



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΔΟΣΗΣ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΕΥΡΕΙΑΣ ΖΩΝΗΣ ΒΑΣΙΣΜΕΝΑ ΣΤΑ ΠΡΟΤΥΠΑ IEEE 802.11

Η Διδακτορική Διατριβή
Παρουσιάστηκε Ενώπιον
του Διδακτικού Προσωπικού του
Πανεπιστημίου Αιγαίου

Σε Εκπλήρωση των Απαιτήσεων
για την Ανάδειξη σε Διδάκτορα

του
ΔΗΜΗΤΡΗ ΕΛ. ΒΑΣΣΗ

ΧΕΙΜΕΡΙΝΟ ΕΞΑΜΗΝΟ 2005

Η ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΔΙΔΑΣΚΟΝΤΩΝ ΕΓΚΡΙΝΕΙ ΤΗ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΤΟΥ ΔΗΜΗΤΡΗ ΕΛ. ΒΑΣΣΗ

Κάτσικας Σωκράτης, Επιβλέπων 11/10/2005
Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων

Κορμέντζας Γεώργιος, Μέλος Τριμελούς Επιτροπής
Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων

Στασινόπουλος Γεώργιος, Μέλος Τριμελούς Επιτροπής
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ, ΕΜΠ

Αναγνώστου Μιλτιάδης, Μέλος Επταμελούς Επιτροπής
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ, ΕΜΠ

Γκρίτζαλης Στέφανος, Μέλος Επταμελούς Επιτροπής
Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων

Ρούσκας Άγγελος, Μέλος Επταμελούς Επιτροπής
Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων

Βέργαδος Δημήτριος, Μέλος Επταμελούς Επιτροπής
Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ
ΧΕΙΜΕΡΙΝΟ ΕΞΑΜΗΝΟ 2005

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το 1999 η IEEE δημοσίευσε το πρότυπο 802.11 που καλύπτει το πρώτο και δεύτερο στρώμα του μοντέλου OSI για WLANs. Το συγκεκριμένο πρότυπο προσφέρει χαμηλό κόστος υλοποίησης, υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης ενώ υποστηρίζει μεταγωγή πακέτου, κινητικότητα και πολλαπλά κανάλια επικοινωνίας. Πάρα ταύτα, η απόσταση επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων ενός IEEE 802.11 WLAN είναι σχετικά μικρή, δεν υποστηρίζεται ποιότητα υπηρεσίας, ενώ η ασφάλεια επικοινωνίας δεν είναι εφάμιλλη με αυτή των ενσύρματων δικτύων.

Ανεξάρτητα από τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά του, το πρότυπο IEEE 802.11 έγινε ευρέως αποδεκτό εμπορικά και χρησιμοποιείται σήμερα σε μια πληθώρα από δίκτυα επικοινωνιών. Η εν λόγω ραγδαία εξάπλωσή του, ώθησε και ωθεί ένα μεγάλο μέρος της επιστημονικής κοινότητας σε ερευνητικές δραστηριότητες. Οι κυριότερες από αυτές αφορούν τη διαχείριση ενεργειακών και δικτυακών πόρων, την ασφάλεια επικοινωνίας και την ενοποίηση των WLANs με δίκτυα 3G. Η παρούσα διατριβή ασχολείται με τη διαχείριση δικτυακών πόρων. Οι επιμέρους ερευνητικές δραστηριότητες που παρατηρούνται στη συγκεκριμένη περιοχή είναι (α) αύξηση του ρυθμού μετάδοσης, (β) αξιολόγηση επίδοσης του πρωτοκόλλου πρόσβασης μέσου, (γ) υποστήριξη ποιότητας υπηρεσίας και (δ) εφαρμογή του προτύπου IEEE 802.11 σε δίκτυα ad hoc.

Έχοντας υπόψη τα παραπάνω ανοιχτά ερευνητικά θέματα, η παρούσα διατριβή, επιτελεί πολύπλευρη αξιολόγηση επίδοσης του IEEE 802.11, όπως αυτό εμφανίζεται μέσω των τελευταίων του επεκτάσεων στα στρώματα OSI, και προτείνει αποδοτικά σχήματα για την εφαρμογή του σε δημοφιλή δίκτυα ad hoc.

Από τη σκοπιά που το πρότυπο IEEE 802.11 εμφανίζεται σε κάθε στρώμα του μοντέλου OSI, σε πρώτο στάδιο μελετάται το φυσικό στρώμα του, όπου εστιάζεται η προσοχή γύρω από τη μελέτη του προτύπου IEEE 802.11g. Συγκεκριμένα, γίνεται μια παρουσίαση του IEEE 802.11g δίνοντας βάση στα καινοτομικά χαρακτηριστικά του και, εν συνεχεία, πραγματοποιείται αξιολόγηση επίδοσης μέσω εκτεταμένων σεναρίων προσομοίωσης σε πλατφόρμα που σχεδιάστηκε για το συγκεκριμένο σκοπό.

Μετά τη μελέτη του φυσικού στρώματος των δικτύων IEEE 802.11 περνάμε στη μελέτη του στρώματος πρόσβασης μέσου, όπου εστιάζουμε την προσοχή στο πρότυπο IEEE 802.11e για παροχή ποιότητας υπηρεσίας. Συγκεκριμένα, πραγματοποιείται αξιολόγηση επίδοσης του μηχανισμού πρόσβασης *Enhanced Distributed Coordinate Access - EDCA* σε συνθήκες πεπερασμένου φόρτου κίνησης. Η αξιολόγηση πραγματοποιείται μέσω αναλυτικού μοντέλου η ακρίβεια του οποίου επαληθεύεται μέσω προσομοίωσης.

Έχοντας ολοκληρώσει τη μελέτη γύρω από τα στρώματα OSI που καλύπτει το πρότυπο IEEE 802.11, μελετάμε το εν λόγω πρότυπο από τη σκοπιά που εφαρμόζεται σε δυο γενικές κατηγορίες δικτύων ad hoc: Τα δίκτυα αισθητήρων-συντονιστών (Wireless Sensor Actor Networks) και τα δίκτυα ad hoc με υποδομή (infrastructured ad hoc networks). Και για τις δυο περιπτώσεις προτείνονται αποδοτικά σχήματα επικοινωνίας πολλαπλών καναλιών για βελτίωση της επίδοσης των δικτύων. Τα σχήματα αξιολογούνται μέσω αναλυτικού μοντέλου που σχεδιάζεται για το συγκεκριμένο σκοπό και επαληθεύονται μέσω προσομοίωσης.

Η χρησιμότητα της παρούσας διατριβής έγκειται, αφ' ενός στην ανάλυση επίδοσης που πραγματοποιείται και, αφ' εταίρου, στα σχήματα επικοινωνίας που προτείνονται. Μέσω της συγκεκριμένης διατριβής προκύπτουν θέματα για μελλοντική εργασία, όπως η βελτίωση και επέκταση των αναλυτικών μοντέλων, η αξιολόγηση επίδοσης μεταγενέστερων προτύπων της οικογένειας IEEE 802.11 και η επέκταση των προτεινόμενων σχημάτων.

ABSTRACT

In 1999, IEEE published the 802.11 standard that covers the first two layers of the OSI model for Wireless LANs. The standard offers low implementation cost, high data rates, while it supports packet switched services, mobility and multiple wireless channels. However, the node's transmission range in an IEEE 802.11 WLAN is relatively small, there is no support of QoS and the security is not as high as in wired networks.

Apart from the advantages and disadvantages mentioned above, IEEE 802.11 is widely accepted commercially. This rapid evolvement pushed the researchers in various activities, concerning the standard. The most important of them concern the energy and network resource allocation, the security, and the integration of WLANs with the 3G networks. The present thesis deals with the network resource allocation. In the specific area, the following research activities exist: (a) increase of the data rates, (b) performance evaluation of the MAC layer, (c) QoS support and (d) implementation of the standard in ad hoc networks.

Considering the above research issues, the thesis performs a performance evaluation of the IEEE 802.11 standard, as it appears in the OSI model through its extensions, and proposes efficient schemes for implementation of the standard in popular ad hoc networks.

From the side that the standard appears in the OSI model, firstly, we study the IEEE 802.11 physical layer, where we focus on the IEEE 802.11g standard. Specifically, a presentation of IEEE 802.11g is performed, emphasizing on its novel characteristics. Secondly, a performance evaluation is performed in a simulation platform, developed for this purpose.

After studying the physical layer, we come to the MAC layer, where we concentrate on the forthcoming IEEE 802.11e standard for QoS provision. Specifically, we perform a performance evaluation of the Enhanced Distributed Channel Access (EDCA) function, which is the fundamental access mechanism of IEEE 802.11e. The performance evaluation is performed through an analytical model, the accuracy of which is validated through simulation. Unlike most of the other research works, which derive the saturation throughput, our model derives the packet delay in finite load conditions.

After the study that concerns the way IEEE 802.11 appears in the OSI model, we study the standard from the way that is implemented in two types of ad hoc networks. The first one is Wireless Sensor Actor networks (WSANs). For this case, we first propose a single channel scheme and a multi channel one. For each scheme, we design an analytical model for its evaluation, and validate it through simulation. Afterwards, we compare the two schemes through their analytical models.

The second type of ad hoc networks we examine is the infrastructured ad hoc networks. For this case, we propose a multi-channel scheme in order to improve the network performance. We first build an analytical model for the single-channel case and we validate it through simulation. Afterwards, we propose our model and we compare it with two other heuristic multi channel schemes. The comparison is performed through the analytical model, that we extend it in order to fit in each scheme's characteristics.

The contribution of the present thesis in research concerning IEEE 802.11 lies in the analytical models provided and in the communication schemes proposed. Additionally, lots of issues for future work arise through this thesis. Some of them are the improvement and enhancement of the analytical models, the performance evaluation of future IEEE 802.11 standards and the enhancement of the proposed communication schemes.

Dimitris Vassis
Department of Information and Communication Systems Engineering
UNIVERSITY OF THE AEGEAN
©2005

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν στη διεκπεραίωση της παρούσας διατριβής. Ξεχωριστά ευχαριστώ:

- Τον Λέκτορα του Πανεπιστημίου Αιγαίου κ. Γεώργιο Κορμέντζα για την αδιάκοπη καθοδήγηση καθ' όλη την εκπόνηση της διατριβής.
- Τον Καθηγητή του ΕΜΠ κ. Γεώργιο Στασινόπουλο για τη συνεχή υποστήριξη που παρείχε.
- Τον Πρύτανη του Πανεπιστημίου Αιγαίου κ. Σωκράτη Κάτσικα που δέχτηκε να εκπονήσω τη διδακτορική μου διατριβή στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων.
- Τα υπόλοιπα μέλη της επταμελούς επιτροπής, κ. Μιλτιάδη Αναγνώστου, κ. Στέφανο Γκρίτζαλη, κ. Άγγελο Ρούσκα και κ. Δημήτριο Βέργαδο για τον πολύτιμο χρόνο που διέθεσαν στην αξιολόγηση της διατριβής.

Πάνω απ' όλα, θα ήθελα να απευθύνω τις θερμότερες ευχαριστίες στους γονείς μου Λευτέρη και Κωνσταντίνα, στην αδερφή μου Μυρτώ και στη φίλη μου Σεβαστή, για την υπομονή τους και την ανεκτίμητη ψυχολογική στήριξη που προσέφεραν.

Πίνακας Περιεχομένων

Ορολογία	1
1 Εισαγωγή	3
1.1 Τα ασύρματα τοπικά δίκτυα IEEE 802.11	3
1.2 Ερευνητικές δραστηριότητες σχετικές με το πρότυπο IEEE 802.11	7
1.3 Η συμβολή της παρούσας διατριβής στην έρευνα που αφορά το πρότυπο IEEE 802.11	9
1.4 Δομή της διατριβής	10
Βιβλιογραφικές Αναφορές	11
2 Αναλυτική Περιγραφή του Τρόπου Λειτουργίας των Δικτύων IEEE 802.11	13
2.1 Εισαγωγή	13
2.2 Η οικογένεια προτύπων IEEE 802.11	13
2.3 Η δομή των δικτύων IEEE 802.11	14
2.4 Το φυσικό στρώμα του προτύπου IEEE 802.11	15
2.4.1 Το φυσικό στρώμα IR	15
2.4.2 Το φυσικό στρώμα FHSS	17
2.4.3 Το φυσικό στρώμα DSSS	17
2.4.4 Το φυσικό στρώμα του IEEE 802.11b	18
2.4.5 Το φυσικό στρώμα του IEEE 802.11a	18
2.4.6 Η δομή του πακέτου φυσικού στρώματος IEEE 802.11	19
2.5 Το στρώμα MAC στο πρότυπο IEEE 802.11	20
2.5.1 Distributed Coordination Function (DCF)	20
2.5.2 Point Coordination Function (PCF)	26
2.5.3 Enhanced Distributed Channel Access (EDCA)	26
2.6 Προβλήματα επικοινωνίας στα δίκτυα IEEE 802.11	28
2.6.1 Το πρόβλημα του κρυφού κόμβου	28
2.6.2 Το πρόβλημα του εκτεθειμένου κόμβου	29
Βιβλιογραφικές Αναφορές	30
3 Το φυσικό στρώμα του προτύπου IEEE 802.11 - Αξιολόγηση Επίδοσης του Προτύπου IEEE 802.11g	31

3.1	Εισαγωγή	31
3.2	Καινοτομικά χαρακτηριστικά του προτύπου IEEE 802.11g	32
3.2.1	Υποστήριξη τεσσάρων διαφορετικών τύπων φυσικού στρώματος	33
3.2.2	Υποχρεωτική υποστήριξη του short preamble	33
3.2.3	Η παράμετρος δικτύου ERP	34
3.2.4	Θέματα διαλειτουργίας και μηχανισμοί προστασίας	35
3.2.5	Ο μηχανισμός προστασίας CTS-to-Self	37
3.3	Αξιολόγηση επίδοσης του προτύπου IEEE 802.11g	38
3.3.1	Αξιολόγηση επίδοσης του φυσικού στρώματος ERP-OFDM	39
3.3.2	Αξιολόγηση επίδοσης των φυσικών στρωμάτων ERP-DSSS και DSSS-OFDM	39
3.3.3	Αξιολόγηση επίδοσης του μηχανισμού προστασίας CTS-to-Self	41
3.3.4	Αξιολόγηση της δυνατότητας μετάδοσης με πολλαπλούς ρυθμούς	42
3.4	Σύνοψη	44
	Βιβλιογραφικές Αναφορές	45
4	Ποιότητα Υπηρεσίας στο Πρότυπο IEEE 802.11 - Ανάλυση Επίδοσης της Μεθόδου Πρόσβασης IEEE 802.11e EDCA σε Συνθήκες Πεπερασμένου Φόρτου Κίνησης	47
4.1	Εισαγωγή	47
4.2	Αναλυτικό μοντέλο για την καθυστέρηση πακέτου	50
4.2.1	Καθυστέρηση Μετάδοσης	51
4.2.2	Καθυστέρηση Αναμονής	57
4.2.3	Συνολική καθυστέρηση πακέτου	58
4.3	Επαλήθευση του προτεινόμενου μοντέλου	58
4.4	Αξιολόγηση επίδοσης της μεθόδου EDCA	61
4.5	Σύνοψη	65
	Βιβλιογραφικές Αναφορές	67
5	Δίκτυα IEEE 802.11 Ακαθόριστης Διασύνδεσης - Σχεδιασμός και Ανάλυση Επίδοσης Σχημάτων Επικοινωνίας για Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων-Συντονιστών	71
5.1	Εισαγωγή	71
5.2	Σχεδιασμός και μοντελοποίηση σχήματος επικοινωνίας ενός καναλιού	73
5.2.1	Υπολογισμός χρησιμοποίησης	75
5.2.2	Υπολογισμός καθυστέρησης πακέτου	78
5.2.3	Επαλήθευση του αναλυτικού μοντέλου	80
5.3	Σχεδιασμός και μοντελοποίηση σχήματος επικοινωνίας πολλαπλών καναλιών	82
5.3.1	Υπολογισμός χρησιμοποίησης και καθυστέρησης πακέτου	84
5.3.2	Επαλήθευση του αναλυτικού μοντέλου	84
5.4	Αξιολόγηση επίδοσης των δυο προτεινόμενων σχημάτων	85
5.5	Σύνοψη	90

Βιβλιογραφικές Αναφορές	91
6 Δίκτυα IEEE 802.11 Ακαθόριστης Διασύνδεσης - Σχεδιασμός και Ανάλυση Επίδοσης Σχημάτων Επικοινωνίας για Δίκτυα Ακαθόριστης Διασύνδεσης με Υποδομή	93
6.1 Εισαγωγή	93
6.2 Μοντελοποίηση απλού δικτύου ad hoc IEEE 802.11 με υποδομή	95
6.2.1 Μοντέλο κίνησης	97
6.2.2 Μοντέλο δικτύου	98
6.2.3 Υπολογισμός των εμβαδών S_I , S_M και S_E	99
6.2.4 Επαλήθευση του αναλυτικού μοντέλου	102
6.3 MAWA: Το προτεινόμενο σχήμα επικοινωνίας πολλαπλών καναλιών	105
6.4 Σύγκριση του προτεινόμενου σχήματος με άλλα σχήματα επικοινωνίας πολλαπλών καναλιών	106
6.4.1 Παρουσίαση και μοντελοποίηση των σχημάτων επικοινωνίας πολλαπλών καναλιών	107
6.4.2 Συγκριτική αξιολόγηση επίδοσης	108
6.5 Σύνοψη	112
Βιβλιογραφικές Αναφορές	113
7 Συμπεράσματα και Θέματα για Μελλοντική Έρευνα	115
7.1 Εισαγωγή	115
7.2 Εξέλιξη του IEEE 802.11 στο φυσικό στρώμα	115
7.2.1 Συμπεράσματα	115
7.2.2 Μελλοντική έρευνα	116
7.3 Εξέλιξη του IEEE 802.11 στο στρώμα MAC	116
7.3.1 Συμπεράσματα	117
7.3.2 Μελλοντική έρευνα	117
7.4 Εφαρμογή του IEEE 802.11 σε WSNs	118
7.4.1 Συμπεράσματα	118
7.4.2 Μελλοντική έρευνα	119
7.5 Εφαρμογή του IEEE 802.11 σε δίκτυα ad hoc με υποδομή	119
7.5.1 Συμπεράσματα	120
7.5.2 Μελλοντική έρευνα	120
A Παρουσίαση των Εργαλείων Προσομοίωσης που Χρησιμοποιήθηκαν στη Διατριβή	121
A.1 Η πλατφόρμα προσομοίωσης OPNET	121
A.2 Η πλατφόρμα προσομοίωσης Pythagor	123
Βιβλιογραφικές Αναφορές	123

Κατάλογος Πινάκων

2.1	Γενικές παράμετροι που αφορούν το φυσικό στρώμα IEEE 802.11	19
2.2	Τιμές παραμέτρων του προτύπου IEEE 802.11	25
2.3	Τιμές παραμέτρων των προτύπων IEEE 802.11a/b/g	25
2.4	Αντιστοίχιση μεταξύ priority και access category για ένα πακέτο	27
3.1	Παράμετροι για τους τέσσερις τύπους φυσικού στρώματος του προτύπου IEEE 802.11g	34
3.2	Παράμετροι φυσικού στρώματος για διαφορετικούς συνδυασμούς επικοινωνίας μεταξύ δυο κόμβων	36
3.3	Παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση	39
4.1	Παράμετροι προσομοίωσης για την επαλήθευση του μοντέλου	59
4.2	Επαλήθευση μοντέλου καθυστέρησης μετάδοσης - Σενάριο 1	60
4.3	Επαλήθευση μοντέλου καθυστέρησης μετάδοσης - Σενάριο 2	60
4.4	Επαλήθευση μοντέλου καθυστέρησης αναμονής - Σενάριο 1	60
4.5	Επαλήθευση μοντέλου καθυστέρησης αναμονής - Σενάριο 2	60
5.1	Παράμετροι για την επαλήθευση του μοντέλου ενός καναλιού	82
5.2	Επαλήθευση του μέτρου της καθυστέρησης μετάδοσης - Επικοινωνία με ένα κανάλι . . .	82
5.3	Επαλήθευση του μέτρου της καθυστέρησης μετάδοσης - Κανάλι C_s	85
5.4	Επαλήθευση του μέτρου της καθυστέρησης μετάδοσης - Κανάλι C_m	85
5.5	Παράμετροι για την επαλήθευση του μοντέλου ενός καναλιού	87
6.1	Προσεγγιστικές μέθοδοι για τον υπολογισμό των εμβαδών	102
6.2	Ακριβείς τιμές των εμβαδών	102
6.3	Παράμετροι για την επαλήθευση του μοντέλου ενός καναλιού	103
6.4	Επαλήθευση του μέτρου της καθυστέρησης ανόδου - Σενάριο 1	104
6.5	Επαλήθευση του μέτρου της καθυστέρησης ανόδου - Σενάριο 2	104
6.6	Επαλήθευση του μέτρου της καθυστέρησης καθόδου - Σενάριο 1	104
6.7	Επαλήθευση του μέτρου της καθυστέρησης καθόδου - Σενάριο 2	104
6.8	Παράμετροι για την αξιολόγηση επίδοσης του σχήματος MAWA	109

Κατάλογος Σχημάτων

1.1	Παραδείγματα δικτύων IEEE 802.11	6
1.2	Τομείς ερευνητικών δραστηριοτήτων σχετικά με το πρότυπο IEEE 802.11	7
2.1	Εμπορικά διαθέσιμα προϊόντα για IEEE 802.11 WLANs	14
2.2	Τρόποι διασύνδεσης κόμβων στα δίκτυα IEEE 802.11	16
2.3	Η δομή του πακέτου PPDU στο πρότυπο IEEE 802.11	19
2.4	Ο βασικός μηχανισμός πρόσβασης στο πρότυπο IEEE 802.11	23
2.5	Ο μηχανισμός πρόσβασης RTS/CTS στο πρότυπο IEEE 802.11	23
2.6	Αλληλουχία πλαισίων κατά τη μετάδοση με το βασικό μηχανισμό και με RTS/CTS . . .	24
2.7	Τρόπος πρόσβασης με DCF και EDCA	27
2.8	Το πρόβλημα του κρυφού κόμβου	28
2.9	Η λύση του προβλήματος κρυφού κόμβου μέσω RTS/CTS	29
2.10	Το πρόβλημα του εκτεθειμένου κόμβου	29
3.1	Το πακέτο PPDU τύπου IEEE 802.11	34
3.2	Αλληλουχία πλαισίων κατά τη μετάδοση με CTS-to-Self	37
3.3	Η διαδικασία ανταλλαγής μηνυμάτων μέσω CTS-to-Self	38
3.4	Χωρητικότητα καναλιού για ρυθμούς ERP-OFDM	40
3.5	Χωρητικότητα καναλιού για ρυθμούς ERP-DSSS / DSSS-OFDM	40
3.6	Σύγκριση των μηχανισμών RTS/CTS και CTS-to-Self με απουσία κρυφών κόμβων . . .	41
3.7	Σύγκριση των μηχανισμών RTS/CTS και CTS-to-Self με ύπαρξη κρυφών κόμβων . . .	42
3.8	Διέλευση του κάθε κόμβου σε σχέση με τον αριθμό των κόμβων που μεταδίδουν με 54Mb/s	43
4.1	Γραφική απεικόνιση των μέτρων καθυστέρησης πακέτου	50
4.2	Μαρκοβιανή αλυσίδα μοντελοποίησης του backoff counter	54
4.3	Συσχέτιση μεταξύ Cb και Tm	57
4.4	Καθυστέρηση μετάδοσης (Σενάριο 1)	61
4.5	Καθυστέρηση μετάδοσης (Σενάριο 2)	62
4.6	Καθυστέρηση αναμονής (Σενάριο 1)	63
4.7	Καθυστέρηση αναμονής (Σενάριο 2)	63
4.8	Καθυστέρηση μετάδοσης (Σενάριο 3)	64

4.9	Καθυστέρηση αναμονής (Σενάριο 3)	64
4.10	Καθυστέρηση αναμονής στον κορεσμό	66
5.1	Τυπικό δίκτυο αισθητήρων-συντονιστών (WSAN)	73
5.2	Μετάδοση πακέτων στο ασύρματο μέσο	76
5.3	Σχηματιζόμενες κυφές συντονιστών στο δίκτυο	77
5.4	Επικοινωνία με χρήση πολλαπλών καναλιών	83
5.5	Καθυστέρηση στο σύστημα σε σχέση με την κίνηση λ - Επικοινωνία ενός καναλιού	86
5.6	Καθυστέρηση μετάδοσης σε σχέση με την κίνηση λ - Σενάριο 1	87
5.7	Καθυστέρηση στο σύστημα σε σχέση με την κίνηση λ - Σενάριο 1	88
5.8	Καθυστέρηση μετάδοσης σε σχέση με την κίνηση λ - Σενάριο 2	89
5.9	Καθυστέρηση στο σύστημα σε σχέση με την κίνηση λ - Σενάριο 2	90
6.1	Απλό δίκτυο IEEE 802.11 ad hoc με υποδομή	94
6.2	Απλό δίκτυο IEEE 802.11 ad hoc με υποδομή	96
6.3	Τριγωνομετρική ανάλυση της τοπολογίας του δικτύου	100
6.4	Τριγωνομετρική ανάλυση της τοπολογίας του δικτύου για την πρώτη ζώνη	101
6.5	Το προτεινόμενο σχήμα MAWA	105
6.6	Καθυστέρηση καθόδου σε σχέση με την κίνηση καθόδου λ_d - Δίκτυο roof top	109
6.7	Καθυστέρηση ανόδου σε σχέση με την κίνηση καθόδου λ_d - Δίκτυο roof top	110
6.8	Καθυστέρηση καθόδου σε σχέση με την κίνηση ανόδου λ_u - Δίκτυο αισθητήρων	111
6.9	Καθυστέρηση ανόδου σε σχέση με την κίνηση ανόδου λ_u - Δίκτυο αισθητήρων	111
A.1	Διαδικασία σχεδιασμού προσομοίωσης στο OPNET	122
A.2	Γραφική παράσταση της καθυστέρησης μετάδοσης σε σχέση με το χρόνο στο OPNET	123
A.3	Δημιουργία σεναρίων προσομοίωσης μέσω του Pythagor	124

Ορολογία

3G	Δίκτυα κινητής τηλεφωνίας τρίτης γενιάς
Access Point	Δικτυακή συσκευή για την πρόσβαση των χρηστών σε WLANs
AC (Access Category)	Access Category - Κατηγορία Προτεραιότητας
ACK	Acknowledgement - Πακέτο επιβεβαίωσης
Actor	Συντονιστής
Ad-Hoc	Δίκτυα ακαθόριστης διασύνδεσης
Backoff counter	Μετρητής οπισθοδρόμησης
Barker code	Κώδικας Barker - Τεχνική διαμόρφωσης
Beacon frame	Πλαίσιο που περιέχει πληροφορίες για ένα WLAN
BSS	Basic Service Set - Τρόπος διασύνδεσης σε WLAN
CCK	Complementary Code Keying - Τεχνική κωδικοποίησης
Chipping sequence	βλ. Barker code
Contention Window	Παράθυρο ανταγωνισμού - Παράμετρος του IEEE 802.11
CSMA	Carrier Sense Multiple Access
CTS	Clear To Send - Πλαίσιο ελέγχου στο IEEE 802.11
CTS-to-Self	Πλαίσιο του IEEE 802.11 παρόμοιο με το CTS
DCF	Distributed Coordination Function - Μηχανισμός πρόσβασης του IEEE 802.11
Diffused infrared	Διάχυτο υπέρυθρο σήμα
Download traffic	Κίνηση καθόδου
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum - Διάχυση φάσματος με ευθεία ακολουθία
EDCA	Enhanced Distributed Channel Access - Μηχανισμός πρόσβασης του IEEE 802.11e
ERP	Extended Rate Physical - Όρος πολλαπλών εννοιών στο IEEE 802.11g
ESS	Extended Service Set - Τρόπος διασύνδεσης σε WLAN
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum - Διάχυση φάσματος με μεταπήδηση συχνότητας
FSK	Frequency Shift Keying - Τεχνική κωδικοποίησης
HCA	Hybrid Channel Access - Μέθοδος πρόσβασης του IEEE 802.11e
Header	Επικεφαλίδα πακέτου
IBSS	Independent Basic Service Set - Τρόπος διασύνδεσης σε WLAN
Infrared	Υπέρυθρο σήμα
ISM	Industry Science Medical - Μικροκυματική ζώνη
Multi-channel	Επικοινωνία με χρήση πολλαπλών καναλιών
Multi-hop	Επικοινωνία πολλαπλών βημάτων
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing - Τεχνική διαμόρφωσης
Overhead	Πλεόνασμα πακέτου
Payload	Ωφέλιμο μέρος πακέτου
PBCC	Packet Binary Convolutional Coding - Τεχνική κωδικοποίησης

PCF	Point Coordination Function - Μηχανισμός πρόσβασης του IEEE 802.11
Peer to peer	Επικοινωνία μεταξύ ομοίων κόμβων
PLCP header	Επικεφαλίδα φυσικού στρώματος
PLCP preamble	Προοίμιο φυσικού στρώματος
Preamble	Βλ. PLCP preamble
PSK	Phase Shift Keying - Τεχνική κωδικοποίησης
Roof top	Δίκτυα διασύνδεσης οικιών μέσω κεραιών οροφής
RTS	Request To Send - Πλαίσιο ελέγχου του IEEE 802.11
Sensor	Αισθητήρας
Slot	Χρονοθυρίδα
Spread spectrum	Διάχυση φάσματος - Τεχνική διαμόρφωσης
Time slot	Βλ. slot
Throughput	Διέλευση
U-NII	Unlicensed National Information Infrastructure - Μικροκυματική ζώνη
Upload traffic	Κίνηση ανόδου
WLAN	Ασύρματο τοπικό δίκτυο
WSAN	Ασύρματο δίκτυο αισθητήρων/συντονιστών

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Τα ασύρματα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα πρόσβασης έχουν γνωρίσει τα τελευταία χρόνια μεγάλη ανάπτυξη σε διάφορους τομείς των επικοινωνιών, καθώς η υποστήριξη κινητικότητας και η έλλειψη καλωδίωσης τα καθιστούν πολύ πιο εύχρηστα από τα ενσύρματα δίκτυα. Μέχρι πριν λίγα χρόνια, τα ασύρματα δίκτυα πρόσβασης δεν ήταν τόσο διαδεδομένα καθώς, αφ' ενός, η μόνη υπηρεσία που υποστηριζόταν ήταν αυτή της τηλεφωνίας και αφ' εταίρου, τα κινητά τερματικά δεν ήταν τόσο εύχρηστα, κυρίως λόγω του μεγέθους τους. Με την εξέλιξη όμως της μικροηλεκτρονικής και της τεχνολογίας των υλικών τα κινητά τερματικά έγιναν πιο εύχρηστα, τα ασύρματα δίκτυα πρόσβασης πιο διαδεδομένα, ενώ με την ενοποίηση φωνής και δεδομένων άρχισαν να υποστηρίζονται κι άλλων ειδών υπηρεσίες, οι οποίες απαιτούν κατά κόρο υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης και τεχνολογίες μεταγωγής πακέτου. Οι παραπάνω απαιτήσεις ώθησαν τη ραγδαία εξάπλωση ενός νέου τύπου δικτύων στο χώρο των τηλεπικοινωνιών. Πρόκειται για τα *Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα* (*Wireless Local Area Networks - WLANs*). Τα συγκεκριμένα δίκτυα επιτρέπουν την ασύρματη διασύνδεση τερματικών κόμβων σε μικρές σχετικά αποστάσεις (μικρότερες από 300m) με υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης (μέχρι 54Mb/s ενώ στο μέλλον θα ξεπερνούν τα 100Mb/s). Τα WLANs ανήκουν στην κατηγορία των δικτύων μεταγωγής πακέτου και υποστηρίζουν πλήρως υπηρεσίες βασισμένες στο πρωτόκολλο IP.

Σήμερα επικρατούν δυο ανταγωνιστικοί τύποι WLANs. Πρόκειται για τα δίκτυα IEEE 802.11 που βασίζονται στο πρότυπο 802.11 του διεθνούς οργανισμού IEEE και για τα δίκτυα HIPERLAN που βασίζονται στο ομώνυμο πρότυπο του ευρωπαϊκού οργανισμού ETSI. Πιο διαδεδομένα είναι τα δίκτυα IEEE 802.11 τα οποία αποτελούν και το θέμα ενασχόλησης της παρούσας διατριβής.

1.1 Τα ασύρματα τοπικά δίκτυα IEEE 802.11

Το 1999 η IEEE δημοσίευσε το πρότυπο 802.11 [1] που καλύπτει το πρώτο και δεύτερο στρώμα του μοντέλου OSI για WLANs. Η αρχική μορφή του προτύπου σχεδιάστηκε, όπως πολλοί υποστηρίζουν, ως μια ασύρματη έκδοση του Ethernet. Σήμερα, μέσω των διαφόρων επεκτάσεων που δημοσιεύονται κατά καιρούς, υποστηρίζονται ρυθμοί μετάδοσης μέχρι 54Mb/s στις ζώνες ελεύθερης χρήσης ISM (2.4GHz) και U-NII (5GHz). Το πρωτόκολλο πρόσβασης μέσου ανήκει στην κατηγορία πρωτοκόλλων τυχαίας πρόσβασης και διέπεται από παρόμοια φιλοσοφία με αυτή του πρωτοκόλλου CSMA/CD του Ethernet. Τα πλεονεκτήματα του προτύπου που το κατέστησαν ως την πιο δημοφιλή λύση στα WLANs είναι τα ακόλουθα:

- *Χαμηλό κόστος υλοποίησης:* Η μετάδοση δεδομένων πραγματοποιείται σε ζώνες συχνοτήτων ελεύθερης χρήσης. Αυτό σημαίνει ότι δεν απαιτείται χρηματικό κόστος δέσμευσης φάσματος για την ανάπτυξη ενός δικτύου IEEE 802.11. Επιπλέον, οι δικτυακές διεπαφές IEEE 802.11 έχουν χαμηλό κόστος αγοράς, πράγμα που επιτρέπει την υλοποίηση δικτύων με σχετικά χαμηλό κόστος.
- *Υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης:* Οι υποστηριζόμενοι ρυθμοί μετάδοσης κυμαίνονται από 1Mb/s ως 54Mb/s ανάλογα με την απόσταση επικοινωνίας. Οι συγκεκριμένοι ρυθμοί είναι εμφανώς μεγα-

λύτεροι από αυτούς που υποστηρίζουν τα υπόλοιπα δίκτυα πρόσβασης (π.χ. το GPRS υποστηρίζει μέχρι 172Kb/s ενώ το UMTS μέχρι 2Mb/s) επιτρέποντας την υποστήριξη υπηρεσιών που απαιτούν μεγάλες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων.

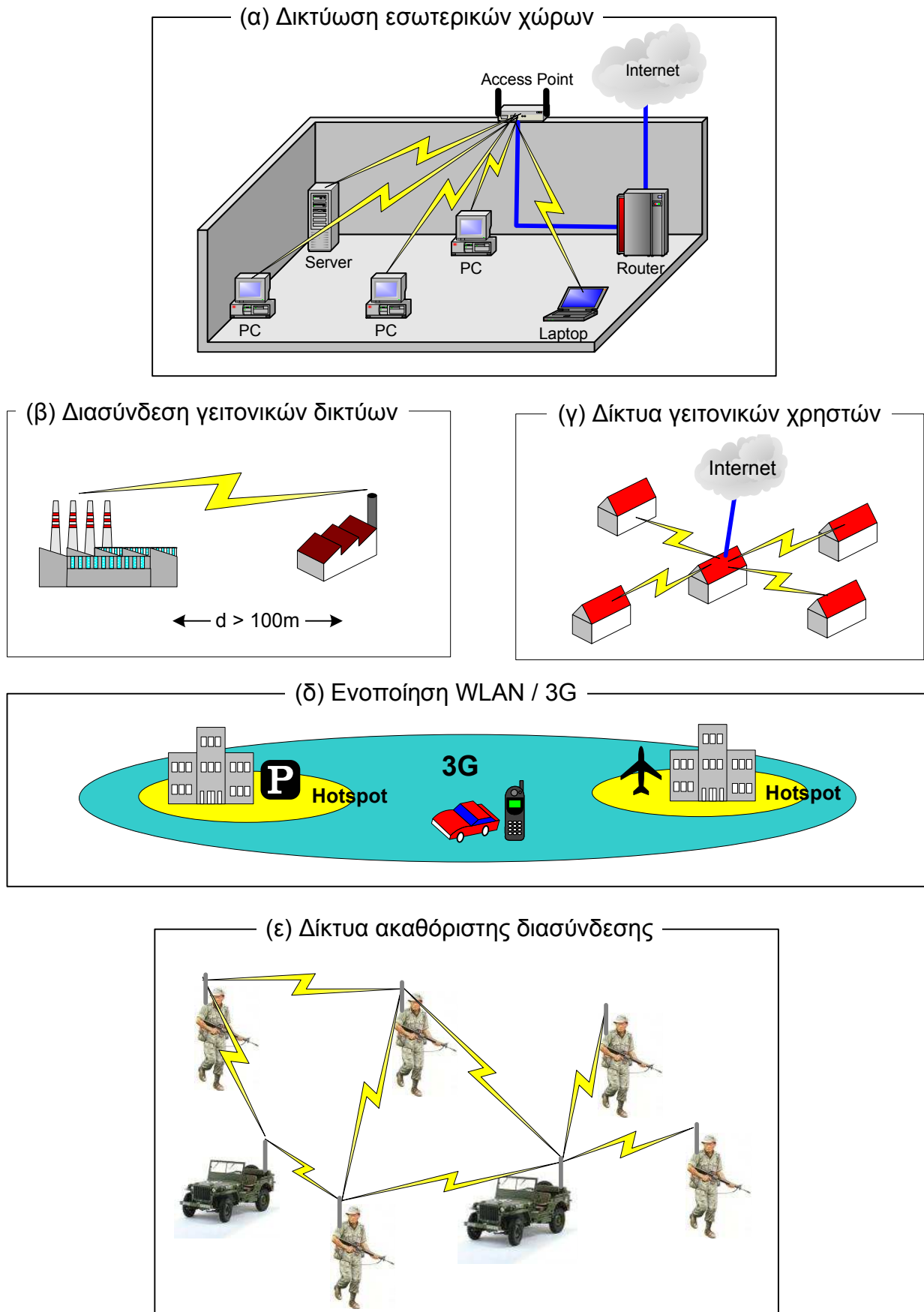
- *Υποστήριξη μεταγωγής πακέτου:* Τα δίκτυα IEEE 802.11 ανήκουν στην κατηγορία των δικτύων μεταγωγής πακέτου, πράγμα που σημαίνει ότι υποστηρίζουν το πρωτόκολλο IP. Σχεπτόμενοι ότι το συντριπτικό ποσοστό των υπηρεσιών που υπάρχουν σήμερα είναι βασισμένες στο πρωτόκολλο αυτό, είναι εμφανές ότι η συμβατότητα με IP καθιστά τα δίκτυα IEEE 802.11 ικανά να υποστηρίξουν οποιαδήποτε δικτυακή υπηρεσία.
- *Υποστήριξη κινητικότητας - Έλλειψη καλωδίωσης:* Η ασύρματη φύση των δικτύων IEEE 802.11 επιτρέπει την υποστήριξη κινητικότητας. Το πλεονέκτημα αυτό είναι ένα από τα πιο σημαντικά, καθώς υπάρχει η δυνατότητα να παρέχονται στο χρήστη υπηρεσίες οποτεδήποτε και οπουδήποτε. Επιπλέον, με τον ασύρματο τρόπο επικοινωνίας δεν απαιτείται καλωδίωση, πράγμα που ελαττώνει σε μεγάλο βαθμό την πολυπλοκότητα και το κόστος ανάπτυξης του δικτύου.
- *Επικοινωνία πολλών προς πολλούς:* Ο τρόπος επικοινωνίας των κόμβων ενός δικτύου IEEE 802.11 κατά τον οποίο ένα πακέτο μεταδίδεται σε όλους τους κόμβους, καθιστά το πρότυπο ιδανικό για λύσεις σε υπηρεσίες multicast, anycast και σε δίκτυα ακαθόριστης διασύνδεσης (ad hoc). Ιδίως όσον αφορά το τελευταίο, το πλεονέκτημα είναι πολύ σημαντικό, καθώς τα συγκεκριμένα δίκτυα αναμένεται να διαδραματίσουν καθοριστικό ρόλο στη μελλοντική εξέλιξη των τηλεπικοινωνιών.
- *Υποστήριξη πολλαπλών καναλιών επικοινωνίας:* Παρ' όλο που το πρωτόκολλο πρόσβασης μέσου του IEEE 802.11 χρησιμοποιεί ένα κανάλι επικοινωνίας, στις ζώνες συχνοτήτων που λειτουργεί το πρότυπο υπάρχουν διαθέσιμα περισσότερα κανάλια που, αν χρησιμοποιηθούν αποδοτικά, μπορούν να συμβάλλουν στην καλύτερη εκμετάλλευση των δικτυακών πόρων. Οι επιστήμονες έχουν ήδη λάβει υπόψη τους το πλεονέκτημα αυτό και σχεδιάζουν αποδοτικά πρωτόκολλα πρόσβασης μέσου που εκμεταλλεύονται τη δυνατότητα υποστήριξης πολλαπλών καναλιών πρόσβασης.

Πέρα όμως από τα παραπάνω πλεονεκτήματα, τα δίκτυα IEEE 802.11 παρουσιάζουν και βασικά μειονεκτήματα:

- *Μικρή απόσταση επικοινωνίας:* Λόγω της χαμηλής ισχύος εκπομπής που ορίζεται στο πρότυπο, η απόσταση επικοινωνίας στα δίκτυα IEEE 802.11 είναι σχετικά μικρή. Για παράδειγμα η μέγιστη απόσταση ραδιοκάλυψης στα 1Mb/s είναι περίπου 500m σε εξωτερικό χώρο ενώ για 54Mb/s περιορίζεται στα 75m για εξωτερικούς χώρους και στα 30m για εσωτερικούς. Οι παραπάνω αποστάσεις είναι εμφανώς μικρότερες από αυτές της τάξης των Km που υποστηρίζονται από τα κινητά δίκτυα τρίτης γενιάς (3G). Το συγκεκριμένο μειονέκτημα ελαττώνει την εμβέλεια των δικτύων IEEE 802.11 και περιορίζει τη χρήση τους για κάλυψη χώρων και όχι περιοχών. Επιπλέον, οι υπηρεσίες που εφαρμόζονται περιορίζονται σε υπηρεσίες που παρέχονται σε συγκεκριμένους χώρους και όχι σε υπηρεσίες που παρέχονται παντού.
- *Αδυναμία υποστήριξης ποιότητας υπηρεσίας:* Το πρωτόκολλο CSMA στο οποίο βασίζεται το πρότυπο IEEE 802.11, όπως θα δούμε και στο Κεφάλαιο 2, αδυνατεί να υποστηρίξει ποιότητα υπηρεσίας και διαφοροποίηση υπηρεσιών. Η συγκεκριμένη αδυναμία, αφ' ενός καθιστά τα δίκτυα IEEE 802.11 ακατάλληλα για υποστήριξη υπηρεσιών πολυμέσων (καθώς απαιτούν ακριβή όρια καθυστέρησης πακέτου) και αφ' εταίρου τα περιορίζει στο να προσφέρουν την ίδια μεταχείριση σε όλες τις υπηρεσίες που εφαρμόζονται σε αυτά.
- *Μειωμένη ασφάλεια:* Η ασύρματη φύση των δικτύων IEEE 802.11 και η επικοινωνία πολλών προς πολλούς αφήνει ένα μεγάλο κενό ασφάλειας, καθώς οποιοσδήποτε χρήστης βρίσκεται στην περιοχή ραδιοκάλυψης του δικτύου μπορεί να λάβει τα μεταδιδόμενα πακέτα. Το μειονέκτημα αυτό έχει ληφθεί σοβαρά υπόψη και συνεχώς προτείνονται αλγόριθμοι κρυπτογράφησης σε διάφορα στρώματα του δικτύου, προκειμένου να υπάρχει ασφάλεια στην επικοινωνία.

Παρά τα μειονεκτήματα που αναφέρθηκαν προηγουμένως, τα πλεονεκτήματα του IEEE 802.11 το κατέστησαν ιδιαίτερα δημοφιλές σε διάφορες λύσεις τηλεπικοινωνιακών δικτύων. Οι πιο πολλές από αυτές εκμεταλλεύονται το πλεονέκτημα της υποστήριξης υψηλών ρυθμών μετάδοσης σε χαμηλό κόστος εγκατάστασης του δικτύου. Παρακάτω παρουσιάζονται οι κυριότεροι τομείς χρήσης του IEEE 802.11.

- *Δικτύωση εσωτερικών χώρων:* Καθώς το κόστος καλωδίωσης ενός εσωτερικού χώρου είναι μεγάλο, πολλά δίκτυα ethernet που καλύπτουν εσωτερικούς χώρους όπως εργαστήρια ή εταιρίες, αντικαθίστανται πλέον από δίκτυα IEEE 802.11 όπου δεν απαιτείται καλωδίωση ενώ υποστηρίζεται παράλληλα και κινητικότητα, προκειμένου οι χρήστες να χρησιμοποιούν το δίκτυο ανεξάρτητα από τη θέση τους. Ένα δίκτυο του συγκεκριμένου τύπου φαίνεται στο Σχήμα 1.1α.
- *Διασύνδεση γειτονικών δικτύων:* Το μέγιστο μήκος καλωδίου σε δίκτυα ethernet περιορίζεται περίπου στα 100m. Απεναντίας, στα δίκτυα IEEE 802.11, για σύνδεση σημείου προς σημείο, αν χρησιμοποιηθούν κατευθυντικές κεραίες, η απόσταση φτάνει μέχρι κάποια χιλιόμετρα. Συνεπώς, για τοπικά δίκτυα που καλύπτουν πάνω από ένα κτίριο, όταν η απόσταση μεταξύ των κτιρίων είναι μεγάλη, είναι δυνατή η διασύνδεσή των τελευταίων μέσω επικοινωνίας IEEE 802.11 σημείου προς σημείο (Σχήμα 1.1β).
- *Δημιουργία ιδιωτικών δικτύων γειτονικών χρηστών:* Αρκετά δημοφιλής είναι η εγκατάσταση δικτύων IEEE 802.11 από χρήστες που κατοικούν σε γειτονικές οικίες, όπου η καλωδίωση ethernet είναι δύσκολη. Με τον τρόπο αυτό, εκτός από υπηρεσίες συνομιλίας και δικτυακών παιχνιδιών που χρησιμοποιούνται, πολλές φορές οι χρήστες μοιράζονται και έναν κοινό λογαριασμό πρόσβασης στο internet, συνήθως μεγάλης ταχύτητας, όπως ADSL. Σχετικό παράδειγμα απεικονίζεται στο Σχήμα 1.1γ.
- *Δημιουργία σημείων με πρόσβαση στο internet (hotspots):* Μεγάλο εύρος χρήσης έχουν και τα γνωστά hotspots, τα οποία δεν είναι τίποτε άλλο από μικρά WLANs που καλύπτουν πολυπληθείς χώρους όπως ξενοδοχεία, αεροδρόμια, καφετέριες, σταθμούς λεωφορείων και τρένων. Τα δίκτυα αυτά προσφέρουν πρόσβαση στο internet συνήθως μέσω κάρτας προπληρωμένων υπηρεσιών (όπως η τηλεκάρτα για τηλέφωνο).
- *Προέκταση δικτύων τρίτης γενιάς:* Προς τον ερχομό των δικτύων κινητών επικοινωνιών τέταρτης γενιάς, έχει ήδη αρχίσει να υλοποιείται η ενοποίηση δικτύων 3G και WLANs. Σύμφωνα με την παραπάνω φιλοσοφία, οι εταιρίες κινητής τηλεφωνίας 3G εγκαθιστούν WLANs σε πολυπληθείς χώρους (hotspots). Ο συνδρομητής του δικτύου θα έχει τη δυνατότητα να εκμεταλλεύεται τις μεγάλες ταχύτητες του WLAN, όπου αυτό υπάρχει, και να χρησιμοποιεί το δίκτυο 3G όπου δεν υπάρχει WLAN διαθέσιμο (βλ. Σχήμα 1.1δ).
- *Δημιουργία δικτύων ακαθόριστης διασύνδεσης (ad hoc):* Αναμφισβήτητα, μια από τις ευρύτερες χρήσεις του προτύπου IEEE 802.11 είναι στα δίκτυα ακαθόριστης διασύνδεσης, τα λεγόμενα δίκτυα ad hoc. Τα συγκεκριμένα δίκτυα, επειδή ακριβώς υπάρχει το πλεονέκτημα της ακαθόριστης διασύνδεσης, υλοποιούνται προσωρινά για να εξυπηρετήσουν κάποιο συγκεκριμένο σκοπό. Οι εφαρμογές των δικτύων αυτών είναι απεριόριστες (προσωπικές επικοινωνίες, δίκτυα αισθητήρων, στρατιωτικά δίκτυα) και ο ρόλος τους θα είναι καθοριστικός στη μελλοντική εξέλιξη των τηλεπικοινωνιών. Από την άλλη πλευρά, όπως θα εξηγηθεί παρακάτω, το πρότυπο IEEE 802.11 είναι κατάλληλο για εφαρμογή σε δίκτυα ad hoc. Ένα δίκτυο του συγκεκριμένου τύπου φαίνεται στο Σχήμα 1.1ε.
- *Δημιουργία δικτύων προσωπικού εξοπλισμού (Personal Area Networks):* Τέλος, το πρότυπο IEEE 802.11 βρίσκει εφαρμογή και σε δίκτυα προσωπικού εξοπλισμού, γνωστά ως Personal Area Networks. Τα συγκεκριμένα δίκτυα διασυνδέουν μικρές συσκευές μεταξύ τους όπως PDAs, κινητά τηλέφωνα, τηλεχειριστήρια, περιφερειακές συσκευές υπολογιστή κ.α. Παρά το γεγονός ότι στο μεγαλύτερο ποσοστό των δικτύων αυτών χρησιμοποιούνται τεχνολογίες όπως το Bluetooth ή οι υπέρυθρες επικοινωνίες, όταν η απόσταση μεταξύ των συσκευών είναι μεγάλη, προτιμάται το πρότυπο IEEE 802.11.

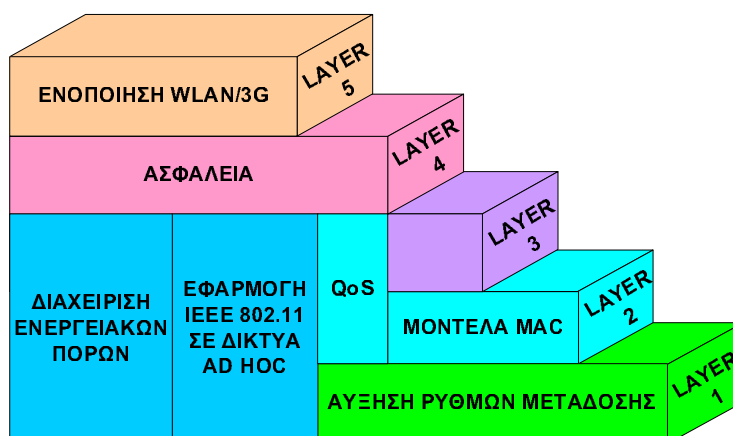


Σχήμα 1.1: Παραδείγματα δικτύων IEEE 802.11

Από τα παραπάνω φαίνεται ξεκάθαρα ο βαθμός εξάπλωσης της χρήσης του προτύπου IEEE 802.11 στα WLANs. Η ραγδαία αυτή αποδοχή του προτύπου ώθησε και ώθει ένα μεγάλο μέρος της επιστημονικής κοινότητας σε ερευνητικές δραστηριότητες με σκοπό τη βελτίωσή του. Οι βασικότεροι τομείς στους οποίους εστιάζεται η συγκεκριμένη έρευνα παρουσιάζονται στην αμέσως επόμενη υποενότητα.

1.2 Ερευνητικές δραστηριότητες σχετικές με το πρότυπο IEEE 802.11

Οι ερευνητικές δραστηριότητες γύρω από το πρότυπο IEEE 802.11 ευρύνονται σε διάφορους τομείς και σε διάφορα στρώματα του μοντέλου OSI. Μια γραφική αναπαράσταση των δραστηριοτήτων αυτών απεικονίζεται στο Σχήμα 1.2. Εν ολίγοις οι συγκεκριμένες δραστηριότητες συνοψίζονται σε έρευνα που αφορά στρώματα άνω του στρώματος δικτύου (τρίτο στρώμα OSI) και σε έρευνα που αφορά στρώματα υπό του στρώματος δικτύου.



