεν είναι συμβατή με το πρότυπο που καθορίζει ότι ο μετρητή πρέπει να σταματά όταν το κανάλι δεν ανιχνευτεί ως ανενεργό. Στο προτεινόμενο μονοδιάστατο μοντέλο υπάρχει πρόβλεψη για αυτή την παράμετρο η οποία εκφράζεται με γενικό τρόπο, γεγονός που το κάνει καλύτερο αφού είναι παραμετροποιήσιμο. Αυτό μας επιτρέπει να έχουμε ένα μοντέλο όπου μπορούν να υλοποιηθούν διαφορετικοί μηχανισμοί οπισθοχώρησης, χωρίς να χρειάζεται τροποποίηση του μαρκοβιανού μοντέλου και υπολογισμό των σχέσεων του εκ νέου. Το μειονέκτημα των δισδιάστατων μοντέλων είναι ότι για να συμπεριλάβουν κάποια αλλαγή, πρέπει να τροποποιηθούν.

Επιπρόσθετα η επιλογή της τιμής του παραθύρου διεκδίκησης ανά στάδιο είναι παραμετρική, με αποτέλεσμα να μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες κατανομές. Τα προαναφερόμενα δισδιάστατα μοντέλα υποθέτουν ότι η επιλογή των τιμών του παραθύρου διεκδίκησης γίνεται σύμφωνα με την ομοιόμορφη κατανομή. Διατηρώντας μια παραμετρική προσέγγιση θα μπορούσε να μελετηθεί η συμπεριφορά του μοντέλου χρησιμοποιώντας διαφορετικούς τρόπους επιλογής της τιμής του παραθύρου διεκδίκησης. Αυτό σημαίνει ότι οι τιμές για το παράθυρο διεκδίκησης εκτός από την ομοιόμορφη κατανομή, μπορούν να επιλεχθούν από οποιαδήποτε στατιστική κατανομή.

Το μονοδιάστατο Μαρκοβιανό μοντέλο εκτός από απλότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την μελέτη του προτύπου ανά στάδιο οπισθοχώρησης, εφόσον η παραμονή σε κάθε στάδιο εκφράζεται από διαφορετική κατάσταση στο μοντέλο. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι μπορούμε να παρατηρήσουμε την συμπεριφορά του μοντέλου ανά στάδιο και να έχουμε με αυτόν τον τρόπο περισσότερες λεπτομέρειες αναφορικά με την λειτουργία του.

# *Βιβλιογραφία*


[1] Pahlavan, Kaveh, Krishnamurthy Prashant, ”Principles Of Wireless Networks – A Unified Approach”, Prentice Hall, 2002.

[2] Gast, S. Matthew, «802.11 Wireless Networks–The Definitive Guide», O’Reilly & Associates, 2002.

[3] Douglas E. Comer, «Δίκτυα και Διαδίκτυα υπολογιστών », 3η έκδοση, Κλειδάριθμος, 2003

[4] Douglas E. Comer, «Διαδίκτυα με TCP/IP, Άρχες, Πρωτόκολλα και Αρχιτεκτονικές», 4η έκδοση, Κλειδάριθμος, 2001

[5] Α. Αλεξόπουλος, Γ. Λαγογιαννης, «Τηλεπικοινωνίες και Δίκτυα Υπολογιστών», 5η έκδοση, 1999

[6] Rob Flickenger, “Wireless Community Networks”, O’Reilly, 2002

[7] Rappaport Theodore, ‘Wireless Communications”, Prentice Hall, 2002

[8] Stojmenovic Ivan, “Handbook of Wireless Networks and Mobile computing”, John Wiley & Sons, 2002

[9] M. Shafi, S. Ogose, T. Hattori, “Wireless Communications in the 21st century”, Wiley-Interscience, 2002

[10] Martin Clark, “Wireless Access Networks”, John Wiley & Sons, 2000

[11] CISCO, “Cisco Networking Academy Program, CCNA 1 and 2”, 3rd ed, CISCO Press, 2003

[12] Brener Pablo,” Tutorial on 802.11 standard “, BreezeCom, 1997

[13] Plamen Nedeltchev, "Wireless Local Area Networks and the 802.11 Standard", White paper, 2001, (http://www.cisco.com/warp)

[14] J. Zyren and Al Petrick, “IEEE 802.11 Tutorial”, White Paper, 2001, (http://www.palowireless.com)

[15] 3Com, ‘‘IEEE 802.11b Wireless LANs’’, Technical Paper, (http://www.3com.com)

[16] "IEEE Standard for Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications", Nov. 1997. P802.11

[17] "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications - ANSI/IEEE Std 802.11", 1999 Edition [ISO/IEC 8802-11: 1999]

[18] IEEE 802.11b WG, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specification: High-speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band, Supplement to IEEE 802.11 Standard, IEEE, Sep. 1999.

[19] IEEE 802.11a WG, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specification: High-speed Physical Layer in the 5GHz Band, Sep. 1999.