Σχήμα 1.2: Τομείς ερευνητικών δραστηριοτήτων σχετικά με το πρότυπο IEEE 802.11

Σχετικά με την έρευνα που πραγματοποιείται άνω του στρώματος δικτύου, οι πιο σημαντικές δραστηριότητες αφορούν την ενοποίηση των WLANs με 3G (στρώμα 5) και την ασφάλεια επικοινωνίας σε WLANs (στρώμα 4). Συγκεκριμένες πληροφορίες για τα παραπάνω θέματα μπορούν να βρεθούν στα άρθρα [2] και [3], αντίστοιχα.

Σχετικά με την έρευνα που πραγματοποιείται υπό του στρώματος δικτύου, αυτή αφορά τη διαχείριση ενεργειακών και δικτυακών πόρων. Η συγκεκριμένη διατριβή εστιάζεται στη διαχείριση δικτυακών πόρων, όπου μπορούμε να διακρίνουμε τους εξής επιμέρους τομείς έρευνας:

- *Αύξηση του ρυθμού μετάδοσης.* Το 1999, το αρχικό πρότυπο IEEE 802.11 υποστήριζε ρυθμούς μέχρι 2Mb/s. Καθώς οι ρυθμοί αυτοί δεν ήταν αρκετοί για την εφαρμογή υπηρεσιών προσωπικών επικοινωνιών μεταγωγής πακέτου, διεξάγεται έρευνα στο φυσικό στρώμα για μετάδοση σε άλλες ζώνες συχνοτήτων καθώς και για την εφεύρεση νέων τεχνικών διαμόρφωσης και κωδικοποίησης, ώστε να είναι δυνατή η υποστήριξη υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης. Σήμερα το πρότυπο IEEE 802.11g υποστηρίζει ρυθμούς μετάδοσης μέχρι 54Mb/s, ενώ το υπό μελέτη πρότυπο IEEE 802.11n δύναται να υποστηρίζει ρυθμούς μέχρι 540Mb/s. Η σταδιακή αύξηση των ρυθμών του προτύπου επιτυγχάνεται με μια επαναληπτική διαδικασία όπου, βάσει προτεινόμενων σχημάτων, εκδίδεται μια επέκταση του IEEE 802.11 για αύξηση των υποστηριζόμενων ρυθμών, η επέκταση αξιολογείται μέσω προσομοίωσης ή αναλυτικών μοντέλων και με βάση τα αποτελέσματα ξεκινά η διαδικασία για έκδοση νέας επέκτασης. Προς την κατεύθυνση αυτή, ζωτικής σημασίας χρίζει η αξιολόγηση επίδοσης της κάθε επέκτασης του προτύπου καθώς και μια συνοπτική και κατανοητή περιγραφή της με ιδιαίτερη αναφορά στα νέα χαρακτηριστικά που εισάγει. Με τον τρόπο αυτό (α) είναι εφικτή η αξιολόγηση των νέων χαρακτηριστικών που κάθε επέκταση εισάγει, (β) είναι εφικτή η σύγκριση μεταξύ των διαφόρων επεκτάσεων και (γ) υπάρχουν μέτρα αναφοράς για μελέτες προς την περαιτέρω αύξηση των ρυθμών μετάδοσης σε μεταγενέστερες επεκτάσεις του προτύπου.

Αναφορικά, οι επεκτάσεις μέχρι την IEEE 802.11b έχουν αξιολογηθεί μέσω διαφόρων ερευνητικών δημοσιεύσεων (π.χ. [4], [5] και [6]). Ανοιχτή παραμένει ωστόσο η αξιολόγηση επίδοσης προτύπων μεταγενέστερων του IEEE 802.11b.

- *Αξιολόγηση επίδοσης του πρωτοκόλλου πρόσβασης μέσου.* Το πρωτόκολλο πρόσβασης μέσου στο πρότυπο IEEE 802.11 είναι το CSMA/CA (θα εξηγηθεί αναλυτικά στο Κεφάλαιο 2), το οποίο κατατάσσεται στα πρωτόκολλα τυχαίας πρόσβασης. Συνεπώς, η επίδοσή του δεν είναι σταθερή (π.χ. σε μια γραμμή IDSN είναι εξαρχής γνωστό ότι η ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων είναι σταθερή και ίση με 64Kb/s) αλλά εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως αριθμός κόμβων, φόρτος κίνησης, ρυθμός μετάδοσης κ.α. Ένα μεγάλο μέρος της ερευνητικής δραστηριότητας εστιάζεται στην αξιολόγηση επίδοσης του πρωτοκόλλου πρόσβασης μέσου με αναλυτικά μοντέλα, ώστε να είναι γνωστός με ακρίβεια ο βαθμός που κάθε παράγοντας επηρεάζει την επίδοση του προτύπου. Αξίζει να σημειωθεί ότι η έρευνα στον τομέα αυτό δε σταματά καθώς υπάρχει πάντα η προσδοκία για το σχεδιασμό μοντέλων ακριβέστερων από τα προηγούμενα. Αντιπροσωπευτικές εργασίες στο συγκεκριμένο τομέα είναι αυτές των [7] και [8].
- *Υποστήριξη ποιότητας υπηρεσίας.* Το αρχικό πρότυπο IEEE 802.11 δεν υποστήριζε ποιότητα υπηρεσίας με την έννοια της διαφοροποίησης υπηρεσιών. Καθώς όμως σε ένα δίκτυο προσωπικών επικοινωνιών εφαρμόζονται υπηρεσίες με διαφορετικές απαιτήσεις, η ποιότητα υπηρεσίας είναι ένα θέμα που απασχολεί τους επιστήμονες από την στιγμή σχεδόν της δημοσίευσης του αρχικού προτύπου. Λαμβάνοντας υπόψη όλες τις προσπάθειες που έγιναν κατά καιρούς [9], ο οργανισμός IEEE βρίσκει ένα βήμα πριν τη δημοσίευση του προτύπου IEEE 802.11e για υποστήριξη ποιότητας υπηρεσίας σε δίκτυα IEEE 802.11. Παρ' ότι το πρότυπο δεν έχει ακόμη δημοσιευθεί, η τελική του μορφή έχει διαμορφωθεί και έχει πραγματοποιηθεί αρκετή έρευνα προς την αξιολόγηση επίδοσής του. Όπως θα εξηγηθεί στο Κεφάλαιο 4, οι περισσότερες ερευνητικές εργασίες αφορούν τη λειτουργία του δικτύου σε κατάσταση κορεσμού (πολύ υψηλός φόρτος κίνησης) με μέτρο επίδοσης τη διέλευση του δικτύου. Αντιπροσωπευτικά άρθρα στο παραπάνω θέμα είναι αυτά των [10] και [11]. Απεναντίας, περιορισμένη είναι η ερευνητική δραστηριότητα για αξιολόγηση επίδοσης του προτύπου IEEE 802.11e σε συνθήκες πεπερασμένου φόρτου κίνησης και για αξιολόγηση επίδοσης του προαναφερόμενου προτύπου με μέτρο επίδοσης την καθυστέρηση πακέτου.
- *Εφαρμογή του προτύπου IEEE 802.11 σε δίκτυα ad hoc.* Στα συγκεκριμένα δίκτυα, που βρίσκουν εφαρμογές σε δίκτυα αισθητήρων, προσωπικών επικοινωνιών και στρατιωτικών υπηρεσιών, δεν υπάρχει η λεγόμενη συσκευή access point που συλλέγει τα πακέτα από τους αποστολείς και τα προωθεί στους παραλήπτες. Απεναντίας, τα δίκτυα αυτά έχουν ακαθόριστη διασύνδεση μεταξύ τους (ad hoc) [12], με την έννοια ότι οι ίδιοι οι τερματικοί κόμβοι παίζουν και το ρόλο των δρομολογητών, ώστε ένα πακέτο να φτάσει από την αρχή στον προορισμό του μέσω περισσότερων του ενός, ενδεχομένως, κόμβων. Ο τρόπος αυτός επικοινωνίας ονομάζεται *επικοινωνία πολλαπλών βημάτων (multi-hop)* και είναι μια ιδιαιτερότητα που αποτελεί σημείο πληγής για το φόρτο κίνησης που υπεισέρχεται στο δίκτυο. Ένας τρόπος λύσης είναι η χρήση πολλαπλών καναλιών επικοινωνίας. Προς τη συγκεκριμένη κατεύθυνση, το πρότυπο IEEE 802.11 αποτελεί μια αρκετά εύστοχη επιλογή για την εφαρμογή του σε δίκτυα του παραπάνω τύπου. Ο λόγος είναι ο ασύρματος τρόπος επικοινωνίας, οπότε ένα πακέτο μεταδίδεται σε όλους τους κόμβους (broadcast), η ίδια η φύση επικοινωνίας πολλών προς πολλούς του πρωτοκόλλου CSMA στο οποίο βασίζεται το πρότυπο, και η δυνατότητα υποστήριξης περισσότερων του ενός καναλιών επικοινωνίας. Δεδομένων των παραπάνω υπάρχει αρκετή ερευνητική δραστηριότητα στη σχέση μεταξύ IEEE 802.11 και δικτύων ad hoc γενικότερα, η οποία εστιάζεται ως επί το πλείστον στην ανακάλυψη αποδοτικών πρωτοκόλλων πρόσβασης μέσου που λαμβάνουν υπόψη τη φύση multi-hop των δικτύων αυτών και εκμεταλλεύονται τη δυνατότητα χρήσης πολλαπλών καναλιών επικοινωνίας. Τα πιο αντιπροσωπευτικά πρωτόκολλα που προτάθηκαν κατά καιρούς συγκεντρώνονται στις επισκοπήσεις που διεξάγουν τα άρθρα [13] και [14].

Μέρος από τα παραπάνω ανοιχτά ερευνητικά θέματα προσδοκεί να καλύψει η παρούσα διατριβή. Ο τρόπος που συμβάλλει στην έρευνα γύρω από τη διαχείριση δικτυακών πόρων στο πρότυπο IEEE 802.11 παρουσιάζεται αμέσως παρακάτω.

1.3 Η συμβολή της παρούσας διατριβής στην έρευνα που αφορά το πρότυπο IEEE 802.11

Έχοντας υπόψη τα ανοιχτά ερευνητικά θέματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω, η παρούσα διατριβή εστιάζει την προσοχή της στη διαχείριση δικτυακών πόρων. Συγκεκριμένα, επιτελείται πολύπλευρη αξιολόγηση επίδοσης του IEEE 802.11 όπως αυτό εμφανίζεται μέσω των τελευταίων του επεκτάσεων και προτείνονται αποδοτικά σχήματα για εφαρμογή του προτύπου IEEE 802.11 στα δημοφιλή δίκτυα ad hoc. Προς τη συγκεκριμένη κατεύθυνση, η εργασία χωρίζεται σε μελέτη του προτύπου από τη σκοπιά που αυτό σκιαγραφείται σε κάθε στρώμα OSI που καλύπτει, και σε μελέτη του προτύπου από τη σκοπιά που αυτό εφαρμόζεται σε συγκεκριμένους τύπους δικτύων.

Από τη σκοπιά που το πρότυπο IEEE 802.11 εμφανίζεται σε κάθε στρώμα του μοντέλου OSI, σε πρώτο στάδιο μελετάται το φυσικό στρώμα των δικτύων IEEE 802.11, όπου εστιάζεται η προσοχή γύρω από τη μελέτη του προτύπου IEEE 802.11g [15]. Συγκεκριμένα, γίνεται μια παρουσίαση του IEEE 802.11g δίνοντας βάση στα καινοτομικά χαρακτηριστικά του, που το κάνουν να ξεχωρίζει από τα υπόλοιπα πρότυπα της οικογένειάς του. Εν συνεχεία, πραγματοποιείται αξιολόγηση επίδοσης μέσω προσομοίωσης στην πλατφόρμα Pythagor [16]. Η εν λόγω αξιολόγηση αφορά τη διεξαγωγή διαφόρων σεναρίων προσομοίωσης όπου, για κάθε σενάριο, μελετάται η επίδραση ενός από τα καινοτομικά χαρακτηριστικά του προτύπου στην επίδοσή του. Ως μέτρο επίδοσης χρησιμοποιείται η χωρητικότητα του καναλιού, που ορίζεται ως η μέγιστη διέλευση (throughput) που μπορεί να επιτευχθεί. Τέλος, με βάση τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, λαμβάνονται συμπεράσματα σχετικά με την επίδοση του IEEE 802.11g καθώς και για τα πλεονεκτήματα / μειονεκτήματα που παρουσιάζουν τα νέα του χαρακτηριστικά.

Μετά τη μελέτη του φυσικού στρώματος των δικτύων IEEE 802.11 περνάμε στη μελέτη του στρώματος πρόσβασης μέσου, όπου εστιάζουμε την προσοχή στο πρότυπο IEEE 802.11e για παροχή ποιότητας υπηρεσίας. Συγκεκριμένα [17], πραγματοποιείται ανάλυση επίδοσης του μηχανισμού πρόσβασης *Enhanced Distributed Coordinate Access - EDCA* που προτείνεται στο συγκεκριμένο πρότυπο για διαφοροποίηση υπηρεσιών. Η ανάλυση αφορά τη λειτουργία του δικτύου σε συνθήκες πεπερασμένου φόρτου κίνησης. Χρησιμοποιώντας θεωρία Μαρκοβιανών αλυσίδων, συστημάτων αναμονής και στοιχείων συνδυαστικής και πιθανοτήτων, μοντελοποιείται το νέο πρωτόκολλο πρόσβασης μέσου για παροχή ποιότητας υπηρεσίας. Ως είσοδος λαμβάνεται ένας μεγάλος αριθμός παραμέτρων όπως ρυθμός άφιξης και μέγεθος πακέτων, αριθμός κόμβων, ρυθμός μετάδοσης κ.α. Καταλήγουμε, τελικά, σε σύστημα μη γραμμικών εξισώσεων απ' όπου προκύπτουν τρία διαφορετικά μέτρα περιγραφής της καθυστέρησης πακέτου. Το μοντέλο επαληθεύεται μέσω προσομοίωσης στην πλατφόρμα OPNET [18] και στη συνέχεια χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση επίδοσης του μηχανισμού EDCA. Τέλος, από τα αναλυτικά αποτελέσματα καταλήγουμε σε συμπεράσματα για τον τρόπο λειτουργίας της μεθόδου EDCA.

Έχοντας ολοκληρώσει τη μελέτη γύρω από τα στρώματα OSI που καλύπτει το πρότυπο IEEE 802.11, μελετάμε το εν λόγω πρότυπο από τη σκοπιά που εφαρμόζεται σε διάφορους τύπους δικτύων επικοινωνιών. Έχοντας υπόψη και τα ανοιχτά ερευνητικά της προηγούμενης παραγράφου, εστιάζουμε την προσοχή μας στην εφαρμογή του προτύπου σε δίκτυα ad hoc. Η πρώτη υπό μελέτη περίπτωση είναι τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων-συντονιστών (Wireless Sensor Actor Networks - WSNs). Τα εν λόγω δίκτυα αποτελούνται από έναν μεγάλο αριθμό κόμβων-αισθητήρων και έναν μικρότερο αριθμό κόμβων-συντονιστών. Οι συντονιστές είναι κόμβοι με αυξημένες δυνατότητες όσον αφορά την ευφυία, την επεξεργαστική ισχύ και την αποθηκευτική ικανότητα και συντονίζουν τις ενέργειες των αισθητήρων. Στην παρούσα εργασία μελετάται αποκλειστικά η επικοινωνία μεταξύ των συντονιστών, καθώς, όπως θα εξηγηθεί στο Κεφάλαιο 5, συνιστούν ένα δίκτυο ad hoc. Πιο συγκεκριμένα, για το δίκτυο που συνιστούν οι συντονιστές, εξετάζονται και συγκρίνονται δυο σχήματα επικοινωνίας με ένα και δυο κανάλια IEEE 802.11 αντίστοιχα [19]. Κάθε σχήμα μοντελοποιείται μέσω αναλυτικού μοντέλου. Ως είσοδος στο μοντέλο λαμβάνεται η παραγόμενη κίνηση από τους συντονιστές, η γεωγραφική μορφολογία του δικτύου, η φύση της επικοινωνίας μεταξύ των συντονιστών (κατανομημένη, περιορισμένη σε γειτονικούς κόμβους) κ.α. Ως έξοδος του μοντέλου λαμβάνεται η χρησιμοποίηση (utilization) του καναλιού και η καθυστέρηση πακέτου. Αφού το μοντέλο επαληθευθεί μέσω προσομοίωσης στο OPNET, χρησιμοποιείται για τη σύγκριση μεταξύ των δυο σχημάτων. Από τα αναλυτικά αποτελέσματα προκύπτουν συμπεράσματα για την καταλληλότητα του κάθε σχήματος.

Η μελέτη γύρω από τα δίκτυα ad hoc γενικεύεται στη συνέχεια με την περίπτωση των δικτύων ad hoc IEEE 802.11 με υποδομή. Ο όρος ‘με υποδομή’ μεταφράζει τον ξένο όρο ‘infrastructured’ που υπονοεί ότι υπάρχει ένας κεντρικός κόμβος ο οποίος συλλέγει όλη την ωφέλιμη πληροφορία από τους τερματικούς κόμβους και μεταδίδει όλη την ωφέλιμη πληροφορία προς αυτούς. Στη συγκεκριμένη εργασία προτείνεται ένα σχήμα επικοινωνίας [20] που χρησιμοποιεί το IEEE 802.11 με πολλά κανάλια μετάδοσης δεδομένων για χρήση σε δίκτυα του παραπάνω τύπου. Αρχικά σχεδιάζεται αναλυτικό μοντέλο για την απλή περίπτωση, με ένα κανάλι επικοινωνίας. Το μοντέλο επαληθεύεται μέσω προσομοίωσης στο OP-NET. Εν συνεχεία παρουσιάζεται και μοντελοποιείται το προτεινόμενο σχήμα, επεκτείνοντας το μοντέλο της απλής περίπτωσης. Τέλος, χρησιμοποιώντας το αναλυτικό μοντέλο, το σχήμα συγκρίνεται με δυο άλλα σχήματα πολλαπλών καναλιών επικοινωνίας, όπου αποδεικνύεται και η υπεροχή του. Η σύγκριση επιτελείται σε δυο παραδειγματικούς τύπους δικτύων ad hoc με υποδομή: στα δίκτυα διασύνδεσης κατοικιών για υπηρεσίες προσωπικών επικοινωνιών (roof top networks) και στα δίκτυα αισθητήρων (sensor networks).

Αναφερόμενοι γενικότερα σε όλη τη διατριβή, για κάθε ερευνητικό θέμα ενασχόλησης πραγματοποιείται αξιολόγηση επίδοσης μέσω προσομοίωσης ή ανάλυση επίδοσης μέσω μαθηματικού μοντέλου που επαληθεύεται με προσομοίωση. Για τη διεξαγωγή των προσομοιώσεων χρησιμοποιήθηκαν δυο πλατφόρμες οι οποίες παρουσιάζονται συνοπτικά στο Παράρτημα Α. Η πρώτη πλατφόρμα είναι η εμπορικά διαθέσιμη πλατφόρμα OPNET [18] για προσομοίωση δικτύων επικοινωνιών. Επεκτείνοντας τα υπάρχοντα στοιχεία της πλατφόρμας ενσωματώθηκαν τα προς μελέτη σχήματα επικοινωνίας. Η δεύτερη πλατφόρμα ονομάζεται Pythagor [16] και κατασκευάστηκε αποκλειστικά στα πλαίσια της παρούσας διατριβής. Η εφαρμογή πραγματοποιεί λεπτομερή προσομοίωση της οικογένειας προτύπων IEEE 802.11. Έχει υλοποιηθεί σε C++, είναι ανοιχτού κώδικα και έχει αρχίσει να χρησιμοποιείται ευρέως και από άλλους ερευνητές.

1.4 Δομή της διατριβής

Κλείνοντας το εισαγωγικό κεφάλαιο, θα κάνουμε μια συνοπτική παρουσίαση της δομής της παρούσας διατριβής.

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται λεπτομερώς ο τρόπος λειτουργίας του προτύπου IEEE 802.11. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο περιέχεται όλη η χρήσιμη εισαγωγική πληροφορία που είναι απαραίτητη για την κατανόηση των επόμενων κεφαλαίων.

Τα επόμενα τέσσερα κεφάλαια περιέχουν την έρευνα που πραγματοποιήθηκε στη συγκεκριμένη εργασία. Το Κεφάλαιο 3 αφορά τη μελέτη γύρω από την εξέλιξη του φυσικού στρώματος του υπό μελέτη προτύπου. Ειδικότερα, η έρευνα αφορά το πρότυπο IEEE 802.11g για το οποίο πραγματοποιείται μια σύντομη παρουσίαση των καινοτομικών χαρακτηριστικών του και μια αξιολόγηση επίδοσής του, συγκρινόμενο πάντα με τα προγενέστερα από αυτό πρότυπα της οικογένειας.

Μετά τη μελέτη του IEEE 802.11g ανεβαίνουμε ένα στρώμα υψηλότερα για να ασχοληθούμε με το πρωτόκολλο πρόσβασης μέσου του προτύπου. Προς την κατεύθυνση αυτή, στο Κεφάλαιο 4 πραγματοποιείται μελέτη του προτύπου IEEE 802.11e για ποιότητα υπηρεσίας. Συγκεκριμένα, πραγματοποιείται ανάλυση επίδοσης του μηχανισμού πρόσβασης *Enhanced Distributed Coordinate Access - EDCA* που προτείνεται στο συγκεκριμένο πρότυπο για διαφοροποίηση υπηρεσιών.

Τα επόμενα δυο Κεφάλαια αφορούν τη μελέτη του προτύπου από τη σκοπιά που αυτό εφαρμόζεται σε διάφορα δίκτυα επικοινωνιών. Στο Κεφάλαιο 5 προτείνονται δυο σχήματα επικοινωνίας σε δίκτυα αισθητήρων συντονιστών, όπου χρησιμοποιούνται ένα και πολλά κανάλια επικοινωνίας αντίστοιχα, ενώ στο Κεφάλαιο 6 προτείνεται ένα σχήμα επικοινωνίας για δίκτυα ακαθόριστης διασύνδεσης με υποδομή.

Τέλος, ολοκληρώνοντας την παρουσίαση της έρευνας που πραγματοποιήθηκε στη συγκεκριμένη διατριβή, στο Κεφάλαιο 7 παρουσιάζονται τα κυριότερα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη συγκεκριμένη εργασία ενώ προτείνονται θέματα για μελλοντική έρευνα.

Βιβλιογραφικές Αναφορές

- [1] *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification*, IEEE Std. 802.11, 1999.
- [2] J. C. Chen, M. C. Jiang, and Y. W. Liu, "Wireless LAN Security and IEEE 802.11i," *IEEE Wireless Communications*, vol. 12, no. 1, Feb. 2005.
- [3] A. Salkintzis, "Interworking Techniques and Architectures for WLAN/3G Integration Toward 4G Mobile Data Networks," *IEEE Wireless Communications*, vol. 11, no. 3, pp. 50–61, Jun. 2004.
- [4] B. Crow *et al.*, "IEEE 802.11 Wireless Local Area Networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 35, no. 9, pp. 116–126, Dec. 1997.
- [5] S. Simoens *et al.*, "The evolution of 5GHz WLAN Toward Higher Throughputs," *IEEE Wireless Communications*, vol. 10, no. 6, pp. 10–16, Dec. 2003.
- [6] C. Heegard *et al.*, "High Performance Wireless Ethernet," *IEEE Communications Magazine*, vol. 39, no. 11, pp. 64–73, 2001.
- [7] G. Bianchi, "Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function," *IEEE Journal on Selected Areas of Communications*, vol. 18, no. 3, pp. 535–547, 2000.
- [8] F. Cali, M. Conti, and E. Gregori, "Dynamic Tuning of the IEEE 802.11 Protocol to Achieve a Theoretical Throughput Limit," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 8, no. 6, pp. 785–799, 2000.
- [9] H. Zhu *et al.*, "A Survey of Quality of Service in IEEE 802.11 Networks," *IEEE Wireless Communications*, vol. 11, no. 4, pp. 6–14, Aug. 2004.
- [10] J. Robinson and T. Randhawa, "Saturation Throughput Analysis of IEEE 802.11e Enhanced Distributed Coordination Function," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 22, no. 5, pp. 917–928, Jun. 2004.
- [11] Y. Xiao, "Performance Analysis of Priority Schemes for IEEE 802.11 and IEEE 802.11e Wireless LANs," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, To appear.
- [12] R. Ramanathan and J. Redi, "A brief Overview of Ad hoc Networks: Challenges and Directions," *IEEE Communications Magazine*, vol. 40, no. 5, pp. 20–22, May 2002.
- [13] E. Jurdak *et al.*, "A Survey, Classification and Comparative Analysis of Medium Access Control Protocols for Ad Hoc Networks," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 6, no. 1, pp. 2–16, First Quarter 2004.
- [14] H. Zhai *et al.*, "Medium Access Control in Mobile Ad Hoc Networks: Challenges and Solutions," *Wireless Communications and Mobile Computing*, To appear.
- [15] D. Vassis *et al.*, "The IEEE 802.11g Standard for High Data Rate WLANs," *IEEE Network*, vol. 19, no. 3, pp. 21–26, May 2005.
- [16] "Pythagor simulation tool." [Online]. Available: <http://www.icsd.aegean.gr/telecom/pythagor/index.htm>
- [17] D. Vassis and G. Kormentzas, "Delay Performance Analysis and Evaluation of IEEE 802.11e EDCA in Finite Load Conditions," *Wireless Personal Communications*, vol. 34, no. 1-2, pp. 29–43, Aug. 2005.
- [18] "Optimized Network Engineering Tools (OPNET)." [Online]. Available: <http://www.opnet.com>

- [19] D. Vassis, G. Kormentzas, and C. Skianis, “Performance Evaluation of Single and Multi-Channel Actor to Actor Communication for Wireless Sensor Actor Networks,” *Ad Hoc Networks*, To appear.
- [20] D. Vassis and G. Kormentzas, “Delay Performance Analysis of Single and Multi-Channel Communication Schemes for Ad Hoc Networks with Infrastructure Support,” *Wireless Communications and Mobile Computing*, Submitted for publication.

Κεφάλαιο 2

Αναλυτική Περιγραφή του Τρόπου Λειτουργίας των Δικτύων IEEE 802.11

2.1 Εισαγωγή

Όπως ειπώθηκε και στο εισαγωγικό κεφάλαιο, πριν προχωρήσουμε στην αναλυτική παρουσίαση της εργασίας που πραγματοποιήθηκε στη διατριβή, είναι απαραίτητο να παρατεθεί πρώτα όλη η απαραίτητη γνωστική πληροφορία για την κατανόηση των επόμενων κεφαλαίων. Προς την κατεύθυνση αυτή, στο παρόν κεφάλαιο θα αναφερθούμε αναλυτικά στον τρόπο λειτουργίας των δικτύων IEEE 802.11, καθώς και σε δυο προβλήματα επικοινωνίας, σχετικά με τα εν λόγω δίκτυα. Πιο λεπτομερώς, στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θίγονται τα παρακάτω θέματα.

Στην Ενότητα 2.2 παρουσιάζονται όλες οι επεκτάσεις του προτύπου IEEE 802.11. Στην Ενότητα 2.3 περιγράφονται τα δομικά στοιχεία ενός δικτύου IEEE 802.11 και ο τρόπος διασύνδεσής τους. Η Ενότητα 2.4 περιγράφει αναλυτικά τον τρόπο λειτουργίας του φυσικού στρώματος στο IEEE 802.11 και στις επεκτάσεις αυτού. Στην Ενότητα 2.5 περιγράφεται ο τρόπος λειτουργίας του στρώματος πρόσβασης μέσου στο IEEE 802.11. Τέλος, στην Ενότητα 2.6 θίγονται δυο βασικά προβλήματα επικοινωνίας στα δίκτυα IEEE 802.11, αυτά του κρυφού και του εκτεθειμένου κόμβου.

2.2 Η οικογένεια προτύπων IEEE 802.11

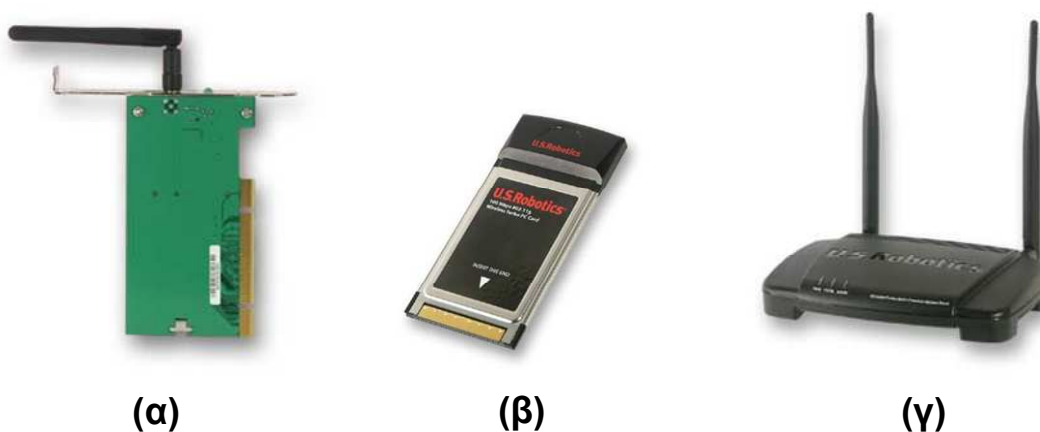
Είναι ήδη γνωστό ότι, από το 1999 που δημοσιεύθηκε το αρχικό πρότυπο IEEE 802.11, έχει διεξαχθεί ένας αριθμός από επεκτάσεις σε διάφορους τομείς και σε διάφορα στρώματα του μοντέλου OSI. Για το λόγο αυτό, όταν σήμερα αναφέρεται κάποιος σε δίκτυα IEEE 802.11, εννοεί στην ουσία τα δίκτυα τα οποία καλύπτονται από μια ή περισσότερες επεκτάσεις του συγκεκριμένου προτύπου. Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται όλες οι εν λόγω επεκτάσεις, οι οποίες έχουν δημοσιευθεί (publications) ή βρίσκονται ακόμη σε εξέλιξη (drafts).

- *IEEE 802.11* [1]: Πρόκειται για το αρχικό πρότυπο. Καλύπτει το πρώτο και δεύτερο στρώμα OSI υποστηρίζοντας ρυθμούς μέχρι και 2Mb/s, στα 2.4GHz. Δημοσιεύτηκε το 1999.
- *IEEE 802.11a* [2]: Επέκταση του αρχικού προτύπου για υποστήριξη ρυθμών μέχρι και 54Mb/s, στα 5GHz. Δημοσιεύτηκε το 2000.
- *IEEE 802.11b* [3]: Επέκταση του αρχικού προτύπου για υποστήριξη ρυθμών μέχρι και 11Mb/s στα 2.4GHz. Αποτελεί σήμερα την πιο διαδεδομένη έκδοση του προτύπου. Είναι γνωστό και ως Wi-Fi [4]. Δημοσιεύτηκε το 2001.
- *IEEE 802.11c* [5]: Συμπλήρωμα της επέκτασης IEEE 802.11d για γεφύρωση της πληροφορίας (information bridging) στα Access Points.

- *IEEE 802.11d* [6]: Επέκταση του αρχικού προτύπου για λειτουργία σε παγκόσμια κλίμακα, σύμφωνα με τους κανονισμούς κάθε χώρας. Η τελική του μορφή δημοσιεύθηκε το 2001.
- *IEEE 802.11e* [7]: Επέκταση σε εξέλιξη (draft) για την ενσωμάτωση ποιότητας υπηρεσίας στο αρχικό πρότυπο.
- *IEEE 802.11f* [8]: Επέκταση για διαλειτουργία μεταξύ των Access Points. Δημοσιεύθηκε το 2003.
- *IEEE 802.11g* [9]: Επέκταση για υποστήριξη ρυθμών μέχρι και 54Mb/s στα 2.4GHz. Δημοσιεύθηκε το 2003.
- *IEEE 802.11h* [10]: Επέκταση για συμβιβασμό με τους ευρωπαϊκούς κανονισμούς στη ζώνη των 5GHz. Δημοσιεύθηκε το 2003.
- *IEEE 802.11i* [11]: Επέκταση για παροχή ασφάλειας στο στρώμα πρόσβασης μέσου. Δημοσιεύθηκε το 2004.
- *IEEE 802.11j* [12]: Επέκταση για συμβιβασμό με τους ιαπωνικούς κανονισμούς στη ζώνη των 5GHz. Δημοσιεύθηκε το 2004.
- *IEEE 802.11k* [13]: Επέκταση σε εξέλιξη (draft) για ενσωμάτωση μηχανισμών διαχείρισης σε WLANs.
- *IEEE 802.11m* [14]: Πρόκειται για έργο (project) που έχει σκοπό τη διόρθωση τυπογραφικών και συντακτικών λαθών στις τυποποιήσεις που αφορούν το πρότυπο IEEE 802.11.
- *IEEE 802.11n* [15]: Επέκταση σε εξέλιξη (draft) για υποστήριξη υψηλών ρυθμών μετάδοσης. Αναμένονται ρυθμοί μέχρι και 540Mb/s.

2.3 Η δομή των δικτύων IEEE 802.11

Οι βασικές δικτυακές οντότητες που υπάρχουν σε ένα IEEE 802.11 WLAN είναι οι *τερματικοί κόμβοι* και το *σημείο πρόσβασης*. Η τελευταία συσκευή είναι διεθνώς γνωστή ως *Access Point (AP)*.



Σχήμα 2.1: Εμπορικά διαθέσιμα προϊόντα για IEEE 802.11 WLANs

Όσον αφορά την πρώτη δικτυακή οντότητα, αναμφισβήτητα, η πιο διαδεδομένη συσκευή τερματικού κόμβου είναι ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής, στον οποίο υπάρχει προσαρτημένη μια δικτυακή διεπαφή (κάρτα) IEEE 802.11. Στο Σχήμα 2.1α φαίνεται μια κάρτα IEEE 802.11 που προσαρμόζεται στη θύρα PCI ενός προσωπικού υπολογιστή (PC), ενώ στο Σχήμα 2.1β φαίνεται μια κάρτα IEEE 802.11 που προσαρμόζεται στη θύρα PCMCIA ενός φορητού υπολογιστή (laptop). Οι κάρτες αυτές παίζουν το ρόλο των καρτών LAN για σύνδεση σε δίκτυα ethernet. Άλλων ειδών τερματικοί κόμβοι, εκτός των

παραπάνω, μπορεί να είναι τα PDAs, κινητά τηλέφωνα τέταρτης γενιάς, διαφόρων ειδών αισθητήρες ή, γενικότερα, συσκευές προοριζόμενες για ειδική χρήση.

Η δεύτερη δικτυακή οντότητα, το access point, εξασφαλίζει την ασύρματη επικοινωνία μεταξύ των κόμβων, παίζοντας ρόλο ανάλογο με αυτόν του hub στα δίκτυα ethernet. Ένα access point φαίνεται στο Σχήμα 2.1γ. Ας έχουμε υπόψη τώρα ότι, στα δίκτυα ethernet, η παρουσία του hub κρίνεται απαραίτητη, καθώς απαιτείται ούτως ή άλλως, μια συσκευή στην οποία να τερματίζονται οι φυσικές συνδέσεις (καλώδια) μεταξύ των κόμβων. Δεν ισχύει όμως το αντίστοιχο και στα WLANs, αφού το ασύρματο μέσο εξασφαλίζει την επικοινωνία των κόμβων στο φυσικό στρώμα, χωρίς την ανάγκη ύπαρξης κάποιας συνδετικής συσκευής, όπως το hub. Με άλλα λόγια, η ύπαρξη του access point μπορεί να παραλειφθεί, και οι κόμβοι να επικοινωνούν απευθείας μεταξύ τους. Ανάλογα τώρα με την ύπαρξη ή όχι access point, προκύπτουν οι παρακάτω τρεις τύποι διασύνδεσης σε ένα δίκτυο IEEE 802.11, που απεικονίζονται στο Σχήμα 2.2.

- *IBSS - Independent Basic Service Set*: Η συγκεκριμένη δομή διασύνδεσης, που απεικονίζεται στο Σχήμα 2.2α, δεν απαιτεί την ύπαρξη access point. Οι τερματικοί κόμβοι επικοινωνούν απευθείας μεταξύ τους, προκειμένου να ανταλλάξουν πληροφορία. Ένα δίκτυο IBSS μπορεί να θεωρηθεί δίκτυο ad hoc.
- *BSS - Basic Service Set*: Ο συγκεκριμένος τρόπος διασύνδεσης, απεικονιζόμενος στο Σχήμα 2.2β, προϋποθέτει την ύπαρξη access point. Συνεπώς, όλοι οι τερματικοί κόμβοι επικοινωνούν με το access point, προκειμένου να ανταλλάξουν πληροφορία μεταξύ τους. Στην περίπτωση αυτή, Το access point, παίζει αντίστοιχο ρόλο με το hub στα δίκτυα ethernet: Όποιο πακέτο λαμβάνει το προωθεί στο ασύρματο μέσο.
- *ESS - Extended Service Set*: Η συγκεκριμένη δομή επικοινωνίας, απεικονιζόμενη στο Σχήμα 2.2γ, προϋποθέτει την ύπαρξη access point που διαθέτει και κάποια άλλη διεπαφή, για σύνδεση σε εξωτερικό δίκτυο. Με τον τρόπο αυτό, πολλά ESS συνιστούν ένα ευρύτερο δίκτυο, που μπορεί επιπλέον να έχει πρόσβαση στο internet. Το access point στη συγκεκριμένη περίπτωση παίζει το διπλό ρόλο hub και γέφυρας, στα ενσύρματα δίκτυα. Σήμερα, τα περισσότερα access points διαθέτουν και μια διεπαφή για δίκτυο ethernet, ώστε να είναι δυνατή η σύνδεση σε ευρύτερο δίκτυο.

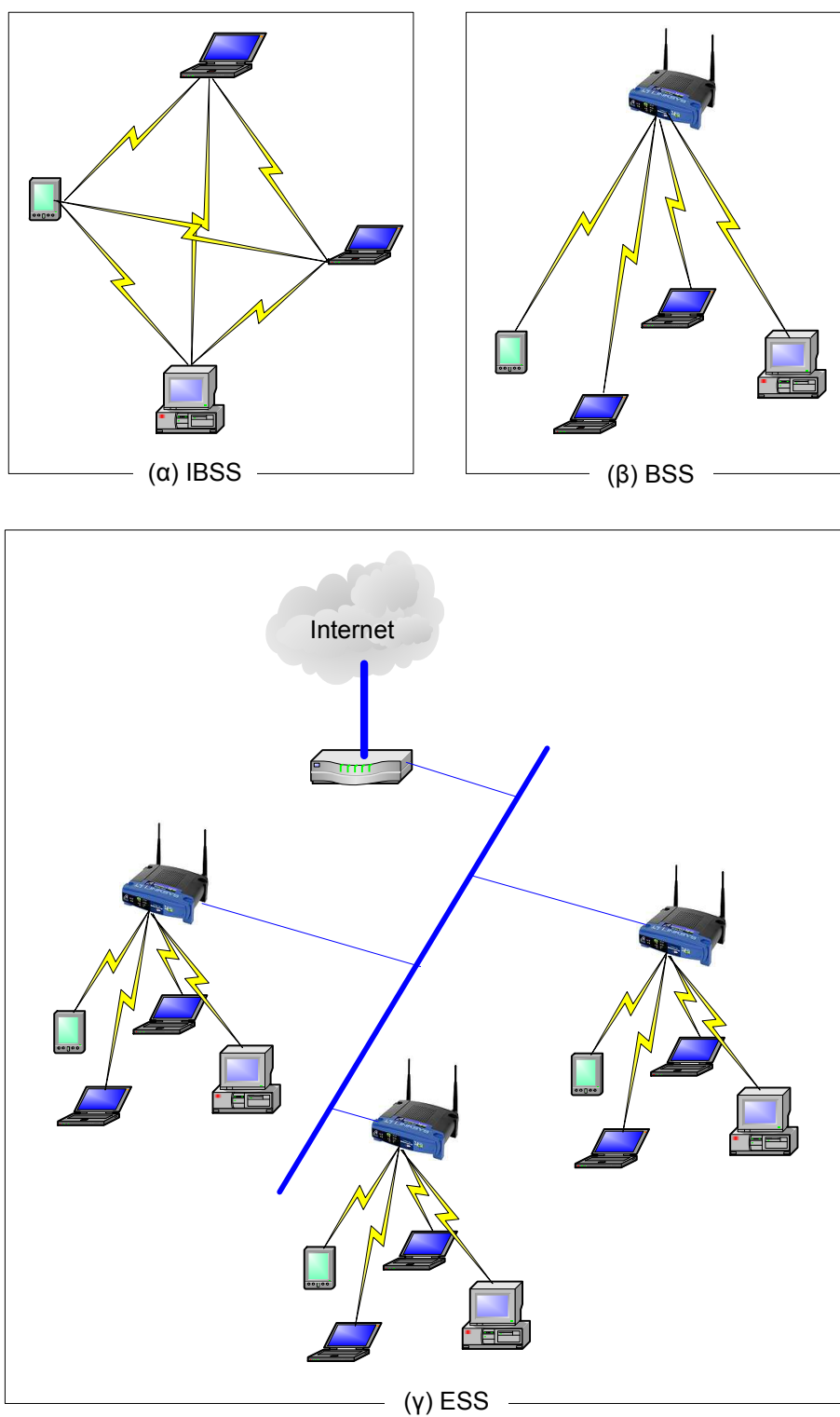
Τα δίκτυα που περιγράφηκαν παραπάνω λειτουργούν με υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, που κυμαίνονται από 1Mb/s ως 54Mb/s. Η επίτευξη των συγκεκριμένων ρυθμών οφείλεται στο ευέλικτο φυσικό στρώμα του προτύπου IEEE 802.11. Προς τη συγκεκριμένη κατεύθυνση, στην επόμενη ενότητα περιγράφονται αναλυτικά οι μηχανισμοί λειτουργίας στο φυσικό στρώμα που ορίζει το πρότυπο, μέσω των οποίων επιτυγχάνονται οι υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης που προσφέρονται.

2.4 Το φυσικό στρώμα του προτύπου IEEE 802.11

Το αρχικό πρότυπο IEEE 802.11 προβλέπει τρία διαφορετικά φυσικά στρώματα. Το πρώτο λειτουργεί με υπέρυθρες ακτινοβολίες στη ζώνη των 850nm-950nm. Τα άλλα δυο λειτουργούν στη μικροκυματική ζώνη ελεύθερης χρήσης *ISM (Industry - Science - Medical)*, στα 2.4GHz. Τα υπόλοιπα πρότυπα (IEEE 802.11a/b/g) λειτουργούν κι αυτά σε μικροκυματική ζώνη, με διαφορετικές όμως τεχνικές διαμόρφωσης. Στις υποενότητες που ακολουθούν περιγράφεται το φυσικό στρώμα για όλα τα πρότυπα της οικογένειας IEEE 802.11.

2.4.1 Το φυσικό στρώμα IR

Το συγκεκριμένο φυσικό στρώμα ορίζεται μόνο στο αρχικό πρότυπο IEEE 802.11. Λειτουργεί στη ζώνη των 850-950nm με υπέρυθρες ακτινοβολίες. Παρά το γεγονός ότι, θεωρητικά, τα φωτονικά συστήματα επιτυγχάνουν μεγαλύτερους ρυθμούς από τα μικροκυματικά, στη συγκεκριμένη περίπτωση υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί. Πρώτον, απαιτείται οπτική επαφή (Line of Sight) για την επικοινωνία μεταξύ δυο



Σχήμα 2.2: Τρόποι διασύνδεσης κόμβων στα δίκτυα IEEE 802.11

κόμβων. Δεύτερον, οι πομποδέκτες πρέπει να τοποθετούνται με μεγάλη ακρίβεια, αλλιώς το σήμα δε λαμβάνεται επιτυχώς. Τα δυο αυτά θέματα, έχουν, μέχρι ενός σημείου, λυθεί με τη χρήση διάχυτου υπέρυθρου σήματος (diffused infrared signal). Τρίτον, η ισχύς εκπομπής είναι πολύ χαμηλή (για να μη βλάπτεται το ανθρώπινο μάτι), με αποτέλεσμα η απόσταση ραδιοκάλυψης να περιορίζεται περίπου στα 25m. Το τελευταίο είναι και το βασικότερο μειονέκτημα από τα παραπάνω, και αποτελεί και τον κύριο λόγο που το συγκεκριμένο φυσικό στρώμα δεν προχώρησε αρκετά εμπορικά.

2.4.2 Το φυσικό στρώμα FHSS

Τα υπόλοιπα δυο φυσικά στρώματα του αρχικού προτύπου IEEE 802.11 χρησιμοποιούν την τεχνική διάχυσης φάσματος (*spread spectrum*), η οποία χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά σε στρατιωτικά δίκτυα, για ελάττωση των παρεμβολών και των υποκλοπών. Με τη συγκεκριμένη τεχνική, ένα ψηφιακό σήμα 'απλώνεται' ώστε να φαίνεται περισσότερο ως τυχαίος θόρυβος, παρά ως ένα σήμα δεδομένων. Η κωδικοποίηση πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας, είτε ολίσθηση συχνότητας (FSK), είτε ολίσθηση φάσης (PSK). Και οι δυο μέθοδοι αυξάνουν το μέγεθος του σήματος και το προσφερόμενο εύρος ζώνης. Παρά το ότι το σήμα εμφανίζεται πιο ισχυρό (μεγαλύτερο εύρος ζώνης) και πιο εύκολο στην ανίχνευσή του, στην πραγματικότητα είναι ακατάληπτο και εμφανίζεται ως θόρυβος, εκτός αν ο δέκτης έχει ρυθμιστεί με τις σωστές παραμέτρους.

Με την τεχνική διάχυσης φάσματος με μεταπήδηση συχνότητας (*Frequency Hopping Spread Spectrum*) το σήμα δεδομένων διαμορφώνεται με κάποιο φέρον σήμα στενής ζώνης, που μπορεί να αλλάζει συχνότητα. Το πρότυπο IEEE 802.11 παρέχει 79 κανάλια του 1MHz¹ στη ζώνη των 2.4GHz, από 2.402GHz ως 2.495GHz. Επιπλέον ορίζονται 22 πρότυποι αλγόριθμοι μέσω των οποίων πραγματοποιείται η μεταπήδηση από κανάλι σε κανάλι. Με βάση τα παραπάνω, όταν δυο κόμβοι θέλουν να επικοινωνήσουν μεταξύ τους, επιλέγουν έναν από τους 22 αλγόριθμους μεταπήδησης και, κατά την επικοινωνία, αλλάζουν συνεχώς κανάλι με κάποιον προκαθορισμένο ρυθμό (τουλάχιστο 2.5hops/s). Με τον τρόπο αυτό, αποφεύγονται οι παρεμβολές που συγκεντρώνονται γύρω από μια κεντρική συχνότητα. Επιπλέον, το σήμα είναι δύσκολο να ανιχνευθεί, καθώς ο πομπός πρέπει να γνωρίζει τόσο το ρυθμό, όσο και τον αλγόριθμο μεταπήδησης από κανάλι σε κανάλι. Με βάση την τεχνική FHSS, ορίζονται, θεωρητικά, 22 ανεξάρτητα κανάλια στη ζώνη των 2.4GHz. Με άλλα λόγια, μπορούν να συνυπάρξουν 22 διαφορετικά δίκτυα, οι κόμβοι των οποίων θα επικοινωνούν μεταξύ τους με ένα από τα 22 πρότυπα μεταπήδησης, χωρίς να υπάρχουν παρεμβολές μεταξύ των δικτύων. Πρακτικά όμως, λόγω της πιθανότητας, κάποια στιγμή, οι κόμβοι δυο δικτύων να επικοινωνούν με το ίδιο πρότυπο, ο αριθμός των ανεξάρτητων καναλιών περιορίζεται στα 15.

2.4.3 Το φυσικό στρώμα DSSS

Με την τεχνική διάχυσης φάσματος ευθείας ακολουθίας (*Direct Sequence Spread Spectrum*), το σήμα διαμορφώνεται ψευδοτυχαία. Συγκεκριμένα, η ακολουθία δυαδικών ψηφίων από την οποία αποτελείται το ψηφιακό σήμα δεδομένων διαμορφώνεται μέσω μιας πρότυπης ακολουθίας ψηφίων που αποτελείται από 11bits, ονομαζόμενη *ψηφιδωτή ακολουθία (chipping sequence)* ή κώδικας Barker. Η συγκεκριμένη ακολουθία χρησιμοποιείται για να διαμορφώσει το σήμα δεδομένων, ώστε αυτό να φαίνεται σαν θόρυβος ευρείας ζώνης. Ένα από τα πλεονεκτήματα της τεχνικής αυτής είναι ότι, ακόμη κι αν κατά τη μετάδοση χαθούν κάποια bits του σήματος, αυτά μπορούν να ανακτηθούν στο δέκτη, μέσω τεχνικών στατιστικής που υπάρχουν ενσωματωμένες σε αυτόν.

Στο πρότυπο IEEE 802.11, η τεχνική DSSS χωρίζει τη ζώνη των 2.4GHz σε 14 διαφορετικά κανάλια των 22MHz. Τα δεδομένα μεταδίδονται σε ένα από τα 14 αυτά κανάλια, χωρίς να γίνεται μεταπήδηση, όπως στην περίπτωση της FHSS. Για να μειωθούν ο θόρυβος και ο αριθμός επαναμεταδόσεων που προκαλούνται από τη μεμονωμένη μετάδοση σε ένα συγκεκριμένο κανάλι, χρησιμοποιείται η προαναφερόμενη διαμόρφωση με την κώδικα Barker.

Με την τεχνική DSSS, κάθε ακολουθία των 11 bits αναπαριστά ένα bit δεδομένων και μετατρέπεται

¹Για Ευρώπη και Αμερική το πρότυπο ορίζει 79 κανάλια. Εξαιρούνται η Γαλλία, όπου ορίζονται 35, και η Ισπανία, όπου ορίζονται 27. Για Ιαπωνία ορίζονται 23.

σε μια κυματομορφή που ονομάζεται σύμβολο. Τα σύμβολα αυτά μεταδίδονται με ρυθμό 1MSymbol/s χρησιμοποιώντας την τεχνική *BPSK* (*Binary Phase Shift Keying*), επιτυγχάνοντας έτσι ρυθμό 1Mb/s. Στην περίπτωση των 2Mb/s, χρησιμοποιείται η τεχνική *QPSK* (*Quadrature Phase Shift Keying*) που διπλασιάζει τον αριθμό των bits δεδομένων που μπορούν να αναπαρασταθούν.

Από την άλλη πλευρά, με χρήση της τεχνικής DSSS ορίζονται, θεωρητικά, 14 ανεξάρτητα κανάλια (συνυπαρξή 14 διαφορετικών WLANs). Πρακτικά όμως, επειδή τα κανάλια αυτά επικαλύπτονται μεταξύ τους, ο αριθμός των ανεξάρτητων καναλιών ώστε να μην παρατηρούνται παρεμβολές περιορίζεται στα τρία.

2.4.4 Το φυσικό στρώμα του IEEE 802.11b

Από τις τεχνικές διάχυσης φάσματος που περιγράφηκαν παραπάνω, η μόνη που μπορεί να εγγυηθεί μεγάλες αποστάσεις ραδιοκάλυψης και μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης είναι η DSSS. Η συγκεκριμένη τεχνική υιοθετήθηκε και στο φυσικό στρώμα του IEEE 802.11b [3].

Το πρότυπο IEEE 802.11b, με σκοπό να αυξήσει τους προσφερόμενους ρυθμούς μετάδοσης, χρησιμοποιεί μια εναλλακτική τεχνική, ονομαζόμενη *Complementary code Keying* (*CCK*). Η συγκεκριμένη τεχνική, αντί να χρησιμοποιεί τον κώδικα Barker των 11 bits, χρησιμοποιεί ένα σετ από 64 λέξεις των 8 bits. Με τον τρόπο αυτό, μπορούν να αναπαρασταθούν μέχρι και 6 bits δεδομένων σε ένα σύμβολο, αντί του ενός που ήταν δυνατό με τον κώδικα Barker. Με βάση την τεχνική CCK, οι ρυθμοί των 5.5Mb/s και 11Mb/s επιτυγχάνονται χρησιμοποιώντας QPSK ως τεχνική διαμόρφωσης, και κωδικοποιώντας 4 bits/symbol και 8 bits/symbol αντίστοιχα. Η μετάδοση πραγματοποιείται με ρυθμό 1.375MSymbols/s.

2.4.5 Το φυσικό στρώμα του IEEE 802.11a

Η ριζική αλλαγή στο φυσικό στρώμα του IEEE 802.11 δόθηκε με το πρότυπο IEEE 802.11a [2]. Εν αντιθέσει με τα προηγούμενα πρότυπα, το IEEE 802.11a χρησιμοποιεί τη μικροκυματική ζώνη *U-NII* (*Unlicensed National Information Infrastructure*) στα 5GHz. Η συγκεκριμένη ζώνη προσφέρει φάσμα 300MHz, εν αντιθέσει με τη ζώνη ISM που προσφέρει 83MHz.

Η τεχνική διαμόρφωσης που χρησιμοποιεί το πρότυπο IEEE 802.11a είναι η *OFDM* (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). Η συγκεκριμένη τεχνική σπάει ένα κανάλι ευρείας ζώνης σε μικρότερα κανάλια, και τα δεδομένα που θα μεταδίδονταν στο μεγάλο κανάλι, μεταδίδονται τώρα παράλληλα στα μικρότερα υποκανάλια, με κωδικοποίηση. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνονται υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης και μεγάλη αξιοπιστία, χάρη στους μηχανισμούς διόρθωσης λαθών.

Το πρότυπο IEEE 802.11a ορίζει 12 ανεξάρτητα κανάλια των 20MHz, από 5.150GHz ως 5.350GHz και από 5.725GHz ως 5.825GHz. Η μετάδοση δεδομένων πραγματοποιείται σε ένα από αυτά τα 12 κανάλια. Το κανάλι που επιλέγεται για τη μετάδοση διασπάται σε 52 μικρότερα υποκανάλια των 300KHz. Τα 48 από αυτά χρησιμοποιούνται για δεδομένα και τα υπόλοιπα για διόρθωση λαθών. Το σήμα, πριν μεταδοθεί, κωδικοποιείται με κάποιον από τους αλγορίθμους κωδικοποίησης που χρησιμοποιεί η OFDM. Η κωδικοποιημένη μετάδοση των συμβόλων πραγματοποιείται σε ρυθμό $250 \cdot R$ KSymbols/s, όπου η παράμετρος R ονομάζεται ρυθμός κωδικοποίησης και μπορεί να πάρει τις τιμές $1/2$, $2/3$ ή $3/4$. Με παράλληλη μετάδοση και στα 48 υποκανάλια, επιτυγχάνεται συνολικός ρυθμός μετάδοσης $250 \cdot R \cdot 48$ KSymbols/s. Η κωδικοποίηση που χρησιμοποιείται τώρα για την απεικόνιση των bits σε σύμβολα μπορεί να είναι BPSK (1bit/symbol), QPSK (2bits/symbol), 16-QAM²(4bits/symbol) ή 64-QAM (6bits/symbol). Δηλώνοντας ως M τον αριθμό των bits/symbol που μπορούν να απεικονιστούν με την κάθε τεχνική κωδικοποίησης, ο ρυθμός μετάδοσης που επιτυγχάνει η OFDM είναι:

$$Data_Rate = 250 \cdot R \cdot 48 \cdot M \quad Kb/s. \quad (2.1)$$

Στον πίνακα 78 του προτύπου IEEE 802.11a [2] παρέχονται οι παράμετροι R και M για κάθε ρυθμό μετάδοσης. Με χρήση της τεχνικής που περιγράφηκε παραπάνω, επιτυγχάνονται ρυθμοί από 6Mb/s ως 54Mb/s.

²16-level Quadrature Amplitude Modulation: Αποδοτική τεχνική διαμόρφωσης πλάτους.

Το βασικό μειονέκτημα του IEEE 802.11a έναντι του IEEE 802.11b, είναι οι μικρότερες αποστάσεις ραδιοκάλυψης. Πράγματι, καθώς η εκπεμπόμενη ισχύς (άρα και η απόσταση ραδιοκάλυψης) είναι αντιστρόφως ανάλογη της συχνότητας, μετακινούμενοι από τα 2.4GHz στα 5GHz, η μέγιστη απόσταση ραδιοκάλυψης μειώνεται.

Τέλος, αναφέρουμε ότι η εκμετάλλευση της ζώνης U-NII επιτρέπει την ύπαρξη 12 ανεξάρτητων καναλιών. Πρακτικά όμως, λόγω παρεμβολών, ο αριθμός τους περιορίζεται στα οκτώ.

Ολοκληρώνοντας την παρουσίαση των φυσικών στρώματων που ορίζονται στα διάφορα πρότυπα της οικογένειας IEEE 802.11, να αναφέρουμε ότι, το φυσικό στρώμα του προτύπου IEEE 802.11g, λόγω της μεγαλύτερης πολυπλοκότητάς του, θα αναλυθεί εκτενώς στο Κεφάλαιο 3. Όσο για το φυσικό στρώμα του IEEE 802.11n, επειδή το πρότυπο δεν έχει ωριμάσει ακόμη σχεδιαστικά, θα περιοριστούμε στο να αναφέρουμε ότι θα επιτυγχάνονται, θεωρητικά, ρυθμοί μέχρι 540Mb/s, χρησιμοποιώντας κεραίες *MIMO* (*Multiple Input Multiple Output*).

Ως σύνοψη των παραπάνω, παρατίθεται ο Πίνακας 2.1 όπου καταγράφονται διάφορες παράμετροι που αφορούν το φυσικό στρώμα IEEE 802.11.

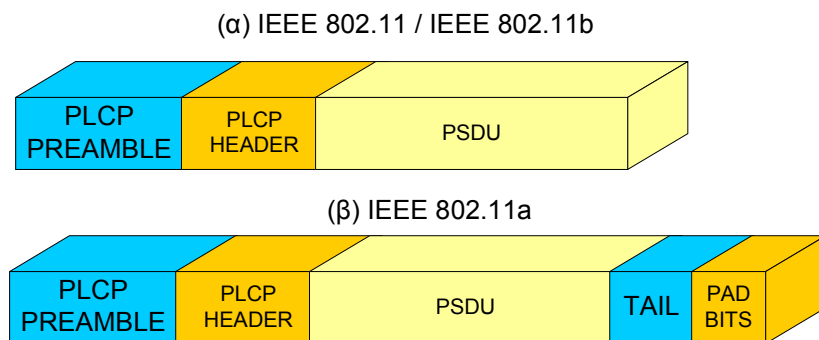
Πρότυπο	IEEE 802.11	IEEE 802.11a	IEEE 802.11b	IEEE 802.11g
Ζώνη	ISM 2.4GHz IR 850-950nm	U-NII 5GHz	ISM 2.4GHz	ISM 2.4GHz
Διαμόρφωση	FSSS/DSSS	OFDM	DSSS	DSSS/OFDM
Ρυθμοί	1Mb/s - 2Mb/s	6Mb/s - 54Mb/s	1Mb/s - 11Mb/s	1Mb/s - 54Mb/s
Coverage (indoor)	100m (1Mb/s)	50m (6Mb/s) 13m (54Mb/s)	120m (1Mb/s) 48m (11Mb/s)	120m (1Mb/s) 27m (54Mb/s)
Coverage (outdoor)	600m (1Mb/s)	300m(6Mb/s) 30m(54Mb/s)	600m (1Mb/s) 300m (11Mb/s)	600m (1Mb/s) 75m (54Mb/s)
Channels (θεωρητικά)	22 (FHSS) 14 (DSSS)	12	14	14
Channels (πρακτικά)	15 (FHSS) 3 (DSSS)	8	3	3

Πίνακας 2.1: Γενικές παράμετροι που αφορούν το φυσικό στρώμα IEEE 802.11

Θα κλείσουμε την παρούσα ενότητα περιγράφοντας τη δομή του πακέτου φυσικού στρώματος όπως ορίζεται στο πρότυπο IEEE 802.11.

2.4.6 Η δομή του πακέτου φυσικού στρώματος IEEE 802.11

Στο Σχήμα 2.3 απεικονίζεται η δομή του πακέτου φυσικού στρώματος IEEE 802.11. Το συγκεκριμένο πακέτο ονομάζεται και *Physical layer Protocol Data Unit (PPDU)*.



Σχήμα 2.3: Η δομή του πακέτου PPDU στο πρότυπο IEEE 802.11

Το πακέτο διαφέρει ελαφρώς για το πρότυπο IEEE 802.11a, όπου προστίθενται και κάποια bits στο τέλος

του. Σε όλα τα πρότυπα πάντως, το πακέτο φυσικού στρώματος αποτελείται από τρία βασικά τμήματα:

- *PLCP Preamble*: Το συγκεκριμένο τμήμα ονομάζεται Physical Layer Convergence Protocol Preamble και σημαίνει προοίμιο φυσικού στρώματος. Το προοίμιο PLCP χρησιμεύει για το συγχρονισμό της μετάδοσης και, γενικότερα, της επικοινωνίας των κόμβων στο φυσικό στρώμα.
- *PLCP Header*: Το συγκεκριμένο τμήμα ονομάζεται επικεφαλίδα PLCP και περιέχει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες που σχετίζονται με το φυσικό στρώμα.
- *PSDU*: Το συγκεκριμένο τμήμα ονομάζεται PLCP Service Data Unit και περιέχει το πακέτο του ανώτερου στρώματος. Στην ουσία, είναι το τμήμα που περιέχει τα δεδομένα του πακέτου.

Το μήκος και η διάρκεια του προοιμίου και της επικεφαλίδας είναι σταθερά, αλλά διαφέρουν μεταξύ των προτύπων. Οι τιμές τους παρατίθενται αργότερα, στους συγκεντρωτικούς Πίνακες 2.2 και 2.3. Το μήκος του PSDU είναι μεταβλητό και εξαρτάται από το μέγεθος του πακέτου στο στρώμα MAC. Με το συγκεκριμένο στρώμα θα ασχοληθούμε στην ενότητα που ακολουθεί.

2.5 Το στρώμα MAC στο πρότυπο IEEE 802.11

Όπως ειπώθηκε και στο εισαγωγικό κεφάλαιο, πολλές φορές, το πρότυπο IEEE 802.11 παρομοιάζεται με ασύρματο Ethernet. Ο λόγος είναι η ομοιότητα που παρουσιάζεται στο στρώμα πρόσβασης μέσου (*Medium Access Control-MAC*) των δυο προτύπων. Πράγματι, και στα δυο πρωτόκολλα, ο χρόνος είναι χωρισμένος σε *χρονοθυρίδες (time slots)*. Αυτό σημαίνει ότι οι κόμβοι δε μπορούν να μεταδώσουν οποιαδήποτε χρονική στιγμή, αλλά μόνο στην αρχή κάθε χρονοθυρίδας. Η διάρκεια μιας χρονοθυρίδας ορίζεται στο πρότυπο από την παράμετρο *slotTime* και είναι ίση με το χρόνο που χρειάζεται ένας κόμβος για να ανιχνεύσει τη μετάδοση ενός πακέτου στο μέσο. Από την άλλη πλευρά, το πρωτόκολλο πρόσβασης μέσου και στα δυο πρότυπα είναι το *Carrier Sense Multiple Access (CSMA)*, που σημαίνει πολλαπλή πρόσβαση με αίσθηση μέσου. Το συγκεκριμένο πρωτόκολλο ανήκει στα πρωτόκολλα τυχαίας πρόσβασης, όπου οι κόμβοι έχουν τη δυνατότητα να αντιλαμβάνονται αν το μέσο είναι ελεύθερο ή αν κάποια μετάδοση λαμβάνει χώρα. Πιο συγκεκριμένα, όταν ένας κόμβος θέλει να μεταδώσει, αντιλαμβάνεται πρώτα το μέσο. Αν αυτό είναι ελεύθερο, τότε μεταδίδει. Αν είναι κατειλημμένο, περιμένει μέχρι η μετάδοση που λαμβάνει χώρα να τελειώσει, και μετά μεταδίδει. Πάρα ταύτα, υπάρχει μια βασική διαφορά στο μηχανισμό λειτουργίας των προτύπων IEEE 802.3 (Ethernet) και IEEE 802.11. Το πρώτο χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο *CSMA/CD (Collision Detection)*. Αυτό σημαίνει ότι οι κόμβοι έχουν τη δυνατότητα να αντιληφθούν από μόνοι τους την ύπαρξη σύγκρουσης πακέτων στο μέσο. Το δεύτερο πρότυπο χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο *CSMA/CA (Collision Avoidance)*. Αυτό σημαίνει ότι, λόγω της φύσης του ασύρματου μέσου, οι κόμβοι δεν έχουν τη δυνατότητα να αντιληφθούν από μόνοι τους την ύπαρξη σύγκρουσης, οπότε χρησιμοποιούνται συγκεκριμένοι μηχανισμοί αποφυγής σύγκρουσης. Με βάση το παραπάνω πρωτόκολλο, το αρχικό πρότυπο IEEE 802.11 προβλέπει τρεις διαφορετικές μεθόδους πρόσβασης οι οποίες περιγράφονται παρακάτω.

2.5.1 Distributed Coordination Function (DCF)

Η μέθοδος *Distributed Coordination Function*, που σημαίνει μέθοδος κατανεμημένου συντονισμού, είναι η πιο βασική από τις δυο μεθόδους πρόσβασης του IEEE 802.11, και είναι και η μόνη που υλοποιείται σήμερα στην πλειονότητα των δικτυακών προϊόντων. Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη μέθοδο, όταν ένας σταθμός θέλει να μεταδώσει κάποιο πακέτο, πρώτα πρέπει να περιμένει για ένα χρονικό διάστημα ονομαζόμενο *Distributed Interframe Space (DIFS)*. Σύμφωνα με το πρότυπο, για τη διάρκεια του DIFS ισχύει $DIFS = SIFS + 2SlotTime$. Η παράμετρος SIFS θα εξηγηθεί παρακάτω. Αν το μέσο είναι αδρανές για χρόνο τουλάχιστον ίσο με DIFS, τότε ο κόμβος μεταδίδει το πακέτο του. Αν μέσα στο διάστημα DIFS συμβεί κάποια μετάδοση, τότε ο κόμβος περιμένει ξανά για χρόνο ίσο με DIFS, μέχρι να μη συμβεί κάποια μετάδοση μέσα στο διάστημα αυτό.

Ας υποθέσουμε ότι ο κόμβος για τον οποίο έγινε αναφορά παραπάνω, ξεκινά να μεταδίδει το πακέτο του στο μέσο. Η κατάληξη της ενέργειας αυτής μπορεί να είναι μια επιτυχής μετάδοση, ή μια σύγκρουση, όταν κάποιος άλλος κόμβος μεταδώσει παράλληλα. Ας υποθέσουμε ότι η μετάδοση του υπό μελέτη κόμβου είναι επιτυχής. Σε ένα ασύρματο μέσο όμως, δεν υπάρχει τρόπος ο αποστολέας να αντιληφθεί αν η μετάδοσή του ήταν ή όχι επιτυχής. Για το λόγο αυτό ο παραλήπτης στέλνει στο αποστολέα ένα πακέτο επιβεβαίωσης, ή αλλιώς *acknowledgement (ACK)*, ώστε ο τελευταίος να καταλάβει ότι η μετάδοσή του ήταν επιτυχής. Ο τρόπος είναι ο εξής: Μόλις ο παραλήπτης λάβει το πακέτο, περιμένει για ένα διάστημα *Short Interframe Space (SIFS)*, απαραίτητο για να αντιστραφεί η πολικότητα των πομποδεκτών, και στέλνει στον παραλήπτη το πακέτο ACK. Ο αποστολέας, αν λάβει την επιβεβαίωση εντός διαστήματος ίσο με *ACK_Timeout* (η τιμή του ορίζεται στο πρότυπο), τότε μετάδοσή του ήταν επιτυχής. Αν δεν το λάβει εντός του συγκεκριμένου διαστήματος, υποθέτει ότι έγινε σύγκρουση και ξαναστέλνει το πακέτο. Τι γίνεται όμως αν, κατά το διάστημα SIFS, που περιμένει ο παραλήπτης, κάποιος άλλος κόμβος μεταδώσει; Το συγκεκριμένο πρόβλημα έχει λυθεί με κατάλληλη ρύθμιση των τιμών SIFS και DIFS. Πράγματι, ο κόμβος που θέλει να μεταδώσει θα πρέπει να περιμένει τουλάχιστο DIFS. Επειδή η διάρκεια DIFS είναι μεγαλύτερη από τη SIFS, με το πέρας του SIFS, ο παραλήπτης θα στείλει την επιβεβαίωση, οπότε, ένας άλλος κόμβος που προσδοκεί να μεταδώσει, θα αντιληφθεί το μέσο κατειλημμένο και θα περιμένει μέχρι την ολοκλήρωση μετάδοσης της επιβεβαίωσης. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται ότι η μετάδοση ενός πακέτου και της επιβεβαίωσής του θα διεξαχθούν χωρίς την παρεμβολή μετάδοσης από άλλους κόμβους.

Ας πάρουμε τώρα την περίπτωση όπου μια μετάδοση είναι ανεπιτυχής. Αυτό συμβαίνει όταν δυο ή περισσότεροι κόμβοι μεταδώσουν στην ίδια χρονοθυρίδα, οπότε συμβαίνει σύγκρουση. Ερμηνεύοντας τη σύγκρουση με όρους φυσικού στρώματος, αυτό σημαίνει ότι τα σήματα που στέλνουν οι δυο κόμβοι μπερδεύονται, με αποτέλεσμα η λήψη στους δέκτες να είναι ανεπιτυχής. Στη συγκεκριμένη περίπτωση οι κόμβοι-αποστολείς δε θα λάβουν κάποια επιβεβαίωση, οπότε, μόλις η σύγκρουση ολοκληρωθεί, θα πρέπει να ξαναστείλουν τα πακέτα τους. Για να εξασφαλιστεί ότι δε θα ξανασυμβεί σύγκρουση με τους ίδιους κόμβους, ακολουθείται μια διαδικασία, γνωστή ως *διαδικασία οπισθοδρόμησης (backoff process)*. Κατά τη διαδικασία αυτή, μόλις η μετάδοση των συγκρουόμενων πακέτων τελειώσει, κάθε κόμβος που έχει εμπλακεί στη σύγκρουση, επιλέγει ένα τυχαίο διάστημα σε slots, με το οποίο αρχικοποιεί έναν μετρητή γνωστό ως *backoff counter*. Ο συγκεκριμένος μετρητής, αφού αρχικοποιηθεί, αρχίζει να μετράει αντίστροφα, ελαττώνοντας την τιμή του σε κάθε slot. Όταν ο backoff counter μηδενιστεί, ο κόμβος περιμένει επιπλέον για DIFS, μέχρι να αντιληφθεί το μέσο αδρανές, και στη συνέχεια στέλνει το πακέτο.

Τονίζεται ότι, κατά τη διαδικασία backoff, όπου ο backoff counter μειώνεται, όταν ο κόμβος που βρίσκεται στη διαδικασία backoff αντιληφθεί ότι κάποιος άλλος κόμβος αρχίζει να μεταδίδει, ο backoff counter σταματά να μειώνεται (παγώνει), ως ότου ολοκληρωθεί η μετάδοση. Με το πέρας της μετάδοσης, ο κόμβος περιμένει μέχρι το μέσο να καταστεί αδρανές για τουλάχιστο DIFS, και συνεχίζεται η μείωση του backoff counter από το σημείο που είχε παγώσει.

Το διάστημα που περιμένουν οι κόμβοι στη διαδικασία backoff, που είναι και η τιμή με την οποία αρχικοποιείται ο backoff counter ονομάζεται backoff interval και μετρείται σε χρονοθυρίδες. Συγκεκριμένα, ο κόμβος επιλέγει τυχαία έναν αριθμό χρονοθυρίδων από 1 ως CW. Η παράμετρος CW ονομάζεται *Contention Window*, που σημαίνει *παράθυρο ανταγωνισμού*, και μετρείται σε χρονοθυρίδες. Κατά την πρώτη ανεπιτυχή μετάδοση, το contention window έχει την τιμή CW_{min}. Η συγκεκριμένη παράμετρος ονομάζεται *minimum contention window* και η τιμή της ορίζεται στο πρότυπο. Μετά από κάθε ανεπιτυχή μετάδοση (που αφορά το ίδιο, συγκεκριμένο πακέτο), η τιμή του contention window διπλασιάζεται, ώστε το εύρος τιμών στο οποίο θα επιλέξει ο κόμβος το διάστημα backoff να μεγαλώνει. Με τον τρόπο αυτό ελαττώνεται η πιθανότητα δυο κόμβοι να επιλέξουν την ίδια τιμή για το διάστημα backoff που θα περιμένουν. Όταν το contention window φτάσει μια τιμή ίση με CW_{max} (*maximum contention window*), τότε σταματά να διπλασιάζεται σε κάθε επαναμετάδοση. Η τιμή του CW_{max} ορίζεται στο πρότυπο.

Στο σημείο αυτό, έχοντας εξηγήσει τη διαδικασία backoff, θα κάνουμε μια συμπλήρωση όσον αφορά τον τρόπο αποστολής ενός πακέτου. Ειπώθηκε προηγουμένως ότι, όταν θέλει κάποιος κόμβος να στείλει ένα πακέτο, τότε πρέπει να περιμένει για διάστημα DIFS. Στην πραγματικότητα, ο μηχανισμός είναι λίγο πιο σύνθετος. Αν κατά το διάστημα DIFS δεν πραγματοποιήθηκε κάποια μετάδοση, τότε ο κόμβος περιμένει απλά DIFS και στέλνει το πακέτο του. Αν όμως κατά το διάστημα DIFS που περιμένει ο κόμβος συμβεί κάποια μετάδοση, τότε ο κόμβος θα πρέπει να περιμένει για DIFS, μέχρι να εξασφαλίσει

ότι δε συνέβηκε μετάδοση και μετά, μπαίνει στη διαδικασία backoff. Με το πέρας της διαδικασίας αυτής, στέλνει το πακέτο. Ο παραπάνω μηχανισμός, σε πολλά άρθρα περιγράφεται αλλιώς. Αν έχει περάσει χρόνος μεγαλύτερος του DIFS από την τελευταία μετάδοση στο μέσο, τότε ο κόμβος μεταδίδει το πακέτο χωρίς να μπει στη διαδικασία backoff. Αν όμως έχει περάσει χρόνος μικρότερος του DIFS από την τελευταία μετάδοση στο μέσο, τότε ο κόμβος ακολουθεί πρώτα τη διαδικασία backoff. Και οι δυο παραπάνω τρόποι εξήγησης της διαδικασίας είναι όμοιοι και αναλύουν ακριβώς το ίδιο γεγονός. Ο λόγος που το πρότυπο προβλέπει το συγκεκριμένο διαχωρισμό είναι για να αποφύγει τις συγκρούσεις όταν υπάρχει μεγάλος φόρτος κίνησης. Πράγματι, αν το διάστημα που πέρασε μετά από την τελευταία μετάδοση ενός πακέτου είναι μικρότερο από DIFS, ο φόρτος κίνησης είναι μεγάλος, οπότε είναι και μεγάλη η πιθανότητα να συμβεί σύγκρουση κατά την υπεισερχόμενη μετάδοση. Για την αποφυγή της σύγκρουσης, ο κόμβος ακολουθεί εξ' αρχής τη διαδικασία backoff. Αν όμως ο φόρτος κίνησης είναι μικρός, τότε και η πιθανότητα να συμβεί σύγκρουση είναι μικρή, οπότε η διαδικασία backoff προσδίδει στις περισσότερες περιπτώσεις, άσκοπα ένα επιπλέον διάστημα αναμονής. Για το λόγο αυτό, ο κόμβος απλά περιμένει διάστημα DIFS και στέλνει το πακέτο του.

Μια επιπλέον περίπτωση, στην οποία ένας κόμβος ακολουθεί τη διαδικασία backoff από την πρώτη κιόλας μετάδοση, είναι όταν έχει στείλει ένα πακέτο και, αμέσως μετά, θέλει να στείλει κι άλλο. Τότε, προς αποφυγή της συνεχούς απασχόλησης του μέσου από τον ίδιο κόμβο, ο συγκεκριμένος κόμβος πρέπει να μπει στη διαδικασία backoff, ακόμη κι αν το μέσο είναι αδρανές για διάστημα DIFS. Εξαίρεση στο συγκεκριμένο, αποτελεί η περίπτωση όπου ένα πακέτο που έρχεται από το στρώμα δικτύου είναι μεγαλύτερο από το μέγιστο μέγεθος του πακέτου MAC που ορίζει το πρότυπο. Στην περίπτωση αυτή, ο κόμβος σπάει το πακέτο σε μικρότερα τα οποία στέλνει διαδοχικά χωρίς καν να περιμένει DIFS. Η δυνατότητα αυτή ισχύει μόνο εφ' όσον η συνολική διάρκεια αποστολής όλων των επιμέρους πακέτων και λήψης των αντίστοιχων επιβεβαιώσεων δεν ξεπερνά ένα διάστημα $TXOP$, η τιμή του οποίου ορίζεται στο πρότυπο.

Με βάση τα παραπάνω, το αρχικό διάστημα CW , από το οποίο θα επιλεγεί μια τυχαία τιμή διαστήματος backoff, δίνεται από την Εξίσωση 2.2 (όταν ο κόμβος εκτελεί τη διαδικασία backoff και κατά την πρώτη προσπάθεια μετάδοσης) και την Εξίσωση 2.3 (όταν δεν εκτελείται η διαδικασία backoff κατά την πρώτη μετάδοση). Όπως ειπώθηκε και παραπάνω, το συγκεκριμένο διάστημα CW ονομάζεται contention window. Στις εξισώσεις που ακολουθούν, m είναι ο αριθμός των επαναμεταδόσεων και M είναι ο αριθμός των επαναμεταδόσεων για τον οποίο η τιμή του contention window γίνεται CW_{max} .

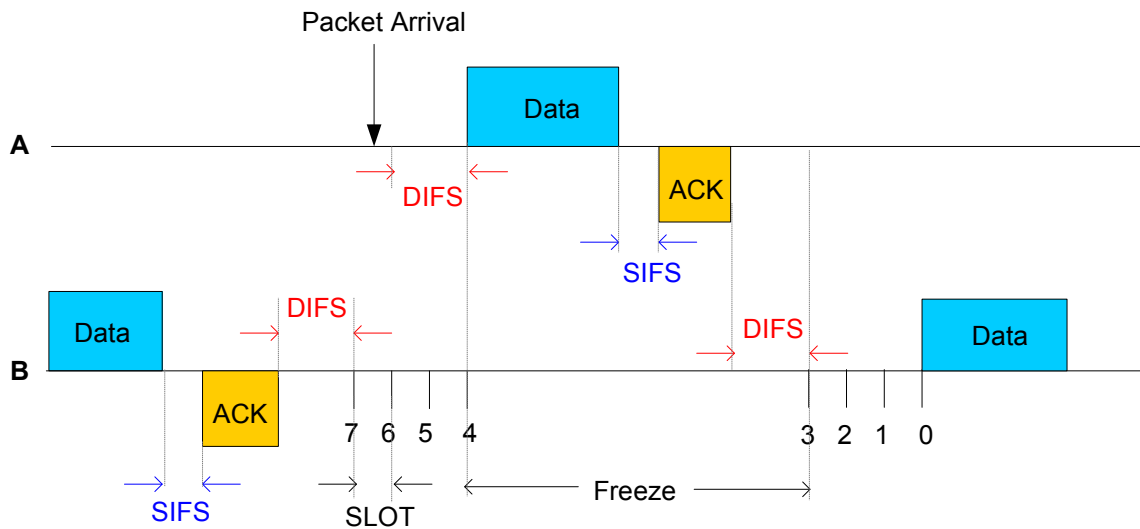
$$CW = \begin{cases} 2^m CW_{min}, & 1 \leq m \leq M, \\ CW_{max}, & m > M. \end{cases} \quad (2.2)$$

$$W = \begin{cases} 0, & m = 1, \\ 2^{m-2} CW_{min}, & 2 \leq m \leq M, \\ CW_{max}, & m > M. \end{cases} \quad (2.3)$$

Ας δούμε τώρα ένα παράδειγμα [16], το οποίο απεικονίζεται στο Σχήμα 2.4.

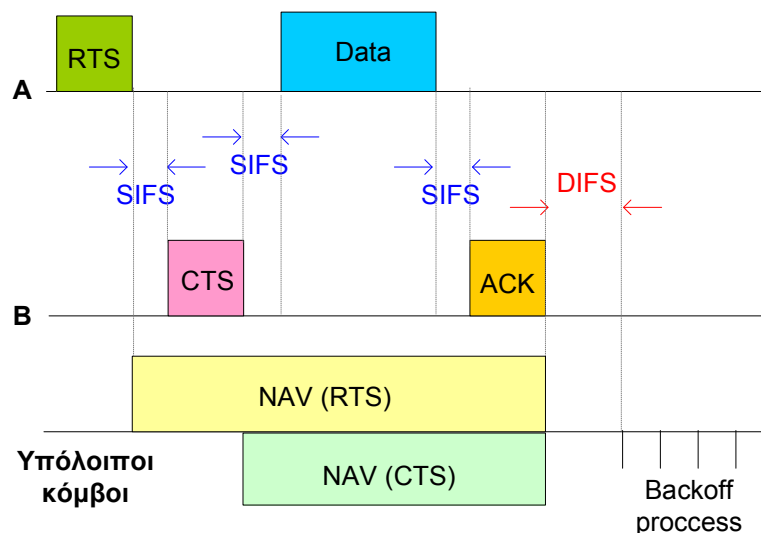
Ο κόμβος B, μόλις έχει τελειώσει τη μετάδοση ενός πακέτου, πήρε την επιβεβαίωση, και ετοιμάζεται να στείλει ένα άλλο. Ο κόμβος A δεν έχει στείλει πακέτο για πολλή ώρα, και ένα πακέτο φτάνει προς αποστολή τη στιγμή που δηλώνεται με το βέλος 'packet arrival'. Ο κόμβος B, αφού αμέσως πριν είχε στείλει ένα πακέτο, πρέπει να μπει υποχρεωτικά στη διαδικασία backoff. Περιμένει, λοιπόν, διάστημα DIFS και επιλέγει μια τυχαία τιμή για το διάστημα backoff. Η τιμή αυτή είναι 7. Μεταξύ, τώρα, του slot 7 και του slot 6, έρχεται πακέτο προς μετάδοση στον A. Επειδή ο χρόνος είναι διακριτός και χωρίζεται σε slots, ο A αρχίζει να περιμένει DIFS από την αρχή του slot 6. Για όλο το διάστημα DIFS που περιμένει, δεν έχουμε μετάδοση στο μέσο. Συνεπώς, ο A στέλνει το πακέτο του. Για όλη τη διάρκεια της μετάδοσης του A και της λήψης της ACK, ο B παγώνει τον backoff counter. Όταν η μετάδοση του A τελειώσει, ο B περιμένει DIFS, και αφού εξασφαλίσει ότι στο διάστημα αυτό δε συνέβηκε μετάδοση, επανενεργοποιεί το backoff counter. Όταν ο backoff counter μηδενιστεί, ο B στέλνει το πακέτο.

Εκτός από τον παραπάνω βασικό μηχανισμό πρόσβασης, το πρότυπο IEEE 802.11 προβλέπει έναν εναλλακτικό μηχανισμό, ονομαζόμενο RTS/CTS, ώστε να μειώσει το χρόνο που χάνεται από τις συγκρούσεις. Σύμφωνα με το μηχανισμό RTS/CTS, όταν ένας κόμβος θέλει να στείλει ένα πακέτο, αντί να στείλει



Σχήμα 2.4: Ο βασικός μηχανισμός πρόσβασης στο πρότυπο IEEE 802.11

το ίδιο, στέλνει πρώτα ένα αίτημα αποστολής μέσω ενός πακέτου συγκεκριμένου μήκους, γνωστό ως πακέτο *RTS* (από τα αρχικά *Request to Send*). Όταν οι υπόλοιποι κόμβοι λάβουν το συγκεκριμένο πακέτο καταλαβαίνουν ότι κάποιος κόμβος θέλει να μεταδώσει. Προς απάντηση στο *RTS*, ο παραλήπτης περιμένει *SIFS* και στέλνει μια επιβεβαίωση *Clear to Send*, μέσω ενός αντίστοιχου πακέτου *CTS*. Ο κόμβος που έστειλε το *RTS*, μόλις λάβει το *CTS*, περιμένει *SIFS* και μεταδίδει. Στο τέλος της μετάδοσης, ο παραλήπτης στέλνει την αντίστοιχη *ACK*, αφού περιμένει *SIFS*. Οι υπόλοιποι κόμβοι τώρα, έλαβαν, είτε το *RTS* είτε το *CTS*, και περιμένουν μέχρι την ολοκλήρωση της μετάδοσης, καθώς, τα πακέτα *RTS* και *CTS*, εκτός των άλλων, περιέχουν και το χρόνο που απαιτείται για την ολοκλήρωση της μετάδοσης του πακέτου που προσδοκεί να στείλει ο κόμβος-αποστολέας. Με βάση το χρόνο αυτό, οι υπόλοιποι κόμβοι, αρχικοποιούν έναν μετρητή ονομαζόμενο *Network Allocation Vector (NAV)*. Η διάρκεια του χρόνου για τον οποίο μειώνεται το *NAV* είναι ίση με τη διάρκεια που απαιτείται για την ολοκλήρωση της μετάδοσης του πακέτου που επιθυμεί να μεταδώσει ο κόμβος που έστειλε το *RTS*. Μόλις το *NAV* μηδενιστεί, οι κόμβοι καταλαβαίνουν ότι η μετάδοση έχει τελειώσει, οπότε μπορούν να συναγωνιστούν για το μέσο. Στο Σχήμα 2.5 απεικονίζεται ένα παράδειγμα [16] με χρήση του μηχανισμού *RTS/CTS*.

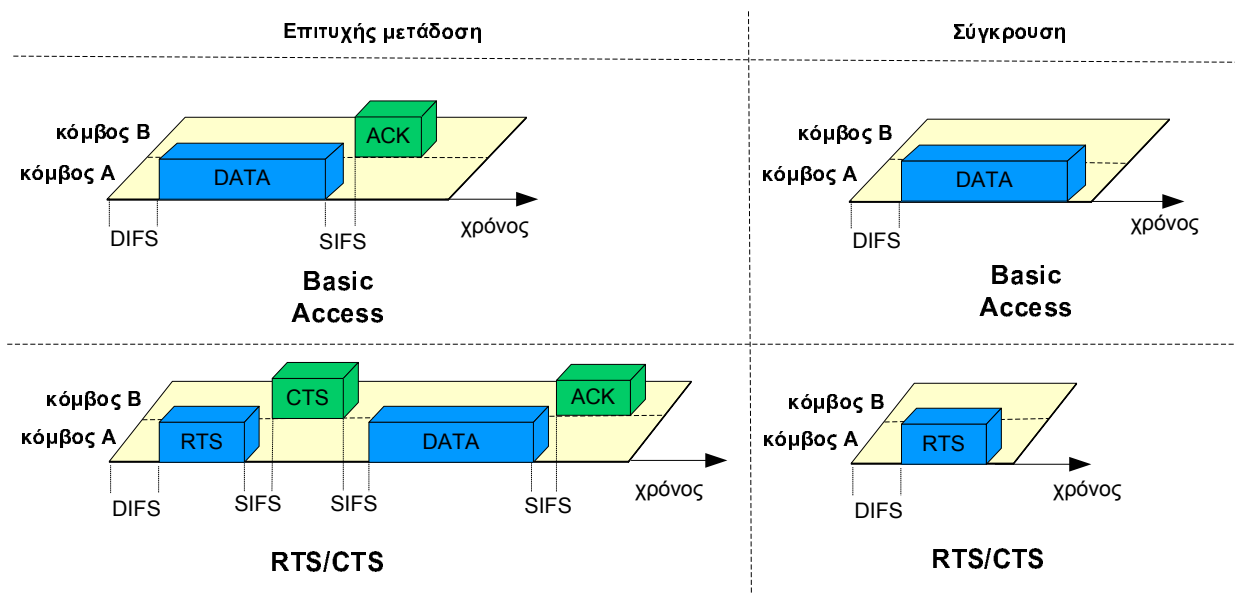


Σχήμα 2.5: Ο μηχανισμός πρόσβασης *RTS/CTS* στο πρότυπο IEEE 802.11

Ο κόμβος A έχει ένα πακέτο προς μετάδοση στον κόμβο B. Προς την κατεύθυνση αυτή, στέλνει ένα *RTS*. Ο B, αφού περιμένει *SIFS* στέλνει το *CTS*. Οι υπόλοιποι κόμβοι έλαβαν είτε το *RTS*, είτε το *CTS* και ξέρουν πόσο θα διαρκέσει η μετάδοση του A. Καθένας τους, λοιπόν, αρχικοποιεί το *NAV*. Ο A, μόλις

λάβει το CTS, περιμένει SIFS και στέλνει το πακέτο. Ο B, μόλις λάβει το πακέτο δεδομένων από τον A, περιμένει SIFS και στέλνει την ACK. Με τη λήψη της ACK από τον A, τα NAVs των υπόλοιπων κόμβων μηδενίζονται, και το κανάλι είναι πάλι ελεύθερο προς μετάδοση.

Αναμφισβήτητα, η χρήση του RTS/CTS αυξάνει την επίδοση του συστήματος. Αυτό έγκειται στο γεγονός ότι, μια σύγκρουση, λαμβάνει χώρα μόνο μεταξύ των πακέτων RTS (όταν δυο ή περισσότεροι κόμβοι θέλουν να στείλουν πακέτο την ίδια στιγμή). Καθώς τα συγκεκριμένα πακέτα είναι πολύ μικρότερα από τα πακέτα δεδομένων, η σύγκρουση διαρκεί πολύ λιγότερο, οπότε μειώνεται και ο χρόνος που το μέσο μένει κατειλημμένο λόγω συγκρούσεων. Από την άλλη όμως, όταν οι μεταδόσεις είναι επιτυχείς, η χρήση του RTS/CTS προσδίδει έναν φόρτο στο σύστημα. Μια εκτίμηση του χρόνου που διαρκεί μια επιτυχής μετάδοση και μια σύγκρουση με χρήση του βασικού μηχανισμού πρόσβασης και του RTS/CTS, μπορεί να γίνει από το Σχήμα 2.6, όπου απεικονίζεται η αλληλουχία πλαισίων με βάση τους δυο προαναφερθέντες μηχανισμούς.



Σχήμα 2.6: Αλληλουχία πλαισίων κατά τη μετάδοση με το βασικό μηχανισμό και με RTS/CTS

Συνεπώς, η αποδοτικότητα του RTS/CTS εξαρτάται από το μήκος του πακέτου δεδομένων που 'προστατεύεται'. Προς την κατεύθυνση αυτή, το πρότυπο IEEE 802.11 ορίζει μια παράμετρο ονομαζόμενη *κατώφλι RTS* (*RTS threshold*). Με τη χρήση της παραμέτρου αυτής ακολουθείται ένας υβριδικός μηχανισμός, μέσω του οποίου, πακέτα μεγαλύτερα του κατωφλίου RTS μεταδίδονται με RTS/CTS, ενώ πακέτα μικρότερα του κατωφλίου RTS μεταδίδονται με το βασικό μηχανισμό πρόσβασης. Η τιμή του RTS threshold δεν ορίζεται στο πρότυπο και αφήνεται στην επιλογή του σχεδιαστή δικτύου. Τέλος, αξίζει να ειπωθεί ότι, ο μηχανισμός RTS/CTS, λόγω του τρόπου με τον οποίο χειρίζεται το πρόβλημα των συγκρούσεων, ονομάζεται και *μηχανισμός εικονικής αίσθησης μέσου* (*virtual carrier sense mechanism*).

Συνοψίζοντας την περιγραφή της μεθόδου DCF, στους Πίνακες 2.2 και 2.3, συγκεντρώνονται οι τιμές όλων των παραμέτρων που αναφέρθηκαν παραπάνω, όπως ορίζονται στα πρότυπα της οικογένειας IEEE 802.11. Η παράμετρος Max MPDU είναι το μέγιστο μήκος που μπορεί να έχει το πακέτο MAC.

Αξίζει να ειπωθεί ότι η μέθοδος πρόσβασης DCF χαρακτηρίζεται γενικώς από απλότητα στην υλοποίησή της και σφριγηλότητα (robustness) στη λειτουργία της. Αυτός είναι και ο λόγος που καταξιώθηκε ως αποκλειστικά υλοποιήσιμη μέθοδος στα εμπορικά προϊόντα. Ο τρόπος επικοινωνίας όμως που πρεσβεύει, δεν προσφέρει υποστήριξη ποιότητας υπηρεσίας, με την έννοια των εγγυημένων ορίων χρονικής καθυστέρησης και του διαχωρισμού υπηρεσιών. Πράγματι, αφ' ενός, η τυχαία πρόσβαση που πρεσβεύει η επιλογή του διαστήματος backoff δεν είναι ικανή να εγγυηθεί σαφή όρια καθυστέρησης. Αφ' εταίρου, κάθε κόμβος ακολουθεί ακριβώς την ίδια διαδικασία για να μεταδώσει ένα πακέτο, με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η διαφοροποίηση υπηρεσιών. Τα παραπάνω ελήφθησαν υπόψη, και το αρχικό πρότυπο

Παράμετρος	IEEE 802.11 FHSS	IEEE 802.11 DSSS	IEEE 802.11 IR
slot time	50 μs	20 μs	8 μs
PLCP Preamble	96 μs	144 μs	16 μs /20 μs
PLCP Header	32 μs	48 μs	41 μs /25 μs
SIFS	28 μs	10 μs	10 μs
DIFS	128 μs	50 μs	26 μs
MAC	272bits	272bits	272bits
ACK	112bits	112bits	112bits
RTS	160bits	160bits	160bits
CTS	112bits	112bits	112bits
CW _{min}	15	31	63
CW _{max}	1024	1024	1024
Max MPDU	32768bits	32768bits	32768bits

Πίνακας 2.2: Τιμές παραμέτρων του προτύπου IEEE 802.11

Παράμετρος	IEEE 802.11a	IEEE 802.11b	IEEE 802.11g
slot time	9 μs	20 μs	9 μs /20 μs
PLCP Preamble	16 μs	144 μs	16 μs /144 μs /96 μs
PLCP Header	4 μs	48 μs	4 μs /48 μs /24 μs
SIFS	16 μs	10 μs	10 μs
DIFS	34 μs	50 μs	34 μs /50 μs
MAC	272bits	272bits	272bits
ACK	112bits	112bits	112bits
RTS	160bits	160bits	160bits
CTS	112bits	112bits	112bits
CW _{min}	15	31	15/31
CW _{max}	1024	1024	1024
Max MPDU	32768bits	32768bits	32768bits

Πίνακας 2.3: Τιμές παραμέτρων των προτύπων IEEE 802.11a/b/g

προέβλεψε μια εναλλακτική μέθοδο πρόσβασης που εξετάζεται παρακάτω.

2.5.2 Point Coordination Function (PCF)

Η μέθοδος *Point Coordination Function (PCF)*, που σημαίνει *Μέθοδος Κεντροποιημένου Συντονισμού*, ορίστηκε για να είναι δυνατή η εφαρμογή υπηρεσιών με απαιτήσεις σε χρονικά όρια καθυστέρησης. Εν αντιθέσει με την DCF, όπου απαιτείται να υποστηρίζεται σε όλα τα δικτυακά προϊόντα, η PCF είναι προαιρετική και χρησιμοποιείται μόνο για την εγγύηση συγκεκριμένων ορίων καθυστέρησης πακέτου.

Πιο συγκεκριμένα, η PCF, αντί για στατιστική πολυπλεξία, χρησιμοποιεί πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου. Το access point ελέγχει την πρόσβαση στο μέσο με έναν μηχανισμό, γνωστό ως *Point Coordinator (Κεντρικός Συντονιστής)*. Όταν ένα WLAN λειτουργεί με ενεργοποιημένη την PCF, ο χρόνος χωρίζεται σε δυο διαστήματα, τα οποία διαδέχονται περιοδικά το ένα το άλλο. Στο πρώτο διάστημα το δίκτυο λειτουργεί με τη μέθοδο DCF που περιγράφηκε παραπάνω. Το συγκεκριμένο διάστημα ονομάζεται *περίοδος ανταγωνισμού (contention period)*, λόγω της διαδικασίας κατά την οποία οι κόμβοι ανταγωνίζονται για να κερδίσουν πρόσβαση στο μέσο. Στο δεύτερο διάστημα, που ονομάζεται *περίοδος χωρίς ανταγωνισμό (contention free period)*, εφαρμόζεται κλασσική πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου. Στην περίπτωση αυτή, το access point επιλέγει διαδοχικά τους τερματικούς κόμβους για να τους δώσει την πρόσβαση στο μέσο (να στείλουν ή να λάβουν δεδομένα από αυτό). Με άλλα λόγια, κάθε κόμβος επιτρέπεται να στείλει δεδομένα μόνο όταν επιλέγεται από το access point, και αντίστροφα, κάθε κόμβος λαμβάνει δεδομένα μόνο όταν επιλέγεται από το access point. Μετά από ένα συγκεκριμένο διάστημα, το access point επιλέγει τον επόμενο κόμβο. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγονται οι συγχρούσεις στο μέσο, οπότε επιτυγχάνονται εγγυημένα όρια καθυστέρησης πακέτου.

Το βασικό μειονέκτημα της PCF είναι η έλλειψη ευελιξίας και επεκτασιμότητας. Αυτό γιατί, πρώτον, απαιτείται η ύπαρξη access point που θα επιλέγει τους κόμβους και, δεύτερον, η διαδοχική επιλογή των κόμβων από το access point, μπορεί να είναι μη αποδοτική σε δίκτυα μεγάλης κλίμακας. Για τους παραπάνω λόγους, παρά το γεγονός ότι η PCF ήταν η μόνη μέθοδος που μπορούσε να προσφέρει ποιότητα υπηρεσίας, δεν προχώρησε εμπορικά όσο αναμενόταν. Σήμερα μάλιστα, στη συντριπτική πλειοψηφία των δικτυακών προϊόντων εφαρμόζεται μόνο η DCF. Η ομάδα εργασίας IEEE 802.11 έλαβε το παραπάνω μειονέκτημα υπόψη, και προχώρησε σε μια άλλη μέθοδο για παροχή ποιότητας υπηρεσίας, τη μέθοδο EDCA. Πριν προχωρήσουμε στην επόμενη ενότητα για να εξετάσουμε τη συγκεκριμένη μέθοδο, σημειώνουμε ότι, καθώς στην παρούσα διατριβή ασχολούμαστε αποκλειστικά με τη DCF, δε θα μπούμε σε περαιτέρω λεπτομέρειες για τον τρόπο λειτουργίας της PCF.

2.5.3 Enhanced Distributed Channel Access (EDCA)

Όπως ειπώθηκε και παραπάνω, η μέθοδος πρόσβασης DCF δεν είναι ικανή να υποστηρίξει διαφοροποίηση υπηρεσιών, καθώς παρέχει έναν τρόπο πρόσβασης στο μέσο με ίσες πιθανότητες για όλους τους κόμβους. Στοχεύοντας στην παροχή ποιότητας υπηρεσίας, και ειδικότερα, στην υποστήριξη διαφοροποίησης υπηρεσιών, ορίζεται, στο υπό μελέτη πρότυπο IEEE 802.11e [7], η μέθοδος πρόσβασης *Enhanced Distributed Channel Access (EDCA)*. Πριν προχωρήσουμε στην αναλυτική περιγραφή του τρόπου λειτουργίας της συγκεκριμένης μεθόδου, θα σημειώσουμε ότι, στις πρώτες εκδόσεις του IEEE 802.11e draft, η συγκεκριμένη μέθοδος οριζόταν ως *Enhanced Distributed Coordination Function (EDCF)*. Στις τελευταίες εκδόσεις του draft όμως, ο ορισμός άλλαξε σε EDCA.

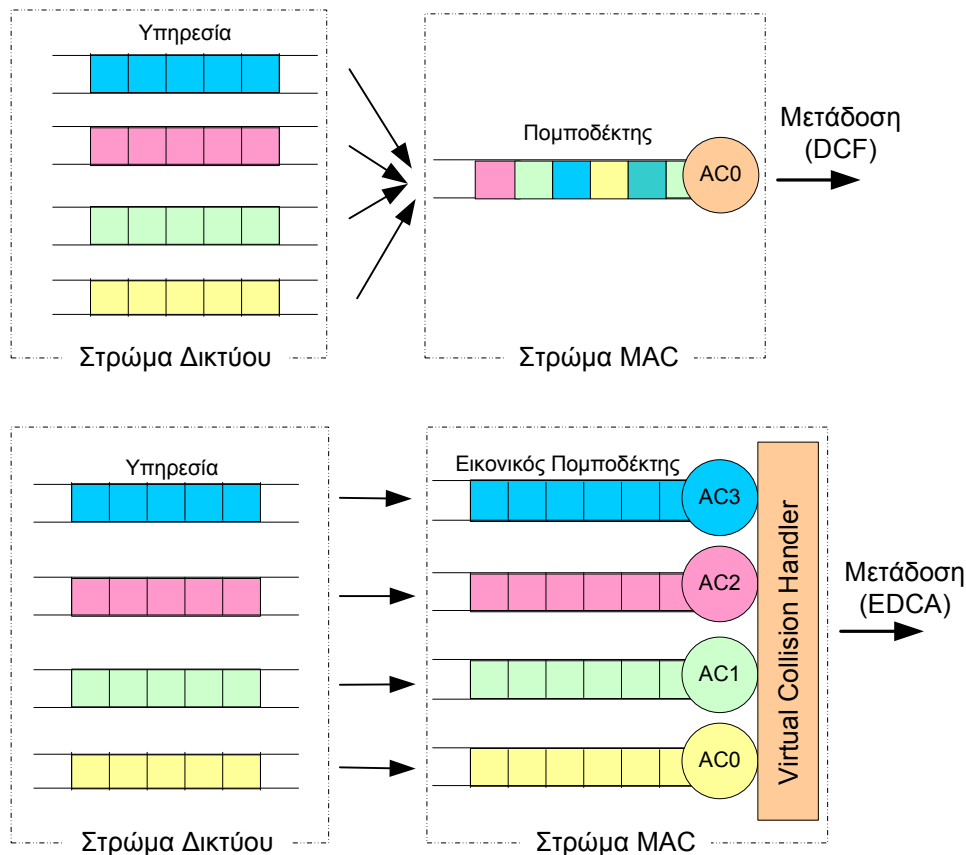
Σύμφωνα με τη μέθοδο EDCA, ορίζονται οκτώ τιμές προτεραιότητας (*priority values*) και τέσσερις κατηγορίες πρόσβασης (*Access Categories*). Ο όρος Access Category ορίζεται στο IEEE 802.11e draft και ως AC, για χάρη συντομίας. Κάθε πακέτο από υψηλότερα στρώματα, φτάνει στο MAC με μια συγκεκριμένη τιμή προτεραιότητας. Ανάλογα με την τιμή προτεραιότητας που έχει, του αποδίδεται μια κατηγορία πρόσβασης (AC), με βάση τον Πίνακα 2.4, που ορίζεται στο IEEE 802.11e³.

³Ας σημειωθεί ότι, στον Πίνακα 2.4, η προτεραιότητα 0 βρίσκεται ανάμεσα από τις 2 και 3. Η κατηγοριοποίηση αυτή πραγματοποιήθηκε για να υπάρξει συμφωνία με το πρότυπο IEEE 802.11d [6].

Priority	Access Category (AC)	Service
1	0	Best Effort
2	0	Best Effort
0	0	Best Effort
3	1	Video Probe
4	2	Video
5	2	Video
6	3	Voice
7	3	Voice

Πίνακας 2.4: Αντιστοίχιση μεταξύ priority και access category για ένα πακέτο

Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται ο διαχωρισμός των υπηρεσιών έγκειται στον ορισμό διαφορετικών παραμέτρων για κάθε access category (AC), στο στρώμα MAC. Πιο αναλυτικά, οι σταθερές DIFS, CWmin, CWmax και TXOP που ορίζονται στη DCF, παίρνουν διαφορετική τιμή για κάθε AC στην EDCA. Συνεπώς οι σταθερές αυτές γίνονται παράμετροι και ορίζονται αντίστοιχα ως $AIFS[AC]$, $CWmin[AC]$, $CWmax[AC]$ και $TXOP[AC]$. Ειδικά η τιμή της AIFS ορίζεται ως $AIFS[AC] = SIFS + AIFS[AC] \cdot SlotTime$, όπου $AIFS[AC]$ είναι ένας ακέραιος μεγαλύτερος του μηδενός. Με βάση τους νέους ορισμούς των CWmin και CWmax, γίνεται αντιληπτό ότι ο backoff counter κάθε κόμβου αρχικοποιείται κάθε φορά ανάλογα με την κατηγορία πρόσβασης στην οποία ανήκει το πακέτο που στέλνει. Δηλαδή, αντί να επιλέγονται τυχαία τιμές μεταξύ $[1, CWmin]$, επιλέγονται τώρα μεταξύ $[1, CWmin[AC]]$. Τονίζεται ότι οι τιμές των παραπάνω παραμέτρων δεν είναι πια ορισμένες στο πρότυπο, αλλά αφήνονται στην κρίση του σχεδιαστή του δικτύου. Οι συγκεκριμένες τιμές ανακοινώνονται στους κόμβους μέσω του πλαισίου Beacon⁴ και μπορούν να μεταβάλλονται δυναμικά, ανάλογα με την κατάσταση του δικτύου.