[20] Th. Zahariadis, "Evolution of the Wireless PAN and LAN standards", Elsevier, Computer Standards & Interfaces 26 (2004) 175–185

[21] G. Bianchi, “IEEE 802.11—Saturation throughput analysis,” IEEE Commun. Lett., vol. 2, pp. 318–320, Dec. 1998.

[22] Giuseppe Bianchi, "Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function", IEEE Journal of Selected Areas in Telecommunications,Wireless series, Vol. 18, no. 3, March 2000, pp. 535-547

[23] Y. Xiao, “A Simple and Effective Priority Scheme for IEEE 802.11,” IEEE Communications Letters, Vol. 7, No. 2, Feb. 2003, pp. 70-72.

[24] H. Wu, Y. Peng, K. Long, S. Cheng, "A simple model of IEEE 802.11 wireless LAN", Proceedings of ICII 2001, pp.514-519, Oct. 2001

[25] Haitao Wu, Shiduan Cheng, Yong Peng, Keping Long, Jian Ma, "IEEE 802.11 Distributed Coordination Function(DCF): Analysis and Enhancement", International Conference on Communications (ICC), April 2002.

[26] Haitao Wu, Shiduan Cheng, Yong Peng, Keping Long, Jian Ma, "Performance of Reliable Transport Protocol over IEEE 802.11 Wireless LAN:Analysis and Enhancement", IEEE INFOCOM 2002

[27] H. S. Chhaya and S. Gupta, "Performance modeling of asynchronous data transfer methods of IEEE 802.11 MAC protocol", *WirelessNetworks*, vol. 3, pp. 217-234, 1997

[28] V. Vitsas,“Throughput analysis of linear backoff scheme in Wireless LANs", IEEE Elec.Letters, 2003, Vol. 39

[29] P. Chatzimisios, V. Vitsas and A. C. Boucouvalas, “IEEE 802.11 Packet Delay – A Finite Retry Limit Analysis”, Proc. of IEEE Global Telecommunications Conference (Globecom), vol. 2, pp. 950-954, 2003.

[30] V. Vitsas, A. C. Boucouvalas, "Performance analysis of the collision avoidance procedure of the advanced Infrared (Air) CSMA/CA Protocol for wireless LANs", ACM Wireless Networks, Vol. 9, No. 5, September 2003

[31] Vasileios Vitsas and Anthony C. Boucouvalas, "Optimization of IrDA IrLAP Link Access Protocol", in Proc. 3rd Conf. Telecommunications, Figueira da Foz, Portugal, Apr. 23–24, 2001, pp. 225–229.

[32] F.Cali, M.Conti, and E.Gregori, "Dynamic Tuning of the IEEE 802.11 Protocol to Achieve a Theoretical Throughput Limit", *IEEE Trans. Networking*, Vol. 8, No. 6, pp. 785-790, December 2000.

[33] P. Chatzimisios, V. Vitsas and A.C. Boucouvalas, "Throughput and delay analysis of IEEE 802.11 protocol", IEEE Globecom 2003, December 2003,San Francisco

[34] E. Ziouva, T. Antonakopoulos, "CSMA/CA performance under high traffic conditions: throughput and delay analysis", Elsevier, Computer Communications, Vol. 25, February 2002, pp. 313-321

[35] P. Barker,s, A. C. Boucouvalas and V. Vitsas, Performance modelling of the IrDA infrared wireless communications protocol, International Journal of Communications systems, 2000

[36] Yang Xiao, "Saturation Performance Metrics of the IEEE 802.11 MAC", Proc. of IEEE VTC 2003, Fall. 2003

[37] Z. Hadzi-Velkov and B, Spasenovski, "Saturation Throughput – Delay Analysis of IEEE 802.11 DCF in Fading Channel," *Proc. IEEE ICC'2003*, May, 2003.

[38] Y. Xiao and J. Rosdahl, "Throughput and Delay Limits of IEEE 802.11," IEEE Communications Letters, Vol. 6, No. 8, Aug. 2002, pp. 355-357.

[39] Y. Xiao and J. Rosdahl, "A Performance Analysis of IEEE 802.11a Wireless LAN," Proc. of SCI 2002, pp. 243-248.

[40] Zaki, A.N. El-Hadidi, M.T. ,"Throughput analysis of IEEE 802.11 DCF under finite load traffic", Communications and Signal Processing, vol. 3, pp. 535-538, 2004

[41] Ferre, P. Doufexi, A. Nix, A. Bull, D. ,"Throughput analysis of IEEE 802.11 and IEEE 802.11e MAC", Proc. IEEE WCNC 2004, March 2004

[42] Giuseppe Bianchi, Ilenia Tinnirello, "Remarks on IEEE 802.11 DCF performance analysis", 2004

[43] http://standards.ieee.org/wireless/

[44] http://www.weca.net

[45] http://www.wi-fi.org

[46] http://www.wlana.com

[47] http://www.hiperlan2.com