Σχήμα 2.7: Τρόπος πρόσβασης με DCF και EDCA

⁴Το πλαίσιο Beacon είναι ένα πακέτο ειδικού τύπου που μεταδίδεται προς όλους τους κόμβους ανά τακτά χρονικά διαστήματα και περιέχει πληροφορίες για τις παραμέτρους και την κατάσταση του δικτύου.

Με τον παραπάνω τρόπο λειτουργίας, κάθε κόμβος διατηρεί, το μέγιστο, τέσσερις ACs, δηλαδή τέσσερις διαφορετικούς εικονικούς πομποδέκτες, έναν για κάθε AC. Κάθε εικονικός πομποδέκτης έχει τις δικές του τιμές για τις παραμέτρους που αναφέρθηκαν παραπάνω. Όταν, λοιπόν συμβαίνει σύγκρουση, αυτή διαχειρίζεται με εικονικό τρόπο. Ο κόμβος που έστειλε το πακέτο με τη μεγαλύτερη AC μεταδίδει απευθείας. Οι υπόλοιποι κόμβοι ακολουθούν τη διαδικασία backoff με τις παραμέτρους που ορίζονται για την κάθε AC. Στο Σχήμα 2.7 απεικονίζεται γραφικά η διαφορά στον τρόπο πρόσβασης μεταξύ DCF και EDCA.

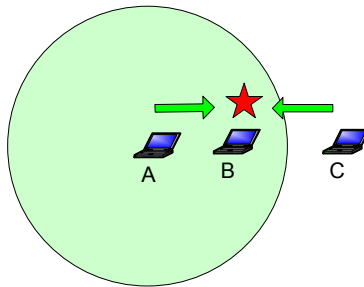
Κλείνοντας την παρουσίαση του τρόπου λειτουργίας της EDCA, οφείλεται να ειπωθεί ότι η συγκεκριμένη μέθοδος δεν είναι εναλλακτική, αλλά συμπληρωματική μέθοδος πρόσβασης. Κατά τρόπο ανάλογο με τη DCF, η EDCA μπορεί να συνυπάρξει με την PCF και να απαρτίσουν τη μέθοδο πρόσβασης *Hybrid Channel Access (HCA)* που ορίζεται στο IEEE 802.11e. Καθώς, όπως ειπώθηκε και πριν, η συγκεκριμένη διατριβή ασχολείται αποκλειστικά με τη DCF και την EDCA, δε θα δοθεί παραπάνω έκταση στο θέμα της HCA. Θα αναφέρουμε μόνο ότι η συγκεκριμένη μέθοδος, στις παλιές εκδόσεις του IEEE 802.11e, οριζόταν ως *Hybrid Coordination Function (HCF)*.

2.6 Προβλήματα επικοινωνίας στα δίκτυα IEEE 802.11

Στη συγκεκριμένη ενότητα θα αναφέρουμε δυο βασικά προβλήματα επικοινωνίας που λαμβάνουν χώρα στα δίκτυα IEEE 802.11 και, γενικότερα στα δίκτυα ad hoc. Πιο συγκεκριμένα, θα αναφερθούμε στα προβλήματα του *κρυφού κόμβου (hidden terminal problem)* και του *εκτεθειμένου κόμβου (exposed terminal problem)*, που περιγράφονται αμέσως παρακάτω. Τα δυο αυτά προβλήματα έχουν μείζονα σημασία για τα δίκτυα IEEE 802.11 καθώς μειώνουν αισθητά την επιτυγχάμενη διέλευση.

2.6.1 Το πρόβλημα του κρυφού κόμβου

Το συγκεκριμένο πρόβλημα απεικονίζεται στο Σχήμα 2.8.

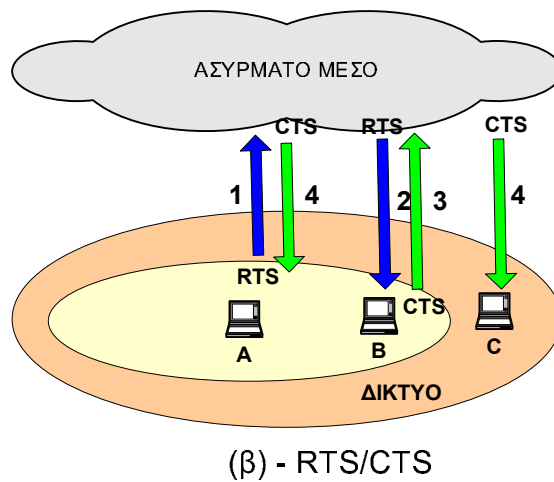


Σχήμα 2.8: Το πρόβλημα του κρυφού κόμβου

Ας υποθέσουμε ότι ο κόμβος A επιθυμεί να στείλει ένα πακέτο στον B. Κατά τη διάρκεια μετάδοσης του A, ο C θέλει να στείλει ένα πακέτο στον B, ή σε κάποιον άλλο κόμβο. Ο C βρίσκεται εκτός της περιοχής ραδιοκάλυψης του A, οπότε δε μπορεί να αντιληφθεί τη μετάδοσή του. Συνεπώς, θα αντιληφθεί το μέσο ως αδρανές και θα στείλει το πακέτο. Τότε όμως θα συμβεί σύγκρουση στον B, ο οποίος βρίσκεται στην περιοχή ραδιοκάλυψης και των δυο. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, ο C είναι κρυφός για τον A. Το πρόβλημα αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ελάττωση της διέλευσης λόγω άσκοπων επαναμεταδόσεων.

Το συγκεκριμένο πρόβλημα αποφεύγεται, μέχρις ενός σημείου, με χρήση του μηχανισμού RTS/CTS. Μάλιστα, ένας λόγος που το αρχικό πρότυπο ενσωμάτωσε τον RTS/CTS στη λειτουργία του στρώματος MAC είναι η αποφυγή του προβλήματος του κρυφού κόμβου. Ας δούμε τώρα, στο Σχήμα 2.9, πώς με το RTS/CTS λύνεται το συγκεκριμένο πρόβλημα.

Ο κόμβος A θέλει να στείλει πακέτο στον B. Ο C, όντας έξω από την περιοχή ραδιοκάλυψης του A, δε θα μπορέσει να αντιληφθεί τη μετάδοση. Αυτό θα γίνει έμμεσα, μέσω του RTS/CTS (για το λόγο αυτό ο συγκεκριμένος μηχανισμός χαρακτηρίζεται και ως virtual carrier sense mechanism). Πριν ο A στείλει

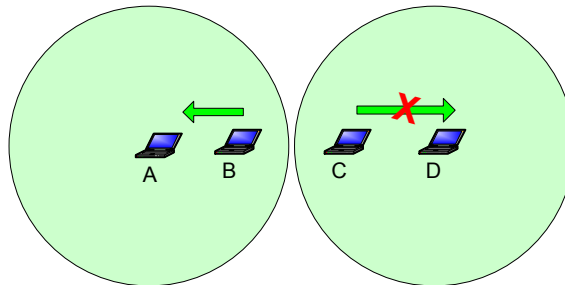


Σχήμα 2.9: Η λύση του προβλήματος κρυφού κόμβου μέσω RTS/CTS

το πακέτο δεδομένων, στέλνει ένα RTS (βέλος 1), που λαμβάνεται από το B (βέλος 2). Ο B με τη σειρά του στέλνει ένα CTS στον A (βέλος 3). Ο C τώρα, μπορεί να μην έλαβε το RTS του A, αλλά θα λάβει το CTS του B (βέλος 4), αφού είναι στην περιοχή ραδιοκάλυψής του. Με τη λήψη του CTS από τον B, ο C θα καταλάβει ότι κάποιος θα μεταδώσει, οπότε ο ίδιος θα πρέπει να μη μεταδώσει στο ασύρματο μέσο.

2.6.2 Το πρόβλημα του εκτεθειμένου κόμβου

Το συγκεκριμένο πρόβλημα απεικονίζεται στο Σχήμα 2.10



Σχήμα 2.10: Το πρόβλημα του εκτεθειμένου κόμβου

Ας υποθέσουμε ότι ο κόμβος B στέλνει ένα πακέτο στον A. Κατά τη μετάδοση του B, ο C θέλει να στείλει ένα πακέτο στον D. Στην περίπτωση αυτή, ο C θα περιμένει μέχρι να ολοκληρωθεί η μετάδοση του B. Αυτό όμως δεν είναι αναγκαίο. Πράγματι, αν ο B και ο C μεταδώσουν ταυτόχρονα, εφ' όσον ο A δε βρίσκεται στην περιοχή ραδιοκάλυψής του C (οπότε δεν αντιλαμβάνεται τη μετάδοσή του) και ο D βρίσκεται εκτός της περιοχής ραδιοκάλυψής του B (οπότε δεν αντιλαμβάνεται τη μετάδοσή του), οι δυο μεταδόσεις θα ολοκληρωθούν επιτυχώς. Συνεπώς, ο C περιμένει άσκοπα για την ολοκλήρωση της μετάδοσης του B. Στην περίπτωση αυτή ο C είναι εκτεθειμένος στον B. Το πρόβλημα αυτό έχει ως αποτέλεσμα την κακή εκμετάλλευση του εύρους ζώνης. Η λύση του θα επέφερε μια αύξηση της μέγιστης επιτυγχάμενης διέλευσης. Για το συγκεκριμένο πρόβλημα όμως, το πρότυπο IEEE 802.11 δεν έχει ενσωματώσει κάποια λύση.

Στο σημείο αυτό έχει ολοκληρωθεί η παράθεση όλων των εισαγωγικών πληροφοριών που θα μας χρησιμεύσουν στα επόμενα κεφάλαια. Είμαστε πλέον έτοιμοι για την παρουσίαση της έρευνας που πραγματοποιήθηκε στη συγκεκριμένη διατριβή. Θα ξεκινήσουμε από την εξέλιξη στο φυσικό στρώμα του IEEE 802.11, και ειδικότερα στο φυσικό στρώμα του IEEE 802.11g. Το συγκεκριμένο είναι το θέμα ενασχόλησης του επόμενου κεφαλαίου.

Βιβλιογραφικές Αναφορές

- [1] *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification*, IEEE Std. 802.11, 1999.
- [2] *High-Speed Physical Layer in the 5 GHz Band*, IEEE Std. 802.11a, 1999.
- [3] *Higher Speed Physical Layer (PHY) Extension in the 2.4 GHz Band*, IEEE Std. 802.11b, 2001.
- [4] “Wireless-Fidelity Alliance.” [Online]. Available: www.wi-fi.com
- [5] *Supplement to IEEE 802.11d Standard to Support IEEE 802.11 Frames*, IEEE Working Project, 802.11c.
- [6] *Specification for Operation in Additional Regulatory Domains*, IEEE Std. 802.11d, 1999.
- [7] *Medium Access Control (MAC) Enhancements for Quality of Service (QoS)*, IEEE Working Draft Proposed Std. 802.11e.
- [8] *IEEE Recommended Practice for Multi-Vendor Access Point Interoperability via an Inter-Access Point Protocol Across Distribution Systems Supporting IEEE 802.11 Operation*, IEEE Std. 802.11f, 2003.
- [9] *Further Higher-Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band*, IEEE Std. 802.11g, 2003.
- [10] *Spectrum and Transmit Power Management Extensions in the 5GHz band in Europe*, IEEE Std. 802.11h, 2003.
- [11] *Medium Access Control (MAC) Security Enhancements*, IEEE Std. 802.11i, 2004.
- [12] *4.9GHz - 5GHz Operation in Japan*, IEEE Std. 802.11j, 2004.
- [13] *Radio Resource Management in IEEE 802.11 WLANs*, IEEE Working Draft Proposed Std. 802.11k.
- [14] *Project for Correcting Editorial Issues in IEEE 802.11 Standards*, IEEE Working Project 802.11m.
- [15] *Standard for Enhancements for Higher Throughput*, IEEE Working Draft Proposed Std. 802.11n.
- [16] G. Bianchi, “Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function,” *IEEE Journal on Selected Areas of Communications*, vol. 18, no. 3, pp. 535–547, 2000.

Κεφάλαιο 3

Το φυσικό στρώμα του προτύπου IEEE 802.11 - Αξιολόγηση Επίδοσης του Προτύπου IEEE 802.11g

3.1 Εισαγωγή

Όπως ειπώθηκε και στο εισαγωγικό κεφάλαιο, ένα από τα βασικά ερευνητικά θέματα πάνω στο πρότυπο IEEE 802.11 στοχεύει στην αύξηση των ρυθμών μετάδοσης. Το αρχικό πρότυπο IEEE 802.11 προσέφερε ρυθμούς μέχρι 2Mb/s. Το 1999, η συγκεκριμένη ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων ήταν αρκετή για τις υπηρεσίες προσωπικών επικοινωνιών που λειτουργούσαν τότε στα WLANs (όπως, για παράδειγμα, η υπηρεσία πλοήγησης στο διαδίκτυο και η υπηρεσία ηλεκτρονικού ταχυδρομείου). Με τον καιρό όμως, η πληροφορία που ανταλλάσσόταν μέσω των δικτύων προσωπικών επικοινωνιών αυξανόταν σε μέγεθος (μεγαλύτερα αρχεία, μεγαλύτερος αριθμός χρηστών). Από την άλλη πλευρά, τα δίκτυα IEEE 802.11 γίνονταν όλο και πιο δημοφιλή και παρουσιάστηκε η προσδοκία για υποστήριξη νέων υπηρεσιών που απαιτούν, μεταξύ άλλων, και υψηλές ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων. Οι υπηρεσίες αυτές είναι κατά κανόνα υπηρεσίες πολυμέσων και πραγματικού χρόνου, όπως φωνή και video πάνω από IP, τηλεδιάσκεψη, video κατ' απαίτηση, ηλεκτρονικά παιχνίδια πραγματικού χρόνου κ.α.

Με στόχο τη βελτίωση των υπηρεσιών που υποστήριζε το αρχικό πρότυπο αλλά και την εφαρμογή νέων, πραγματοποιήθηκαν και πραγματοποιούνται έρευνες προς την εξέλιξη του φυσικού στρώματος του προτύπου IEEE 802.11 για αύξηση των διατιθέμενων ρυθμών μετάδοσης. Καρποί των ερευνών αυτών είναι οι προεκτάσεις του προτύπου οι οποίες παρουσιάζονται αμέσως παρακάτω μέσω μιας σύντομης ιστορικής ανασκόπησης που αφορά την εξέλιξη του φυσικού στρώματος IEEE 802.11 από το 1999 μέχρι σήμερα.

Το 1999, το αρχικό πρότυπο IEEE 802.11 [1] υποστήριζε ρυθμούς μετάδοσης μέχρι 2Mb/s χρησιμοποιώντας είτε υπέρυθη ακτινοβολία είτε τη μικροκυματική ζώνη των 2.4GHz. Η πρώτη περίπτωση δεν ευδοκίμησε λόγω της μικρής απόστασης μετάδοσης και της οπτικής επαφής που απαιτούνταν μεταξύ πομπού και δέκτη. Η δεύτερη περίπτωση, όπου χρησιμοποιείται διαμόρφωση FHSS ή DSSS είναι αυτή που τελικά επικράτησε και ήταν δυνατό να επεκταθεί, όσον αφορά τους υποστηριζόμενους ρυθμούς.

Ενώ το πρότυπο IEEE 802.11, στην αρχική του μορφή, εξαπλωνόταν ραγδαία στις λύσεις WLANs, οι επιστήμονες έψαχναν τρόπους αύξησης του ρυθμού των 2Mb/s εστιάζοντας την προσοχή τους στη ζώνη συχνοτήτων των 5GHz και στην τεχνική διαμόρφωσης OFDM. Κατάφεραν έτσι να προεκτείνουν το φυσικό στρώμα του προτύπου δημοσιεύοντας, το 2000, το πρότυπο IEEE 802.11a [2] που προσέφερε ρυθμούς μέχρι 54Mb/s στη ζώνη των 5GHz.

Παρ' ότι οι ρυθμοί του προτύπου IEEE 802.11a ήταν δελεαστικοί, υπήρχε ασυμβατότητα μεταξύ των παλιών δικτυακών συσκευών IEEE 802.11 και των νέων συσκευών IEEE 802.11a. Για το λόγο αυτό το πρότυπο IEEE 802.11a δεν προχώρησε όσο αναμενόταν. Απεναντίας, έγιναν προσπάθειες για αύξηση των ρυθμών στη ζώνη των 2.4GHz. Αυτό πραγματοποιήθηκε με τη δημοσίευση του προτύπου IEEE

802.11b [3] που προσφέρει ρυθμούς μέχρι 11Mb/s χρησιμοποιώντας διαμόρφωση DSSS με κωδικοποίηση είτε CCK είτε PBCC.

Με τη δημοσίευση του προτύπου IEEE 802.11b επιτεύχθηκε συμβατότητα με τις παλιές δικτυακές συσκευές. Οι ρυθμοί που υποστηρίζει όμως δε μπορούν να συγκριθούν με τους ρυθμούς που υποστηρίζει το πρότυπο IEEE 802.11a. Η βέλτιστη λύση δόθηκε με τη δημοσίευση του προτύπου IEEE 802.11g, το 2003, όπου υποστηρίζονται ρυθμοί μετάδοσης μέχρι 54Mb/s στα 2.4GHz, χρησιμοποιώντας είτε διαμόρφωση DSSS είτε διαμόρφωση OFDM.

Όλη η εξέλιξη του φυσικού στρώματος από το πρότυπο IEEE 802.11 μέχρι το πρότυπο IEEE 802.11b υπάρχει καταγεγραμμένη στη βιβλιογραφία μέσω ερευνητικών δημοσιεύσεων όπου περιγράφεται με απλά λόγια το κάθε πρότυπο και στη συνέχεια αξιολογείται η επίδοσή του, δίνοντας βάση στα νέα του χαρακτηριστικά. Αντιπροσωπευτικά, τα άρθρα [1], [2] και [3] παρουσιάζουν και αξιολογούν τα πρότυπα IEEE 802.11, IEEE 802.11a και IEEE 802.11b αντίστοιχα.

Υπό το παραπάνω πρίσμα, το παρόν κεφάλαιο της διατριβής [4], ασχολείται με το πρότυπο IEEE 802.11g, συνεχίζοντας κατά κάποιο τρόπο τις εργασίες των τριών προηγούμενων άρθρων. Συγκεκριμένα, το παρόν κεφάλαιο αποσκοπεί αφ' ενός να παρουσιάσει με απλό και κατανοητό τρόπο το πρότυπο IEEE 802.11g, δίνοντας έμφαση στα καινοτομικά χαρακτηριστικά που παρουσιάζει και αφ' εταίρου να διεξάγει αξιολόγηση επίδοσης του προτύπου συγκρίνοντάς το παράλληλα με τα προγενέστερα πρότυπα που αφορούν το φυσικό επίπεδο IEEE 802.11.

Η ερευνητική χρησιμότητα του παρόντος κεφαλαίου είναι διπλή. Πρώτον, για επιστήμονες μη σχετικούς με το χώρο του IEEE 802.11 που θέλουν όμως να ενημερωθούν για την κατάσταση που επικρατεί, το παρόν κεφάλαιο χρησιμεύει ως ένα απλό κείμενο αναφοράς, όπου περιγράφονται απλά και κατανοητά σε οποιονδήποτε σχετικό με δίκτυα επικοινωνιών, τα νέα χαρακτηριστικά του προτύπου IEEE 802.11g. Δεύτερον, για την έρευνα που πραγματοποιείται πάνω στο πρότυπο IEEE 802.11, η αξιολόγηση επίδοσης που διεξάγεται παρέχει ακριβή μέτρα και σταθμά με βάση τα οποία οι επιστήμονες μπορούν να ενημερωθούν για τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του προτύπου IEEE 802.11g, έναντι των προγενέστερών του, αλλά και να τα λάβουν υπόψη τους για μεταγενέστερα πρότυπα που θα δημοσιευθούν.

Με βάση τα παραπάνω, το υπόλοιπο του κεφαλαίου σκιαγραφείται ως εξής: Στην Ενότητα 3.2 παρουσιάζονται και εξηγούνται τα νέα χαρακτηριστικά του προτύπου IEEE 802.11g. Στην Ενότητα 3.3 πραγματοποιείται η αξιολόγηση επίδοσης του προτύπου μέσω προσομοίωσης στην πλατφόρμα Pythagor [5]. Τέλος, στην Ενότητα 3.4 πραγματοποιείται μια σύντομη ανακεφαλαίωση της εργασίας του παρόντος κεφαλαίου, δίνοντας παράλληλα τα βασικότερα συμπεράσματα που προέκυψαν.

3.2 Καινοτομικά χαρακτηριστικά του προτύπου IEEE 802.11g

Στην παρούσα ενότητα θα παρουσιάσουμε τα βασικά καινοτομικά χαρακτηριστικά του προτύπου IEEE 802.11g, με βάση τα οποία ξεχωρίζει από τα υπόλοιπα πρότυπα της οικογένειάς του. Επιγραμματικά, τα νέα αυτά χαρακτηριστικά είναι:

- Η υποστήριξη τεσσάρων διαφορετικών τύπων φυσικού στρώματος.
- Η υποχρεωτική υποστήριξη του προοιμίου συνοπτικού τύπου (short preamble).
- Η παράμετρος δικτύου ERP.
- Οι μηχανισμοί προστασίας, σχετικοί με θέματα διαλειτουργίας (interoperability) μεταξύ των κόμβων.
- Ο μηχανισμός πρόσβασης CTS-to-Self.

Καθένα από τα παραπάνω καινοτομικά στοιχεία περιγράφεται στις επόμενες υποενότητες.

3.2.1 Υποστήριξη τεσσάρων διαφορετικών τύπων φυσικού στρώματος

Όπως τονίζεται στο άρθρο [6], το πρότυπο IEEE 802.11g αποτελεί μια τομή ανάμεσα στα πρότυπα IEEE 802.11a και IEEE 802.11b. Η άποψη αυτή είναι σωστή, αν σκεφτούμε ότι το πρότυπο IEEE 802.11g προσφέρει τους ρυθμούς του προτύπου IEEE 802.11a στη ζώνη συχνοτήτων του προτύπου IEEE 802.11b, υποστηρίζοντας έτσι συμβατότητα με τις παλιές δικτυακές συσκευές IEEE 802.11b ή IEEE 802.11.

Από την άλλη πλευρά, εν αντιθέσει με τα πρότυπα IEEE 802.11a και IEEE 802.11b που χρησιμοποιούν για διαμόρφωση τις τεχνικές OFDM και DSSS αντίστοιχα (βλ. Κεφ. 2), το πρότυπο IEEE 802.11g χρησιμοποιεί και τις δυο για την επίτευξη ρυθμών μετάδοσης μέχρι και 54Mb/s στα 2.4GHz. Ο συνδυασμός των δυο αυτών τεχνικών διαμόρφωσης επιτυγχάνεται με την υποστήριξη τεσσάρων διαφορετικών τύπων φυσικού στρώματος που αναφέρονται στο πρότυπο ως *ERP*. Η συντομογραφία αυτή προέρχεται από τον όρο *Extended Rate Physicals* που σημαίνει *φυσικά στρώματα εκτεταμένων ρυθμών*. Οι τέσσερις τύποι φυσικού στρώματος που υποστηρίζει το πρότυπο IEEE 802.11g είναι οι εξής:

- *ERP-DSSS/CCK*: Το συγκεκριμένο φυσικό στρώμα χρησιμοποιείται στο πρότυπο IEEE 802.11b. Χρησιμοποιεί διαμόρφωση DSSS με κωδικοποίηση CCK. Οι ρυθμοί που υποστηρίζονται είναι αυτοί του IEEE 802.11b.
- *ERP-OFDM*: Ο συγκεκριμένος τύπος φυσικού στρώματος ορίζεται αποκλειστικά στο πρότυπο IEEE 802.11g. Με βάση το νέο αυτό φυσικό στρώμα, χρησιμοποιείται διαμόρφωση OFDM για την υποστήριξη των ρυθμών του IEEE 802.11a στη ζώνη συχνοτήτων των 2.4GHz.
- *ERP-DSSS/PBCC*: Το συγκεκριμένο φυσικό στρώμα είχε οριστεί αρχικά στο πρότυπο IEEE 802.11b και προσέφερε τους ίδιους ρυθμούς με αυτούς του φυσικού στρώματος DSSS/CCK. Χρησιμοποιεί διαμόρφωση DSSS με κωδικοποίηση PBCC¹. Στο IEEE 802.11g έγινε επέκταση για την υποστήριξη των ρυθμών μετάδοσης 22Mb/s και 33Mb/s.
- *DSSS-OFDM*: Το συγκεκριμένο φυσικό στρώμα, οριζόμενο αποκλειστικά στο πρότυπο IEEE 802.11g, χρησιμοποιεί έναν υβριδικό συνδυασμό διαμόρφωσης βασισμένο στις τεχνικές DSSS και OFDM. Συγκεκριμένα, η επικεφαλίδα φυσικού στρώματος του πακέτου μεταδίδεται μέσω DSSS ώστε η μετάδοση του πακέτου να γίνεται αντληπτή και από παλιούς κόμβους που δεν υποστηρίζουν φυσικά στρώματα βασισμένα σε OFDM, ενώ το υπόλοιπο του πακέτου μεταδίδεται μέσω OFDM για μεγαλύτερη ταχύτητα μετάδοσης. Ο σκοπός του συγκεκριμένου φυσικού στρώματος είναι η κάλυψη θεμάτων διαλειτουργίας, όπως θα εξηγηθεί και στην υποενότητα 3.2.4.

Από τους τέσσερις παραπάνω τύπους φυσικού στρώματος, οι πρώτοι δυο πρέπει να υποστηρίζονται υποχρεωτικά από τις δικτυακές συσκευές IEEE 802.11g. Οι υπόλοιποι δυο είναι προαιρετικοί. Στη στήλη 2 του Πίνακα 3.1 συνοψίζονται οι ρυθμοί μετάδοσης που υποστηρίζονται από κάθε φυσικό στρώμα. Οι υπόλοιπες στήλες θα εξηγηθούν στην επόμενη υποενότητα.

3.2.2 Υποχρεωτική υποστήριξη του short preamble

Όπως ειπώθηκε και στο Κεφάλαιο 2, το πλεόνασμα (overhead) φυσικού στρώματος στο πρότυπο IEEE 802.11 αποτελείται από δυο μέρη: το *προοίμιο PLCP (PLCP preamble)* που χρησιμοποιείται για συγχρονισμό, και την *επικεφαλίδα PLCP (PLCP header)* όπου αποθηκεύεται πληροφορία για το συγκεκριμένο πακέτο, σχετική με το φυσικό στρώμα. Στο Σχήμα 3.1 απεικονίζονται τα μέρη ενός πακέτου IEEE 802.11, οριζόμενο στο πρότυπο ως *PLCP Protocol Data Unit (PPDU)* που σημαίνει μονάδα δεδομένων πρωτοκόλλου φυσικού στρώματος. Στο ίδιο σχήμα, κάτω από την PPDU, απεικονίζονται και οι τέσσερις τύποι φυσικού στρώματος του IEEE 802.11g όπου καταγράφεται και η τεχνική που χρησιμοποιείται για τη μετάδοση καθενός από τα μέρη του πακέτου.

¹Packet Binary Convolutional Coding: Τεχνική κωδικοποίησης που χρησιμοποιείται και στο IEEE 802.11b.

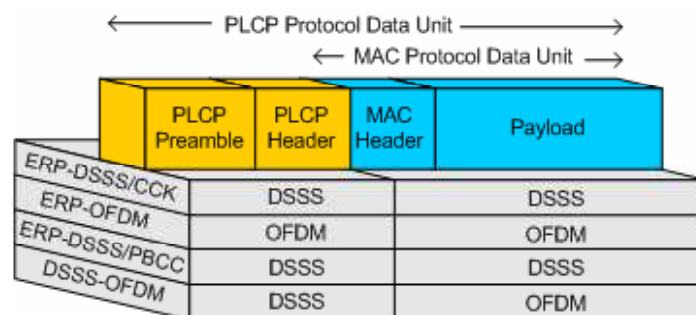
Φυσικό Στρώμα	Ρυθμοί μετάδοσης που υποστηρίζονται (Mb/s)	Διάρκεια PLCP preamble και PLCP header		Μήκος PLCP preamble και PLCP header	
		Long	Short	Long	Short
ERP-DSSS (Υποχρεωτικό)	1, 2, 5.5, 11	192 μ s	96 μ s	192bits	120 bits
ERP-OFDM (Υποχρεωτικό)	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54	20 μ s		40bits ^a	
ERP-PBCC (Προαιρετικό)	1, 2, 5.5, 11, 22, 33	192 μ s	96 μ s	192bits	120bits
DSSS-OFDM (Προαιρετικό)	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54	192 μ s	96 μ s	192bits	120bits

^aΤο μήκος αυτό αφορά μόνο το PLCP header. Το PLCP preamble, που χρησιμοποιείται για συγχρονισμό, είναι ένα καθαρό χρονικό διάστημα, ίσο με 16 μ s χωρίς να περιέχει bits.

Πίνακας 3.1: Παράμετροι για τους τέσσερις τύπους φυσικού στρώματος του προτύπου IEEE 802.11g

Η ομάδα εργασίας IEEE 802.11b συνειδητοποίησε ότι το PLCP preamble είναι αρκετά μεγάλο και προσθέτει σημαντικό φόρτο κατά τη μετάδοση. Προς την κατεύθυνση αυτή ορίστηκε ένας νέος τύπος preamble γνωστός ως *προοίμιο συνοπτικού τύπου (short preamble)* εν αντιθέσει με το *προοίμιο εκτεταμένου τύπου (long preamble)* που υποστηριζόταν μέχρι τότε. Σκοπός του νέου preamble ήταν η μείωση του φόρτου και η βελτίωση της επίδοσης του δικτύου. Αν ο αποστολέας και ο παραλήπτης υποστήριζαν short preamble, τότε η επικοινωνία επιτελούνταν μέσω αυτού, αλλιώς χρησιμοποιούνταν το προοίμιο εκτεταμένου τύπου (long preamble). Το πρότυπο IEEE 802.11g κατέστησε πλέον υποχρεωτική την υποστήριξη του long preamble στις νέες συσκευές.

Στις στήλες 3 και 4 του Πίνακα 3.1 συνοψίζονται η διάρκεια και το μήκος των short preamble και long preamble για κάθε τύπο φυσικού στρώματος. Για μετάδοση που πραγματοποιείται μέσω DSSS (αυτό συμβαίνει σε όλα τα φυσικά στρώματα εκτός του ERP-OFDM) ορίζονται δυο τύποι preamble (short και long). Για το φυσικό στρώμα ERP-OFDM ορίζεται ένας και μοναδικός τύπος, αυτός του short preamble. Η μορφή του τελευταίου είναι σχεδόν ίδια με αυτή που ορίζεται στο πρότυπο IEEE 802.11a.



Σχήμα 3.1: Το πακέτο PPDU τύπου IEEE 802.11

3.2.3 Η παράμετρος δικτύου ERP

Η διάρκεια χρονοθυρίδας (slot time) και το μέγεθος του minimum contention window που ορίζονται στο πρότυπο IEEE 802.11b είναι 20 μ s και 31 slots αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές υιοθετήθηκαν και από το πρότυπο IEEE 802.11g σε όλους τους τύπους φυσικού στρώματος, ώστε να υποστηρίζεται συμβατότητα με IEEE 802.11b. Η επιλογή των συγκεκριμένων τιμών έγινε με στόχο τη μεγιστοποίηση της επίδοσης του δικτύου όταν η επικοινωνία πραγματοποιείται με διαμόρφωση DSSS, για ρυθμούς μέχρι 11Mb/s και preambles των 192 μ s ή των 96 μ s. Παρ' όλ' αυτά, όταν όλοι οι κόμβοι μεταδίδουν σε ρυθμούς ERP-OFDM με το σημαντικά μικρότερο preamble των 20 μ s, η επιλογή των συγκεκριμένων τιμών ελαττώνει την επίδοση του δικτύου. Οι βέλτιστες τιμές για την περίπτωση αυτή είναι εκείνες που ορίζονται στο

IEEE 802.11a (9μs και 15 slots αντίστοιχα), όπου η μετάδοση πραγματοποιούνται αποκλειστικά μέσω OFDM.

Έχοντας υπόψη τα παραπάνω, στο πρότυπο IEEE 802.11g υποστηρίζεται δυναμική ρύθμιση των τιμών της διάρκειας χρονοθυρίδας και του minimum contention window ορίζοντας την παράμετρο δικτύου ERP. Η παράμετρος αυτή είναι μια δυαδική σημαία που γνωστοποιείται στους κόμβους μέσω του πλαισίου beacon².

Η παράμετρος ERP είναι ενεργοποιημένη όταν όλοι οι κόμβοι του δικτύου υποστηρίζουν ρυθμούς ERP-OFDM. Στην περίπτωση αυτή, οι τιμές των παραμέτρων slot time και minimum contention window εξαρτώνται από τον τρόπο λειτουργίας του δικτύου (IBSS ή BSS), δηλαδή αν υπάρχει access point ή αν το δίκτυο είναι αυτόνομο (ad hoc).

Για λειτουργία BSS, όπου υπάρχει access point, όταν όλοι οι κόμβοι υποστηρίζουν ρυθμούς ERP-OFDM, τότε η παράμετρος ERP είναι ενεργοποιημένη και οι τιμές των παραμέτρων slot time και minimum contention window είναι 9μs και 15 slots αντίστοιχα. Υπό αυτές τις συνθήκες, η λειτουργία του δικτύου είναι ίδια με αυτή ενός δικτύου IEEE 802.11a. Ας σημειωθεί ότι, στη συγκεκριμένη περίπτωση, η τιμή του minimum contention window μπορεί να τεθεί στα 15 slots ακόμη και όταν η παράμετρος ERP δεν είναι ενεργοποιημένη (κάποιοι κόμβοι δεν υποστηρίζουν το φυσικό στρώμα ERP-OFDM), αρκεί το access point του δικτύου να υποστηρίζει ρυθμούς OFDM.

Για λειτουργία IBSS, όπου το δίκτυο είναι αυτόνομο, όταν η παράμετρος ERP είναι ενεργοποιημένη (όλοι οι κόμβοι υποστηρίζουν ρυθμούς ERP-OFDM), τότε οι τιμές της παραμέτρου minimum contention window είναι 15 slots, ενώ η διάρκεια μιας χρονοθυρίδας παραμένει στα 20μs.

3.2.4 Θέματα διαλειτουργίας και μηχανισμοί προστασίας

Η βασική διαφορά του προτύπου IEEE 802.11g σε σχέση με τα υπόλοιπα της οικογένειάς του είναι η υποστήριξη ενός μεγάλου εύρους ρυθμών μετάδοσης και τύπων φυσικού στρώματος. Επιπροσθέτως, με την υποστήριξη δυναμικής ρύθμισης του ρυθμού μετάδοσης ανάλογα με τις συνθήκες του καναλιού, οι κόμβοι τύπου IEEE 802.11g έχουν τη δυνατότητα να επιλέξουν μεταξύ δεκατεσσάρων διαφορετικών ρυθμών και τεσσάρων διαφορετικών τύπων φυσικού στρώματος για να μεταδώσουν ένα πακέτο με τον πιο αποδοτικό τρόπο. Πάρα ταύτα, η πληθώρα αυτή των ρυθμών μετάδοσης και των φυσικών στρωμάτων προκαλεί προβλήματα διαλειτουργίας μεταξύ των κόμβων.

Πριν προχωρήσουμε παρακάτω, είναι σκόπιμο να διαχωρίσουμε τους διάφορους τύπους κόμβων που μπορούν να υπάρχουν σε ένα δίκτυο IEEE 802.11g.

- *Κόμβοι ERP*: Οι κόμβοι αυτοί είναι εξοπλισμένοι με δικτυακή διεπαφή IEEE 802.11g. Όταν το δίκτυο αποτελείται από κόμβους ERP και μόνο, τότε η παράμετρος ERP ενεργοποιείται και η επικοινωνία μεταξύ των κόμβων πραγματοποιείται σε ρυθμούς ERP-OFDM, που φτάνουν τα 54Mb/s. Οι κόμβοι αυτού του τύπου υποστηρίζουν επικοινωνία μέσω DSSS και μέσω OFDM ενώ υποστηρίζουν και short preamble.
- *Κόμβοι nonERP που υποστηρίζουν short preamble*: Οι συγκεκριμένοι κόμβοι είναι εξοπλισμένοι με δικτυακή διεπαφή IEEE 802.11b, σχετικά καινούρια, με αναβαθμισμένο υλικό και λογισμικό ώστε να υποστηρίζει short preamble. Η επικοινωνία πραγματοποιείται με ρυθμούς DSSS που φτάνουν μέχρι 11Mb/s. Αν ένας κόμβος αυτού του τύπου θέλει να επικοινωνήσει με κάποιον άλλο κόμβο, τότε, αν ο άλλος κόμβος υποστηρίζει short preamble, η επικοινωνία πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας αυτό. Αλλιώς χρησιμοποιείται long preamble.
- *Κόμβοι nonERP που δεν υποστηρίζουν short preamble*: Οι κόμβοι αυτοί είναι εξοπλισμένοι με δικτυακή διεπαφή IEEE 802.11b μη αναβαθμισμένη, ή με δικτυακή διεπαφή IEEE 802.11. Οι συγκεκριμένες δικτυακές διεπαφές δεν υποστηρίζουν short preamble. Η επικοινωνία πραγματοποιείται

²Το πλαίσιο beacon είναι πλαίσιο ελέγχου που περιέχει πληροφορίες σχετικές με το δίκτυο. Μεταδίδεται από το access point προς τους κόμβους του δικτύου σε τακτά χρονικά διαστήματα.

με ρυθμούς ως 11Mb/s αν πρόκειται για κόμβο IEEE 802.11b και μέχρι 2Mb/s αν πρόκειται για κόμβο IEEE 802.11. Σε όλες τις περιπτώσεις χρησιμοποιείται long preamble.

Με βάση τα παραπάνω γίνεται σαφές ότι προκύπτουν διάφοροι συνδυασμοί επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων ενός δικτύου IEEE 802.11g. Στον Πίνακα 3.2 συνοψίζονται οι παράμετροι του δικτύου για όλους τους πιθανούς συνδυασμούς επικοινωνίας. Οι συντομογραφίες *nonERP/S* και *nonERP/L* σημαίνουν κόμβος *nonERP* που υποστηρίζει (*S*) ή δεν υποστηρίζει (*L*) *short preamble*.

Επικοινωνία	Preamble	SlotTime	CwMin
ERP - ERP	ERP-OFDM	20 μ s	31
ERP - nonERP/S	ERP-DSSS/short	20 μ s	31
ERP - nonERP/L	ERP-DSSS/long	20 μ s	31
nonERP/S - nonERP/S	ERP-DSSS/short	20 μ s	31
nonERP/S - nonERP/L	ERP-DSSS/long	20 μ s	31
nonERP/L - nonERP/L	ERP-DSSS/long	20 μ s	31
όλοι ERP	ERP-OFDM	9 μ s	15

Πίνακας 3.2: Παράμετροι φυσικού στρώματος για διαφορετικούς συνδυασμούς επικοινωνίας μεταξύ δυο κόμβων

Ας επιστρέψουμε τώρα στα προβλήματα διαλειτουργίας που αναφέρθηκαν στην αρχή της υποενότητας. Ας θεωρήσουμε ένα δίκτυο τύπου IEEE 802.11g που αποτελείται από κόμβους ERP και nonERP. Οι κόμβοι ERP επικοινωνούν μεταξύ τους χρησιμοποιώντας διαμόρφωση OFDM στα πακέτα τους. Όμως, οι κόμβοι nonERP δεν έχουν τη δυνατότητα να αντιληφθούν τη μετάδοση των κόμβων ERP, καθώς αυτή πραγματοποιείται με διαμόρφωση OFDM, ενώ οι ίδιοι υποστηρίζουν μόνο διαμόρφωση DSSS. Συνεπώς, όταν ένας κόμβος ERP μεταδίδει, οι κόμβοι nonERP αντιλαμβάνονται το κανάλι ως αδρανές και κάθε προσπάθεια από αυτούς να μεταδώσουν θα καταλήξει σε σύγκρουση. Προφανώς, το πρόβλημα είναι παρόμοιο με αυτό του κρυφού κόμβου, όπου ένας κόμβος δε μπορεί να αντιληφθεί τη μετάδοση ενός άλλου λόγω έλλειψης ραδιοκάλυψης μεταξύ τους.

Η πρώτη λύση που προτείνεται στο πρότυπο IEEE 802.11g είναι η χρήση του φυσικού στρώματος DSSS-OFDM. Πράγματι, όλοι οι κόμβοι θα μπορούν να αντιληφθούν τις μεταδόσεις των κόμβων ERP, (αφού το preamble και η επικεφαλίδα μεταδίδονται μέσω DSSS) και να αναβάλλουν τη μετάδοσή τους ώστε να αποφευχθούν πιθανές συγκρούσεις. Δυστυχώς όμως, το preamble και η επικεφαλίδα DSSS είναι πολύ μεγαλύτερα από αυτά της περίπτωσης OFDM, και, συνεπώς, προσδίδεται ένας σημαντικός φόρτος στο σύστημα.

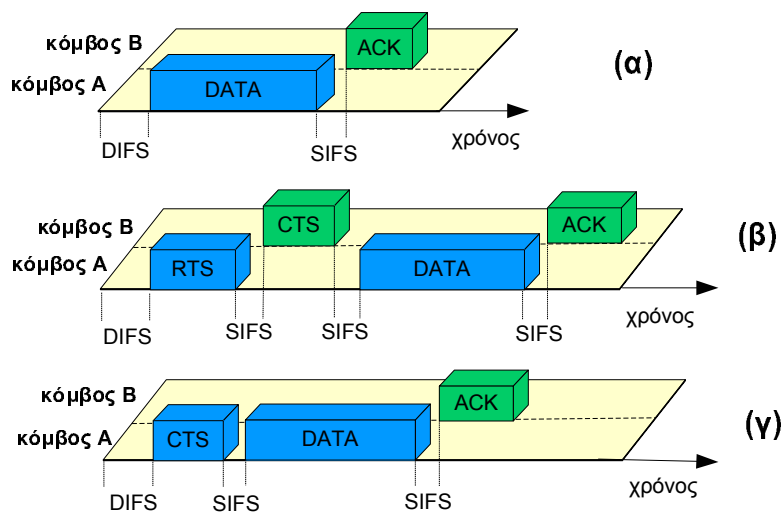
Η δεύτερη προτεινόμενη λύση είναι η χρήση του μηχανισμού πρόσβασης RTS/CTS για την ‘προστασία’ των πακέτων που μεταδίδονται μέσω OFDM. Σύμφωνα με το πρότυπο, όταν η παράμετρος ERP δεν είναι ενεργοποιημένη (ύπαρξη κόμβων ERP και nonERP στο δίκτυο) τα πακέτα RTS και CTS πρέπει να μεταδίδονται μέσω DSSS. Έτσι όλοι οι κόμβοι θα μπορούν να αντιληφθούν την έναρξη μιας μετάδοσης, ακόμη και αν το πακέτο που περιέχει τα ωφέλιμα δεδομένα μεταδίδεται μέσω OFDM. Προφανώς, όταν όλοι οι κόμβοι του δικτύου είναι τύπου ERP δεν είναι απαραίτητη η χρήση του RTS/CTS (εκτός αν υπάρχουν κρυφοί κόμβοι, αλλά αυτό είναι άλλο θέμα) αφού όλοι οι κόμβοι μπορούν να αντιληφθούν μια μετάδοση OFDM.

Εκτός από το RTS/CTS, το πρότυπο IEEE 802.11 ορίζει και έναν εναλλακτικό μηχανισμό πρόσβασης για την πρόληψη συγκρούσεων που οφείλονται στο πρόβλημα διαλειτουργίας DSSS/OFDM. Ο μηχανισμός αυτός, γνωστός ως CTS-to-Self θα συζητηθεί στην επόμενη υποενότητα.

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι πρότυπο IEEE 802.11g ορίζει δυο διαφορετικές έννοιες για το μηχανισμό πρόσβασης RTS/CTS (ή CTS-to-Self), ανάλογα με τον τύπο σύγκρουσης τον οποίο προλαμβάνει. Όταν οι παραπάνω μηχανισμοί χρησιμοποιούνται για την πρόληψη τυχαίων συγκρούσεων (δυο ή περισσότεροι κόμβοι ξεκινούν να μεταδίδουν στην ίδια χρονοθυρίδα) ή συγκρούσεων που οφείλονται στο πρόβλημα του κρυφού κόμβου, τότε ορίζονται ως *μηχανισμοί εικονικής αντίληψης μέσου (virtual carrier sense mechanisms)*. Απεναντίας, όταν οι προαναφερθέντες μηχανισμοί χρησιμοποιούνται για την πρόληψη συγκρούσεων που οφείλονται στο πρόβλημα διαλειτουργίας DSSS/OFDM τότε ορίζονται ως *μηχανισμοί προστασίας (protection mechanisms)*.

3.2.5 Ο μηχανισμός προστασίας CTS-to-Self

Όπως ειπώθηκε στην προηγούμενη υποενότητα, το πρότυπο IEEE 802.11g ορίζει το μηχανισμό προστασίας CTS-to-Self ως εναλλακτικό του RTS/CTS, με σκοπό να ελαττώσει τον αριθμό των συγκρούσεων που συμβαίνουν εξ' αιτίας των προβλημάτων διαλειτουργίας. Σύμφωνα με το μηχανισμό αυτό, όταν κάποιος κόμβος θέλει να μεταδώσει, αντί να στείλει ένα πακέτο RTS, στέλνει ένα πακέτο CTS προοριζόμενο στον εαυτό του, χωρίς να περιμένει απάντηση από κανέναν κόμβο. Με τον τρόπο αυτό, οι κόμβοι που βρίσκονται στην περιοχή κάλυψης του αποστολέα θα λάβουν το πακέτο CTS και δε θα μεταδώσουν, όσο ο αποστολέας μεταδίδει. Στο Σχήμα 3.2γ απεικονίζεται η αλληλουχία πλαισίων σε μια μετάδοση μέσω CTS-to-Self. Τα Σχήματα 3.2α και 3.2β που αφορούν την αλληλουχία πλαισίων σε μια μετάδοση με το βασικό μηχανισμό πρόσβασης και με RTS/CTS αντίστοιχα, τα εξετάσαμε στο Κεφάλαιο 2 (βλ. Σχ. 2.6).



Σχήμα 3.2: Αλληλουχία πλαισίων κατά τη μετάδοση με CTS-to-Self

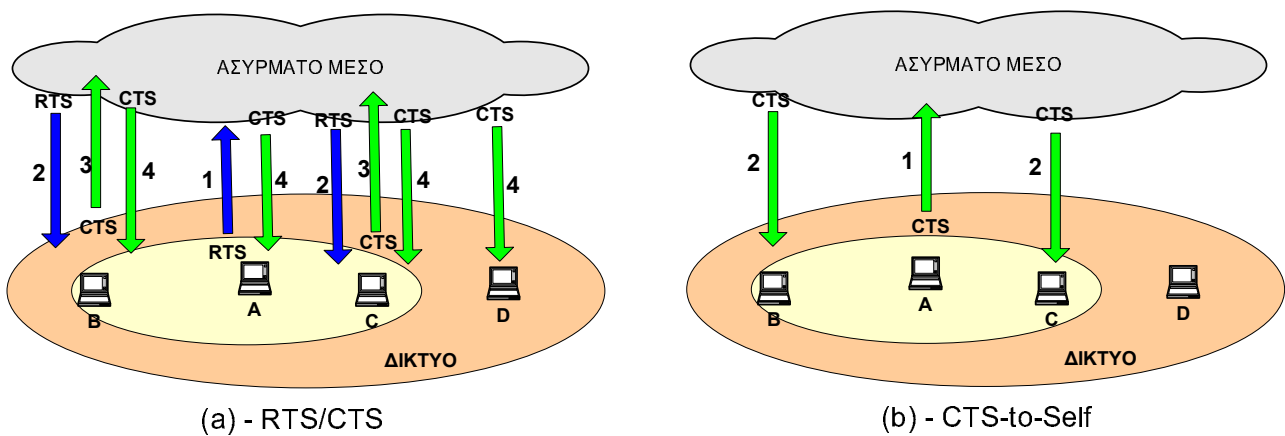
Ο τρόπος χρήσης του CTS-to-Self είναι ίδιος με αυτόν του RTS/CTS. Δηλαδή σε μια μετάδοση μπορεί να χρησιμοποιείται μόνο ο βασικός μηχανισμός πρόσβασης, μόνο ο CTS-to-Self ή ένας υβριδικός μηχανισμός όπου η επιλογή του τρόπου πρόσβασης εξαρτάται από την τιμή του RTS Threshold.

Ενώ το CTS-to-Self, προφανώς προσδίδει αρκετά μικρότερο φόρτο στο σύστημα (ένα πακέτο RTS και ένα διάστημα SIFS λιγότερο για κάθε μετάδοση), το μειονέκτημά του είναι ότι σχεδιάστηκε και χρησιμεύει αποκλειστικά σαν μηχανισμός προστασίας και όχι σαν μηχανισμός εικονικής αντίληψης μέσου. Αυτό φαίνεται ξεκάθαρα στο Σχήμα 3.3, όπου το CTS-Self συγκρίνεται με το RTS/CTS.

Στο Σχήμα 3.3α απεικονίζεται η αλληλουχία ανταλλαγής μηνυμάτων μέσω των κόμβων του δικτύου με χρήση RTS/CTS.

Κατά την επικοινωνία με χρήση RTS/CTS, όταν ο κόμβος Α θέλει να στείλει ένα πακέτο στον κόμβο C, στέλνει πρώτα ένα πακέτο RTS (βέλος No1) το οποίο φτάνει στους κόμβους B και C (βέλος No2) οι οποίοι βρίσκονται στην περιοχή κάλυψης του αποστολέα. Οι κόμβοι B και C λαμβάνουν το πλαίσιο RTS, και μεταδίδουν ένα πλαίσιο CTS (βέλος No3), που λαμβάνεται απ' όλους τους κόμβους (βέλος No4). Ο κρυφός κόμβος D τώρα, που βρίσκεται εκτός της περιοχής ραδιοκάλυψης του κόμβου Α, παρ' όλο που δεν έλαβε το πλαίσιο RTS, έχει λάβει το πλαίσιο CTS, επομένως αναιρεί τη μετάδοσή του την ώρα που ο Α μεταδίδει.

Σύμφωνα τώρα με το μηχανισμό CTS-to-Self που φαίνεται στο Σχήμα 3.3b, όταν ο κόμβος Α θέλει να στείλει πακέτο στον κόμβο C, στέλνει πρώτα ένα πακέτο CTS (βέλος No1) το οποίο λαμβάνεται από τους κόμβους B και C (βέλος No2) οι οποίοι βρίσκονται στην περιοχή κάλυψης του αποστολέα. Και οι δυο κόμβοι θα αναβάλλουν τις μεταδόσεις τους. Ο κρυφός κόμβος D όμως δεν καταλαβαίνει ότι ο κόμβος Α θα μεταδώσει, καθώς δεν έλαβε κανένα μήνυμα ελέγχου. Επακόλουθο αυτού είναι οι συγκρούσεις και η μειωμένη επίδοση του δικτύου.



Σχήμα 3.3: Η διαδικασία ανταλλαγής μηνυμάτων μέσω CTS-to-Self

Προφανώς, το CTS-to-Self μπορεί να προλάβει μόνο τυχαίες συγκρούσεις και συγκρούσεις λόγω διαλειτουργίας. Δυστυχώς, δε μπορεί να προλάβει συγκρούσεις που οφείλονται στο πρόβλημα του κρυφού κόμβου. Συνεπώς, ο μηχανισμός CTS-Self θα πρέπει να χρησιμοποιείται μόνο όταν υπάρχει ραδιοκάλυψη μεταξύ όλων των κόμβων του δικτύου. Σε διαφορετική περίπτωση θα πρέπει να χρησιμοποιείται RTS/CTS.

Ολοκληρώνοντας την παρουσίαση των βασικών χαρακτηριστικών του προτύπου IEEE 802.11g, θα περάσουμε στην επόμενη ενότητα όπου πραγματοποιείται αξιολόγηση επίδοσης του προτύπου.

3.3 Αξιολόγηση επίδοσης του προτύπου IEEE 802.11g

Από τη μελέτη που πραγματοποιήθηκε στην προηγούμενη ενότητα φαίνεται ότι τα καινοτομικά χαρακτηριστικά του προτύπου αυξάνουν την επίδοσή του, σε σχέση με τα παλιότερα πρότυπα της οικογένειάς του. Για να καταλήξουμε όμως σε συγκεκριμένα συμπεράσματα που αφορούν τον ακριβή βαθμό της βελτίωσης, πραγματοποιήθηκε στη συγκεκριμένη ενότητα μια αξιολόγηση επίδοσης του προτύπου, βασισμένη σε προσομοίωση. Η αξιολόγηση αφορά διάφορα σενάρια, στο καθένα από τα οποία μελετάται η επήρεια του κάθε καινοτομικού χαρακτηριστικού στην επίδοση του προτύπου. Για την αξιολόγηση επίδοσης χρησιμοποιήθηκε η πλατφόρμα προσομοίωσης Pythagor [5] που αναφέρθηκε στο εισαγωγικό κεφάλαιο. Η συγκεκριμένη πλατφόρμα πραγματοποιεί λεπτομερή προσομοίωση του IEEE 802.11g υπολογίζοντας διάφορα μέτρα αξιολόγησης όπως καθυστέρηση πακέτου, διέλευση, αριθμός πακέτων στον καταχωρητή του πομποδέκτη κ.α. Περισσότερες λεπτομέρειες για την πλατφόρμα αναφέρονται στο Παράρτημα Α.

Καθώς η αξιολόγηση επίδοσης πραγματοποιήθηκε για ένα μεγάλο εύρος ρυθμών μετάδοσης, θεωρήθηκε σκόπιμη η επιλογή της χωρητικότητας καναλιού (*channel capacity*) ως μέτρο αξιολόγησης. Ως χωρητικότητα καναλιού ορίζουμε τη μέγιστη χρησιμοποίηση καναλιού (διέλευση/ρυθμός μετάδοσης) που μπορεί να επιτευχθεί. Προκειμένου να πετύχουμε μέγιστη χρησιμοποίηση θεωρήθηκαν ιδανικές συνθήκες στο μέσο (απουσία κρυφών κόμβων, μηδενικές απώλειες διαδρομής, απουσία παρεμβολών). Εξαιρέση αποτελεί το σενάριο μελέτης του μηχανισμού προστασίας CTS-to-Self, όπου στο δίκτυο υπάρχουν κρυφοί κόμβοι.

Αναφορικά με το φόρτο κίνησης, υποθέτουμε ότι το δίκτυο αποτελείται από δέκα κόμβους που μεταδίδουν σε κατάσταση κορεσμού, ώστε να επιτευχθεί μέγιστη χρησιμοποίηση. Το μέγεθος ωφέλιμου πακέτου (packet payload size) ακολουθεί την Εκθετική κατανομή με μέση τιμή 1KByte, που είναι μια τυπική τιμή μεγέθους πακέτου IP.

Τέλος, για το κατώφλι RTS, όπως τονίζεται στο άρθρο [7], η βέλτιστη τιμή του εξαρτάται από έναν μεγάλο αριθμό παραγόντων (μέγεθος δικτύου, σταθερό ή μεταβλητό μέγεθος πακέτου, minimum contention window) και μπορεί να οριστεί μόνο εμπειρικά. Για τη δική μας περίπτωση, μετά από προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν, επιλέχθηκε η τιμή των 256bytes ως βέλτιστη τιμή για το κατώφλι RTS.

Στον Πίνακα 3.3 συνοψίζονται οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση. Σε κάθε σενάριο προσομοιώθηκε μια ώρα πραγματικής λειτουργίας του δικτύου.

Παράμετρος	Τιμή
Αριθμός κόμβων	10
Κατανομή του packet payload size	Εκθετική
Μέση τιμή του packet payload size	1024Bytes
Κατώφλι RTS	256Bytes

Πίνακας 3.3: Παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση

Στις επόμενες υποενότητες πραγματοποιείται η αξιολόγηση επίδοσης του προτύπου IEEE 802.11g όσον αφορά τα καινοτομικά χαρακτηριστικά του.

3.3.1 Αξιολόγηση επίδοσης του φυσικού στρώματος ERP-OFDM

Στη συγκεκριμένη υποενότητα αξιολογείται η επίδοση του φυσικού στρώματος ERP-OFDM καθώς και η αποδοτικότητα της παραμέτρου ERP. Για το συγκεκριμένο σκοπό πραγματοποιήθηκαν τρία σενάρια προσομοίωσης, όπου καθένα από αυτά εκτελέστηκε για διάφορους ρυθμούς μετάδοσης. Στο πρώτο σενάριο όλοι οι κόμβοι είναι ERP, δηλαδή υποστηρίζουν ρυθμούς ERP-OFDM. Στην περίπτωση αυτή η επικοινωνία μεταξύ τους πραγματοποιείται μέσω OFDM και η παράμετρος ERP είναι ενεργοποιημένη (βλ. υποενότητα 3.2.3). Στο δεύτερο σενάριο ένας κόμβος δεν υποστηρίζει ρυθμούς ERP (κόμβος nonERP), οπότε η παράμετρος ERP δεν είναι ενεργοποιημένη. Το τρίτο σενάριο αφορά ένα δίκτυο IEEE 802.11a, πανομοιότυπο με το δίκτυο των δυο προηγούμενων σεναρίων (όσον αφορά τις παραμέτρους προσομοίωσης).

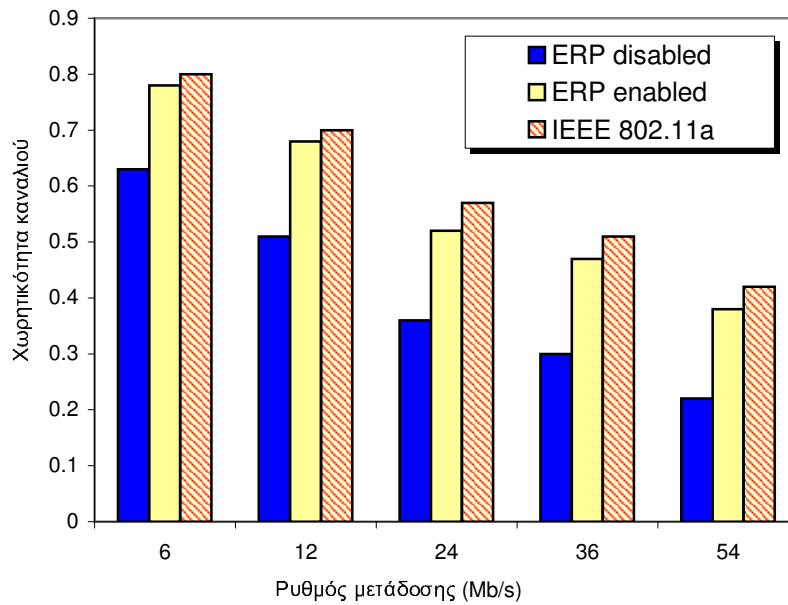
Ο σκοπός που επιλέχθηκαν τα τρία παραπάνω σενάρια με το συγκεκριμένο τρόπο είναι ο εξής: Το πρώτο σενάριο επιλέχθηκε για την αξιολόγηση επίδοσης ενός δικτύου όταν όλοι οι κόμβοι είναι ERP. Το δεύτερο σενάριο δημιουργήθηκε για να ελέγξουμε την επίδοση του πρωτοκόλλου όταν (σχεδόν) όλοι οι κόμβοι είναι ERP, οπότε (σχεδόν) μεταξύ όλων των κόμβων η μετάδοση πραγματοποιείται με διαμόρφωση OFDM, αλλά με την παράμετρο ERP απενεργοποιημένη. Με άλλα λόγια το δεύτερο σενάριο δημιουργήθηκε για την αξιολόγηση της παραμέτρου ERP. Το τρίτο σενάριο δημιουργήθηκε προφανώς για τη σύγκριση ενός δικτύου IEEE 802.1a με με ένα δίκτυο IEEE 802.11g αποτελούμενο από κόμβους ERP μόνο.

Στο Σχήμα 3.4 απεικονίζεται η χωρητικότητα του καναλιού για διάφορους ρυθμούς μετάδοσης και στα τρία σενάρια. Όπως φαίνεται, όταν η παράμετρος ERP είναι ενεργοποιημένη, τότε η χωρητικότητα του δικτύου αυξάνεται σημαντικά σε σχέση με την περίπτωση όπου υπάρχει τουλάχιστον ένας κόμβος non-ERP. Συγκεκριμένα, για ρυθμό μετάδοσης ίσο με 6Mb/s, η χωρητικότητα είναι 0.78 (4.7Mb/s) όταν όλοι οι κόμβοι είναι ERP, που σημαίνει 24% περισσότερο από την περίπτωση όπου υπάρχει τουλάχιστον ένας κόμβος nonERP (0.63 ή 3.8Mb/s). Ειδικά για ρυθμό μετάδοσης 54Mb/s, η διαφορά στη χωρητικότητα μεταξύ των δυο περιπτώσεων φτάνει 72%, που σημαίνει επιπλέον διέλευση της τάξης των 9Mb/s.

Τα παραπάνω συμβαίνουν λόγω των μικρότερων τιμών για τη διάρκεια χρονοθυρίδας και το minimum contention window που ορίζονται όταν η παράμετρος ERP είναι ενεργοποιημένη και, επιπλέον, λόγω των μικρότερων διαρκειών των preambles που ορίζονται στην περίπτωση αυτή. Οι τιμές των preambles, της διάρκειας χρονοθυρίδας και του minimum contention window είναι ίδιες με αυτές που ορίζονται στο πρότυπο IEEE 802.11a. Στην ουσία, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.4, το IEEE 802.11g με κόμβους ERP φτάνει σχεδόν την επίδοση του IEEE 802.11a. Η διαφορά στη χωρητικότητα που μπορεί να επιτευχθεί στις δυο περιπτώσεις είναι της τάξης του 5% περισσότερο για το δίκτυο IEEE 802.11a.

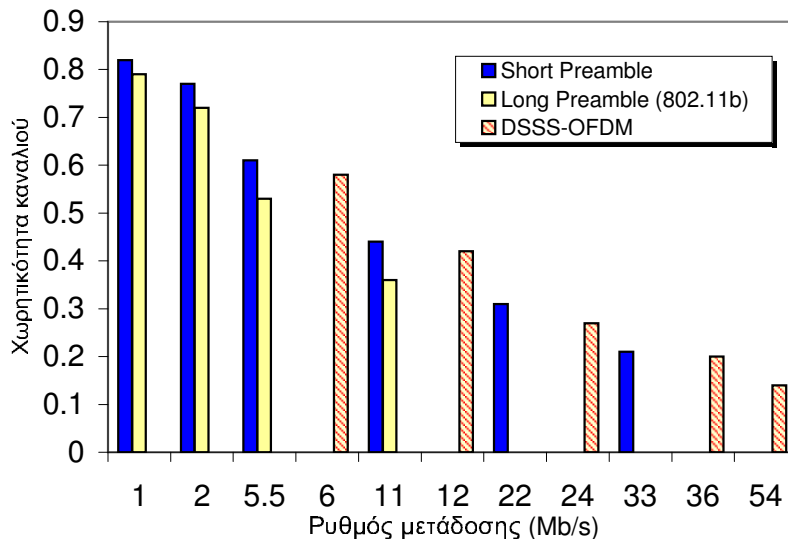
3.3.2 Αξιολόγηση επίδοσης των φυσικών στρωμάτων ERP-DSSS και DSSS-OFDM

Στην παρούσα υποενότητα αξιολογείται η επίδοση των φυσικών στρωμάτων ERP-DSSS και DSSS-OFDM, καθώς και η αποδοτικότητα χρήσης του short preamble. Για το συγκεκριμένο σκοπό πραγματοποιήθηκαν τρία σενάρια προσομοίωσης, όπου καθένα από αυτά εκτελέστηκε για διάφορους ρυθμούς



Σχήμα 3.4: Χωρητικότητα καναλιού για ρυθμούς ERP-OFDM

μετάδοσης. Στο πρώτο σενάριο υποθέτουμε ότι όλοι οι κόμβοι είναι nonERP και υποστηρίζουν το short preamble. Συνεπώς, όλες οι μεταδόσεις πραγματοποιούνται με short preamble και διαμόρφωση DSSS. Ως τεχνική κωδικοποίησης επιλέχθηκε η PBCC, οπότε οι ρυθμοί που υποστηρίζονται φτάνουν μέχρι 33Mb/s. Στο δεύτερο σενάριο υποθέτουμε ότι όλοι οι κόμβοι είναι nonERP αλλά δεν υποστηρίζουν τη χρήση short preamble. Το σενάριο αυτό αντιστοιχεί στην περίπτωση ενός παλιού δικτύου IEEE 802.11b. Οι ρυθμοί μετάδοσης που υποστηρίζονται φτάνουν τα 11Mb/s. Το τρίτο σενάριο αφορά την αξιολόγηση επίδοσης του φυσικού στρώματος DSSS-OFDM. Όλοι οι κόμβοι υποτίθεται ότι υποστηρίζουν το φυσικό στρώμα DSSS-OFDM, οπότε η επικοινωνία πραγματοποιείται με ρυθμούς μετάδοσης 6Mb/s-54Mb/s. Στο Σχήμα 3.5 φαίνεται η χωρητικότητα του καναλιού για ρυθμούς ERP-DSSS και DSSS-OFDM.



Σχήμα 3.5: Χωρητικότητα καναλιού για ρυθμούς ERP-DSSS / DSSS-OFDM

Όπως είναι προφανές, η χρήση short preamble βελτιώνει τη χωρητικότητα του καναλιού σε σχέση με αυτή που επιτυγχάνεται σε δίκτυα τύπου IEEE 802.11b. Ενώ η χωρητικότητα με χρήση long preamble είναι 0.36 (4Mb/s) για ρυθμό μετάδοσης 11Mb/s, η χρήση short preamble αυξάνει τη χωρητικότητα σε 0.44 (σχεδόν 5Mb/s), που σημαίνει 22% βελτίωση.

Από την άλλη πλευρά, η χωρητικότητα του καναλιού για την περίπτωση του φυσικού στρώματος DSSS-OFDM είναι πολύ μικρότερη από αυτή που επιτυγχάνεται μέσω του φυσικού στρώματος ERP-OFDM (βλ.

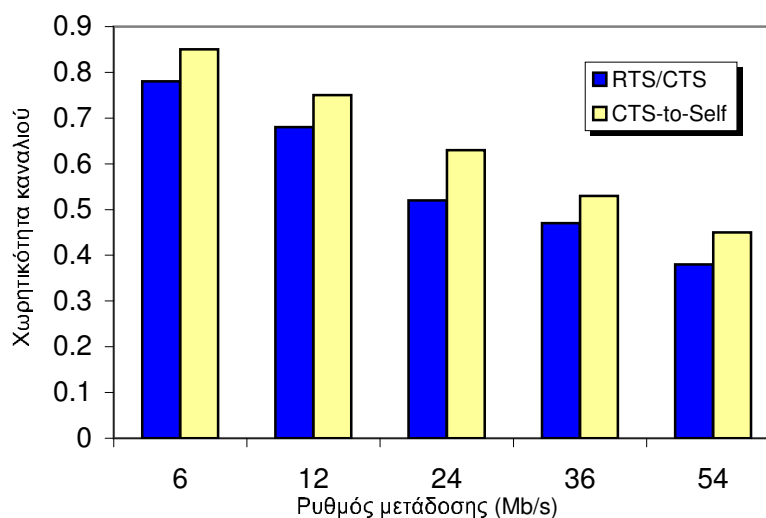
Σχ. 3.4). Πράγματι, για ρυθμό μετάδοσης 6Mb/s, με φυσικό στρώμα ERP-OFDM και με όλους τους κόμβους να είναι ERP, η χωρητικότητα είναι 9% (300Kb/s) περισσότερη από αυτή που επιτυγχάνεται με χρήση DSSS-OFDM. Για ρυθμό μετάδοσης 54Mb/s η αύξηση αυτή φτάνει το 57%, που σημαίνει 4.3Mb/s επιπλέον διέλευσης. Προφανώς, λόγω του επιπλέον φόρτου που προσθέτει στην επικοινωνία το προοίμιο DSSS, το φυσικό στρώμα DSSS-OFDM δεν είναι κατάλληλο για μετάδοση σε ρυθμούς OFDM.

Τέλος, ένα γενικό συμπέρασμα που αφορά όλους τους τύπους φυσικού στρώματος είναι ότι η χωρητικότητα καναλιού ελαττώνεται με την αύξηση των ρυθμών μετάδοσης. Αυτό συμβαίνει λόγω του μικρού μήκους πακέτου σε σχέση με τους υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης που υποστηρίζονται από το πρότυπο. Οι συγγραφείς του άρθρου [8] διεξάγουν μια λεπτομερή ανάλυση για τον τρόπο που το μέγεθος πακέτου επηρεάζει τη χωρητικότητα καναλιού στα δίκτυα CSMA.

3.3.3 Αξιολόγηση επίδοσης του μηχανισμού προστασίας CTS-to-Self

Στη συγκεκριμένη υποενότητα πραγματοποιείται αξιολόγηση επίδοσης του μηχανισμού προστασίας CTS-to-Self, από δυο διαφορετικές οπτικές γωνίες. Πρώτον, από τον επιπλέον φόρτο κίνησης που προσδίδει στο σύστημα και δεύτερον, από την ικανότητά του να αντιμετωπίσει το πρόβλημα του κρυφού κόμβου. Για το συγκεκριμένο σκοπό δημιουργήθηκαν δυο ξεχωριστά σενάρια, ονομαζόμενα *Line of Sight (LOS)* και *Non Line of Sight (NLOS)*. Στο πρώτο σενάριο δεν υπάρχουν κρυφοί κόμβοι ενώ στο δεύτερο υπάρχουν.

Ας περάσουμε τώρα στη μελέτη του πρώτου σεναρίου (LOS). Ας θεωρήσουμε ένα δίκτυο IEEE 802.11g του οποίου οι παράμετροι περιγράφηκαν στην αρχή της ενότητας (βλ. Πιν. 3.3). Δέκα κόμβοι ERP μεταδίδουν σε κορεσμό με την παράμετρο ERP ενεργοποιημένη. Ραδιοκάλυψη υπάρχει μεταξύ όλων των κόμβων, δηλαδή δεν υπάρχουν κρυφοί κόμβοι. Επιπλέον, καθώς όλοι οι κόμβοι είναι ERP, μπορούν να αντιληφθούν τη μετάδοση του καθενός, οπότε δεν απαιτούνται μηχανισμοί προστασίας. Πάρα ταύτα, παρόμοια συμπεράσματα θα είχαμε αν υποθέταμε ότι κάποιοι κόμβοι είναι nonERP και χρησιμοποιούσαμε κάποιον μηχανισμό προστασίας. Με βάση τα παραπάνω μπορούν να συμβούν μόνο τυχαίες συγκρούσεις, όπου δυο ή περισσότεροι κόμβοι ξεκινούν να μεταδίδουν στην ίδια χρονοθυρίδα. Στο Σχήμα 3.6 απεικονίζεται γραφικά η χωρητικότητα του καναλιού για διάφορους ρυθμούς μετάδοσης, όταν χρησιμοποιείται RTS/CTS και όταν χρησιμοποιείται CTS-to-Self.

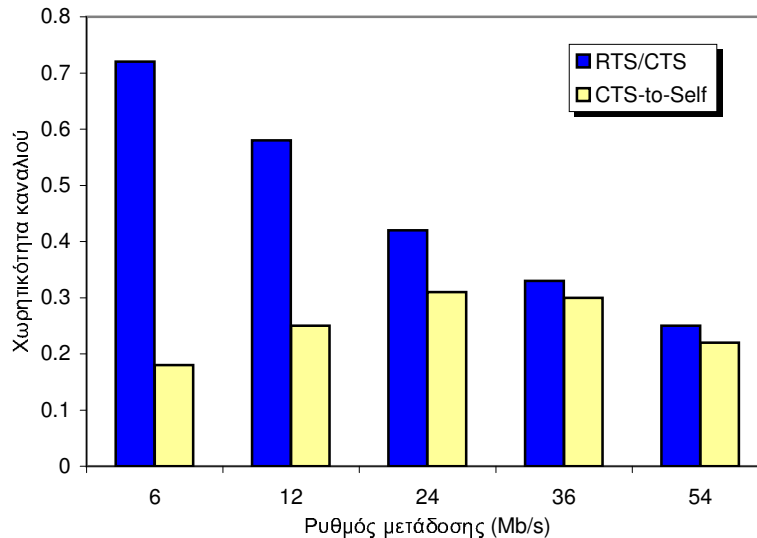


Σχήμα 3.6: Σύγκριση των μηχανισμών RTS/CTS και CTS-to-Self με απουσία κρυφών κόμβων

Όπως φαίνεται και από το σχήμα, ο μηχανισμός CTS-to-Self είναι πιο αποδοτικός από τον RTS/CTS όταν υπάρχει ραδιοκάλυψη μεταξύ όλων των κόμβων. Ο μικρός φόρτος που προστίθεται από το ένα και μοναδικό πλαίσιο CTS που μεταδίδεται, συγκρινόμενος με τον αυξημένο φόρτο που προσθέτει η ανταλλαγή πλαισίων RTS και CTS, μπορεί να αυξήσει τη χωρητικότητα του δικτύου. Συγκεκριμένα, για ρυθμό μετάδοσης 54Mb/s, με χρήση CTS-to-Self η χωρητικότητα του καναλιού είναι 0.45 (24.3Mb/s),

που είναι 18% περισσότερη από αυτή που επιτυγχάνεται με το μηχανισμό RTS/CTS (0.38 ή 20.5Mb/s). Η αύξηση αυτή του 18% σημαίνει 3.8Mb/s περισσότερης διέλευσης.

Περνάμε τώρα στο δεύτερο σενάριο (NLOS), όπου εμπερικλείεται το πρόβλημα του κρυφού κόμβου. Το σενάριο είναι το ίδιο με το προηγούμενο, με τη διαφορά ότι η διάταξη των κόμβων είναι τέτοια ώστε, για κάθε κόμβο, 22% από τους εναπομείναντες (2 από τους 9) να είναι κρυφοί. Στο Σχήμα 3.7 φαίνεται η χωρητικότητα του καναλιού για διάφορους ρυθμούς μετάδοσης, όταν χρησιμοποιείται RTS/CTS και όταν χρησιμοποιείται CTS-to-Self.



Σχήμα 3.7: Σύγκριση των μηχανισμών RTS/CTS και CTS-to-Self με ύπαρξη κρυφών κόμβων

Η έλλειψη αποτελεσματικότητας του μηχανισμού CTS-to-Self στην περίπτωση αυτή είναι προφανής. Η μετάδοση μόνο ενός πλαισίου CTS δε μπορεί να αποτρέψει τους κρυφούς κόμβους από το να μεταδώσουν όταν δεν πρέπει. Αντιθέτως, ο μηχανισμός RTS/CTS εγγυάται ότι η πλειοψηφία των κρυφών κόμβων θα λάβει είτε ένα πακέτο RTS από τον αποστολέα είτε ένα πακέτο CTS από κάποιον άλλο κόμβο, οπότε δε θα μεταδώσει κατά τη διάρκεια μιας μετάδοσης που εκκρεμεί.

Μια αξιοσημείωτη παρατήρηση είναι η σύγκλιση των τιμών της χωρητικότητας στις δυο περιπτώσεις, καθώς ο ρυθμός μετάδοσης αυξάνει. Πράγματι, η διαφορά στη χωρητικότητα είναι 0.54 για ρυθμό μετάδοσης 6Mb/s ενώ για ρυθμό μετάδοσης 54Mb/s είναι μόνο 0.03. Αυτό εξηγείται σκεπτόμενοι ότι μια μετάδοση με ρυθμό 6Mb/s διαρκεί περισσότερο από μια με ρυθμό 54Mb/s. Συνεπώς, στα 6Mb/s, η πιθανότητα ένας κρυφός κόμβος να μεταδώσει κατά τη διάρκεια μιας άλλης μετάδοσης είναι μεγαλύτερη. Με άλλα λόγια, σε ρυθμό μετάδοσης 6Mb/s συμβαίνουν περισσότερες συγκρούσεις οφειλόμενες σε κρυφούς κόμβους απ' ό,τι σε ρυθμό 54Mb/s (και γενικότερα σε χαμηλούς ρυθμούς απ' ό,τι σε υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης). Το πρόβλημα με το μηχανισμό CTS-to-Self είναι ότι δε μπορεί να προλάβει αυτές τις συγκρούσεις. Συνεπώς, όσο ο ρυθμός μετάδοσης αυξάνεται και ο αριθμός των συγκρούσεων μειώνεται, ο μηχανισμός CTS-to-Self γίνεται πιο αποτελεσματικός.

3.3.4 Αξιολόγηση της δυνατότητας μετάδοσης με πολλαπλούς ρυθμούς

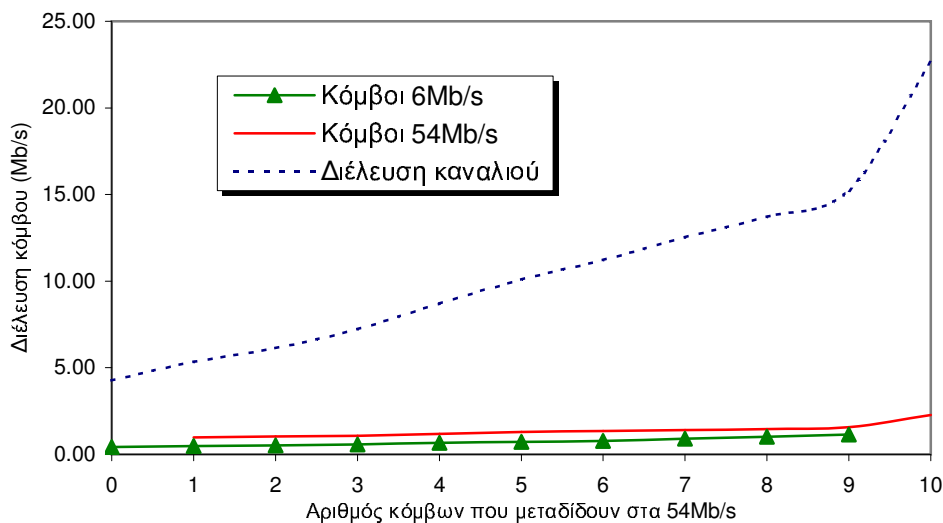
Το πρότυπο IEEE 802.11 προσφέρει στους κόμβους τη δυνατότητα να μεταδίδουν με πολλαπλούς ρυθμούς μετάδοσης, καθώς και τη δυνατότητα να ρυθμίζουν το ρυθμό μετάδοσης ανάλογα με τις υπάρχουσες συνθήκες του καναλιού. Με τον τρόπο αυτό, όταν η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη είναι μεγάλη ή όταν το κανάλι εμφανίζει απώλειες, παρεμβολές κ.α., τότε ο ρυθμός μετάδοσης ελαττώνεται δυναμικά με σκοπό να γίνει εφικτή η επικοινωνία.

Στην περίπτωση του προτύπου IEEE 802.11g υπάρχουν 14 διαθέσιμοι ρυθμοί μετάδοσης που κυμαίνονται από 1Mb/s ως 54Mb/s, οπότε, όπως είναι προφανές, οι ρυθμοί μετάδοσης με τους οποίους μεταδίδουν οι διάφοροι κόμβοι μπορεί να διαφέρουν ριζικά μεταξύ τους.

Στην παρούσα υποενότητα μελετάται, μέσω προσομοίωσης πώς οι κόμβοι που μεταδίδουν με χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης επηρεάζουν τους κόμβους που μεταδίδουν με υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης και αντίστροφα.

Θεωρούμε πάλι δέκα κόμβους ERP που μεταδίδουν σε κατάσταση κορεσμού. Οι παράμετροι της προσομοίωσης περιγράφηκαν στην αρχή της Ενότητας 3.3 και συνοψίζονται στον Πίνακα 3.3. Από τους δέκα αυτούς κόμβους κάποιοι μεταδίδουν με ρυθμό 54Mb/s (π.χ. βρίσκονται κοντά στο δέκτη) και οι υπόλοιποι μεταδίδουν με ρυθμό 6Mb/s (βρίσκονται μακριά από το δέκτη).

Στο Σχήμα 3.8 φαίνεται η διέλευση του κάθε κόμβου σε σχέση με τον αριθμό των κόμβων που μεταδίδουν με 54Mb/s. Παράλληλα απεικονίζεται και η συνολική διέλευση του καναλιού, που είναι το άθροισμα της διέλευσης όλων των κόμβων.



Σχήμα 3.8: Διέλευση του κάθε κόμβου σε σχέση με τον αριθμό των κόμβων που μεταδίδουν με 54Mb/s

Αρχικά βλέπουμε ότι η διέλευση των κόμβων που μεταδίδουν στα 54Mb/s αυξάνεται όταν αυξάνεται ο αριθμός τους. Συνεπώς η παρουσία κόμβων που μεταδίδουν με χαμηλούς ρυθμούς επηρεάζει αρνητικά τους κόμβους που μεταδίδουν με υψηλούς ρυθμούς.

Από την άλλη πλευρά, παρατηρούμε ότι και η διέλευση των κόμβων που μεταδίδουν με χαμηλούς ρυθμούς αυξάνεται όταν ο αριθμός των κόμβων που μεταδίδουν με υψηλούς ρυθμούς αυξάνεται. Συνεπώς, η παρουσία κόμβων που μεταδίδουν με υψηλούς ρυθμούς επηρεάζει θετικά τους κόμβους που μεταδίδουν με χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης.

Τέλος, είναι προφανές ότι η διέλευση του καναλιού αυξάνεται καθώς ο αριθμός των κόμβων που μεταδίδουν στα 54Mb/s αυξάνεται. Συνεπώς η παρουσία κόμβων που μεταδίδουν με υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης αυξάνει τη διέλευση του καναλιού. Μάλιστα, βλέπουμε ότι η κλίση της καμπύλης της συνολικής διέλευσης αλλάζει σημαντικά καθώς ο αριθμός των κόμβων που μεταδίδουν στα 54Mb/s αλλάζει από εννιά σε δέκα. Αυτό σημαίνει ότι ακόμη και ένας κόμβος που μεταδίδει με χαμηλό ρυθμό επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη διέλευση του δικτύου.

Η εξήγηση για τα παραπάνω είναι η ίδια η φύση του πρωτοκόλλου CSMA που, μακροπρόθεσμα, εγγυάται ίση πιθανότητα πρόσβασης στο μέσο για όλους τους κόμβους. Πιο συγκεκριμένα, η διάρκεια μετάδοσης πακέτου από έναν κόμβο που μεταδίδει με χαμηλό ρυθμό είναι μεγαλύτερη από αυτή που αντιστοιχεί σε έναν κόμβο που μεταδίδει με υψηλό ρυθμό μετάδοσης. Συνεπώς, ένας κόμβος που μεταδίδει με χαμηλό ρυθμό απασχολεί το μέσο για περισσότερη ώρα, οδηγώντας έτσι σε ελάττωση της διέλευσης του καναλιού. Οι συγγραφείς του άρθρου [9] διεξάγουν μια λεπτομερή ανάλυση για την ελάττωση της διέλευσης του καναλιού IEEE 802.11b παρουσία κόμβων που μεταδίδουν με χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης.

3.4 Σύνοψη

Κλείνοντας το παρόν κεφάλαιο θα κάνουμε μια σύντομη ανασκόπηση της εργασίας που πραγματοποιήθηκε και θα τονίσουμε επιγραμματικά τα συμπεράσματα που προέκυψαν.

Ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία εξέλιξης του προτύπου IEEE 802.11 είναι η συνεχής αύξηση των υποστηριζόμενων ρυθμών μετάδοσης, ξεκινώντας από 2Mb/s το 1999 και φτάνοντας σήμερα τα 54Mb/s μέσω των προτύπων IEEE 802.11a και IEEE 802.11g.

Συνεχίζοντας προγενέστερες εργασίες που αφορούν τα πρότυπα IEEE 802.11, IEEE 802.11a, και IEEE 802.11b, το παρόν κεφάλαιο ασχολήθηκε με το πρότυπο IEEE 802.11g. Συγκεκριμένα έγινε μια σύντομη παρουσίαση των νέων χαρακτηριστικών του προτύπου και πραγματοποιήθηκε μια αξιολόγησή του μέσω προσομοίωσης στην πλατφόρμα Pythagor. Από τον τρόπο λειτουργίας του προτύπου, από τη μελέτη των νέων χαρακτηριστικών που υποστηρίζει και από την αξιολόγηση επίδοσης που πραγματοποιήθηκε προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Το IEEE 802.11g είναι ένας συγκερασμός των IEEE 802.11a και IEEE 802.11b. Πράγματι, με τα τέσσερα διαφορετικά φυσικά στρώματα που υποστηρίζει, προσφέρει τους υψηλούς ρυθμούς του IEEE 802.11a υποστηρίζοντας παράλληλα και συμβατότητα με παλιές δικτυακές διεπαφές IEEE 802.11 ή IEEE 802.11b. Συνεπώς, είναι αναμφισβήτητο η πιο ολοκληρωμένη, μέχρι στιγμής, λύση σχετική με το φυσικό στρώμα IEEE 802.11.
- Η παράμετρος ERP αυξάνει κατά πολύ τη χωρητικότητα του καναλιού. Πράγματι, με την κατάλληλη ρύθμιση της διάρκειας χρονοθυρίδας και του minimum contention window επιτυγχάνεται επίδοση σχεδόν ίση με αυτή του IEEE 802.11a.
- Η χρήση short preamble βελτιώνει τη χωρητικότητα του καναλιού σε σχέση με τη χρήση long preamble, με τη βελτίωση να φτάνει μέχρι και 22%.
- Η χρήση του τύπου φυσικού στρώματος DSSS-OFDM δεν είναι τόσο αποδοτική όσο η χρήση του ERP-OFDM. Η διαφορά της χωρητικότητας του καναλιού μεταξύ των δυο περιπτώσεων μπορεί να φτάσει μέχρι και 57%.
- Ο μηχανισμός πρόσβασης CTS-to-Self είναι αρκετά αποδοτικός όταν δεν υπάρχουν κρυφοί κόμβοι. Η βελτίωση στη χωρητικότητα του καναλιού σε σχέση με το μηχανισμό RTS-CTS μπορεί να φτάσει και 18%. Όταν όμως υπάρχουν κρυφοί κόμβοι ο μηχανισμός CTS-to-Self είναι αναποτελεσματικός και δε θα πρέπει σε καμιά περίπτωση να χρησιμοποιείται.
- Η ύπαρξη κόμβων που μεταδίδουν με χαμηλούς ρυθμούς σε ένα δίκτυο IEEE 802.11g, επηρεάζει αρνητικά τους ίδιους, τους κόμβους που μεταδίδουν με υψηλούς ρυθμούς και τη χωρητικότητα του καναλιού. Μάλιστα, η διαφορά στη χωρητικότητα μεταξύ της ύπαρξης ενός και κανενός κόμβου που μεταδίδει με χαμηλό ρυθμό είναι πολύ μεγαλύτερη από τη διαφορά στη χωρητικότητα μεταξύ της ύπαρξης ενός και δυο κόμβων ή δυο και τριών κόμβων κ.ο.κ.

Η χρησιμότητα της παρούσας εργασίας συνοψίζεται στα παραπάνω συμπεράσματα, τα οποία είναι χρήσιμα για κάθε ερευνητική προσπάθεια γύρω από το φυσικό στρώμα IEEE 802.11 γενικότερα, αλλά και στον απλό και κατανοητό τρόπο που παρουσιάζονται τα καινοτομικά χαρακτηριστικά του προτύπου IEEE 802.11g, καθιστώντας επιπλέον την εργασία ως ένα ενημερωτικό κείμενο πάνω στο συγκεκριμένο πρότυπο.

Θα κλείσουμε το κεφάλαιο επιστρέφοντας στην πρώτη του παράγραφο όπου τονίζεται ότι ένας λόγος για τον οποίο προέκυψε η ανάγκη υψηλών ρυθμών μετάδοσης ήταν η προσδοκία για εφαρμογή νέων υπηρεσιών με υψηλές απαιτήσεις σε ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων. Θα συμπληρώσουμε τώρα ότι με το πλήθος των νέων αυτών υπηρεσιών που δύνανται να εφαρμοστούν στα WLANs, δεν αρκεί μόνο υψηλός ρυθμός μετάδοσης, αλλά απαιτείται επιπλέον και ποιότητα υπηρεσίας. Ο όρος αυτός είναι το θέμα με το οποίο ασχολείται το επόμενο κεφάλαιο.

Βιβλιογραφικές Αναφορές

- [1] B. Crow *et al.*, “IEEE 802.11 Wireless Local Area Networks,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 35, no. 9, pp. 116–126, Dec. 1997.
- [2] S. Simoens *et al.*, “The evolution of 5GHz WLAN Toward Higher Throughputs,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 10, no. 6, pp. 10–16, Dec. 2003.
- [3] C. Heegard *et al.*, “High Performance Wireless Ethernet,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 39, no. 11, pp. 64–73, 2001.
- [4] D. Vassis *et al.*, “The IEEE 802.11g Standard for High Data Rate WLANs,” *IEEE Network*, vol. 19, no. 3, pp. 21–26, May 2005.
- [5] “Pythagor simulation tool.” [Online]. Available: <http://www.icsd.aegean.gr/telecom/pythagor/index.htm>
- [6] “Capacity, Coverage, and Deployment Considerations for IEEE 802.11g,” White Paper, Cisco Systems Inc, Oct. 2003.
- [7] G. Bianchi, “Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function,” *IEEE Journal on Selected Areas of Communications*, vol. 18, no. 3, pp. 535–547, 2000.
- [8] L. Kleinrock and F. Tobagi, “Packet Switching in Radio Channels: Part I-Carrier Sense Multiple Access Models and their Throughput-Delay Characteristics,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 23, no. 12, pp. 1400–1416, Dec. 1975.
- [9] M. Heusse *et al.*, “Performance Anomaly of 802.11b,” in *Proc. IEEE INFOCOM*, San Fransisco, USA, Apr. 2003.

Κεφάλαιο 4

Ποιότητα Υπηρεσίας στο Πρότυπο IEEE 802.11 - Ανάλυση Επίδοσης της Μεθόδου Πρόσβασης IEEE 802.11e EDCA σε Συνθήκες Πεπερασμένου Φόρτου Κίνησης

4.1 Εισαγωγή

Έχοντας ολοκληρώσει τη μελέτη για την εξέλιξη του φυσικού επιπέδου της οικογένειας προτύπων IEEE 802.11, περνάμε τώρα σε ένα άλλο μεγάλο θέμα που χρίζει ερευνητικού ενδιαφέροντος, αυτό της ποιότητας υπηρεσίας. Προτού περιγράψουμε το αντικείμενο με το οποίο ασχολείται το παρόν κεφάλαιο, είναι αναγκαίο να διασαφηνίσουμε τον όρο ποιότητα υπηρεσίας και να εξηγήσουμε πώς η έννοια αυτή συνδέεται αλληλένδετα με την εξέλιξη του φυσικού επιπέδου που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Όπως ειπώθηκε στο Κεφάλαιο 3, η αύξηση του ρυθμού μετάδοσης από 2Mb/s, που πρόσφερε το αρχικό πρότυπο, σε 54Mb/s που προσφέρει το πρότυπο IEEE 802.11g, καθιστά τις υπάρχοντες υπηρεσίες που εφαρμόζονταν στα ασύρματα τοπικά (WLANs) πολύ πιο εύχρηστες. Επιπλέον, πέρα από τη βελτίωση των υπάρχοντων υπηρεσιών, η αύξηση του ρυθμού μετάδοσης δίνει τη δυνατότητα για εφαρμογή νέων, που απαιτούν μεγάλο εύρος ζώνης. Αυτές είναι κατά κανόνα υπηρεσίες πολυμέσων και πραγματικού χρόνου, όπως φωνή και video πάνω από IP, τηλεδιάσκεψη, video κατ' απαίτηση, ηλεκτρονικά παιχνίδια πραγματικού χρόνου κ.α. Δυστυχώς όμως, οι υπηρεσίες αυτές δεν απαιτούν μόνο μεγάλο εύρος ζώνης αλλά και εγγύηση για αυστηρά καθορισμένα όρια καθυστέρησης πακέτου. Αυτό διότι οι παραπάνω υπηρεσίες λειτουργούν σε πραγματικό χρόνο, οπότε το κάθε πακέτο θα πρέπει να έχει καθορισμένη καθυστέρηση από άκρο σε άκρο. Για παράδειγμα [1], οι υπηρεσίες video απαιτούν καθυστέρηση πακέτου μικρότερη από 50ms, και οι υπηρεσίες ηλεκτρονικών παιχνιδιών απαιτούν καθυστέρηση μικρότερη από 10ms. Δημιουργείται αυτόματα, λοιπόν, η ανάγκη για εγγύηση προκαθορισμένου εύρους ζώνης και ορίων καθυστέρησης στις υπηρεσίες που εκτελούνται σε ένα WLAN.

Από την άλλη πλευρά, με την εφαρμογή των νέων υπηρεσιών στα WLANs, προέκυψε το ζήτημα για βέλτιστη εκμετάλλευση του εύρους ζώνης. Πιο συγκεκριμένα, κάθε υπηρεσία από τις ποικίλες που υπάρχουν σε ένα WLAN, έχει τις δικές της απαιτήσεις για εύρος ζώνης και για καθυστέρηση πακέτου. Για παράδειγμα, μια υπηρεσία video πάνω από IP απαιτεί εύρος ζώνης τουλάχιστο 1Mb/s ενώ, για μια υπηρεσία πλοήγησης στο δίκτυο, 128Kb/s είναι αρκετά. Επιπλέον, μια υπηρεσία φωνής πάνω από IP απαιτεί σχετικά μικρό εύρος ζώνης (64Kb/s είναι υπέρ αρκετά), αλλά απαιτεί αυστηρώς καθορισμένα όρια καθυστέρησης πακέτου. Αντιθέτως, μια υπηρεσία ftp ευνοείται από το μεγάλο εύρος ζώνης αλλά δεν απαιτεί εγγύηση για προκαθορισμένες χρονικές καθυστερήσεις πακέτου. Από τα προηγούμενα παραδείγματα είναι εμφανές ότι προκύπτει ένα επιπλέον ζήτημα, αυτό της διαφοροποίησης του τρόπου ανάθεσης πόρων μεταξύ των υπηρεσιών που εκτελούνται σε ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο.

Η εγγύηση για προκαθορισμένο εύρος ζώνης και προκαθορισμένα χρονικά όρια καθυστέρησης πακέτου καθώς και η διαφοροποίηση του τρόπου ανάθεσης πόρων μεταξύ των υπηρεσιών είναι αυτό που ονομάζουμε *ποιότητα υπηρεσίας (Quality of Service - QoS)* σε ένα δίκτυο τηλεπικοινωνιών.

Η υποστήριξη ποιότητας υπηρεσίας (QoS) στο IEEE 802.11 είναι ένα θέμα που απασχόλησε την ερευνητική κοινότητα από τη στιγμή που δημοσιεύθηκε το αρχικό πρότυπο. Το θέμα είναι εξαιρετικά περίπλοκο και, παρόλο που έχουν προταθεί κατά καιρούς αρκετά αξιολογικές λύσεις (οι οποίες συγκεντρώνονται στις επισκοπήσεις των άρθρων [2], [3], [4] και [5]), η προτυποποίηση μιας οριστικής εκκρεμεί μέχρι σήμερα. Η περιπλοκότητα του προβλήματος πηγάζει από τη φύση του πρωτοκόλλου CSMA και της μεθόδου πρόσβασης DCF, όπου η πρόσβαση στο μέσο πραγματοποιείται μέσω στατιστικής πολυπλεξίας. Αυτός ο τρόπος τυχαίας πρόσβασης δε μπορεί να εγγυηθεί προκαθορισμένα όρια καθυστέρησης πακέτου, καθώς η στιγμή που το πακέτο θα μεταδοθεί στο μέσο είναι ένα στοχαστικό μέγεθος, εξαρτώμενο από διάφορες παραμέτρους που παίρνουν τυχαίες τιμές (π.χ. backoff counter).

Για την υποστήριξη QoS, όπως ειπώθηκε και στο Κεφάλαιο 2, το αρχικό πρότυπο IEEE 802.11 εμπεριέχει την εναλλακτική μέθοδο πρόσβασης PCF, όπου η μετάδοση πραγματοποιείται με πολυπλεξία χρόνου. Η μέθοδος αυτή μπορεί, μέχρι ένα σημείο, να εγγυηθεί προκαθορισμένα όρια καθυστέρησης πακέτου. Η πολυπλοκότητά της όμως είναι αρκετά μεγάλη, πράγμα που καθιστά δύσκολη την υλοποίησή της στις δικτυακές συσκευές. Επιπλέον, η εφαρμογή της PCF αλλοιώνει τη στιβαρή, απλή και ευέλικτη φύση της DCF. Αξίζει να ειπωθεί ότι κατά το σχεδιασμό του IEEE 802.11, η αρχική πρόθεση ήταν η ανάπτυξη ενός προτύπου 'ασύρματου ethernet' [6]. Αυτό και μόνο δηλώνει ότι οι βασικές αρχές που διέπουν το IEEE 802.11 είναι η απλότητα στο σχεδιασμό και η στιβαρότητα στη λειτουργία, πράγματα που αίρονται, μέχρις ενός σημείου, από την εφαρμογή της PCF. Για τους παραπάνω λόγους, η PCF χρησιμοποιείται σήμερα λίγο ως καθόλου, καθώς το συντριπτικό ποσοστό των δικτυακών συσκευών είναι βασισμένο αποκλειστικά στη DCF.

Η δυσκολία υλοποίησης και τα μειονεκτήματα την PCF φάνηκαν από τα αρχικά στάδια ανάπτυξης του IEEE 802.11. Προς την κατεύθυνση αυτή οι ερευνητές αναζητούσαν νέους τρόπους για ενσωμάτωση QoS στο πρωτόκολλο. Ενδεικτικά ερευνητικά επιτεύγματα είναι αυτά που αναφέρονται στα άρθρα [7], [8], [9] και [10].

Η IEEE με τη σειρά της, ίδρυσε την ομάδα εργασίας IEEE 802.11e που ασχολείται αποκλειστικά με την ενσωμάτωση QoS στο IEEE 802.11. Μετά από αρκετές τροποποιήσεις, το πρότυπο IEEE 802.11e βρίσκεται αυτή τη στιγμή ένα βήμα πριν τη δημοσίευσή του. Βασισμένο σε διάφορες ερευνητικές προτάσεις, το IEEE 802.11e προτείνει τη μέθοδο πρόσβασης *Enhanced Distributed Channel Access - EDCA* που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 2. Όπως ειπώθηκε, η μέθοδος αυτή αντικαθιστά την παλιά DCF ώστε να υποστηρίζεται διαφοροποίηση υπηρεσιών.

Η μέθοδος EDCA δεν έχει προς το παρόν υλοποιηθεί σε δικτυακές συσκευές, επομένως ο βαθμός αποτελεσματικότητάς της και αποδοχής της από εμπορικής άποψης είναι ακόμη άγνωστος. Προς την κατεύθυνση αυτή, υψίστης πολυτιμότητας κρίνονται οι ερευνητικές προσπάθειες για την αξιολόγηση επίδοσης της EDCA. Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχει ήδη αρκετή συνεισφορά στο παραπάνω θέμα, είτε μέσω μαθηματικής ανάλυσης, είτε μέσω προσομοίωσης. Μεταξύ των διαφόρων ερευνητικών δημοσιεύσεων, θα αναφερθούμε στις πιο σημαντικές από αυτές.

Όσον αφορά την αξιολόγηση επίδοσης μέσω ανάλυσης, τα άρθρα [11] και [12] επεκτείνουν την ανάλυση του [13] που αφορά την DCF, για να υπολογίσουν τη διέλευση στον κορεσμό, στην περίπτωση της EDCA. Προς την ίδια κατεύθυνση κινούνται και οι συγγραφείς του άρθρου [14], με τη διαφορά ότι υπολογίζουν επιπλέον και την καθυστέρηση πρόσβασης στο μέσο. Απεναντίας, στις εργασίες των άρθρων [15] και [16] υπολογίζεται η διέλευση στον κορεσμό με διαφορετική προσέγγιση. Για παράδειγμα, στο άρθρο [16] δίνεται βάση στον παράγοντα 'post-collision period', όπως τον αποκαλούν οι συγγραφείς, πράγμα που βελτιώνει την ακρίβεια του μοντέλου. Από την άλλη πλευρά, το άρθρο [17] παρέχει ένα απλό μοντέλο για τον υπολογισμό της καθυστέρησης πακέτου στον κορεσμό ενώ οι συγγραφείς του άρθρου [18] υπολογίζουν αναλυτικά τη διέλευση σε συνθήκες πεπερασμένου φόρτου κίνησης μοντελοποιώντας τη χρονοθυρίδα ως μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων. Στο άρθρο [19] πραγματοποιείται μια λεπτομερής ανάλυση όπου υπολογίζεται η διέλευση και η καθυστέρηση πακέτου στον κορεσμό για διάφορες τιμές των παραμέτρων του πρωτοκόλλου. Τέλος, ο συγγραφέας του άρθρου [20] αναλύει διάφορα σενάρια

διαφοροποίησης της κίνησης που αφορούν τόσο το IEEE 802.11 όσο και το IEEE 802.11e.

Όσον αφορά τώρα την αξιολόγηση επίδοσης μέσω προσομοίωσης, τα άρθρα [21] και [22] μετρούν τη διέλευση, την καθυστέρηση πακέτου και τα δεδομένα που χάνονται, για διάφορες κατηγορίες προτεραιότητας. Η προσομοίωση πραγματοποιείται στην πλατφόρμα OPNET [23]. Η ίδια πλατφόρμα χρησιμοποιείται και στην εργασία του άρθρου [24], όπου η αξιολόγηση αφορά επιπλέον το μέγεθος πακέτου και την κατάσταση του μέσου. Απεναντίας, οι συγγραφείς του άρθρου [25] χρησιμοποιούν μια πλατφόρμα προσομοίωσης υλοποιημένη σε C++ για να υπολογίσουν τη διέλευση και την καθυστέρηση πακέτου ειδικά για υπηρεσίες φωνής και video. Επιπλέον, στο άρθρο [26] αξιολογείται η επίδοση τόσο της EDCA όσο και της HCA μετρώντας τη διέλευση και την καθυστέρηση πακέτου στα κανάλια αποστολής και λήψης δεδομένων, για υπηρεσίες πολυμέσων και εκρηκτικής (bursty) φύσεως. Τέλος, η εργασία του άρθρου [27] περιλαμβάνει σύγκριση της επίδοσης του IEEE 802.11e με αυτή του μηχανισμού EY-NPMA που προτείνει το ευρωπαϊκό πρότυπο HIPERLAN-I για WLANs.

Πέρα από την αξιολόγηση επίδοσης της EDCA, αξίζει να ειπωθεί ότι προτείνονται κατά καιρούς διάφοροι αλγόριθμοι βελτίωσης αυτής. Ενδεικτικοί αυτών είναι ο *Adaptive EDCF* [28], ο *EDCF-DM* [29] και ο *SBB* [30].

Από την προαναφερόμενη ερευνητική δραστηριότητα, θα εστιάσουμε την προσοχή μας στην αξιολόγηση επίδοσης μέσω μαθηματικής ανάλυσης, που είναι και ο πιο περιγραφικός αλλά και αξιόπιστος τρόπος για την αξιολόγηση ενός πρωτοκόλλου. Στην περίπτωση της EDCA, η πλειονότητα της έρευνας αφορά τον υπολογισμό της διέλευσης στον κορεσμό, ενώ πολύ λιγότερες εργασίες ασχολούνται με το θέμα της καθυστέρησης πακέτου. Προσεγγίζοντας το θέμα από άλλη οπτική γωνία, το μεγαλύτερο ποσοστό των ερευνητικών δημοσιεύσεων ασχολείται με τον αναλυτικό υπολογισμό διαφόρων μέτρων σε κατάσταση κορεσμού ενώ λιγότερη δραστηριότητα διεξάγεται στον υπολογισμό των μέτρων σε κατάσταση πεπερασμένου φόρτου κίνησης.

Έχοντας υπόψη τις παραπάνω παρατηρήσεις, το συγκεκριμένο κεφάλαιο της διατριβής αποσκοπεί να συμπληρώσει την ερευνητική δραστηριότητα πάνω στη μαθηματική ανάλυση της μεθόδου EDCA υπολογίζοντας αναλυτικά το μέτρο της καθυστέρησης πακέτου σε συνθήκες πεπερασμένου φόρτου κίνησης [31]. Συγκεκριμένα, λαμβάνοντας υπόψη τις νέες παραμέτρους του προτύπου IEEE 802.11e, ορίζονται τρία μέτρα της καθυστέρησης πακέτου και διεξάγεται πιθανοτική ανάλυση για τον υπολογισμό τους. Το κλειδί για το σχεδιασμό του μοντέλου είναι η προσέγγιση του προβλήματος από δυο διαφορετικές οπτικές γωνίες, βάσει των οποίων:

- Κάτω από συνθήκες πεπερασμένου φόρτου κίνησης, ο πομποδέκτης ενός κόμβου μπορεί να μοντελοποιηθεί με σύστημα αναμονής G/G/1.
- Ο backoff counter κάθε κόμβου μπορεί να μοντελοποιηθεί μέσω μιας διακριτής Μαρκοβιανής αλυσίδας [13].

Ο συνδυασμός των δυο προσεγγίσεων καταλήγει σε ένα σύστημα μη γραμμικών εξισώσεων, απ' όπου υπολογίζονται τα τρία οριζόμενα μέτρα καθυστέρησης πακέτου. Το προτεινόμενο αναλυτικό μοντέλο επαληθεύεται μέσω προσομοίωσης στην πλατφόρμα OPNET [23], όπου και αποδεικνύεται η εγκυρότητά του ώστε να χρησιμοποιηθεί με ασφάλεια για την αξιολόγηση επίδοσης της μεθόδου EDCA.

Η χρησιμότητα του παραπάνω αναλυτικού μοντέλου είναι διπλή. Πρώτον, μέσω αυτού, γίνεται αξιολόγηση επίδοσης της EDCA απ' όπου προκύπτουν συμπεράσματα για τον τρόπο λειτουργίας της, την ευελιξία, την αποτελεσματικότητα, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της. Δεύτερον, το συγκεκριμένο μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τους σχεδιαστές δικτύων για την πρόβλεψη της καθυστέρησης μετάδοσης των υπηρεσιών που θέλουν να εφαρμόσουν. Καθώς το μοντέλο δέχεται έναν μεγάλο αριθμό παραμέτρων εισόδου και είναι πλήρως παραμετροποιήσιμο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κάθε δίκτυο IEEE 802.11 όπου απαιτείται διαφοροποίηση υπηρεσιών.

Με βάση όλα τα παραπάνω, το υπόλοιπο του παρόντος κεφαλαίου σχηματίζεται ως ακολούθως. Στην Ενότητα 4.2 σχεδιάζεται το προτεινόμενο μοντέλο και εξάγονται αναλυτικά τα τρία μέτρα καθυστέρησης πακέτου. Στην Ενότητα 4.3 επαληθεύεται η εγκυρότητα του μοντέλου μέσω προσομοίωσης. Η Ενότητα

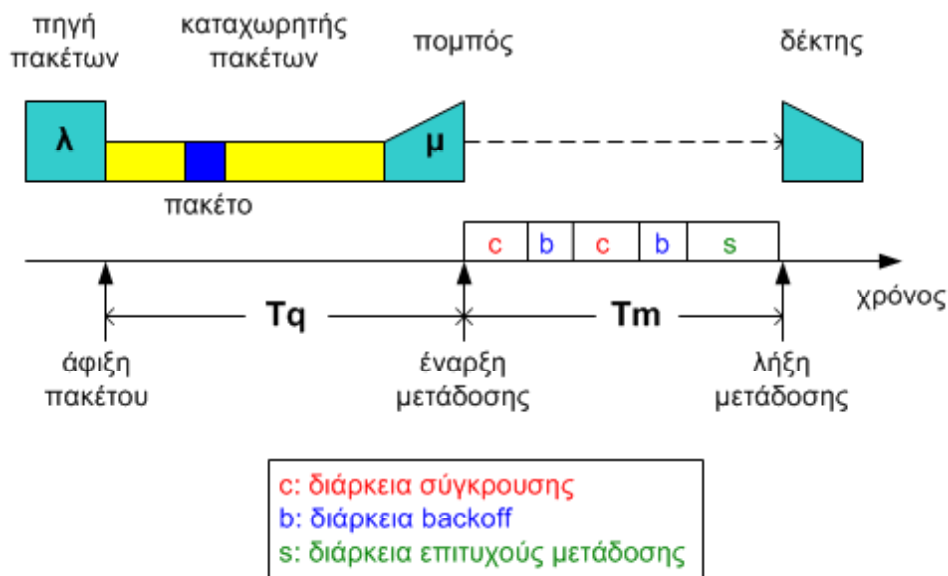
4.4 αφορά την αξιολόγηση επίδοσης της μεθόδου πρόσβασης EDCA μέσω του προτεινόμενου αναλυτικού μοντέλου. Τέλος στην Ενότητα 4.5 πραγματοποιείται μια ανασκόπηση της όλης εργασίας του κεφαλαίου και συζητούνται τα συμπεράσματα που προέκυψαν.

4.2 Αναλυτικό μοντέλο για την καθυστέρηση πακέτου

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται ο σχεδιασμός του αναλυτικού μοντέλου για τη μέθοδο πρόσβασης EDCA σε συνθήκες πεπερασμένου φόρτου κίνησης. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι με τον όρο *συνθήκες πεπερασμένου φόρτου κίνησης* εννοούμε την κατάσταση στην οποία ο ρυθμός άφιξης πακέτων σε κάθε κόμβο είναι μικρότερος από το ρυθμό μετάδοσης των πακέτων στο μέσο. Στην κατάσταση αυτή, ο καταχωρητής πακέτων κάθε κόμβου περιέχει πεπερασμένο αριθμό πακέτων ο οποίος δεν απειρίζεται ποτέ.

Δεδομένων των παραπάνω συνθηκών, ο πομποδέκτης κάθε σταθμού μπορεί να μοντελοποιηθεί με ένα σύστημα αναμονής G/G/1, στο οποίο ο ρυθμός άφιξης πακέτων είναι λ πακέτα/s και ο ρυθμός μετάδοσης των πακέτων στο μέσο είναι μ πακέτα/s. Ο παράγοντας χρησιμοποίησης ρ ισούται με $\rho = \lambda/\mu$. Καθώς υποθέτουμε συνθήκες πεπερασμένου φόρτου κίνησης, ισχύει $\lambda < \mu$, δηλαδή $\rho < 1$. Υπό αυτή τη συνθήκη το σύστημα αναμονής είναι ευσταθές [32], πράγμα που εγγυάται ότι το σύστημα μακροπρόθεσμα καταλήγει σε μια οριακή κατάσταση όπου τα στοχαστικά μεγέθη που το διέπουν είναι ανεξάρτητα από το χρόνο και μπορούν να περιγραφούν αναλυτικά.

Με τη βοήθεια της παραπάνω μοντελοποίησης μπορούμε πλέον να ορίσουμε τρία σημαντικά μέτρα που περιγράφουν την καθυστέρηση πακέτου σε έναν κόμβο. Τα μέτρα αυτά απεικονίζονται γραφικά στο Σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.1: Γραφική απεικόνιση των μέτρων καθυστέρησης πακέτου

Συγκεκριμένα, για ένα πακέτο, ορίζουμε ως *καθυστέρηση μετάδοσης* T_m το χρονικό διάστημα από τη στιγμή που ξεκινά η μετάδοση ενός πακέτου από τον πομπό μέχρι τη στιγμή που λαμβάνεται η επιβεβαίωση για την ορθή λήψη του πακέτου στο δέκτη. Η χρονική αυτή καθυστέρηση περιλαμβάνει το συνολικό χρόνο που διήρκεσαν οι τυχόν συγκρούσεις του πακέτου, τις καθυστερήσεις λόγω της διαδικασίας backoff, και το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την ορθή μετάδοση του πακέτου.

Εκτός της καθυστέρησης μετάδοσης, ορίζουμε την *καθυστέρηση αναμονής* T_q , που ισούται με το χρονικό διάστημα από την άφιξη του πακέτου στο επίπεδο MAC μέχρι τη στιγμή που το πακέτο φτάνει στον πομπό για να αρχίσει η μετάδοσή του στο μέσο.

Τέλος, η συνολική καθυστέρηση πακέτου T ισούται με το χρονικό διάστημα από την άφιξη του πακέτου

μέχρι τη στιγμή που λαμβάνεται η επιβεβαίωση για την ορθή λήψη του πακέτου στο δέκτη. Συνεπώς η συνολική καθυστέρηση πακέτου είναι το άθροισμα της καθυστέρησης μετάδοσης και της καθυστέρησης αναμονής.

Έχοντας υπόψη τα παραπάνω, ας εξετάσουμε ένα WLAN τύπου IEEE 802.11 με N κόμβους, όπου υποστηρίζονται $L + 1$ κατηγορίες πρόσβασης ($0 \leq L \leq 3$). Για το υπόλοιπο του παρόντος κεφαλαίου θα αναφερόμαστε στον όρο *κατηγορία πρόσβασης* με τη συντομογραφία *AC* (*access category*) που ακολουθείται στη διεθνή βιβλιογραφία. Για απλοποίηση της ανάλυσης θα υποθέσουμε ότι κάθε κόμβος του δικτύου στέλνει πακέτα που ανήκουν σε μια συγκεκριμένη AC μόνο. Φυσικά, αυτή η περίπτωση δεν ανταποκρίνεται επακριβώς στην πραγματικότητα, καθώς σε κάθε κόμβο μπορούν να εκτελούνται ταυτόχρονα εφαρμογές που ανήκουν σε διαφορετικές κατηγορίες πρόσβασης. Πάρα ταύτα, σύμφωνα με το μηχανισμό virtual collision handler που υποστηρίζει το πρότυπο IEEE 802.11e, κάθε AC διατηρεί το δικό της backoff counter σε έναν κόμβο. Η γενική περίπτωση λοιπόν όπου υπάρχουν N κόμβοι ενός WLAN ο καθένας από τους οποίους υποστηρίζει M ACs, απλοποιείται θεωρώντας ότι υπάρχουν NxM κόμβοι που υποστηρίζουν μια AC ο καθένας. Συνεπώς, η υπόθεση που προτείνεται για την απλοποίηση της ανάλυσης δε βλάπτει τη γενικότητα. Ορίζουμε τώρα ως N_i τον αριθμό των κόμβων που ανήκουν σε μια συγκεκριμένη AC- i , όπου $0 \leq i \leq L$. Με βάση την παραπάνω υπόθεση ισχύει προφανώς $\sum_{i=0}^L N_i = N$.

Συνεχίζοντας, υποθέτουμε ότι το ασύρματο μέσο βρίσκεται υπό ιδανικές συνθήκες (απουσία κρυφών, εκτεθειμένων κόμβων και θορύβου), και ο ρυθμός μετάδοσης που υποστηρίζεται είναι R Kb/s. Επιπλέον, οι κόμβοι που ανήκουν σε μια συγκεκριμένη AC- i παράγουν πακέτα με τον ίδιο ρυθμό, ίσο με λ_i πακέτα/s για τον καθένα. Συνεπώς, ο συνολικός φόρτος κίνησης στο δίκτυο είναι ίσος με $\sum_{i=0}^L N_i \lambda_i$. Όσον αφορά την στατιστική κατανομή της παραγόμενης κίνησης, αυτή εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους σχετιζόμενες κυρίως με το στρώμα εφαρμογής. Για την απλοποίηση της ανάλυσης (όπως για παράδειγμα στα άρθρα [13] και [33]) υποθέτουμε ότι ο ρυθμός άφιξης πακέτων για κάθε κόμβο ακολουθεί κατανομή Poisson με μέση τιμή λ_i πακέτα/s. Ωστόσο, το προτεινόμενο μοντέλο μπορεί εύκολα να επεκταθεί για την κάλυψη άλλων κατανομών παραγόμενης κίνησης, αρκεί η τυπική απόκλιση αυτών να είναι γνωστή και να μπορεί να εκφραστεί σε κλειστό τύπο.

Όσον αφορά το μέγεθος του ωφέλιμου πακέτου, υποθέτουμε ότι ακολουθεί την εκθετική κατανομή με μέση τιμή P_i bits, η οποία εξαρτάται από την AC που ανήκει ο κάθε σταθμός. Τέλος, όσον αφορά τα χαρακτηριστικά του φυσικού στρώματος, ορίζουμε ως σ τη διάρκεια μιας χρονοθυρίδας (slot time) και ως $CWmin_i$, $CWmax_i$ τις τιμές του minimum contention window και του maximum contention window αντίστοιχα, για κάθε AC- i .

Στο υπόλοιπο της ενότητας εξάγονται αναλυτικά τα τρία μέτρα που ορίσαμε στην αρχή.

4.2.1 Καθυστέρηση Μετάδοσης

Το μέτρο της καθυστέρησης μετάδοσης εξάγεται μέσω δυο πιθανοτικών παραμέτρων, ονομαζόμενες πιθανότητα μετάδοσης και πιθανότητα σύγκρουσης αντίστοιχα. Η πιθανότητα μετάδοσης t_i ορίζεται ως η πιθανότητα κάποιος κόμβος που ανήκει στην i -οστή AC (εν συντομία: κόμβος AC- i) να μεταδώσει πακέτο σε μια τυχαία χρονοθυρίδα. Η πιθανότητα σύγκρουσης p_i ορίζεται ως η πιθανότητα η μετάδοση πακέτου από έναν κόμβο AC- i να καταλήξει σε σύγκρουση. Η προτεινόμενη ανάλυση χωρίζεται σε δυο σκέλη. Η ανάλυση σε κάθε σκέλος προσεγγίζει το πρόβλημα από διαφορετική οπτική γωνία. Εν τέλει, και στα δυο εξάγεται μια εξίσωση που συνδέει τις μεταβλητές Tm_i και p_i . Ο υπολογισμός της καθυστέρησης μετάδοσης Tm_i γίνεται με την επίλυση του συστήματος των δυο αυτών εξισώσεων.

Ερχόμενοι στο πρώτο σκέλος υποθέτουμε ότι η πιθανότητα p_i είναι ανεξάρτητη από τον αριθμό των επαναμεταδόσεων που πραγματοποιούνται. Η υπόθεση αυτή χρησιμοποιείται ευρέως για τη μοντελοποίηση πρωτοκόλλων τυχαίας πρόσβασης και επηρεάζει σε ελάχιστο βαθμό την ακρίβεια της ανάλυσης [13]. Αν τώρα p_i είναι η πιθανότητα η μετάδοση ενός κόμβου AC- i να καταλήξει σε σύγκρουση τότε $(1 - p_i)$ είναι η πιθανότητα η μετάδοση ενός κόμβου AC- i να είναι επιτυχής. Εφ' όσον η πιθανότητα p_i (άρα και η $1 - p_i$) είναι ανεξάρτητη των επαναμεταδόσεων, μπορούμε να μοντελοποιήσουμε τη διαδικασία μετάδοσης ενός πακέτου με μια διαδικασία δοκιμών Bernoulli [34]. Βάσει αυτού, ο αριθμός των επαναμεταδόσεων ενός πακέτου από έναν κόμβο AC- i ακολουθεί Γεωμετρική κατανομή με παράμετρο $ps_i = (1 - p_i)$. Από

τις ιδιότητες της κατανομής αυτής [34] μπορεί εύκολα να προκύψει ο μέσος αριθμός επαναμεταδόσεων ενός πακέτου, r_i :

$$r_i = \frac{1}{1 - p_i}. \quad (4.1)$$

Μέσω της παραμέτρου r_i θα υπολογιστεί στη συνέχεια ο μέσος αριθμός χρονοθυρίδων που κρατά η διαδικασία backoff για έναν κόμβο AC-i. Ας ορίσουμε τον αριθμό αυτό ως μέσο backoff window. Για τον υπολογισμό του υποθέτουμε ότι το διάστημα μεταξύ δυο αφίξεων πακέτων είναι μεγαλύτερο από το διάστημα DIFS, οπότε οι κόμβοι δεν εκτελούν τη διαδικασία backoff για την πρώτη προσπάθεια μετάδοσης. Η παραδοχή είναι απόλυτα λογική στις συνθήκες πεπερασμένου φόρτου κίνησης που μελετάμε. Βάσει της προαναφερθείσας υπόθεσης, κατά την j -οστή προσπάθεια επαναμετάδοσης ενός πακέτου, το minimum contention window έχει την τιμή $2^{j-1}CWmin_i - 1$. Ο εκθέτης έχει την τιμή $j - 1$ αντί για j λόγω της υπόθεσης που έγινε. Επιπλέον, από τον όρο $2^{j-1}CWmin_i$ που είναι δύναμη του δυο, αφαιρούμε μια μονάδα ώστε η τιμή του contention window να συμβαδίζει με τον τρόπο ορισμού του προτύπου IEEE 802.11. Σύμφωνα τώρα με το πρότυπο, ο αριθμός των χρονοθυρίδων για τη διαδικασία backoff επιλέγεται τυχαία μεταξύ 1 και $2^{j-1}CWmin_i - 1$. Η τυχαία επιλογή σημαίνει ότι ο αριθμός των χρονοθυρίδων ακολουθεί την ομοιόμορφη κατανομή. Εξ' αυτού συνεπάγεται ότι ο μέσος αριθμός χρονοθυρίδων $\bar{W}_i^j$ που επιλέγονται για μια διαδικασία backoff κατά τη j -οστή επαναμετάδοση είναι ίσος με

$$\bar{W}_i^j = \frac{1}{2}(2^{j-1}CWmin_i - 1 + 1) = \frac{1}{2}2^{j-1}CWmin_i = 2^{j-2}CWmin_i. \quad (4.2)$$

Στο σημείο αυτό κάνουμε μια παρένθεση και τονίζουμε ότι ο τρόπος διαχείρισης μιας σύγκρουσης πακέτων μέσω των μεθόδων DCF και EDCA διαφέρει ριζικά. Κατά τη DCF, όταν γίνει μια σύγκρουση, όλοι οι κόμβοι εκτελούν τη διαδικασία backoff. Αντίθετα, κατά την EDCA, όπως ειπώθηκε και στο Κεφάλαιο 2, η σύγκρουση διαχειρίζεται ως εξής: Από τους κόμβους που έχουν εμπλακεί στη σύγκρουση, αυτός με τη μεγαλύτερη προτεραιότητα μεταδίδει αμέσως το πακέτο χωρίς να μπει στη διαδικασία backoff. Οι υπόλοιποι ακολουθούν τη διαδικασία backoff όπως προβλέπεται από το πρότυπο. Αν δεν υπάρχει μόνο ένας κόμβος με τη μεγαλύτερη προτεραιότητα τότε όλοι οι κόμβοι ακολουθούν τη διαδικασία backoff. Συνεπώς, κατά την EDCA, υπεισέρχεται ακόμη ένας παράγοντας στην ανάλυση, ο οποίος είναι η πιθανότητα ένας κόμβος να ακολουθήσει τη διαδικασία backoff μετά από σύγκρουση. Προφανώς, κατά τη μέθοδο DCF η πιθανότητα αυτή δεν υφίσταται, καθώς όλοι οι κόμβοι ακολουθούν τη διαδικασία backoff μετά από σύγκρουση. Ας ορίσουμε ως q_i την πιθανότητα ένας κόμβος AC-i να μπει στη διαδικασία backoff μετά από σύγκρουση. Η q_i είναι ίση με την πιθανότητα να εμπλέκονται στη σύγκρουση κόμβοι προτεραιότητας τουλάχιστο AC-i ή μεγαλύτερης. Δεδομένου ότι ο αριθμός των κόμβων AC-i στο δίκτυο είναι N_i , η πιθανότητα να εμπλέκονται σε μια σύγκρουση κόμβοι AC-i είναι N_i/N . Επομένως η πιθανότητα q_i ισούται με

$$q_i = \sum_{j=0}^i \frac{N_j}{N} = \frac{\sum_{j=0}^i N_j}{N} = \frac{\sum_{j=0}^i N_j}{\sum_{j=0}^L N_j}. \quad (4.3)$$

Επιστρέφουμε τώρα στον υπολογισμό του μέσου contention window και ορίζουμε ως m_i τον αριθμό επαναμεταδόσεων με τις οποίες το contention window φτάνει τη μέγιστη τιμή του. Ο αριθμός αυτός είναι ίσος με $m_i = \log_2(CWmax_i/CWmin_i)$. Ξαναθυμίζουμε επιπλέον ότι ο αριθμός των επαναμεταδόσεων ενός πακέτου ακολουθεί τη Γεωμετρική κατανομή με παράμετρο $(1-p_i)$. Αν όλοι οι κόμβοι ακολουθούσαν τη διαδικασία backoff μετά από μια σύγκρουση (η πιθανότητα q_i δεν υφίσταται) τότε το μέσο backoff window $\bar{W}_i$ για έναν κόμβο AC-i θα ήταν ίσο με [35]:

$$\begin{aligned} \bar{W}_i &= (1 - p_i)\bar{W}_i^1 + p_i(1 - p_i)\bar{W}_i^2 + \dots + p_i^m(1 - p_i)\bar{W}_i^{m+1} + p_i^{m+1}\bar{W}_i^{m+1} = \\ &= (1 - p_i)2^{-1}CWmin_i + p_i(1 - p_i)2^0CWmin_i + \dots \\ &\quad + p_i^m(1 - p_i)2^{m-1}CWmin_i + p_i^{m+1}2^{m-1}CWmin_i = \\ &= \frac{CWmin_i[1 - p_i - p_i(2p_i)^{m_i}]}{2(1 - 2p_i)}. \end{aligned} \quad (4.4)$$

Στην περίπτωσή μας όμως το μέσο backoff window για κάθε κόμβο εξαρτάται και από την πιθανότητα ο κόμβος να ακολουθήσει τη διαδικασία backoff. Συνεπώς, η προηγούμενη εξίσωση συμπληρώνεται ως

εξής:

$$\begin{aligned}\bar{W}_i &= q_i \frac{CWmin_i[1 - p_i - p_i(2p_i)^{m_i}]}{2(1 - 2p_i)} = \frac{\sum_{j=0}^i N_j}{\sum_{j=0}^L N_j} \frac{CWmin_i[1 - p_i - p_i(2p_i)^{m_i}]}{2(1 - 2p_i)} = \\ &= \frac{CWmin_i[1 - p_i - p_i(2p_i)^{m_i}]}{2(1 - 2p_i)} \frac{\sum_{j=0}^i N_j}{\sum_{j=0}^L N_j}.\end{aligned}\quad (4.5)$$

Έχοντας υπολογίσει τις μεταβλητές r_i και $\bar{W}_i$ μέσω της πιθανότητας p_i , περνάμε τώρα να υπολογίσουμε την πιθανότητα μετάδοσης t_i . Για να μεταδώσει κάποιος κόμβος ένα πακέτο πρέπει:

- Να υπάρχει πακέτο προς μετάδοση στον ουρά του πομποδέκτη.
- Ο backoff counter του κόμβου να μηδενιστεί, δεδομένου ότι έχει κάποιο πακέτο που περιμένει στην ουρά.

Συνεπώς ισχύει $t_i = P\{have_packet \cap (backoff = 0/have_packet)\}$. Όσον αφορά την πιθανότητα να υπάρχει πακέτο προς μετάδοση αυτή είναι ίση με το ποσοστό του χρόνου όπου υπάρχουν πακέτα στην ουρά του πομποδέκτη. Θεωρώντας τον πομποδέκτη ως σύστημα αναμονής G/G/1, το ποσοστό αυτό είναι ίσο με τον παράγοντα χρησιμοποίησης ρ [32], ο οποίος είναι διαφορετικός για κάθε AC (ρ_i). Από την άλλη πλευρά, η πιθανότητα να μηδενιστεί ο backoff counter, δεδομένου ότι υπάρχει πακέτο στην ουρά είναι ίση με $1/\bar{W}_i$ [35]. Πράγματι, η δεδομένη συνθήκη ότι υπάρχει πακέτο στην ουρά μας επιτρέπει να θεωρήσουμε ότι ο backoff counter επαναλαμβάνει περιοδικά την ίδια διαδικασία, κατά μέσο όρο στην πάροδο του χρόνου: Παίρνει την αρχική του τιμή ($\bar{W}_i$), μειώνεται για $\bar{W}_i$ χρονοθυρίδες, μηδενίζεται, ξαναπαίρνει την αρχική του τιμή, μειώνεται, μηδενίζεται κ.ο.κ. Συνεπώς, ο backoff counter μηδενίζεται κάθε 1 ανά $\bar{W}_i$ χρονοθυρίδες, πράγμα που συνεπάγεται ότι η πιθανότητα μηδενισμού του (δεδομένου ότι υπάρχει πακέτο στην ουρά) είναι ίση με $1/\bar{W}_i$. Συνεπώς, η πιθανότητα t_i είναι τώρα ίση με

$$t_i = \frac{\rho_i}{\bar{W}_i}. \quad (4.6)$$

Ας ορίσουμε ως Tm_i την καθυστέρηση μετάδοσης ενός πακέτου που στέλνεται από έναν κόμβο AC-i. Η καθυστέρηση αυτή είναι ο μέσος χρόνος που κάνει ο εξυπηρετητής για να εξυπηρετήσει έναν πελάτη στο σύστημα αναμονής G/G/1, και μάλιστα ισχύει $\rho_i = \lambda_i Tm_i$. Επομένως,

$$t_i = \rho_i \frac{1}{\bar{W}_i} = \frac{\lambda_i Tm_i}{\bar{W}_i}. \quad (4.7)$$

Για την ολοκλήρωση της ανάλυσης του πρώτου σκέλους χρειαζόμαστε μια εξίσωση που να συνδέει τις μεταβλητές t_i και p_i . Η εξίσωση αυτή έχει υπολογιστεί μέσω μιας περίπλοκης Μαρκοβιανής αλυσίδας στο άρθρο [13] για την περίπτωση της μεθόδου DCF και επεκτάθηκε στο άρθρο [11] για την περίπτωση της μεθόδου EDCA. Η αναφερόμενη Μαρκοβιανή αλυσίδα (για την περίπτωση της DCF) φαίνεται στο Σχήμα 4.2.

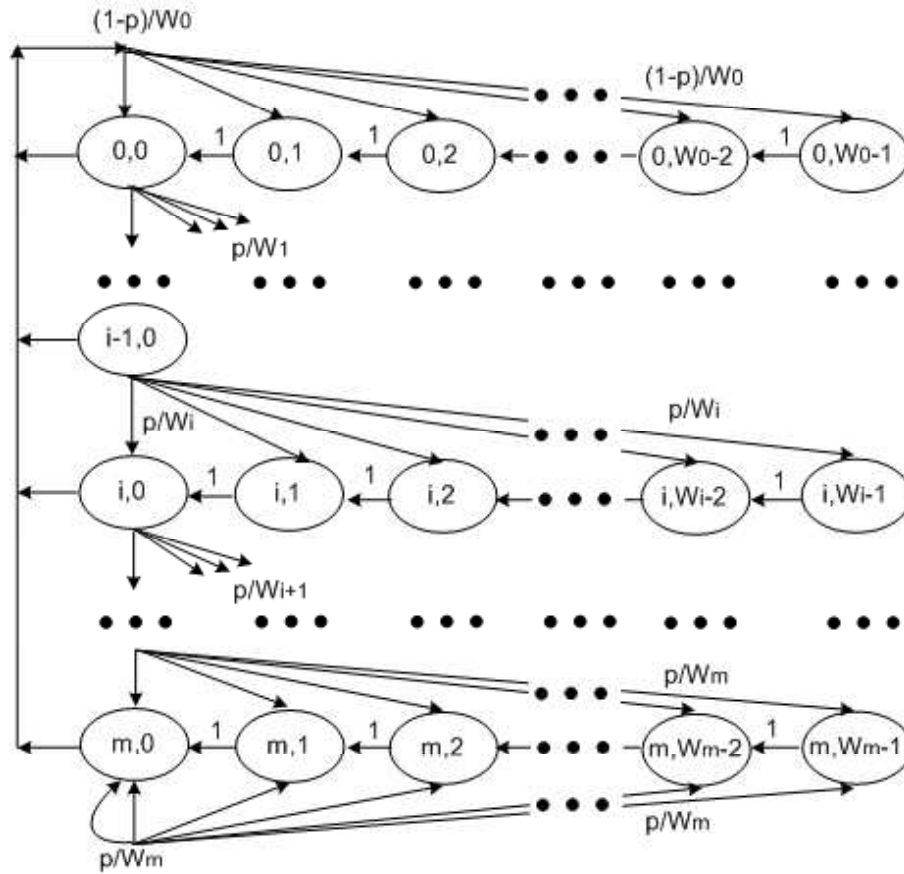
Η ζητούμενη εξίσωση είναι η εξής:

$$p_i = 1 - (1 - t_i)^{N_i-1} \prod_{j=0, j \neq i}^L (1 - t_j)^{N_j}. \quad (4.8)$$

απ' όπου συνεπάγεται μέσω της Εξίσωσης (4.7) ότι

$$p_i = 1 - \left(1 - \frac{\lambda_i Tm_i}{\bar{W}_i}\right)^{N_i-1} \prod_{j=0, j \neq i}^L \left(1 - \frac{\lambda_j Tm_j}{\bar{W}_j}\right)^{N_j}, \quad (4.9)$$

Έχοντας εξάγει την πρώτη εξίσωση που συνδέει τις μεταβλητές Tm και p για κάθε AC, προχωράμε στο δεύτερο σκέλος για τη διεξαγωγή της δεύτερης εξίσωσης. Για να γίνει αυτό πρέπει πρώτα να οριστούν



Σχήμα 4.2: Μαρκοβιανή αλυσίδα μοντελοποίησης του backoff counter

οι χρόνοι Ts_i και Tc_i που είναι οι διάρκειες μιας επιτυχούς μετάδοσης και μιας σύγκρουσης πακέτου αντίστοιχα, για τους κόμβους κάθε AC. Τονίζεται ότι οι χρόνοι αυτοί δεν έχουν καμιά σχέση με την καθυστέρηση μετάδοσης που μελετάμε. Ο χρόνος επιτυχούς μετάδοσης είναι ο χρόνος που απαιτείται για να μεταδοθεί στο μέσο ένα πακέτο και η σχετική επιβεβαίωσή του. Ο χρόνος σύγκρουσης είναι ο χρόνος που απαιτείται για να αντιληφθούν οι κόμβοι ότι έχει γίνει σύγκρουση πακέτων. Οι παραπάνω χρόνοι θα υπολογιστούν λεπτομερώς στο τέλος της ανάλυσης.

Συνεχίζοντας, με αναφορά στο Σχήμα 4.1, η καθυστέρηση μετάδοσης περιλαμβάνει:

- Το χρόνο που ο backoff counter μειώνεται, ο οποίος για κάθε κόμβο AC- i είναι κατά μέσο όρο ίσος με $\bar{W}_i$.
- Το χρονικό διάστημα που διαρκούν όλες οι συγκρούσεις. Αν r_i είναι ο μέσος αριθμός των επαναμεταδόσεων ενός πακέτου τότε έχουμε μια επιτυχή μετάδοση (την τελευταία) και $r_i - 1$ ανεπιτυχείς μεταδόσεις (συγκρούσεις). Επομένως ο συνολικός χρόνος που κρατούν οι συγκρούσεις είναι $(r_i - 1)Tc_i$.
- Το χρόνο Ts_i που διαρκεί η επιτυχής μετάδοση.
- Το χρόνο $\bar{F}_i$ που ο backoff counter παγώνει λόγω άλλων μεταδόσεων στο μέσο.

Ο τελευταίος παράγοντας καθυστέρησης από τους παραπάνω υπολογίζεται ως εξής. Ας υποθέσουμε ότι κάποιος κόμβος προτεραιότητας AC- i βρίσκεται σε διαδικασία backoff, η οποία διαρκεί κατά μέσο όρο $\bar{W}_i$ χρονοθυρίδες. Η πιθανότητα κάποιος άλλος κόμβος κατηγορίας AC- j (μπορεί να ισχύει και $i=j$) να μεταδώσει πακέτο σε μια χρονοθυρίδα από αυτές είναι απλά $t_j = \rho_j / \bar{W}_j$. Άρα σε $\bar{W}_i$ χρονοθυρίδες ο κόμβος AC- j θα πραγματοποιήσει κατά μέσο όρο $\bar{W}_i(\rho_j / \bar{W}_j)$ μεταδόσεις. Κάποιες από αυτές θα είναι επιτυχείς με πιθανότητα $1 - p_j$, ενώ οι υπόλοιπες θα καταλήξουν σε σύγκρουση με πιθανότητα p_j . Προφανώς, κατά τη διαδικασία backoff ενός κόμβου AC- i , κάθε κόμβος AC- j προσθέτει μια επιπλέον

καθυστερήση ίση με $f_i^j = \frac{\bar{W}_i}{\bar{W}_j} \rho_j [(1 - p_j)T_{s_j} + p_j T_{c_j}]$. Όλοι οι κόμβοι του δικτύου προσθέτουν στη διαδικασία backoff του κόμβου που μελετάμε μια συνολική καθυστέρηση ίση με $\bar{F}_i = (N_i - 1)f_i^i + \sum_{j=0, j \neq i}^L N_j f_i^j$.

Παρ' όλ' αυτά, η παραπάνω καθυστέρηση είναι εσφαλμένη, καθώς ο πραγματικός αριθμός συγκρούσεων που συμβαίνουν είναι μικρότερος. Πράγματι, στην παραπάνω ανάλυση υπολογίστηκαν οι συνολικές συγκρούσεις ως άθροισμα των συγκρούσεων του κάθε σταθμού. Όμως, καθώς σε μια σύγκρουση εμπλέκονται πολλοί σταθμοί, πολλές από τις συγκρούσεις που υπολογίστηκαν πρέπει να συνοψιστούν στην πραγματικότητα σε μια. Αυτό σημαίνει ότι ο πραγματικός αριθμός των συγκρούσεων που συμβαίνουν είναι προσεγγιστικά C/K , όπου C είναι ο αριθμός των συγκρούσεων που υπολογίστηκαν προηγουμένως και K είναι ο μέσος αριθμός κόμβων που εμπλέκονται σε μια σύγκρουση. Για μια προσεγγιστική εκτίμηση του K υποθέτουμε ότι η πιθανότητα μετάδοσης είναι ίδια για όλους τους κόμβους του δικτύου, ανεξαρτήτου κατηγορίας πρόσβασης, και ίση με το μέσο όρο των πιθανοτήτων t_i . Αυτή είναι $t = \bar{t} = \frac{1}{L+1} \sum_{i=0}^L t_i$. Η πιθανότητα σε μια σύγκρουση να συμμετέχουν k συγκεκριμένοι κόμβοι και μόνο αυτοί, είναι ίση με την πιθανότητα οι κόμβοι αυτοί να μεταδώσουν ταυτόχρονα (t^k) και οι υπόλοιποι $N - k$ κόμβοι να μη μεταδώσουν (δηλαδή $(1 - t)^{N-k}$), δεδομένου ότι τουλάχιστο k κόμβοι μετέδωσαν. Η τελευταία πιθανότητα είναι ίση με 1 μείον την πιθανότητα $\{N - (k - 1)$ κόμβοι να μη μεταδώσουν}. Προφανώς, η πιθανότητα $p_c(k)$, ακριβώς k κόμβοι να εμπλέκονται σε μια σύγκρουση είναι ίση με το άθροισμα των πιθανοτήτων "σε μια σύγκρουση να συμμετέχουν k συγκεκριμένοι κόμβοι και μόνο αυτοί", για όλους τους πιθανούς συνδυασμούς των k κόμβων. Συνεπώς

$$p_c(k) = \binom{N}{k} \frac{t^k (1 - t)^{N-k}}{1 - (1 - t)^{N-(k-1)}}. \quad (4.10)$$

Με βάση τα παραπάνω, ο μέσος αριθμός κόμβων που εμπλέκονται σε μια σύγκρουση είναι ίσος με

$$K = \sum_{k=2}^N k p_c(k) = \sum_{k=2}^N k \frac{\binom{N}{k} t^k (1 - t)^{N-k}}{1 - (1 - t)^{N-(k-1)}}, \quad (4.11)$$

και η συνολική καθυστέρηση που προκαλείται από το πάγωμα του backoff counter ενός κόμβου AC-i είναι ίση με

$$\bar{F}_i = (N_i - 1) \rho_i [(1 - p_i)T_{s_i} + \frac{p_i}{K} T_{c_i}] + \sum_{j=0, j \neq i}^L N_j \frac{\bar{W}_i}{\bar{W}_j} \rho_j [(1 - p_j)T_{s_j} + \frac{p_j}{K} T_{c_j}] \quad (4.12)$$

Επιστρέφοντας στην ανάλυση της καθυστέρησης μετάδοσης Tm_i , έχοντας υπόψη τις επιμέρους χρονικές καθυστερήσεις από τις οποίες αυτή απαρτίζεται και δεδομένου ότι $\rho_i = \lambda_i Tm_i$, καταλήγουμε στη σχέση

$$\begin{aligned} Tm_i &= \bar{W}_i \sigma + T_{s_i} + (r_i - 1)T_{c_i} + (N_i - 1) \lambda_i Tm_i [(1 - p_i)T_{s_i} + \frac{p_i}{K} T_{c_i}] + \\ &+ \sum_{j=0, j \neq i}^L N_j \frac{\bar{W}_i}{\bar{W}_j} \lambda_j Tm_j [(1 - p_j)T_{s_j} + \frac{p_j}{K} T_{c_j}], \end{aligned} \quad (4.13)$$

απ' όπου προκύπτει ότι

$$Tm_i = \frac{\bar{W}_i \sigma [(1 - p_i)T_{s_i} + \frac{p_i}{K} T_{c_i}] + \sum_{j=0, j \neq i}^L N_j \frac{\bar{W}_i}{\bar{W}_j} \lambda_j Tm_j [(1 - p_j)T_{s_j} + \frac{p_j}{K} T_{c_j}]}{1 - (N_i - 1) \lambda_i Tm_i [(1 - p_i)T_{s_i} + \frac{p_i}{K} T_{c_i}]}. \quad (4.14)$$

Οι Εξισώσεις (4.9) και (4.14) αποτελούν ένα σύστημα $2 \times (L+1)$ μη γραμμικών εξισώσεων που μπορούν να λυθούν με διάφορες αριθμητικές μεθόδους. Στη λύση του βέβαια εμπλέκονται και ενδιάμεσες εξισώσεις για τον υπολογισμό επιπλέον μεταβλητών όπως των K και $\bar{W}_i$. Η τελική λύση είναι ένα διάνυσμα με την τιμή της καθυστέρησης μετάδοσης Tm_i ($0 \leq i \leq L$) που αφορά έναν κόμβο AC-i.

Το μόνο που μένει για να ολοκληρωθεί η ανάλυση είναι να υπολογίσουμε τους χρόνους επιτυχούς μετάδοσης T_{s_i} και σύγκρουσης T_{c_i} . Ο υπολογισμός θα πραγματοποιηθεί για την περίπτωση του βασικού

μηχανισμού πρόσβασης (Ts_i^{bas} , Tc^{bas}), για την περίπτωση του μηχανισμού RTS/CTS (Ts_i^{RTS} , Tc^{RTS}) και για την υβριδική περίπτωση όπου χρησιμοποιούνται και οι δυο μηχανισμοί (Ts_i^{hyb} , Tc^{hyb}). Ας σημειώσουμε ότι οι χρόνοι που διαρκεί η σύγκρουση σε κάθε περίπτωση λαμβάνονται ανεξάρτητοι από την κατηγορία πρόσβασης του πακέτου. Αυτό γιατί σε μια σύγκρουση εμπλέκονται και άλλα πακέτα διαφορετικών (πιθανώς) κατηγοριών, πράγμα που καθιστά την ανάλυση υπερβολικά περίπλοκη. Συνεπώς οι χρόνοι που διαρκεί μια σύγκρουση σε κάθε περίπτωση θα υπολογιστούν σε επίπεδο μέσων τιμών.

Ας ορίσουμε τώρα τα εξής: $AIFSD_i$ και $SIFS$ ως τους χρόνους AIFS και SIFS για κάθε AC- i αντίστοιχα. PHY ως το χρόνο που απαιτείται για να μεταδοθεί η επικεφαλίδα του φυσικού μέσου (PLCP) και το προοίμιο. MAC , ACK , RTS , CTS ως τα μήκη της επικεφαλίδας MAC και των πλαισίων ACK , RTS και CTS αντίστοιχα. RTS_{thr} ως την τιμή του κατωφλίου RTS σε bits. Με αναφορά στο Σχήμα 2.6 του Κεφαλαίου 2 και αγνοώντας την καθυστέρηση διάδοσης στο μέσο (για ρυθμούς μετάδοσης μεγαλύτερους από 2MB/s είναι μικρότερη από 1μsec), οι χρόνοι Ts_i και Tc_i για τις δυο πρώτες περιπτώσεις δίνονται ως εξής:

$$\begin{cases} Ts_i^{bas} = (PHY + MAC/R + P_i/R) + SIFS + (PHY + ACK/R) + AIFSD_i, \\ Tc^{bas} = (PHY + MAC/R + \bar{P}/R) + AIFSD_0, \\ Ts_i^{RTS} = (PHY + RTS/R) + SIFS + (PHY + CTS/R) + SIFS + Ts_i^{bas}, \\ Tc^{RTS} = (PHY + RTS/R) + AIFSD_0. \end{cases} \quad (4.15)$$

Για τον υπολογισμό του χρόνου Tc^{bas} στην παραπάνω εξίσωση, ας έχουμε υπόψη πως, όταν τουλάχιστον ένας κόμβος μεταδίδει μέσω της βασικής μεθόδου πρόσβασης, η πραγματική διάρκεια μιας σύγκρουσης εξαρτάται από το μήκος P του μεγαλύτερου πακέτου από τα εμπλεκόμενα στη σύγκρουση. Ως εκ τούτου, υποθέτουμε ότι το μήκος αυτό είναι ίδιο για κάθε σύγκρουση και ίσο με το μέσο όρο όλων των τιμών P_i , δηλαδή $\bar{P} = \frac{1}{L+1} \sum_{i=0}^L P_i$. Προς την ίδια κατεύθυνση, λαμβάνοντας τη χειρότερη περίπτωση, θεωρούμε ότι η διάρκεια $AIFSD$ είναι η μέγιστη δυνατή και ίση με τη διάρκεια που ορίζεται για την κατηγορία με την ελάχιστη προτεραιότητα. Οι ίδια παραδοχές ισχύει και για το χρόνο Tc^{RTS} μιας σύγκρουσης όταν όλα τα πακέτα μεταδίδονται μέσω RTS/CTS.

Για την υβριδική περίπτωση πρέπει να συμπεριλάβουμε στην ανάλυση και την πιθανότητα το πακέτο να μεταδοθεί μέσω του βασικού μηχανισμού πρόσβασης, που είναι η πιθανότητα το μήκος του να είναι μικρότερο από την τιμή του κατωφλίου RTS (RTS_{thr}). Δεδομένου ότι το μήκος πακέτου στην περίπτωσή μας ακολουθεί την Εκθετική κατανομή με μέση τιμή P_i , διαφορετική για τους κόμβους κάθε AC- i και έχοντας υπόψη της ιδιότητες της Εκθετικής κατανομής, έχουμε ότι η πιθανότητα το πακέτο να μεταδοθεί μέσω του βασικού μηχανισμού πρόσβασης ή, αλλιώς, η πιθανότητα το μήκος ενός πακέτου να είναι μικρότερο από RTS_{thr} είναι

$$p_i^{bas} = 1 - e^{-RTS_{thr}/P_i}. \quad (4.16)$$

Θεωρώντας το χρόνο Ts_i^{hyb} ως μια στοχαστική διαδικασία που παίρνει δυο διακριτές τιμές Ts_i^{bas} και Ts_i^{RTS} με πιθανότητα p_i^{bas} και $(1 - p_i^{bas})$ αντίστοιχα, η μέση τιμή του είναι

$$Ts_i^{hyb} = p_i^{bas} Ts_i^{bas} + (1 - p_i^{bas}) Ts_i^{RTS}. \quad (4.17)$$

Ο υπολογισμός του Tc^{hyb} είναι πιο πολύπλοκος, καθώς πρέπει να ξέρουμε την πιθανότητα p_i^{bas} για κάθε κόμβο που εμπλέκεται σε μια σύγκρουση. Χωρίς αλλοίωση της ακρίβειας του μοντέλου υποθέτουμε ότι αυτή είναι ίδια για όλους τους κόμβους και ίση με το μέσο όρο $\bar{p}_{bas}$ όλων των πιθανοτήτων p_i^{bas} , δηλαδή

$$\bar{p}_{bas} = \frac{1}{L+1} \sum_{i=0}^L p_i^{bas} = 1 - \frac{1}{L+1} \sum_{i=0}^L e^{-RTS_{thr}/P_i}. \quad (4.18)$$

Ας υποθέσουμε ότι K πακέτα εμπλέκονται σε μια σύγκρουση, όπου το K υπολογίστηκε στην Εξίσωση 4.11. Η πιθανότητα και τα K πακέτα να μεταδοθούν μέσω του μηχανισμού RTS/CTS είναι απλά $(1 - \bar{p}_{bas})^K$. Στην περίπτωση αυτή η σύγκρουση θα διαρκέσει Tc^{RTS} . Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις $(1 - (1 - \bar{p}_{bas})^K)$ η σύγκρουση θα διαρκέσει Tc^{bas} . Συνεπώς ο μέσος χρόνος Tc^{hyb} ισούται με

$$Tc^{hyb} = [1 - (1 - \bar{p}_{bas})^K] Tc^{bas} + (1 - \bar{p}_{bas})^K Tc^{RTS} \quad (4.19)$$

Αντικαθιστώντας τις τιμές των Εξισώσεων 4.15, 4.17 και 4.19 στην Εξίσωση 4.14 έχουμε έναν ολοκληρωμένο αναλυτικό υπολογισμό της καθυστέρησης μετάδοσης Tm_i για τα πακέτα κάθε κόμβου AC-i.

Μέσω της καθυστέρησης μετάδοσης θα υπολογίσουμε στη συνέχεια την καθυστέρηση αναμονής.

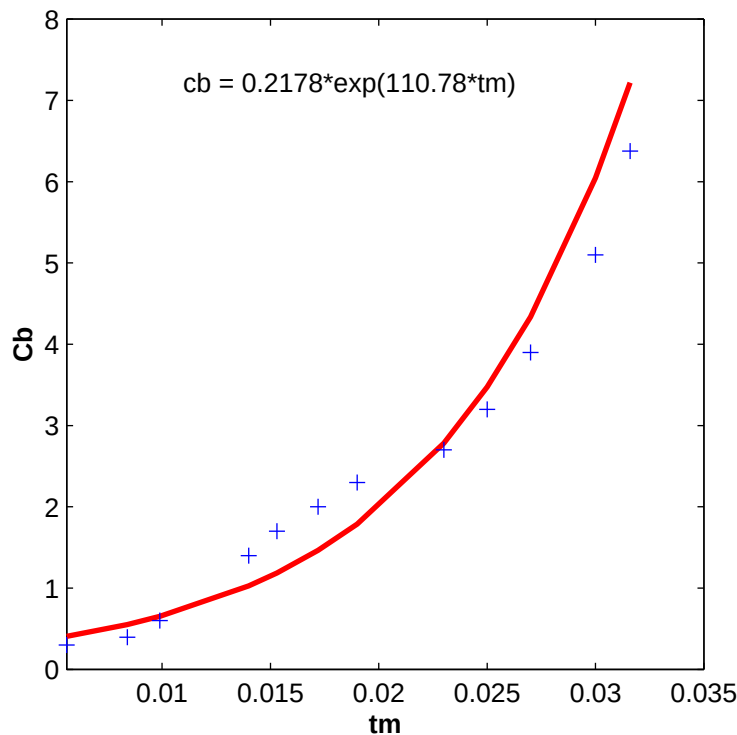
4.2.2 Καθυστέρηση Αναμονής

Για τον υπολογισμό της καθυστέρησης αναμονής θα βασιστούμε στο γεγονός ότι ο πομποδέκτης κάθε σταθμού μπορεί να μοντελοποιηθεί με σύστημα αναμονής G/G/1. Η καθυστέρηση αναμονής ενός πακέτου είναι στην ουσία ο χρόνος που περιμένει ο πελάτης στην ουρά του συστήματος αναμονής. Για τον υπολογισμό του χρόνου αυτού μπορεί να χρησιμοποιηθεί θεωρία ουρών αναμονής για σύστημα G/G/1. Στη δική μας περίπτωση, όπου υποθέσαμε ότι ο ρυθμός άφιξης πακέτων ακολουθεί κατανομή Poisson, η ανάλυση απλοποιείται σε μεγάλο βαθμό, καθώς το σύστημα αναμονής είναι M/G/1. Πάρα ταύτα, όπως ειπώθηκε και στην αρχή του κεφαλαίου, η ανάλυση μπορεί να επεκταθεί και για άλλες κατανομές, αρκεί να είναι γνωστή η μέση τιμή και η διασπορά τους.

Για την εξαγωγή της καθυστέρησης αναμονής στη δική μας περίπτωση, αρχικά θα υπολογίσουμε το μέσο αριθμό πακέτων που περιμένουν στον καταχωρητή πακέτων του πομποδέκτη. Αυτός δίνεται από τον τύπο *Μέσης Τιμής Pollaczek-Khinchin* [36], που υπολογίζει το μέσο αριθμό πελατών στην ουρά ενός συστήματος M/G/1:

$$Q_i = \rho_i^2 \frac{1 + Cb_i^2}{2(1 - \rho_i)}. \quad (4.20)$$

Cb_i είναι ο συντελεστής διασποράς της καθυστέρησης μετάδοσης και ισούται με σ_{Tm_i}/Tm_i , όπου σ_{Tm_i} είναι η τυπική απόκλιση της καθυστέρησης μετάδοσης. Για τον ακριβή υπολογισμό του συντελεστή διασποράς πρέπει να γνωρίζουμε την κατανομή που ακολουθεί η καθυστέρηση μετάδοσης. Λόγω της μαθηματικής πολυπλοκότητας του προβλήματος υπολογίσαμε τη διασπορά της καθυστέρησης μετάδοσης μέσω αρκετών σεναρίων προσομοίωσης στο OPNET. Καταλήξαμε δε στο συμπέρασμα ότι η καθυστέρηση μετάδοσης συνδέεται με το συντελεστή διασποράς της μέσω μιας εκθετικής συνάρτησης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3. Χρησιμοποιώντας στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης μέσω της



Σχήμα 4.3: Συσχέτιση μεταξύ Cb και Tm

μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων καταλήγουμε στην εξίσωση:

$$Cb_i = 0.2178e^{110.78Tm_i}. \quad (4.21)$$

Με βάση την παραπάνω προσέγγιση, ο μέσος αριθμός πακέτων στον καταχωρητή ενός κόμβου AC- i είναι

$$Q_i = \rho_i^2 \frac{1 + 0.047e^{221.56Tm_i}}{2(1 - \rho_i)}. \quad (4.22)$$

Η καθυστέρηση αναμονής μπορεί τώρα να υπολογιστεί από το *θεώρημα του Little* [32], $Q = \lambda T_q$, που συνδέει το μέσο χρόνο αναμονής πελατών (T_q) με το ρυθμό άφιξης των πελατών (λ) και τον αριθμό των πελατών (Q) στην ουρά ενός ευσταθούς συστήματος αναμονής.

$$T_{q_i} = \frac{Q_i}{\lambda_i} = \lambda_i T m_i^2 \frac{1 + 0.047e^{221.56Tm_i}}{2(1 - \lambda_i T m_i)}. \quad (4.23)$$

4.2.3 Συνολική καθυστέρηση πακέτου

Τέλος, η συνολική καθυστέρηση T_i των πακέτων ενός κόμβου AC- i είναι απλά το άθροισμα της καθυστέρησης μετάδοσης και της καθυστέρησης αναμονής. Συνεπώς

$$T_i = T m_i + T_{q_i} = T m_i \left[1 + \lambda_i T m_i \frac{1 + 0.047e^{22.156Tm_i}}{2(1 - \lambda_i T m_i)} \right]. \quad (4.24)$$

Οι Εξισώσεις 4.14, 4.23 και 4.24 είναι οι καταληκτικές του μοντέλου, από τις οποίες υπολογίζονται τα τρία διαφορετικά μέτρα της καθυστέρησης πακέτου.

Στην επόμενη ενότητα πραγματοποιείται επαλήθευση του μοντέλου μέσω προσομοίωσης.

4.3 Επαλήθευση του προτεινόμενου μοντέλου

Το μοντέλο που σχεδιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα επαληθεύεται μέσω προσομοίωσης στο OPNET. Για το συγκεκριμένο σκοπό πραγματοποιήθηκαν δυο ξεχωριστά σενάρια προσομοίωσης που αφορούν ένα δίκτυο IEEE 802.11b. Σε κάθε σενάριο χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές παράμετροι, τόσο για το φυσικό επίπεδο, όσο και για το επίπεδο MAC. Για το πρώτο σενάριο προσομοιώνεται ένα δίκτυο με 21 κόμβους όπου υποστηρίζονται τρεις ACs (AC-0, AC-1, AC-2). Σε κάθε κατηγορία υπάγονται επτά κόμβοι. Το δεύτερο σενάριο αφορά ένα δίκτυο με 20 κόμβους, τέσσερις ACs (AC-0, AC-1, AC-2, AC-3) όπου, σε κάθε κατηγορία, υπάγονται πέντε κόμβοι.

Όσον αφορά τις παραμέτρους κίνησης, για λόγους απλότητας και χωρίς να επηρεάσουμε την ορθότητα των αποτελεσμάτων, υποθέτουμε και στα δυο σενάρια ότι ο ρυθμός άφιξης πακέτων είναι ίδιος για όλους τους κόμβους του δικτύου. Το ωφέλιμο μέγεθος πακέτου υποθέτουμε ότι ακολουθεί την Εκθετική κατανομή με μέση τιμή 1KByte, που είναι ένα τυπικό μέγεθος ενός πακέτου IP.

Οι παράμετροι του φυσικού στρώματος είναι αυτές που ορίζονται στο πρότυπο IEEE 802.11b για ρυθμό 5.5Mb/s και προοίμιο εκτεταμένου τύπου.

Οι υπόλοιπες παράμετροι του δικτύου συνοψίζονται στον Πίνακα 4.1.

Με βάση τα παραπάνω σενάρια διεξήχθησαν αρκετές προσομοιώσεις για διάφορες τιμές του φόρτου κίνησης, προσομοιώνοντας κάθε φορά μια ώρα πραγματικής λειτουργίας του δικτύου.

Στους Πίνακες 4.2 ως 4.5 παρατίθενται τα αριθμητικά αποτελέσματα από το μοντέλο και το OPNET. Μαζί παρουσιάζεται και η διαφορά των τιμών σε εκατοστιαίες μονάδες. Η ποσοστιαία διαφορά στις τιμές ορίζεται ως $(OP - MD)/MD$, όπου OP είναι η τιμή του OPNET και MD είναι η τιμή του μοντέλου.

Παράμετρος	Σενάριο 1	Σενάριο 2
Διάρκεια χρονοθυρίδας (σ)	20 μ s	20 μ s
Διάστημα SIFS	10 μ s	10 μ s
Διάστημα DIFS	20 μ s	20 μ s
Διάρκεια επικεφαλίδας φυσικού επιπέδου (<i>PHY</i>)	192 μ s	192 μ s
Μήκος επικεφαλίδας MAC	272bits	272bits
Μήκος ACK	112bits	112bits
Μήκος RTS	160bits	160bits
Μήκος CTS	112bits	112bits
Ρυθμός μετάδοσης (<i>R</i>)	5.5Mb/s	5.5Mb/s
Κατώφλι RTS	256Bytes	256Bytes
Ωφέλιμο μέγεθος πακέτου (<i>P</i>)	1024Bytes	1024Bytes
Κατηγορίες προτεραιότητας (ACs)	3	4
Κόμβοι ανά AC	7	5
Minimum contention window για AC-0	32	32
Minimum contention window για AC-1	16	16
Minimum contention window για AC-2	8	16
Minimum contention window για AC-3	-	8
Maximum contention window για AC-0	1024	1024
Maximum contention window για AC-1	64	128
Maximum contention window για AC-2	32	64
Maximum contention window για AC-3	-	32
AIFS για AC-0	2	2
AIFS για AC-1	1	2
AIFS για AC-2	1	1
AIFS για AC-3	-	1

Πίνακας 4.1: Παράμετροι προσομοίωσης για την επαλήθευση του μοντέλου

Σε δυο περιπτώσεις η τιμή της καθυστέρησης μετάδοσης ήταν πολύ μεγάλη και το OPNET δεν έδωσε αριθμητικό αποτέλεσμα. Οι περιπτώσεις αυτές σημειώνονται με 'INF'.

Επιπλέον, κάποια αποτελέσματα μεταξύ μοντέλου και OPNET μοιάζουν να είναι ίδια, αλλά παρουσιάζεται μια διαφορά διάφορη του μηδενός. Στην πραγματικότητα οι τιμές δεν είναι ίδιες, απλά στους πίνακες ταυτίζονται διότι έγινε στρογγυλοποίηση στο δεύτερο δεκαδικό ψηφίο.

λ (πακ/s)	Μοντέλο (ms)			OPNET (ms)			Διαφορά (%)		
	AC0	AC1	AC2	AC0	AC1	AC2	AC0	AC1	AC2
5	7.41	4.40	3.27	8.01	4.89	3.57	8	11	9
7	9.41	4.89	3.19	10.17	5.28	3.39	8	8	6
9	12.05	5.58	3.18	12.89	5.92	3.37	7	6	6
11	15.40	6.56	3.51	16.48	6.95	3.69	7	6	5
13	21.17	7.50	5.20	22.05	7.45	5.41	5	6	4

Πίνακας 4.2: Επαλήθευση μοντέλου καθυστέρησης μετάδοσης - Σενάριο 1

λ (πακ/s)	Μοντέλο (ms)				OPNET (ms)				Διαφορά (%)			
	AC0	AC1	AC2	AC3	AC0	AC1	AC2	AC3	AC0	AC1	AC2	AC3
4	6.01	3.57	2.93	2.70	6.67	3.93	3.26	2.89	11	10	11	7
6	7.07	4.17	3.27	2.79	7.56	4.51	3.63	2.94	8	8	11	5
8	8.50	5.06	3.57	3.14	9.18	5.47	3.90	3.28	8	8	9	4
10	15.06	6.50	4.31	3.32	15.90	6.89	4.62	3.46	6	6	7	4
12	30.00	9.36	6.34	5.65	31.80	9.84	6.66	5.88	6	5	5	4

Πίνακας 4.3: Επαλήθευση μοντέλου καθυστέρησης μετάδοσης - Σενάριο 2

λ (πακ/s)	Μοντέλο (ms)			OPNET (ms)			Διαφορά (%)		
	AC0	AC1	AC2	AC0	AC1	AC2	AC0	AC1	AC2
5	0.20	0.06	0.03	0.22	0.06	0.03	10	8	10
7	0.40	0.10	0.04	0.43	0.11	0.04	7	8	7
9	1.20	0.17	0.05	1.28	0.18	0.05	7	7	6
11	3.80	0.31	0.08	3.99	0.33	0.08	5	7	4
13	175000	0.60	0.32	INF	0.64	0.33	-	7	4

Πίνακας 4.4: Επαλήθευση μοντέλου καθυστέρησης αναμονής - Σενάριο 1

λ (πακ/s)	Μοντέλο (ms)				OPNET (ms)				Διαφορά (%)			
	AC0	AC1	AC2	AC3	AC0	AC1	AC2	AC3	AC0	AC1	AC2	AC3
4	0.25	0.03	0.02	0.02	0.27	0.03	0.02	0.02	9	10	8	11
6	0.30	0.06	0.04	0.03	0.32	0.07	0.04	0.03	6	9	7	11
8	0.57	0.12	0.06	0.04	0.60	0.13	0.06	0.05	6	8	7	10
10	2.20	0.30	0.11	0.06	2.31	0.32	0.12	0.07	5	6	7	8
12	27000	0.82	0.31	0.24	INF	0.87	0.33	0.26	-	6	6	7

Πίνακας 4.5: Επαλήθευση μοντέλου καθυστέρησης αναμονής - Σενάριο 2

Όπως είναι προφανές, η εκατοστιαία διαφορά των τιμών επαληθεύει το γεγονός ότι το μοντέλο είναι αρκετά ακριβές.

Στην επόμενη ενότητα θα χρησιμοποιήσουμε το προτεινόμενο μοντέλο για να διεξάγουμε αξιολόγηση επίδοσης της EDCA.

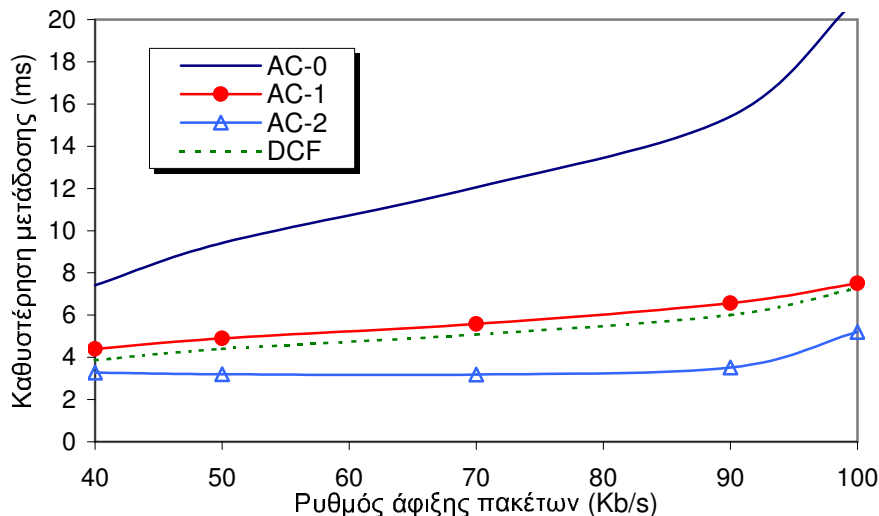
4.4 Αξιολόγηση επίδοσης της μεθόδου EDCA

Για την αξιολόγηση επίδοσης της μεθόδου EDCA χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα σενάρια σε καθένα από τα οποία μεταβάλλονται διαφορετικές παράμετροι. Τα δυο πρώτα σενάρια είναι ίδια με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν κατά την επαλήθευση του μοντέλου. Οι σχετικές παράμετροι συγκεντρώνονται στον Πίνακα 4.1. Η αξιολόγηση του προτύπου πραγματοποιήθηκε μετρώντας τα αναλυτικά αποτελέσματα μέσω του μοντέλου (καθυστέρηση μετάδοσης και καθυστέρηση αναμονής), μεταβάλλοντας κάθε φορά το ρυθμό άφιξης πακέτων, ο οποίος είναι ίδιος για όλους τους κόμβους.

Το τρίτο σενάριο αφορά το ίδιο δίκτυο με αυτό του πρώτου. Στη συγκεκριμένη περίπτωση όμως ο ρυθμός άφιξης πακέτων μεταβάλλεται μόνο για τους κόμβους AC-2, ενώ για τους υπόλοιπους κόμβους παραμένει σταθερός και ίσος με 10 πακέτα/s (80Kb/s). Η αξιολόγηση του προτύπου πραγματοποιείται μετρώντας και πάλι τα αναλυτικά αποτελέσματα μέσω του μοντέλου, μεταβάλλοντας όμως τώρα μόνο το ρυθμό άφιξης πακέτων των κόμβων AC-2.

Το τελευταίο σενάριο αφορά ένα δίκτυο που βρίσκεται σε κατάσταση κορεσμού (ο ρυθμός άφιξης πακέτων για όλους τους κόμβους είναι πολύ μεγάλος). Στην περίπτωση αυτή μετρείται η καθυστέρηση μετάδοσης σε σχέση με τον αριθμό των κόμβων του δικτύου.

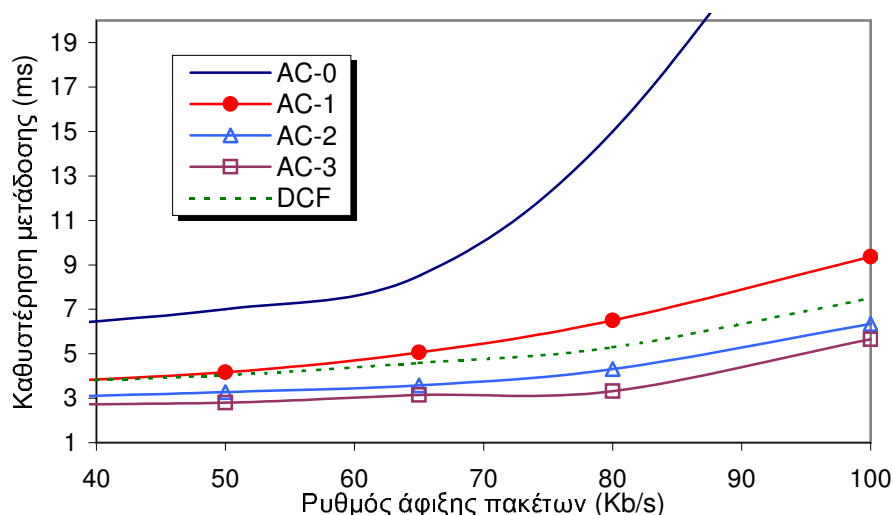
Περνάμε τώρα στα δυο πρώτα σενάρια, όπου μεταβάλλεται ο ρυθμός άφιξης πακέτων, όντας ίδιος για όλους τους κόμβους. Στα Σχήματα 4.4 και 4.5 απεικονίζεται η καθυστέρηση μετάδοσης ενός τυχαίου κόμβου κάθε AC, σε σχέση με το ρυθμό άφιξης πακέτων λ . Παράλληλα απεικονίζεται και η καθυστέρηση μετάδοσης αν το συγκεκριμένο δίκτυο λειτουργούσε υπό το μηχανισμό DCF, χωρίς υποστήριξη διαφοροποίησης υπηρεσιών. Στην περίπτωση αυτή όλοι οι κόμβοι ανήκουν σε μια και μοναδική AC. Ας σημειωθεί ότι, παρ' ότι η παράμετρος λ ορίστηκε σε πακέτα/s, στις γραφικές παραστάσεις παρουσιάζεται σε Kb/s (πολλαπλασιασμένη με το μέγεθος πακέτου που είναι 1KB) ώστε να είναι ανεξάρτητη από το μέγεθος πακέτου και να υπάρχει μια σαφέστερη αντίληψη του φόρτου τηλεπικοινωνιακής κίνησης.



Σχήμα 4.4: Καθυστέρηση μετάδοσης (Σενάριο 1)

Όπως φαίνεται και από τα σχήματα, παρότι τα αριθμητικά αποτελέσματα διαφέρουν στα δυο σενάρια, τα ποιοτικά συμπεράσματα που προκύπτουν είναι ίδια. Η υποστήριξη ACs μέσω της EDCA, πράγματι διαφοροποιεί κατά μεγάλο βαθμό την καθυστέρηση μετάδοσης ανάμεσα στους κόμβους του δικτύου. Ας πάρουμε ως παράδειγμα τις κατηγορίες AC-0 και AC-2 για το πρώτο σενάριο. Με ρυθμό άφιξης πακέτων ίσο με 90Kb/s, η καθυστέρηση μετάδοσης για έναν κόμβο AC-0 είναι 15.4ms ενώ για έναν κόμβο AC-2 είναι 3.5ms, δηλαδή διαφορά ίση με 11.9ms.

Ας δούμε τώρα ποιοτικά το νέο τρόπο που η EDCA χειρίζεται τη διαφοροποίηση των υπηρεσιών. Από τις γραφικές παραστάσεις φαίνεται ότι, και στα δυο σενάρια, η καθυστέρηση μετάδοσης των κόμβων ενδιάμεσων ACs (AC-1 για το πρώτο σενάριο και AC-1, AC-2 για το δεύτερο) κυμαίνεται σε παρόμοια



Σχήμα 4.5: Καθυστερήση μετάδοσης (Σενάριο 2)

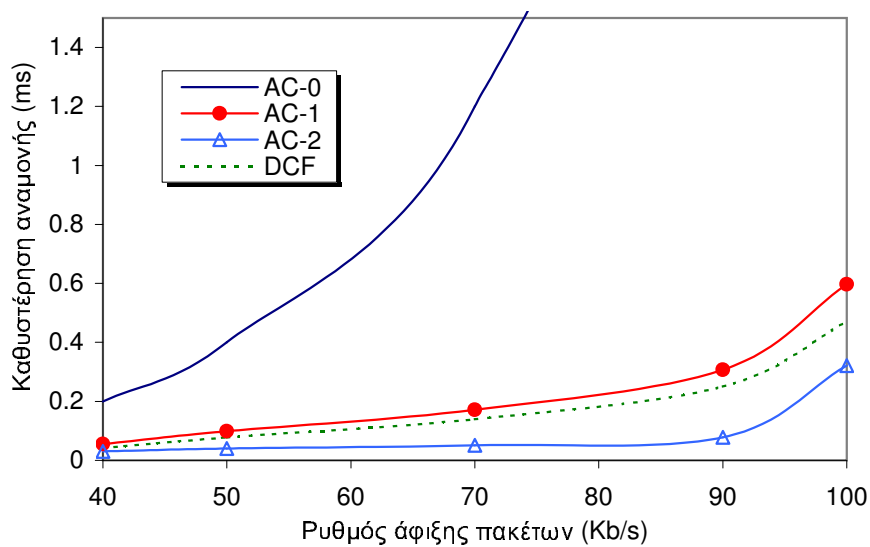
επίπεδα με αυτά της DCF. Πράγματι, για το πρώτο σενάριο η διαφορά στις τιμές της καθυστέρησης μετάδοσης ενός κόμβου AC-1 από έναν τυχαίο κόμβο στην περίπτωση της DCF, δεν ξεπερνά τα 0.5ms. Για το δεύτερο σενάριο, η αντίστοιχη διαφορά είναι μικρότερη από 2ms. Για τους κόμβους AC-2 η διαφορά δεν ξεπερνά τα 1ms. Παρ' όλ' αυτά, για τις κατηγορίες υψηλότερης και χαμηλότερης προτεραιότητας, η κατάσταση είναι εντελώς διαφορετική. Για την υψηλότερη AC (AC-2 στο πρώτο σενάριο και AC-3 στο δεύτερο) η μείωση της καθυστέρησης μετάδοσης σε σχέση με την περίπτωση της DCF φτάνει μέχρι 41% στο πρώτο σενάριο και μέχρι 37% στο δεύτερο. Για τη χαμηλότερη (AC-0), η αύξηση της καθυστέρησης μετάδοσης σε σχέση με την περίπτωση της DCF ξεπερνά το 160% για το πρώτο σενάριο και το 180% για το δεύτερο.

Εξετάζοντας τα παραπάνω μπορούμε εύκολα να καταλήξουμε στον τρόπο με τον οποίο η EDCA χειρίζεται τη διαφοροποίηση των υπηρεσιών, όσον αφορά την καθυστέρηση μετάδοσης. Οι κόμβοι της υψηλότερης AC ευνοούνται, καθώς η καθυστέρηση μετάδοσης μειώνεται αισθητά γι' αυτούς. Οι κόμβοι των μέσων ACs δεν επηρεάζονται αισθητά από την εφαρμογή της μεθόδου EDCA. Για τους κόμβους αυτούς, η καθυστέρηση μετάδοσης κυμαίνεται σε παραπλήσια πλαίσια με αυτά της περίπτωσης DCF. Τέλος, η βελτίωση της καθυστέρησης μετάδοσης των κόμβων της υψηλότερης AC καθώς και η προσπάθεια να μην αυξηθεί η καθυστέρηση μετάδοσης των κόμβων μέσω ACs, έχει σημαντικό αντίκτυπο στους κόμβους της χαμηλότερης AC. Η κατηγορία αυτή υποφέρει από αύξηση της καθυστέρησης μετάδοσης και μάλιστα σε βαθμό που εξαρτάται από τον αριθμό κατηγοριών υψηλότερης από αυτή προτεραιότητας (στο σενάριο 2 που υπήρχαν τρεις κατηγορίες πάνω από την AC-0, η καθυστέρηση μετάδοσης ήταν μεγαλύτερη από αυτή του σεναρίου 1 όπου υπήρχαν δυο κατηγορίες πάνω από την AC-0).

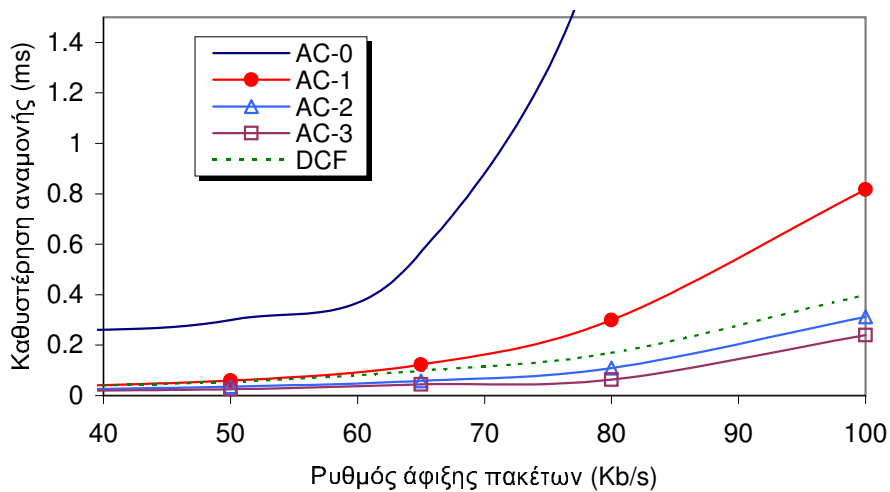
Το παραπάνω βασικό συμπέρασμα επαληθεύεται και στην περίπτωση της καθυστέρησης αναμονής, με πιο εμφανείς, μάλιστα, διαφορές. Στα Σχήματα 4.6 και 4.7 απεικονίζεται η καθυστέρηση αναμονής ενός τυχαίου κόμβου κάθε AC σε σχέση με το ρυθμό άφιξης πακέτων λ. Επιπλέον απεικονίζεται και η καθυστέρηση μετάδοσης αν το συγκεκριμένο δίκτυο λειτουργούσε υπό το μηχανισμό DCF.

Όπως είναι προφανές, ο τρόπος με τον οποίο η μέθοδος EDCA διαχειρίζεται τη διαφοροποίηση των υπηρεσιών, όσον αφορά την καθυστέρηση αναμονής, είναι ο ίδιος με αυτόν που περιγράφηκε προηγουμένως. Η διαφορά στις αριθμητικές τιμές όμως είναι μεγαλύτερη από την περίπτωση της καθυστέρησης μετάδοσης. Ενδεικτικά, η καθυστέρηση αναμονής των κόμβων AC-3 βελτιώνεται μέχρι και 69% στο πρώτο σενάριο. Από την άλλη πλευρά, η καθυστέρηση αναμονής των κόμβων AC-0 χειροτερεύει μέχρι και 1100% στο πρώτο σενάριο και 1200% στο δεύτερο. Η αύξηση αυτή της ποσοστιαίας διαφοράς είναι λογική. Πράγματι, όσο μεγαλύτερη είναι η καθυστέρηση μετάδοσης τόσο μεγαλύτερη είναι η καθυστέρηση αναμονής στην ουρά του πομποδέκτη. Συνεπώς, μια βελτίωση της καθυστέρησης μετάδοσης επιφέρει βελτίωση και στην καθυστέρηση αναμονής, και μάλιστα μεγαλύτερη.

Περνάμε τώρα στη μελέτη του τρίτου σεναρίου, που αφορά το δίκτυο του σεναρίου 1, όπου μεταβάλλεται

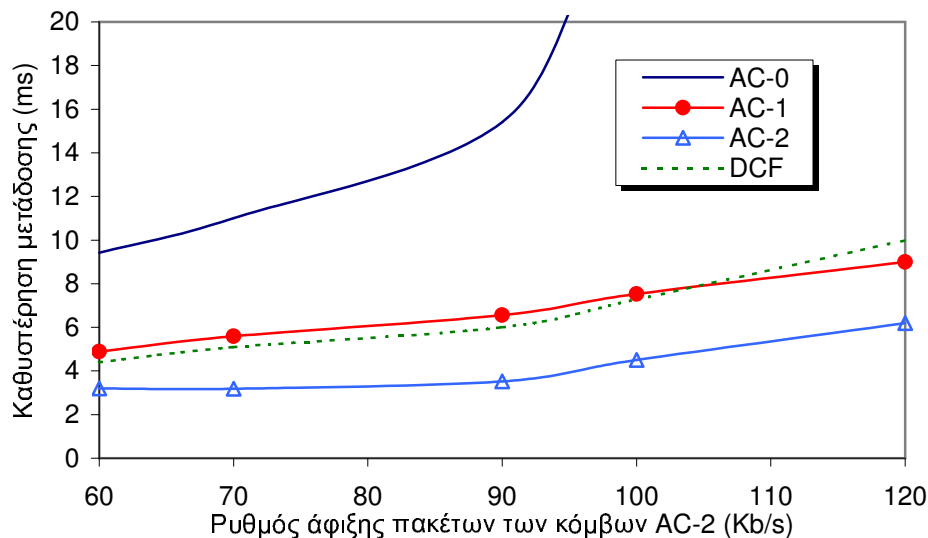


Σχήμα 4.6: Καθυστέρηση αναμονής (Σενάριο 1)

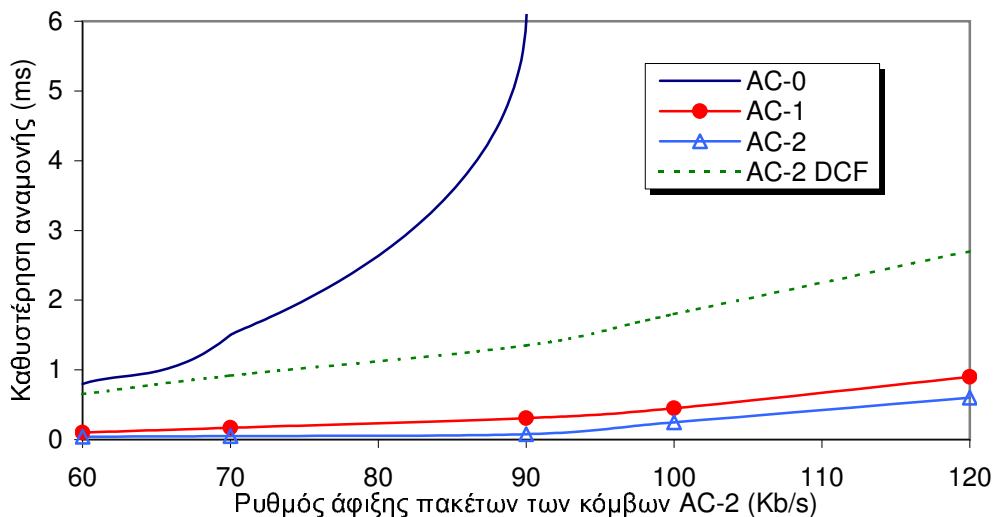


Σχήμα 4.7: Καθυστέρηση αναμονής (Σενάριο 2)

ο ρυθμός άφιξης πακέτων μόνο των κόμβων AC-2. Στους υπόλοιπους κόμβους ο ρυθμός άφιξης πακέτων παραμένει σταθερός και ίσος με 10 πακέτα/s (80Kb/s). Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να δούμε κατά πόσο οι ίδιοι οι κόμβοι AC-2 επηρεάζονται από την αύξηση του ρυθμού άφιξης πακέτων τους. Στα Σχήματα 4.8 και 4.9 απεικονίζονται η καθυστέρηση μετάδοσης και η καθυστέρηση αναμονής σε σχέση με το ρυθμό άφιξης πακέτων των κόμβων AC-2. Παράλληλα παρουσιάζονται και τα αποτελέσματα από την εξής διάταξη: Το παραπάνω δίκτυο λειτουργεί υπό τη μέθοδο DCF, και αυξάνεται ο ρυθμός άφιξης πακέτων μόνο για μερικούς κόμβους (γι' αυτούς οι οποίοι θα ανήκαν στην AC-2 αν το δίκτυο υποστήριζε το πρότυπο IEEE 802.11e) ενώ στους άλλους παραμένει σταθερός και ίσος με 10 πακέτα/s.



Σχήμα 4.8: Καθυστέρηση μετάδοσης (Σενάριο 3)



Σχήμα 4.9: Καθυστέρηση αναμονής (Σενάριο 3)

Όπως φαίνεται από τα σχήματα, η αύξηση του ρυθμού άφιξης πακέτων των κόμβων AC-2 ελάχιστα επηρεάζει τους ίδιους. Συγκεκριμένα, η διαφορά της μέγιστης από την ελάχιστη τιμή της καθυστέρησης μετάδοσης είναι μόνο 3ms, ενώ για την καθυστέρηση αναμονής είναι 0.56ms. Το ίδιο ισχύει πάνω κάτω και για την AC-1. Συνεπώς, η αύξηση του ρυθμού μετάδοσης της υψηλότερης AC επηρεάζει μόνο τη χαμηλότερη AC. Πράγματι, όσο ο ρυθμός άφιξης πακέτων των κόμβων AC-2 αυξάνεται, τόσο πιο απότομη είναι η αύξηση της καθυστέρησης μετάδοσης των κόμβων AC-0. Ενδεικτικά, η διαφορά της μέγιστης από την ελάχιστη τιμή της καθυστέρησης μετάδοσης φτάνει τα 15.6ms, που είναι μια ποσοστιαία διαφορά περίπου 165%. Για την καθυστέρηση αναμονής το αποτέλεσμα είναι πιο εμφανές, καθώς η διαφορά της μέγιστης από την ελάχιστη τιμή φτάνει τα 3.5ms, που είναι μια ποσοστιαία διαφορά της τάξης του 700%.

Με βάση, λοιπόν, τη μελέτη του σεναρίου 3 μπορούμε να πούμε ότι η αύξηση του ρυθμού άφιξης πακέτων των κόμβων της υψηλότερης AC δεν επηρεάζει ούτε τους ίδιους ούτε τους κόμβους μέσω των ACs, αλλά μόνο τους κόμβους της χαμηλότερης AC.

Εφόσον, τώρα, το παραπάνω συμπέρασμα ισχύει στην περίπτωση που αυξάνεται ο ρυθμός άφιξης πακέτων των κόμβων της υψηλότερης AC, είναι προφανές ότι θα ισχύει και για την περίπτωση που αυξάνεται ο ρυθμός άφιξης πακέτων των κόμβων μέσω των ACs (καθώς σίγουρα η αύξηση αυτή δε θα επηρέαζε τους κόμβους της υψηλότερης AC). Συνεπώς, στηριζόμενοι και στα προηγούμενα δυο σενάρια, μπορούμε να γενικεύσουμε τα συμπεράσματα, λέγοντας ότι η αύξηση της παραγόμενης τηλεπικοινωνιακής κίνησης σε ένα δίκτυο IEEE 802.11e επηρεάζει ως επί το πλείστον τους κόμβους της κατηγορίας χαμηλότερης προτεραιότητας.

Θα ολοκληρώσουμε την αξιολόγηση του προτύπου IEEE 802.11e με τη μελέτη του τέταρτου σεναρίου που αφορά τη λειτουργία ενός δικτύου στον κορεσμό. Υπενθυμίζουμε ότι, στην κατάσταση αυτή, ο φόρτος τηλεπικοινωνιακής κίνησης είναι τέτοιος ώστε στον πομποδέκτη κάθε κόμβου να υπάρχουν πάντα πακέτα προς αποστολή. Για τη μελέτη θεωρούμε το δίκτυο του σεναρίου 1, με τρεις ACs. Στη συγκεκριμένη περίπτωση τα αποτελέσματα λαμβάνονται μεταβάλλοντας κάθε φορά τον αριθμό των κόμβων του δικτύου.

Στο σημείο αυτό, κάνοντας μια παρένθεση, διευκρινίζεται ότι, παρ' όλο που το προτεινόμενο μοντέλο έχει σχεδιαστεί για λειτουργία σε συνθήκες πεπερασμένου φόρτου τηλεπικοινωνιακής κίνησης, μπορούμε να μελετήσουμε την κατάσταση του κορεσμού θεωρώντας την ως μια οριακή κατάσταση όπου ο παράγοντας χρησιμοποίησης ρ είναι ίσος με τη μονάδα. Στην περίπτωση αυτή βέβαια, μπορούμε να εξάγουμε αποτελέσματα μόνο για το μέτρο της καθυστέρησης μετάδοσης. Η καθυστέρηση αναμονής (και συνεπώς η συνολική καθυστέρηση) θα είναι άπειρη, αφού, δεδομένου ότι $\rho = 1$, το σύστημα αναμονής δεν είναι πλέον ευσταθές. Επίσης, πρέπει να τονιστεί ότι η σχέση $\rho = \lambda Tm$ δεν ισχύει πια.

Με βάση τα παραπάνω, τα δεδομένα που αλλάζουν στο σχεδιασμό του μοντέλου είναι: (α) το γεγονός ότι η τηλεπικοινωνιακή κίνηση δεν υπεισέρχεται ως παράμετρος εισόδου (ο φόρτος κίνησης έχει ήδη οριστεί μέσω της σχέσης $\rho = 1$) και (β) η αλλαγή των Εξισώσεων 4.7 και 4.14 σε

$$t_i = \frac{1}{W_i} \quad (4.25)$$

και

$$Tm_i = \bar{W}_i \sigma + Ts_i + (r_i - 1)Tc_i + (N_i - 1)[(1 - p_i)Ts_i + \frac{p_i}{K}Tc_i] + \sum_{j=0, j \neq i}^L N_j \frac{\bar{W}_i}{\bar{W}_j} [(1 - p_j)Ts_j + \frac{p_j}{K}Tc_j] \quad (4.26)$$

αντίστοιχα.

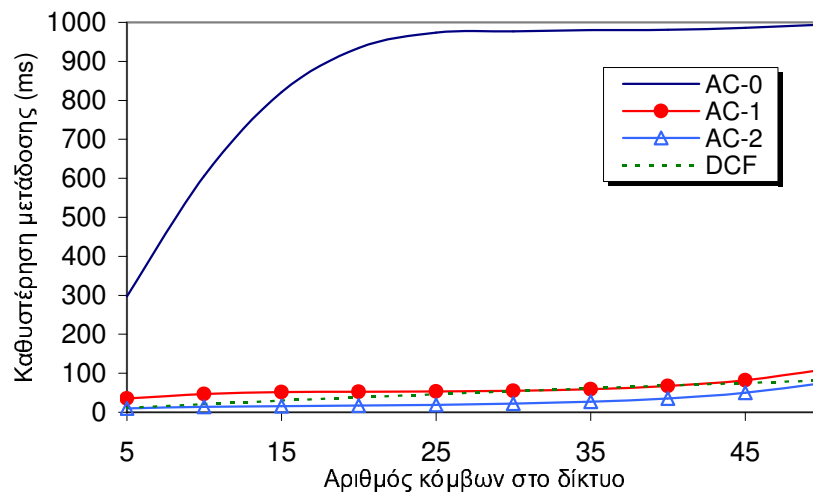
Επιστρέφοντας στην αξιολόγηση επίδοσης, στο Σχήμα 4.10 απεικονίζεται η καθυστέρηση μετάδοσης ενός τυχαίου κόμβου κάθε AC σε σχέση με τον αριθμό των κόμβων του δικτύου. Ο αριθμός των κόμβων που αντιστοιχούν σε κάθε AC είναι ίδιος για καθεμιά από αυτές και ίσος με το ένα τρίτο των κόμβων του δικτύου. Παράλληλα απεικονίζεται και η καθυστέρηση μετάδοσης ενός τυχαίου κόμβου, αν το δίκτυο λειτουργούσε υπό το μηχανισμό DCF.

Όπως φαίνεται και από το σχήμα, τα συμπεράσματα που διεξήχθησαν προηγουμένως ισχύουν και στην κατάσταση του κορεσμού. Μάλιστα, η συγκεκριμένη περίπτωση είναι αυτή που καθιστά πιο εμφανή τον τρόπο λειτουργίας της μεθόδου EDCA.

4.5 Σύνοψη

Κλείνοντας το παρόν κεφάλαιο, θα κάνουμε μια σύντομη ανασκόπηση της εργασίας που πραγματοποιήθηκε και θα αναφέρουμε επιγραμματικά τα συμπεράσματα που προέκυψαν.

Η αύξηση των ρυθμών μετάδοσης του IEEE 802.11 το κατέστησαν ιδιαίτερα δημοφιλές και ικανό να υποστηρίξει ένα μεγάλο εύρος υπηρεσιών. Για την εφαρμογή όμως των νέων αυτών υπηρεσιών απαιτούνται, εκτός από υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης, και εγγύηση για προκαθορισμένα χρονικά όρια καθυστέρησης



Σχήμα 4.10: Καθυστερήση αναμονής στον κορεσμό

πακέτου καθώς και διαφοροποίηση του τρόπου ανάθεσης πόρων μεταξύ των υπηρεσιών. Με λίγα λόγια, απαιτείται ποιότητα υπηρεσίας σε δίκτυα IEEE 802.11.

Προς τη συγκεκριμένη κατεύθυνση, ο οργανισμός IEEE βρίσκεται ένα στάδιο πριν τη δημοσίευση του προτύπου IEEE 802.11e για υποστήριξη QoS. Ένα από τα βασικά δομικά στοιχεία του συγκεκριμένου προτύπου είναι η μέθοδος πρόσβασης EDCA που εγγυάται διαφοροποίηση υπηρεσιών. Καθ' ότι η μέθοδος αυτή δεν έχει υλοποιηθεί ακόμη σε εμπορικά διαθέσιμες δικτυακές συσκευές και δεν υπάρχουν απτά αποτελέσματα για την επίδοσή της, ζωτικής σημασίας για την εδραίωση της EDCA έχουν οι εργασίες που αφορούν την αξιολόγηση επίδοσής της μέσω προσομοίωσης ή, σε καλύτερη περίπτωση, μέσω αναλυτικών μοντέλων.

Έχοντας υπόψη τα παραπάνω, στο παρόν κεφάλαιο σχεδιάστηκε ένα αναλυτικό μοντέλο για την αξιολόγηση επίδοσης της EDCA σε συνθήκες πεπερασμένου φόρτου κίνησης. Προς την κατεύθυνση αυτή, ο πομποδέκτης κάθε κόμβου θεωρήθηκε ως ένα σύστημα αναμονής G/G/1 μέσω πιθανοτικής ανάλυσης του οποίου διεξήχθησαν τρία μέτρα που αφορούν την καθυστέρηση πακέτου.

Η εγκυρότητα του αναλυτικού μοντέλου που σχεδιάστηκε επαληθεύτηκε μέσω προσομοίωσης στην πλατφόρμα OPNET.

Χρησιμοποιώντας το αναλυτικό μοντέλο πραγματοποιήθηκε αξιολόγηση επίδοσης της EDCA, απ' όπου προέκυψαν τα εξής βασικά συμπεράσματα:

- Η μέθοδος EDCA πραγματοποιεί διαφοροποίηση των υπηρεσιών τόσο σε επίπεδο καθυστέρησης μετάδοσης πακέτου όσο και σε επίπεδο καθυστέρησης αναμονής του πακέτου στον καταχωρητή του πομποδέκτη. Η διαφορά στην καθυστέρηση πακέτου μεταξύ των κόμβων των διαφόρων κατηγοριών πρόσβασης είναι αισθητή, σε βαθμό που να εγγυάται την μικρή καθυστέρηση πακέτου σε υπηρεσίες που το απαιτούν.
- Ο τρόπος με τον οποίο η μέθοδος πρόσβασης EDCA διαχειρίζεται τη διαφοροποίηση των υπηρεσιών είναι ο εξής: Η υπηρεσία με την υψηλότερη προτεραιότητα ευνοείται κατά το μέγιστο, επιτυγχάνοντας χαμηλή καθυστέρηση πακέτου. Οι υπηρεσίες μέσης προτεραιότητας επηρεάζονται σε μικρό βαθμό από την εφαρμογή της μεθόδου. Η καθυστέρηση πακέτου για τις υπηρεσίες αυτές είναι παραπλήσια (λίγο μεγαλύτερη ή λίγο μικρότερη) από αυτή που θα παρουσίαζαν αν το δίκτυο λειτουργούσε υπό τη μέθοδο DCF. Οι υπηρεσίες με τη χαμηλότερη προτεραιότητα επηρεάζονται αρνητικά από την εφαρμογή της EDCA καθώς η καθυστέρηση πακέτου αυξάνεται αισθητά σε σχέση με την καθυστέρηση που θα παρουσίαζαν σε λειτουργία υπό τη μέθοδο DCF. Το γεγονός αυτό πηγάζει από την προσπάθεια να ελαττωθεί η καθυστέρηση πακέτου στην κατηγορία υψηλότερης προτεραιότητας και να κρατηθεί σε χαμηλό βαθμό η καθυστέρηση πακέτου για τις υπηρεσίες μέσης προτεραιότητας.

Εκτός από τη διεξαγωγή των παραπάνω συμπερασμάτων για τη λειτουργία της EDCA, η παρούσα εργασία συνδράμει στην ύπαρξη ενός αναλυτικού ευέλικτου μοντέλου που μπορεί να χρησιμοποιηθεί από σχεδιαστές δικτύων για την πρόβλεψη της καθυστέρησης μετάδοσης των υπηρεσιών που θέλουν να εφαρμόσουν. Η ευελιξία του μοντέλου έγκειται στο μεγάλο αριθμό παραμέτρων εισόδου που δέχεται (ρυθμός άφιξης και μέγεθος πακέτων, αριθμός κόμβων, πιθανοτικές κατανομές), στα τρία ωφέλιμα μέτρα που εξάγει για την καθυστέρηση πακέτου και στο γεγονός ότι είναι πλήρως παραμετροποιήσιμο, επεκτάσιμο και ανεξάρτητο των ανώτερων και κατώτερων στρωμάτων OSI.

Στο σημείο αυτό, όπου το παρόν κεφάλαιο κλείνει, έχει ολοκληρωθεί η μελέτη της επίδοσης της οικονομίας προτύπων IEEE 802.11 σε δίκτυα γενικού σκοπού. Στο υπόλοιπο της διατριβής εμβαθύνεται η μελέτη επιστώντας την προσοχή στην εφαρμογή του IEEE 802.11 σε δίκτυα ad hoc συγκεκριμένου τύπου. Τα υπό μελέτη δίκτυα είναι τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων-συντονιστών (Wireless Sensor-Actor Networks) και τα δίκτυα ακαθόριστης διασύνδεσης με υποδομή (Wireless Infrastructured Ad Hoc Networks). Τα δίκτυα αισθητήρων-συντονιστών είναι το αντικείμενο με το οποίο ασχολείται το αμέσως επόμενο κεφάλαιο.

Βιβλιογραφικές Αναφορές

- [1] “Providing QoS in WLANs,” White Paper, Intel Corp., 2004.
- [2] H. Zhu *et al.*, “A Survey of Quality of Service in IEEE 802.11 Networks,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 11, no. 4, pp. 6–14, Aug. 2004.
- [3] A. Lindgren, A. Almquist, and O. Schelen, “Quality of Service Schemes for IEEE 802.11 Wireless LANs - An Evaluation,” *Mobile Networks and Applications*, vol. 8, pp. 223–235, 2003.
- [4] Q. Ni, L. Romdhani, and T. Turletti, “A Survey of QoS Enhancements for IEEE 802.11 Wireless LAN,” *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 4, no. 5, pp. 547–566, 2004.
- [5] W. Pattara-Atikom, P. Krishnamurthy, and S. Banerjee, “Distributed Mechanisms for Quality of Service in Wireless LANs,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 10, no. 3, pp. 26–34, Jun. 2003.
- [6] C. Heegard *et al.*, “High Performance Wireless Ethernet,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 39, no. 11, pp. 64–73, 2001.
- [7] J. Zhao *et al.*, “Performance Study of MAC for Service Differentiation in IEEE 802.11,” in *Proc. IEEE GLOBECOM*, Taipei, Taiwan, Nov. 2002.
- [8] N. Vaidya, P. Bahl, and S. Gupta, “Distributed Fair Scheduling in a Wireless LAN,” in *Proc. Sixth Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, 2000.
- [9] F. Cali, M. Conti, and E. Gregori, “IEEE 802.11 Protocol: Design and Performance Evaluation of an Adaptive Backoff Mechanism,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 18, no. 3, pp. 1776–1784, 2000.
- [10] J. Sobrinho and A. Krishnakumar, “Quality-of-Service in Ad hoc Carrier Sense Multiple Access Networks,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 17, no. 8, pp. 1353–1368, 1999.
- [11] B. Li and R. Battiti, “Performance Analysis of an Enhanced IEEE 802.11 Distributed Coordination Function Supporting Service Differentiation,” in *Proc. QoFIS*, Stockholm, Sweden, Oct. 2003.
- [12] H. Zhu and I. Chlamtac, “An Analytical Model for IEEE 802.11e EDCA Differential Services,” in *Proc. IEEE ICCCN*, Dallas, USA, Oct. 2003.
- [13] G. Bianchi, “Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function,” *IEEE Journal on Selected Areas of Communications*, vol. 18, no. 3, pp. 535–547, 2000.

- [14] M. D. Kim and C. K. Kim, "Performance Analysis and Evaluation of IEEE 802.11e EDCF," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 4, pp. 55–74, Dec. 2004.
- [15] Y. Xiao, "Performance Analysis of IEEE 802.11e EDCF under Saturation Condition," in *Proc. IEEE ICC*, Jun. 2004.
- [16] J. Robinson and T. Randhawa, "Saturation Throughput Analysis of IEEE 802.11e Enhanced Distributed Coordination Function," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 22, no. 5, pp. 917–928, Jun. 2004.
- [17] A. Banchs and L. Vollero, "A Delay Model for IEEE 802.11e EDCA," *IEEE Communications Letters*, vol. 9, no. 6, pp. 508–510, Jun. 2005.
- [18] M. S. Kim *et al.*, "Throughput Analysis of IEEE 802.11e EDCA Protocol," in *Proc. HSNMC*, Toulouse, France, Jun. 2004.
- [19] J. N. Kong *et al.*, "Performance Analysis of IEEE 802.11e Contention-Based Channel Access," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 22, no. 10, pp. 2095–2106, Dec. 2004.
- [20] Y. Xiao, "Performance Analysis of Priority Schemes for IEEE 802.11 and IEEE 802.11e Wireless LANs," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, To appear.
- [21] S. Choi *et al.*, "IEEE 802.11e Contention-based Channel Access (EDCA) Performance Evaluation," in *Proc. IEEE ICC*, Anchorage, AK, May. 2003.
- [22] D. Guand and J. Zhang, "Evaluation of EDCA Mechanism for QoS in IEEE 802.11 Wireless Networks," *TR-2003-51*, May. 2003.
- [23] "Optimized Network Engineering Tools (OPNET)." [Online]. Available: <http://www.opnet.com>
- [24] J. Pavon and S. Shankar, "Impact of Frame Size, Number of Stations and Mobility on the Throughput Performance of IEEE 802.11e," in *Proc. IEEE WCNC*, Atlanta, USA, Mar. 2004.
- [25] H. L. Truong and G. Vannuccini, "The IEEE 802.11e MAC for Quality of Service in Wireless LANs," in *Proc. SSRRR*, L'Aquila, Italy, Jan. 2003.
- [26] S. Choi *et al.*, "Performance Evaluation of IEEE 802.11e," in *Proc. IEEE PIMRC*, Lisbon, Portugal, Sep. 2002.
- [27] G. Dimitriadis and F. Pavlidou, "Comparative Performance Evaluation of EDCF and EY-NPMA Protocols," *IEEE Communications Letters*, vol. 8, no. 1, pp. 42–44, Jan. 2004.
- [28] L. Romdhani, Q. Ni, and T. Turletti, "Adaptive EDCA: Enhanced Service Differentiation for IEEE 802.11 Wireless Ad hoc Networks," in *Proc. IEEE WCNC*, New Orleans, USA, Mar. 2003.
- [29] H. Zhu *et al.*, "EDCA-DM: A Novel Enhanced Distributed Coordination Function for Wireless Ad hoc Networks," in *Proc. IEEE ICC*, Jun. 2004.
- [30] S. Kuppa and R. Prakash, "Service Differentiation Mechanisms for IEEE 802.11-based Wireless Networks," in *Proc. IEEE WCNC*, Atlanta, USA, Mar. 2004.
- [31] D. Vassis and G. Kormentzas, "Delay Performance Analysis and Evaluation of IEEE 802.11e EDCA in Finite Load Conditions," *Wireless Personal Communications*, vol. 34, no. 1-2, pp. 29–43, Aug. 2005.
- [32] L. Kleinrock, *Queuing Systems Volume I: Theory*. New York: John Wiley and Sons, 1975, pp. 17–19.
- [33] L. Kleinrock and F. Tobagi, "Packet Switching in Radio Channels: Part I-Carrier Sense Multiple Access Models and their Throughput-Delay Characteristics," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 23, no. 12, pp. 1400–1416, Dec. 1975.

- [34] D. Montgomery and G. Rungler, *Applied Statistics and Probability for Engineers*. New York: John Wiley and Sons, 1999, pp. 113–123.
- [35] Y. Tay and K. Chua, “A Capacity Analysis for the IEEE 802.11 MAC Protocol,” *Wireless Networks*, vol. 7, pp. 159–171, 2001.
- [36] L. Kleinrock, *Queuing Systems Volume I: Theory*. New York: John Wiley and Sons, 1975, p. 187.

Κεφάλαιο 5

Δίκτυα IEEE 802.11 Ακαθόριστης Διασύνδεσης - Σχεδιασμός και Ανάλυση Επίδοσης Σχημάτων Επικοινωνίας για Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων-Συντονιστών

5.1 Εισαγωγή

Έχοντας ολοκληρώσει τη μελέτη του προτύπου IEEE 802.11 από τη σκοπιά που αυτό σχηματίζεται στα διάφορα στρώματα του μοντέλου OSI, ερχόμαστε να εξετάσουμε την καταλληλότητα της εφαρμογής του σε διάφορους τύπους δικτύων πρόσβασης. Στην παρούσα διατριβή ασχολούμαστε αποκλειστικά με την εφαρμογή του εν λόγω προτύπου σε δίκτυα ακαθόριστης διασύνδεσης (ad hoc) λόγω του μεγάλου ερευνητικού ενδιαφέροντος που χρίζουν και λόγω του καθοριστικού ρόλου που αναμένεται να διαδραματίσουν στη διαμόρφωση της μελλοντικής κατάστασης στις τηλεπικοινωνίες [1]. Προς την κατεύθυνση αυτή, το παρόν κεφάλαιο ασχολείται με την εφαρμογή του προτύπου IEEE 802.11 σε δίκτυα αισθητήρων-συντονιστών. Πριν προχωρήσουμε περεταίρω, ας δούμε τι ακριβώς είναι τα προαναφερόμενα δίκτυα.

Οι ραγδαίες εξελίξεις στις ασύρματες επικοινωνίες και στην ηλεκτρονική κατέστησαν δυνατή την υλοποίηση συσκευών που ονομάζονται *ασύρματοι αισθητήρες*. Οι συσκευές αυτές είναι μικρές σε μέγεθος, έχουν ελάχιστες απαιτήσεις σε ενέργεια, διακρίνονται από χαμηλό κόστος και επικοινωνούν ασύρματα μεταξύ τους σε σχετικά μικρές αποστάσεις. Ομάδες ασύρματων αισθητήρων απαρτίζουν τα *ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (wireless sensor networks)* που χρησιμοποιούνται για να συλλέγουν πληροφορία σε έναν ευρύτερο γεωγραφικό χώρο [2]. Τα συγκεκριμένα δίκτυα βρίσκουν απήχηση σε στρατιωτικές εφαρμογές (παρακολούθηση, έλεγχος, ανεύρεση στόχου), σε εφαρμογές σχετικές με την υγεία (παρακολούθηση ασθενών), σε οικιακές εφαρμογές (συναγερμοί, πυρανίχνευση) και γενικότερα σε ό,τι έχει σχέση με την έννοια του κλασσικού αισθητήρα [3].

Λόγω του μικρού κόστους υλοποίησης των αισθητήρων των παραπάνω δικτύων, της μικρής απόστασης επικοινωνίας αλλά και λόγω των εφαρμογών που καλούνται να καλύψουν, οι κόμβοι τους μπορεί να κυμαίνονται από δυο-τρεις μέχρι κάποιες χιλιάδες. Για το λόγο αυτό απαιτείται μια ιεραρχική δομή διασύνδεσης όπου η πληροφορία πολλών αισθητήρων καταλήγει σε κάποιους κόμβους-συντονιστές οι οποίοι, συνεννοούμενοι μεταξύ τους, συντονίζουν τις περεταίρω ενέργειες. Ένας *κόμβος-συντονιστής (actor/actuator node)* είναι συσκευή με αυξημένες δυνατότητες όσον αφορά την επεξεργαστική ισχύ, τη διαθέσιμη ενέργεια, την ευφυία και την επικοινωνία. Ενδεικτικά παραδείγματα των ενεργειών των συντονιστών είναι επαναφόρτιση αισθητήρων, αυτόματη φωτογράφιση ή καταγραφή video όταν λάβουν κάποιο σήμα από αισθητήρα κ.α. Ο συνδυασμός των κόμβων-αισθητήρων (sensors) και των κόμβων-συντονιστών

(actors) συνιστά τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων-συντονιστών (*wireless sensor actor/actuator networks*) [4], που αποτελούν μια πιο αποδοτική εξέλιξη των ασύρματων δικτύων αισθητήρων.

Με το διμερή διαχωρισμό των κόμβων ενός WSA (δικτύου αισθητήρων-συντονιστών) η επικοινωνία χωρίζεται σε δυο ξεχωριστά τμήματα. Το ένα αφορά την επικοινωνία μεταξύ αισθητήρων-αισθητήρων (sensor to sensor) και μεταξύ αισθητήρων-συντονιστών (actor to sensors), ενώ το άλλο αφορά την επικοινωνία μεταξύ συντονιστών-συντονιστών (actor to actor). Η κάθε επικοινωνία με τη σειρά της μπορεί να είναι κεντροποιημένη ή κατανεμημένη. Κεντροποιημένη είναι η επικοινωνία κατά την οποία οι κόμβοι μιας συγκεκριμένης περιοχής επικοινωνούν, όχι απευθείας μεταξύ τους, αλλά με έναν κεντρικό κόμβο που είναι υπεύθυνος για το συντονισμό της επικοινωνίας. Απεναντίας, στην κατανεμημένη επικοινωνία οι κόμβοι μιας περιοχής επικοινωνούν μεταξύ τους απευθείας, ανταλλάσσοντας πληροφορίες και λαμβάνοντας αποφάσεις. Συνδυασμοί των παραπάνω τύπων επικοινωνίας για τα δυο λογικά τμήματα στα οποία χωρίζεται το δίκτυο καθορίζουν τα διάφορα σχήματα επικοινωνίας των δικτύων αισθητήρων-συντονιστών (WSANs).

Παρά το γεγονός ότι ο ερευνητικός χώρος των WSA εμφανίστηκε εξαιρετικά πρόσφατα και υπάρχουν αρκετά ανοιχτά ερευνητικά θέματα, έχουν ήδη γίνει προσπάθειες, μέσω ερευνητικών δημοσιεύσεων, όπου προτείνονται διάφορα αποδοτικά σχήματα επικοινωνίας. Τα πιο αντιπροσωπευτικά παρουσιάζονται αμέσως παρακάτω. Στο άρθρο [4] πραγματοποιείται μια εμβαθής επισκόπηση που αφορά τα WSA όπου αναλύεται η τωρινή κατάσταση των εν λόγω δικτύων και τονίζονται οι σχετικές ερευνητικές προκλήσεις. Οι συγγραφείς του άρθρου [5] χρησιμοποιώντας το παράδειγμα της επικοινωνίας ‘προς όλους (anycast)’ προσπαθούν να εκμεταλλευτούν τις δυνατότητες των συντονιστών ώστε να μειωθεί ο φόρτος κίνησης στους αισθητήρες. Στην εργασία του άρθρου [6] παρουσιάζεται μια πολιτική διαχείρισης υπερφόρτωσης κίνησης σε WSA, όπου οι κόμβοι απορρίπτουν πακέτα με το βέλτιστο τρόπο, προκειμένου να αποφεύγεται η συμφόρηση. Οι συγγραφείς του άρθρου [7] προτείνουν αλγόριθμους που προσδιορίζουν αυτόματα τη θέση των αισθητήρων και των συντονιστών. Στο άρθρο [8] μελετάται τρόπος ώστε να συνδυάζονται πολλαπλές συσκευές εισόδου/εξόδου σε μια κατανεμημένη διάρθρωση από αισθητήρες και συντονιστές φωνής και video. Το άρθρο [9] με τη σειρά του παρουσιάζει μια επισκόπηση για τις προοπτικές εφαρμογής των έξυπνων ασύρματων αυτόνομων μικροσυστημάτων¹ σε WSA. Οι συγγραφείς του άρθρου [10] σχεδιάζουν λογισμικό βασισμένο σε πράκτορες (*agents*) για τη κατανεμημένη διαχείριση ενεργειακών πόρων σε WSA. Τέλος, στο άρθρο [11] εξετάζονται διάφορα θέματα υλοποίησης και παρουσιάζεται μια πλατφόρμα δοκιμών, ενώ στο άρθρο [12] οι συγγραφείς παρουσιάζουν ένα WSA που κατασκεύασαν για αγροτικές εφαρμογές.

Έχοντας υπόψη την ερευνητική πρόοδο που πραγματοποιήθηκε μέχρι στιγμής στο χώρο των WSA, η παρούσα διατριβή εστιάζει την προσοχή στην επικοινωνία μεταξύ των συντονιστών. Συγκεκριμένα προτείνεται ένα σχήμα όπου η επικοινωνία μεταξύ αισθητήρων-συντονιστών είναι κεντροποιημένη ενώ η επικοινωνία μεταξύ των συντονιστών είναι κατανεμημένη. Σε ένα κατανεμημένο σχήμα δεν υπάρχει κεντρικός κόμβος ο οποίος να διαχειρίζεται την επικοινωνία, οπότε όλοι οι κόμβοι επικοινωνούν μεταξύ τους απευθείας και λαμβάνουν οι ίδιοι όλες τις αποφάσεις. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, όπως τονίζεται και στο άρθρο [4], οι συντονιστές συνιστούν μεταξύ τους ένα δίκτυο ακαθόριστης διασύνδεσης (*ad hoc*).

Υπό την παραπάνω σκέψη, στο παρόν κεφάλαιο προτείνονται δυο σχήματα επικοινωνίας μεταξύ των συντονιστών, βασισμένα στο πρότυπο IEEE 802.11. Αρχικά παρουσιάζεται ένα σχήμα επικοινωνίας βασισμένο σε ένα κανάλι μετάδοσης δεδομένων, όπως λειτουργεί σήμερα το πρότυπο IEEE 802.11. Για την αξιολόγηση της επίδοσής του σχεδιάζεται αναλυτικό μοντέλο του οποίου η ακρίβεια επαληθεύεται μέσω προσομοίωσης. Εν συνεχεία, έχοντας υπόψη τα διάφορα πρωτόκολλα που έχουν προταθεί κατά καιρούς ([13], [14]), τα οποία εκμεταλλεύονται την ύπαρξη περισσότερων του ενός καναλιών στη ζώνη συχνοτήτων ISM, καθώς και τις προσπάθειες που πραγματοποιούνται για δυναμική προσαρμογή του ρυθμού μετάδοσης ανάλογα με τις συνθήκες του ασύρματου μέσου ([15], [16]), παρουσιάζεται ένα σχήμα επικοινωνίας όπου χρησιμοποιούνται δυο κανάλια με τρόπο αποδοτικό και βασισμένο στις ιδιαιτερότητες των WSA [17]. Το σημείο-κλειδί του συγκεκριμένου σχήματος είναι η χρήση δυο καναλιών μέσω των οποίων διαχωρίζεται η κίνηση που προορίζεται σε γειτονικούς συντονιστές από την κίνηση που

¹Στη διεθνή βιβλιογραφία τα έξυπνα ασύρματα αυτόνομα μικροσυστήματα είναι γνωστά με τον όρο *SWAMS: Smart Wireless Autonomous Microsystems* και είναι συστήματα τα οποία λαμβάνουν δεδομένα από πολλούς αισθητήρες και ελέγχουν συντονιστές.

προορίζεται σε απομακρυσμένους.

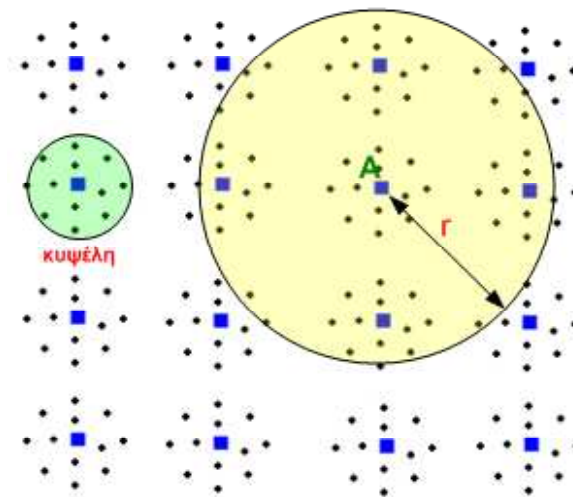
Για την αξιολόγηση επίδοσης των προτεινόμενων σχημάτων ορίζονται αναλυτικά μέτρα που αφορούν την καθυστέρηση πακέτου. Με χρήση αυτών των μέτρων αποδεικνύεται ότι το σχήμα δυο καναλιών με ρυθμούς R_1 και R_2 έχει, σε γενικές γραμμές, καλύτερη επίδοση από το σχήμα ενός καναλιού με ρυθμό $R = R_1 + R_2$. Ας σημειωθεί ότι, καθόσον τα αναλυτικά μέτρα ορίζονται με βάση γενικές κατανομές πιθανότητας, αυτά είναι έγκυρα όχι μόνο για τη συγκεκριμένη περίπτωση των WSNs, αλλά και για γενικότερες περιπτώσεις δικτύων ακαθόριστης διασύνδεσης.

Με βάση τα παραπάνω, το υπόλοιπο του κεφαλαίου διαρθρώνεται ως ακολούθως. Στην Ενότητα 5.2 παρουσιάζεται το σχήμα ενός καναλιού ενώ αναπτύσσεται ένα αναλυτικό μοντέλο μέσω του οποίου εξάγονται μέτρα αξιολόγησης του προτύπου. Το μοντέλο επαληθεύεται μέσω προσομοίωσης στην πλατφόρμα OPNET, όπου και αποδεικνύεται η ακρίβειά του. Στην Ενότητα 5.3 παρουσιάζεται το σχήμα δυο καναλιών. Εν συνεχεία επεκτείνεται το μοντέλο της Ενότητας 5.2, για την εξαγωγή αναλυτικών μέτρων αξιολόγησης του νέου προτεινόμενου σχήματος, το οποίο επαληθεύεται και αυτό μέσω προσομοίωσης στο OPNET. Στην Ενότητα 5.4 πραγματοποιείται η αξιολόγηση επίδοσης των δυο προτεινόμενων σχημάτων η οποία έχει συγκριτικό χαρακτήρα βασισμένο σε δυο ξεχωριστά σενάρια. Τέλος, στην Ενότητα 5.5 πραγματοποιείται μια σύντομη ανασκόπηση και παρουσιάζονται συμπεράσματα όσον αφορά την όλη εργασία πάνω στα WSNs.

5.2 Σχεδιασμός και μοντελοποίηση σχήματος επικοινωνίας ενός καναλιού

Στη συγκεκριμένη ενότητα προτείνεται και μοντελοποιείται ένα σχήμα επικοινωνίας μεταξύ των συντονιστών ενός τυπικού WSN. Αρχικά παρουσιάζεται το υπόψη σχήμα, στη συνέχεια μοντελοποιείται μέσω μαθηματικής ανάλυσης και τέλος γίνεται επαλήθευση του μοντέλου μέσω προσομοίωσης.

Ας θεωρήσουμε, λοιπόν, το δίκτυο που φαίνεται στο Σχήμα 5.1.



Σχήμα 5.1: Τυπικό δίκτυο αισθητήρων-συντονιστών (WSN)

Στο συγκεκριμένο δίκτυο υπάρχει ένας αριθμός από αισθητήρες οι οποίοι απεικονίζονται με μικρές κουκίδες, και ένας μικρότερος αριθμός από συντονιστές οι οποίοι απεικονίζονται με τετράγωνα στίγματα. σύμφωνα με το προτεινόμενο σχήμα, οι αισθητήρες ομαδοποιούνται κατά συστάδες. Για κάθε συστάδα υπάρχει ένας υπεύθυνος συντονιστής ο οποίος συντονίζει την επικοινωνία μεταξύ των αισθητήρων της συστάδας του. Σε κάθε συστάδα υπάρχει επικοινωνία μόνο μεταξύ αισθητήρα-συντονιστή και όχι μεταξύ αισθητήρων. Επιπλέον, κάθε αισθητήρας ανήκει μόνο σε μια συστάδα και, κατά συνέπεια, επικοινωνεί μόνο με έναν συντονιστή. Από την άλλη πλευρά, επικοινωνία καθολικά στο δίκτυο λαμβάνει χώρα μόνο μεταξύ των συντονιστών, οι οποίοι επικοινωνούν μεταξύ τους για να συντονίσουν τις ενέργειες που απαιτούνται σε κάθε συστάδα.

Με βάση το παραπάνω προτεινόμενο σχήμα, η διαχείριση χωρίζεται σε τοπική και καθολική. Η τοπική διαχείριση είναι κεντροποιημένη με κέντρο τον υπεύθυνο συντονιστή κάθε συστάδας. Αντίθετα, η καθολική διαχείριση του δικτύου είναι κατακεντρωμένη και λαμβάνει χώρα μεταξύ των συντονιστών του.

Για την υλοποίηση του παραπάνω σχήματος, κάθε συντονιστής απαιτείται να έχει δυο ασύρματες διεπαφές, μια για να επικοινωνεί με τους αισθητήρες της συστάδας του και μια για να επικοινωνεί με τους υπόλοιπους συντονιστές του δικτύου. Έχοντας υπόψη τη συγκεκριμένη δομή, στο Σχήμα 5.1, ο μικρός κύκλος στην πάνω αριστερή γωνία απεικονίζει μια συστάδα. Η έκταση αυτής της περιοχής ταυτίζεται και με την περιοχή ραδιοκάλυψης του υπεύθυνου συντονιστή που αφορά την επικοινωνία μεταξύ αισθητήρων-συντονιστή. Απεναντίας, ο μεγάλος κύκλος απεικονίζει την περιοχή ραδιοκάλυψης του συντονιστή, όσον αφορά την επικοινωνία μεταξύ συντονιστή-συντονιστή. Καθώς οι αισθητήρες έχουν μικρή ισχύ εκπομπής και κατά συνέπεια μικρή ακτίνα ραδιοκάλυψης, η ακτίνα ραδιοκάλυψης του συντονιστή, όσον αφορά την επικοινωνία αισθητήρα-συντονιστή είναι μικρότερη από την ακτίνα ραδιοκάλυψης, όσον αφορά την επικοινωνία συντονιστή-συντονιστή.

Στο παραπάνω σχήμα που παρουσιάστηκε, η διατριβή εστιάζεται στην επικοινωνία μεταξύ των συντονιστών. Όπως ειπώθηκε και στην εισαγωγή, λόγω της κατακεντρωμένης φύσης της συγκεκριμένης επικοινωνίας, το δίκτυο που συνιστούν οι συντονιστές έχει ακαθόριστη διασύνδεση (δίκτυο *ad hoc*). Καθώς, επιπλέον, οι συντονιστές είναι συσκευές με αυξημένες δυνατότητες όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας και την απόσταση ραδιοκάλυψης, το πρότυπο IEEE 802.11 που υιοθετείται στο προτεινόμενο σχήμα θεωρείται μια αρκετά ικανοποιητική λύση.

Για την αξιολόγηση επίδοσης της επικοινωνίας μεταξύ των συντονιστών επικεντρωθήκαμε στην καθυστέρηση μετάδοσης πακέτου. Συγκεκριμένα ορίζονται δυο μέτρα περιγραφής του εν λόγω παράγοντα. Το πρώτο είναι η *καθυστέρηση μετάδοσης*, που ορίζεται ως το χρονικό διάστημα από την αρχή της μετάδοσης ενός πακέτου στο μέσο από το συντονιστή-αποστολέα μέχρι την επιτυχή λήψη του πακέτου από τον επόμενο συντονιστή (που δεν είναι απαραίτητα ο τελικός παραλήπτης του πακέτου). Το δεύτερο μέτρο είναι η *καθυστέρηση στο σύστημα*, που ορίζεται ως ο μέσος χρόνος που απαιτείται για να μεταδοθεί ένα πακέτο από το συντονιστή αποστολέα στο συντονιστή-παραλήπτη, διανύοντας, ενδεχομένως και άλλους ενδιαμέσους συντονιστές. Αρχικά υπολογίζουμε την καθυστέρηση μετάδοσης αγνοώντας το πρόβλημα του κρυφού κόμβου ενώ στη συνέχεια λαμβάνουμε υπόψη και το συγκεκριμένο πρόβλημα, ώστε να βελτιώσουμε την ακρίβεια του μοντέλου. Μέσω του μέτρου της καθυστέρησης μετάδοσης, υπολογίζουμε, τέλος, την καθυστέρηση στο σύστημα.

Ας λάβουμε υπόψη ξανά το δίκτυο που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.1 και ας επικεντρωθούμε στην επικοινωνία μεταξύ των συντονιστών. Για απλοποίηση της ανάλυσης και χωρίς βλάβη της γενικότητας, θα θεωρήσουμε ότι οι συντονιστές είναι σταθεροί και ομοιόμορφα κατακεντρωμένοι γεωγραφικά στο δίκτυο με πυκνότητα ρ . Ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων του καναλιού που αφορά την επικοινωνία μεταξύ των συντονιστών είναι R ενώ η ακτίνα ραδιοκάλυψης του κάθε συντονιστή είναι r . Τονίζεται ότι η συγκεκριμένη ακτίνα ραδιοκάλυψης ισχύει μόνο για την επικοινωνία μεταξύ των συντονιστών, καθώς για την επικοινωνία μεταξύ αισθητήρων-συντονιστών είναι μικρότερη. Ας υποθέσουμε περεταίρω ότι η κίνηση που στέλνεται από κάθε συντονιστή σε όλους τους άλλους ακολουθεί μια γενικευμένη κατανομή με μέση τιμή λ πακέτα/s και το μήκος του ωφέλιμου μέρους πακέτου (payload size) ακολουθεί επίσης μια γενικευμένη κατανομή με μέση τιμή P bits. Αναφορικά με την παραγόμενη κίνηση του κάθε συντονιστή, αυτή αφορά την πληροφορία που συλλέγεται από τους αισθητήρες της συστάδας του και δεν περιλαμβάνει κίνηση που προωθείται εκ μέρους άλλων συντονιστών. Τέλος, στην επικοινωνία *πολλαπλών βημάτων* (*multi-hop*) που εξετάζουμε, ο αριθμός των κόμβων που κάθε πακέτο διανύει προκειμένου να φτάσει στον προορισμό του περιγράφεται μέσω μιας γενικευμένης κατανομής με μέση τιμή h κόμβους.

Στο σημείο αυτό η παραγόμενη κίνηση στο δίκτυο πρέπει να υπολογιστεί λαμβάνοντας υπόψη το φόρτο κίνησης λόγω δρομολόγησης και το φόρτο κίνησης λόγω προώθησης πακέτων εκ μέρους άλλων συντονιστών (*relay traffic*). Όσον αφορά το φόρτο δρομολόγησης πραγματοποιήθηκαν σενάρια προσομοίωσης με πρωτόκολλο δρομολόγησης το AODV (λόγω της καλύτερης επίδοσής του σε δίκτυα IEEE 802.11 [18]). Η κίνηση που οφειλόταν στη δρομολόγηση των πακέτων ήταν μικρότερη από 1Kb/s ανά κόμβο η οποία είναι αμελητέα σε σχέση με τη χωρητικότητα του καναλιού. Μάλιστα, όταν η κίνηση αυτή είναι μικρότερη από 10% του ρυθμού μετάδοσης του καναλιού, σύμφωνα με την ανάλυση του άρθρου [19],

μπορούμε να την αγνοήσουμε. Στη δική μας περίπτωση αυτό γίνεται με μεγάλη ασφάλεια καθώς η κίνηση είναι πολύ μικρότερη του 10% της χωρητικότητας του καναλιού (στη χειρότερη περίπτωση ο ρυθμός μετάδοσης είναι 1Mb/s). Ας σημειωθεί ότι ο φόρτος δρομολόγησης θα παρέμενε μικρός σε σχέση με τη χωρητικότητα του καναλιού ακόμη κι αν χρησιμοποιούταν άλλο πρωτόκολλο αντί για το AODV.

Όσον αφορά τώρα το φόρτο κίνησης λόγω προώθησης πακέτων εκ μέρους άλλων συντονιστών (relay traffic), καθώς η πυκνότητα των συντονιστών είναι σταθερή σε όλη την περιοχή του δικτύου, μπορεί να υποθεθεί ότι όλοι οι συντονιστές δρουν ισοπίθانا ως κόμβοι προωθητές και, συνεπώς, προωθούν σε άλλους συντονιστές την ίδια, κατά μέσο όρο, κίνηση. Παρ' ότι η υπόθεση αυτή δεν ισχύει γενικώς για ένα συγκεκριμένο πακέτο, είναι αποδεκτή όταν μελετάμε μεγάλα δίκτυα σε έκταση, όπου τα προβλήματα ακμών² μπορούν να αγνοηθούν.

5.2.1 Υπολογισμός χρησιμοποίησης

Προχωρούμε τώρα στον υπολογισμό της χρησιμοποίησης (utilization) του καναλιού κατά την επικοινωνία μεταξύ των συντονιστών. Η χρησιμοποίηση ορίζεται ως το ποσοστό του χρόνου κατά το οποίο μεταδίδεται ωφέλιμη πληροφορία στο ασύρματο μέσο. Ας θεωρήσουμε το συντονιστή A του Σχήματος 5.1 ο οποίος παράγει κατά μέσο όρο καθαρή κίνηση (χωρίς να υπολογίζουμε την κίνηση που προωθεί ως ενδιάμεσος κόμβος) λ πακέτα/s. Τα πακέτα της κίνησης αυτής όμως δεν προορίζονται όλα σε γειτονικούς συντονιστές, οπότε κάποια από αυτά απαιτούν να διανύσουν περισσότερους από έναν κόμβους για να φτάσουν στον προορισμό τους. Συνεπώς η πραγματική κίνηση που παράγεται και οφείλεται στο συντονιστή A είναι μεγαλύτερη, αφού πρέπει να συνυπολογιστεί και η κίνηση που προωθούν οι ενδιάμεσοι κόμβοι. Καθώς, όπως ειπώθηκε, κάθε πακέτο απαιτεί κατά μέσο όρο h κόμβους για να φτάσει στον προορισμό του, η παραγόμενη κίνηση στο δίκτυο, που οφείλεται αποκλειστικά στο συντονιστή A, είναι στην πραγματικότητα $\lambda \cdot h$ πακέτα/s. Υποθέτοντας επιπλέον ότι το δίκτυο αποτελείται από M συντονιστές, η συνολική κίνηση που παράγεται από όλους τους συντονιστές είναι $M \cdot \lambda \cdot h$ πακέτα/s. Από την παραπάνω κίνηση, ένα ποσοστό $M\lambda$ αποστέλλεται από τους συντονιστές-αποστολείς ενώ το υπόλοιπο $M\lambda(h-1)$ προωθείται από ενδιάμεσους συντονιστές. Ποιο είναι όμως το ποσό της κίνησης που προωθεί ο κάθε συντονιστής; Ας σημειώσουμε ότι, για μεγάλο αριθμό συντονιστών, καθένας από αυτούς έχει περίπου την ίδια πιθανότητα να δράσει ως ενδιάμεσος κόμβος σε μια επικοινωνία. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι η πυκνότητα συντονιστών είναι ομοιόμορφη σε όλο το δίκτυο, ο αριθμός τους είναι μεγάλος, οπότε αγνοούνται προβλήματα ακμών, και καθένας παράγει την ίδια κίνηση λ . Άρα ο κάθε συντονιστής προωθεί στην ουσία κίνηση ίση με $\frac{1}{M}M\lambda(h-1)$. Εν τέλει, καθένας παράγει στο δίκτυο κίνηση η οποία ισούται με το άθροισμα της δικής του καθαρά κίνησης και της κίνησης που προωθεί εκ μέρους άλλων. Συνεπώς, η πραγματική κίνηση που παράγεται από τον καθένα είναι:

$$\lambda_a = \lambda + \frac{1}{M}M\lambda(h-1) = \lambda h. \quad (5.1)$$

Ας θεωρήσουμε τώρα μια κυψέλη που περιέχει όλους τους συντονιστές που υπάρχουν στην περιοχή ραδιοκάλυψης του συντονιστή A (βλ. Σχήμα 5.1). Προφανώς, η συνολική κίνηση μέσα στην κυψέλη αυτή είναι:

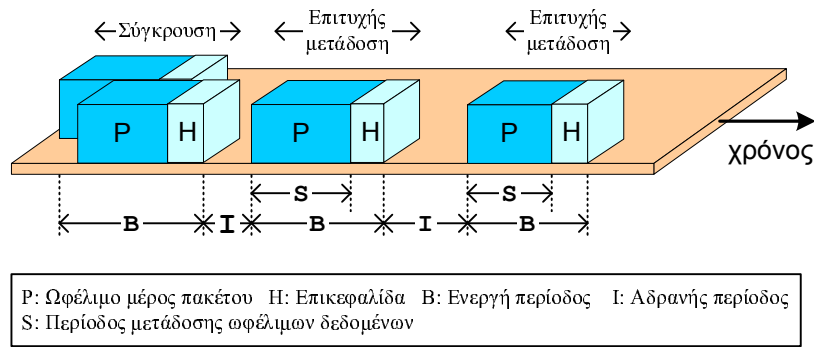
$$g = \lambda_a \rho \pi r^2 = \lambda h \rho \pi r^2. \quad (5.2)$$

Αρχικά θεωρούμε τη συγκεκριμένη κυψέλη σε απομόνωση από το υπόλοιπο δίκτυο ώστε να αγνοήσουμε το πρόβλημα του κρυφού κόμβου. Αργότερα στην ανάλυση η υπόθεση αυτή θα ανααιρεθεί. Με αναφορά στο Σχήμα 5.2, ας ορίσουμε ως S το μέσο χρόνο μετάδοσης ωφέλιμης πληροφορίας στο μέσο, ως B το μέσο διάστημα στο οποίο το κανάλι είναι απασχολημένο (κάποια ή κάποιες μεταδόσεις λαμβάνουν χώρα) και ως I το μέσο διάστημα στο οποίο το μέσο είναι αδρανές (δε λαμβάνει χώρα μετάδοση).

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.2, η χρησιμοποίηση του καναλιού που, όπως ειπώθηκε, ορίζεται ως το ποσοστό του χρόνου κατά το οποίο μεταδίδεται ωφέλιμη πληροφορία στο μέσο είναι [20]:

$$U_{LOS} = \frac{S}{B + I}, \quad (5.3)$$

²Πρόβλημα ακμών ονομάζεται το πρόβλημα όπου η συμπεριφορά του δικτύου αλλάζει στα γεωγραφικά του όρια, λόγω απότομης αλλαγής της γεωγραφικής κατανομής των κόμβων.



Σχήμα 5.2: Μετάδοση πακέτων στο ασύρματο μέσο

όπου U_{LOS} είναι η χρησιμοποίηση του καναλιού αγνοώντας το πρόβλημα του κρυφού κόμβου. Ας ορίσουμε τώρα ως τ τη διάρκεια μιας χρονοθυρίδας (time slot). Επιπλέον, ας είναι p η πιθανότητα να μην έχουμε άφιξη πακέτου σε μια χρονοθυρίδα και συνεπώς $(1-p)$ η πιθανότητα να υπάρχει τουλάχιστο μια άφιξη πακέτου σε μια χρονοθυρίδα. Στην περίπτωση του προτύπου IEEE 802.11 ο χρόνος είναι χωρισμένος σε slots, οπότε έχουμε να κάνουμε με σύστημα διακριτού χρόνου. Η παρατήρηση αυτή μας δίνει τη δυνατότητα να μοντελοποιήσουμε τις αφίξεις πακέτων ως δοκιμές Bernoulli, όπου η πιθανότητα επιτυχίας είναι $(1-p)$. Συνεπώς, ο αριθμός των αδρανών χρονοθυρίδων, ο οποίος ταυτίζεται με τον αριθμό των χρονοθυρίδων (δοκιμών) που χρειάζονται μέχρι την πρώτη άφιξη πακέτου, ακολουθεί τη Γεωμετρική κατανομή $(1-p)p^{n-1}$ με πιθανότητα επιτυχίας $(1-p)$. Από τις ιδιότητες της Γεωμετρικής κατανομής για το μέσο αριθμό δοκιμών Bernoulli που απαιτούνται μέχρι την εμφάνιση της πρώτης επιτυχίας, έχουμε ότι η μέση διάρκεια της αδρανούς περιόδου I (που ισούται με το μέσο αριθμό αδρανών χρονοθυρίδων επί τη διάρκεια της κάθε χρονοθυρίδας) είναι:

$$I = \tau \sum_{n=1}^{\infty} n(1-p)p^{n-1} = \frac{\tau}{1-p}. \quad (5.4)$$

Όσον αφορά τώρα την ενεργή περίοδο B , ας ορίσουμε ως p_s την πιθανότητα η μετάδοση ενός πακέτου να είναι επιτυχής. Η πιθανότητα αυτή ισούται με τη δεσμευμένη πιθανότητα μια ακριβώς άφιξη πακέτου να συμβεί σε μια χρονοθυρίδα, δεδομένου ότι τουλάχιστο μια άφιξη πακέτου έχει συμβεί στη συγκεκριμένη χρονοθυρίδα. Όπως ειπώθηκε προηγουμένως, η πιθανότητα να υπάρχει τουλάχιστο μια άφιξη πακέτου σε μια χρονοθυρίδα είναι $(1-p)$. Ορίζοντας ως p_1 την πιθανότητα μια ακριβώς άφιξη πακέτου να συμβεί σε μια χρονοθυρίδα, η πιθανότητα p_s η μετάδοση ενός πακέτου να είναι επιτυχής ισούται με:

$$p_s = \frac{p_1}{1-p}. \quad (5.5)$$

Ορίζουμε τώρα ως t_B το μέσο αριθμό συνεχόμενων χρονοθυρίδων σε καθεμιά από τις οποίες λαμβάνει χώρα τουλάχιστο μια άφιξη πακέτου, χαρακτηριζόμενες ως ενεργές χρονοθυρίδες. Ο αριθμός των χρονοθυρίδων αυτών μπορεί να μοντελοποιηθεί με δοκιμές Bernoulli, όπου η πιθανότητα επιτυχίας είναι p . Πράγματι, ως επιτυχία στη συγκεκριμένη περίπτωση ορίζουμε το γεγονός να μην έχουμε άφιξη πακέτου. Επομένως ο αριθμός των ενεργών χρονοθυρίδων ισούται με τον αριθμό των δοκιμών Bernoulli μέχρι να εμφανιστεί η πρώτη αδρανής χρονοθυρίδα (επιτυχία). Από τις ιδιότητες της Γεωμετρικής κατανομής για το μέσο αριθμό δοκιμών Bernoulli που απαιτούνται μέχρι την εμφάνιση της πρώτης επιτυχίας, έχουμε ότι ο μέσος αριθμός συνεχόμενων ενεργών χρονοθυρίδων ισούται με:

$$t_B = \sum_{n=1}^{\infty} np(1-p)^{n-1} = \frac{1}{p}. \quad (5.6)$$

Καθώς τώρα η πιθανότητα επιτυχίας μιας μετάδοσης είναι p_s , από τις παραπάνω t_B χρονοθυρίδες υπάρχουν $t_B p_s$ χρονοθυρίδες όπου η μετάδοση που λαμβάνει χώρα είναι επιτυχής και $t_B(1-p_s)$ όπου έχουμε σύγκρουση πακέτων. Ας ορίσουμε τους χρόνους T_s και T_c ως τις διάρκειες μιας επιτυχούς μετάδοσης

και μιας σύγκρουσης πακέτου αντίστοιχα. Τονίζεται ότι οι χρόνοι αυτοί δεν έχουν καμιά σχέση με την καθυστέρηση μετάδοσης που μελετάμε. Ο χρόνος επιτυχούς μετάδοσης είναι ο χρόνος που απαιτείται για να μεταδοθεί στο μέσο ένα πακέτο και η σχετική επιβεβαίωσή του. Ο χρόνος σύγκρουσης είναι ο χρόνος που απαιτείται για να αντιληφθούν οι κόμβοι ότι έχει γίνει σύγκρουση πακέτων. Οι παραπάνω χρόνοι θα υπολογιστούν λεπτομερώς παρακάτω. Δεδομένων των παραπάνω παραμέτρων, οι t_{BP_s} ενεργές χρονοθυρίδες στις οποίες πραγματοποιείται επιτυχής μετάδοση διαρκούν πραγματικό χρόνο $T_s t_{BP_s}$ δευτερόλεπτα, ενώ οι $t_B(1 - p_s)$ ενεργές χρονοθυρίδες όπου έχουμε σύγκρουση πακέτων διαρκούν $T_c t_B(1 - p_s)$ δευτερόλεπτα. Συνεπώς, η ενεργή περίοδος B που ορίζεται με τη μέση διάρκεια του συνεχόμενου αριθμού ενεργών χρονοθυρίδων είναι:

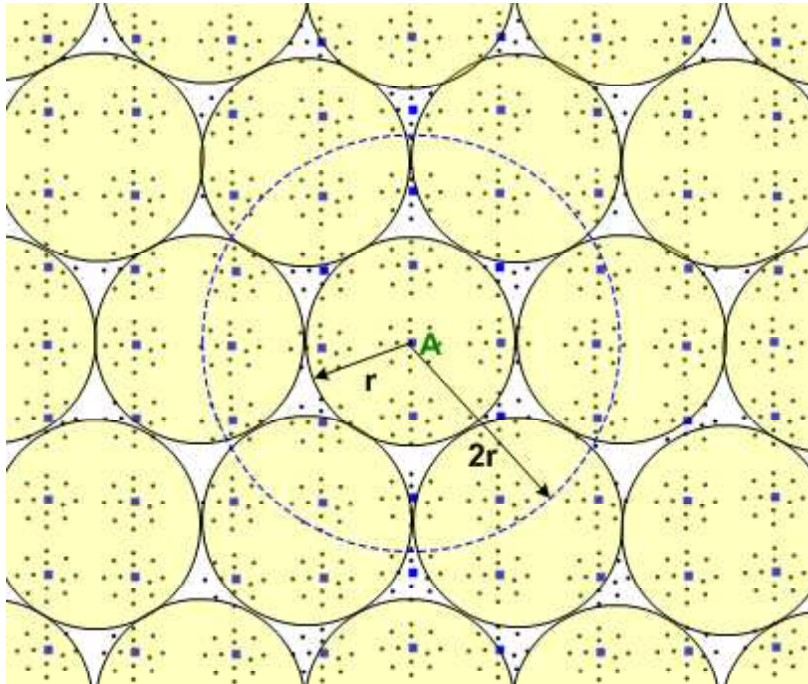
$$B = T_s t_{BP_s} + T_c t_B(1 - p_s) = \frac{T_c + p_s(T_s - T_c)}{p}. \quad (5.7)$$

Τέλος, όσον αφορά την περίοδο S , ας λάβουμε καταρχήν υπόψη ότι ένα πακέτο των P bits που μεταδίδεται σε ένα ασύρματο μέσο με ρυθμό R Kb/s απαιτεί χρόνο $T_p = P/R$. Μετάδοση ωφέλιμης πληροφορίας έχουμε μόνο κατά την επιτυχή μετάδοση πακέτων η οποία λαμβάνει χώρα στην ενεργή περίοδο. Κατά την περίοδο αυτή πραγματοποιούνται επιτυχείς μεταδόσεις σε t_{BP_s} χρονοθυρίδες, σε καθεμιά από τις οποίες μεταδίδεται και ένα πακέτο με ωφέλιμο μήκος P bits που μεταδίδεται σε $T_p = P/R$ δευτερόλεπτα. Συνεπώς, ο μέσος χρόνος κατά τον οποίο μεταδίδεται ωφέλιμη πληροφορία στο μέσο είναι:

$$S = T_p t_{BP_s} = \frac{T_p p_1}{p(1 - p)}. \quad (5.8)$$

Αντικαθιστώντας τις παραμέτρους της εξίσωσης 5.3 με αυτές των εξισώσεων 5.4, 5.7 και 5.8 μπορούμε να υπολογίσουμε τη χρησιμοποίηση του καναλιού αγνοώντας το πρόβλημα του κρυφού κόμβου.

Στο υπόλοιπο της υποενότητας λαμβάνεται υπόψη και το πρόβλημα του κρυφού κόμβου. Προς την κατεύθυνση αυτή δε θεωρούμε πια την κυψέλη του Σχήματος 5.1 σε απομόνωση. Απεναντίας, λαμβάνουμε υπόψη και άλλες παρόμοιες κυψέλες στις οποίες υπάρχουν συντονιστές που επηρεάζουν την επικοινωνία του Α, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.3.



Σχήμα 5.3: Σχηματιζόμενες κυψέλες συντονιστών στο δίκτυο

Κατόπιν του παραπάνω, ας ορίσουμε ως N το πλήθος των κόμβων που μπορούν να επηρεάσουν την επικοινωνία του Α προς τους κόμβους που υπάρχουν στην κυψέλη του Α. Το N λαμβάνεται αρχικά ως

μια αόριστη παράμετρος, αλλά θα υπολογιστεί επακριβώς στη συνέχεια. Η χρησιμοποίηση του καναλιού υπολογίζεται τώρα αθροίζοντας τη χρησιμοποίηση που επιτυγχάνεται ξεχωριστά για κάθε κυψέλη, η οποία πλέον δεν είναι ίδια με αυτή που υπολογίστηκε προηγουμένως. Η χρησιμοποίηση U_{LOS} αντικατοπτρίζει κατά κάποιο τρόπο την πιθανότητα μια μετάδοση του A να είναι επιτυχής λαμβάνοντας υπόψη τους συντονιστές που υπάρχουν μέσα στην κυψέλη του. Με βάση αυτό, η νέα χρησιμοποίηση υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας την παλιά (U_{LOS}) με την πιθανότητα επιτυχίας q μιας μετάδοσης του A λαμβάνοντας υπόψη τους συντονιστές των υπόλοιπων κυψελών. Θεωρούμε ξανά το συντονιστή A ο οποίος έχει ένα πακέτο να μεταδώσει. Για να είναι επιτυχής η μετάδοση του πακέτου πρέπει να ικανοποιούνται ταυτόχρονα οι παρακάτω δυο συνθήκες [21]:

- Για κάθε ξένη κυψέλη- j (όπου j χαρακτηρίζει οποιαδήποτε κυψέλη εκτός από αυτή του A), ο A δεν πρέπει να μεταδώσει κατά τη διάρκεια μετάδοσης από συντονιστή της κυψέλης- j .
- Για κάθε ξένη κυψέλη- j , καμιά μετάδοση δεν πρέπει να συμβεί κατά τη διάρκεια μετάδοσης του A.

Η πρώτη συνθήκη ικανοποιείται με πιθανότητα q_1 η οποία είναι ίση με την πιθανότητα να μην υπάρξει μετάδοση στο μέσο από τους συντονιστές μιας κυψέλης- j . Η συγκεκριμένη πιθανότητα είναι ίση με το ποσοστό του χρόνου στο οποίο το μέσο μένει αδρανές, δηλαδή $q_1 = I/(B + I)$. Καθώς οι κυψέλες είναι πανομοιότυπες μεταξύ τους όσον αφορά τον αριθμό των συντονιστών και την παραγόμενη κίνηση, οι παράμετροι I και B είναι ίδιες για όλες τις κυψέλες και υπολογίστηκαν προηγουμένως.

Η δεύτερη συνθήκη ικανοποιείται με πιθανότητα q_2 που ισούται με την πιθανότητα να μη μεταδοθεί πακέτο για διάρκεια ίση με τη διάρκεια επιτυχούς μετάδοσης του A. Η διάρκεια επιτυχούς μετάδοσης ισούται με T_s δευτερόλεπτα ή T_s/τ χρονοθυρίδες. Δεδομένου ότι η πιθανότητα να μη συμβεί μετάδοση σε μια χρονοθυρίδα είναι p και δεδομένων των ιδιοτήτων της Γεωμετρικής κατανομής, η πιθανότητα καμιά μετάδοση να μη συμβεί σε μια κυψέλη- j για T_s/τ χρονοθυρίδες ισούται με $q_2 = p^{T_s/\tau}$.

Με βάση τα παραπάνω, και γενικεύοντας την πιθανότητα q για όλες τις $(N - 1)$ κυψέλες, έχουμε ότι η πραγματική χρησιμοποίηση για μια συγκεκριμένη κυψέλη ισούται με:

$$U = U_{LOS} \cdot q^{N-1} = U_{LOS} \cdot (q_1 q_2)^{N-1} = \frac{S}{B+I} \left(\frac{I}{B+I} \right)^{N-1} (p^{T_s/\tau})^{N-1} = \frac{S}{(B+I)^N} I^{N-1} p^{(N-1)T_s/\tau}. \quad (5.9)$$

Απομένει τώρα να υπολογίσουμε την παράμετρο N στην παραπάνω σχέση, που είναι το πηλίκο των κόμβων που μπορούν να επηρεάσουν την επικοινωνία του A προς τους κόμβους που υπάρχουν στην κυψέλη του A. Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 5.3, οι κόμβοι που μπορούν να επηρεάσουν την επικοινωνία του A εκτείνονται σε ακτίνα $2r$ γύρω από αυτόν. Πράγματι, οι συντονιστές με τους οποίους επικοινωνεί ο A απευθείας βρίσκονται σε απόσταση το πολύ r από αυτόν. Κόμβοι που επηρεάζουν την επικοινωνία του A είναι αυτοί οι οποίοι μπορούν να επηρεάσουν τη λήψη πακέτου στον A ή στους συντονιστές στους οποίους ο A στέλνει πακέτο. Οι τελευταίοι βρίσκονται σε απόσταση το πολύ r από τους συντονιστές με τους οποίους μπορεί να επικοινωνήσει απευθείας ο A, άρα σε απόσταση το πολύ $2r$ από τον A. Δεδομένου ότι μια κυψέλη έχει έκταση πr^2 , το ζητούμενο πηλίκο ισούται με $N = \pi(2r)^2/\pi r^2 = 4$. Με βάση την τιμή $N = 4$, η εξίσωση 5.9 γίνεται τώρα:

$$U = \frac{S}{(B+I)^4} I^3 p^{3T_s/\tau}. \quad (5.10)$$

Η παραπάνω εξίσωση υπολογίζει τη χρησιμοποίηση που επιτυγχάνει μια τυχαία κυψέλη του δικτύου. Για να υπολογίσουμε τη χρησιμοποίηση όλου του καναλιού πολλαπλασιάζουμε την τιμή του U με την τιμή του N . Η παρατήρηση αυτή γίνεται μόνο αναφορικά, καθώς παρακάτω θα μας χρειαστεί μόνο η χρησιμοποίηση που επιτυγχάνει μια κυψέλη, όπως αυτή υπολογίστηκε στην Εξίσωση 5.10.

5.2.2 Υπολογισμός καθυστέρησης πακέτου

Προχωρώντας τώρα στον υπολογισμό των μέτρων της καθυστέρησης πακέτου, η καθυστέρηση μετάδοσης, όπως αυτή ορίστηκε στην αρχή της ενότητας, μπορεί εύκολα να υπολογιστεί μέσω της χρησιμοποίησης.

Στο σημείο αυτό θα κάνουμε μια παρένθεση για να υπολογίσουμε το μέσο αριθμό επαναμεταδόσεων ενός πακέτου, που θα μας βοηθήσει στην εξαγωγή της καθυστέρησης μετάδοσης. Ας λάβουμε αρχικά υπόψη ότι η χρησιμοποίηση του καναλιού είναι το ποσοστό του χρόνου στο οποίο μεταδίδεται ωφέλιμη πληροφορία. Κανονικοποιώντας το χρόνο με βάση τη διάρκεια μετάδοσης του ωφέλιμου μέρους πακέτου (P/R), η χρησιμοποίηση μπορεί να οριστεί ως το ποσοστό των μεταδόσεων που είναι επιτυχείς στη μονάδα μετάδοσης ωφέλιμου μέρους πακέτου. Με άλλα λόγια ορίζεται ως το γινόμενο της εισερχόμενης κίνησης στη μονάδα μετάδοσης ωφέλιμου μέρους πακέτου επί την πιθανότητα επιτυχούς μετάδοσης. Συνεπώς, αν ορίζουμε ως G την κανονικοποιημένη κίνηση που παράγεται στην κυψέλη ως προς το χρόνο μετάδοσης του ωφέλιμου μέρους πακέτου, ήτοι $G = g(P/R)$, τότε η πιθανότητα επιτυχούς μετάδοσης είναι ίση με U/G . Το αντίστροφο όμως της πιθανότητας επιτυχούς μετάδοσης μας δίνει το μέσο αριθμό επαναμεταδόσεων ενός πακέτου, ήτοι G/U . Εξαιρώντας την τελευταία επιτυχή μετάδοση, ο μέσος αριθμός ανεπιτυχών μεταδόσεων πακέτου ισούται με:

$$m = \frac{G}{U} - 1 = \frac{gP}{UR} - 1, \quad (5.11)$$

όπου g είναι η προσφερόμενη κίνηση στην κυψέλη και ορίστηκε στην Εξίσωση 5.2. Επιστρέφοντας στην καθυστέρηση μετάδοσης, αυτή είναι ίση με το χρόνο T_s που απαιτείται για την επιτυχή μετάδοση του πακέτου συν το χρόνο που απαιτείται για όλες τις ανεπιτυχείς μεταδόσεις του. Ο δεύτερος όρος είναι ίσος με τη μέση διάρκεια μιας σύγκρουσης (χρόνος backoff συν τη διάρκεια T_c μιας σύγκρουσης συν το χρόνο $\bar{F}$ που ο backoff counter παγώνει λόγω μεταδόσεων άλλων κόμβων) επί τον αριθμό m των ανεπιτυχών μεταδόσεων. Δηλαδή:

$$d_m = m(T_c + \tau \cdot \bar{X} + \bar{F}) + T_s, \quad (5.12)$$

όπου d_m είναι η καθυστέρηση μετάδοσης και $\bar{X}$ είναι η μέση διάρκεια του διαστήματος backoff σε χρονοθυρίδες. Για το χρόνο $\bar{X}$, ας σημειωθεί ότι αριθμός χρονοθυρίδων που απαιτούνται κατά τη διαδικασία backoff μετά από μια αποτυχημένη μετάδοση είναι ομοιόμορφα κατανεμημένος μεταξύ 1 και του contention window. Άρα ο μέσος αριθμός αριθμός χρονοθυρίδων που απαιτούνται κατά τη διαδικασία backoff μετά από μια αποτυχημένη μετάδοση ισούται με το μισό του εκάστοτε contention window. Λαμβάνοντας τώρα το μέσο όρο για όλες τις ανεπιτυχείς μεταδόσεις και υποθέτοντας συνθήκες πεπερασμένου φόρτου κίνησης, οπότε η διαδικασία backoff δεν εκτελείται πριν την πρώτη μετάδοση, έχουμε για το $\bar{X}$ ότι:

$$\bar{X} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m W_i = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m W 2^{i-1} = \frac{1}{2m} W (2^m - 1), \quad (5.13)$$

όπου W είναι το minimum contention window.

Για το χρόνο $\bar{F}$, θα ανατρέξουμε στην ανάλυση που έγινε στο Κεφάλαιο 4 απ' όπου θα χρησιμοποιήσουμε τρία στοιχεία:

- Ο πομποδέκτης του κάθε κόμβου μπορεί να θεωρηθεί ως ουρά αναμονής G/G/1 με παράγοντα χρησιμοποίησης u (στο Κεφάλαιο 4 ορίστηκε ως ρ και δεν έχει καμιά σχέση με τη χρησιμοποίηση του συστήματος, U , που μελετήσαμε πριν). Ο παράγοντας χρησιμοποίησης ισούται με $u = \lambda_a \cdot d_m$, όπου λ_a είναι η κίνηση που παράγει ένας συντονιστής στην κυψέλη (ορίστηκε στην Εξίσωση 5.1) και d_m είναι η καθυστέρηση μετάδοσης. Ο παράγοντας χρησιμοποίησης u είναι επίσης και η πιθανότητα ένας κόμβος να έχει πακέτο προς μετάδοση στον πομποδέκτη.
- Η πιθανότητα να μηδενιστεί ο backoff counter ενός συντονιστή ισούται με $1/\bar{X}$.
- Η πιθανότητα ένας κόμβος να μεταδώσει ισούται με την πιθανότητα να υπάρχει πακέτο προς μετάδοση και ο backoff counter να μηδενιστεί, δεδομένου ότι υπάρχει πακέτο προς μετάδοση. Η συγκεκριμένη πιθανότητα ισούται με $u/\bar{X}$.

Με βάση τα παραπάνω, αν K είναι ο αριθμός των συντονιστών σε μια κυψέλη τότε σε $\bar{X}$ χρονοθυρίδες όπου ελαττώνεται ο backoff counter ενός συντονιστή, θα συμβούν $K \cdot (u/\bar{X}) \cdot \bar{X} = K \cdot \lambda_a \cdot d_m =$

$g \cdot d_m$ επιπλέον μεταδόσεις, όπου g είναι η συνολική κίνηση που παράγεται στην κυψέλη. Από όλες τις μεταδόσεις αυτές, οι $g \cdot d_m \cdot m/(m+1)$ θα είναι επαναμεταδόσεις, ενώ οι υπόλοιπες $g \cdot d_m \cdot 1/(m+1)$ θα είναι επιτυχείς μεταδόσεις. Σε όλες τις παραπάνω μεταδόσεις ο backoff counter που ελαττώνεται παγώνει για έναν επιπρόσθετο χρόνο ίσο με:

$$\bar{F} = gd_m \frac{1}{m+1} T_s + gd_m \frac{m}{m+1} T_c = gd_m \frac{T_s + mT_c}{m+1}. \quad (5.14)$$

Συνδυάζοντας τώρα τις εξισώσεις 5.11 ως 5.14 έχουμε:

$$\begin{aligned} d_m &= m[T_c + \tau \frac{1}{2} W(2^m - 1) + gd_m \frac{T_s + mT_c}{m+1}] + T_s \Rightarrow \\ d_m &= \frac{m[T_c + \tau W/2(2^m - 1)] + T_s}{1 - gm(T_s + mT_c)/(m+1)} \Rightarrow \\ d_m &= \frac{(\frac{gP}{UR} - 1)[T_c + \tau W/2(2^{\frac{gP}{UR}-1} - 1)] + T_s}{1 - g(\frac{gP}{UR} - 1)(T_s + (\frac{gP}{UR} - 1)T_c)/[(\frac{gP}{UR} - 1) + 1]} \Rightarrow \\ d_m &= \frac{(\frac{gP}{UR} - 1)[T_c + \tau \frac{W}{2}(2^{\frac{gP}{UR}-1} - 1)] + T_s}{1 - (g - \frac{UR}{P})(T_s + (\frac{gP}{UR} - 1)T_c)}, \end{aligned} \quad (5.15)$$

όπου η κίνηση g που παράγεται σε μια κυψέλη ακτίνας r ορίζεται στην Εξίσωση 5.2.

Ας περάσουμε τώρα στον υπολογισμό της καθυστέρησης στο σύστημα. Αγνοώντας την καθυστέρηση που υφίσταται κάθε πακέτο κατά την επεξεργασία του στους ενδιαμέσους κόμβους, η καθυστέρηση στο σύστημα είναι ίση με το άθροισμα των καθυστερήσεων μετάδοσης σε κάθε κόμβο ανάμεσα στον αποστολέα και τον παραλήπτη. Θεωρώντας ένα δίκτυο με αρκετά μεγάλο αριθμό συντονιστών και υποθέτοντας ότι ο αριθμός των συντονιστών που ένα πακέτο διανύει μέχρι να φτάσει στον παραλήπτη ακολουθεί μια γενικευμένη κατανομή με πιθανότητα $p_h[i], i = 1, 2, \dots$, η καθυστέρηση d_{ov} στο σύστημα είναι:

$$d_{ov} = \sum_{i=1}^{\infty} p_h[i](i \cdot d_m) = d_m \sum_{i=1}^{\infty} p_h[i] \cdot i = d_m \cdot h, \quad (5.16)$$

όπου h είναι ο μέσος αριθμός κόμβων που διανύει κάθε πακέτο από τον αποστολέα μέχρι τον παραλήπτη. Το μέτρο της καθυστέρησης στο σύστημα είναι πολύ χρήσιμο για την αξιολόγηση της γενικής επίδοσης του δικτύου σχετικά με την προσφερόμενη κίνηση και τη δομή του, δεδομένου του μέσου αριθμού ενδιαμέσων κόμβων h .

5.2.3 Επαλήθευση του αναλυτικού μοντέλου

Για την επαλήθευση του μοντέλου που αναπτύχθηκε στην παραπάνω υποενότητα πραγματοποιήθηκαν σενάρια προσομοίωσης στο OPNET. Για την επικοινωνία των συντονιστών μεταξύ τους επιλέχθηκε το πρότυπο IEEE 802.11g με προσόμιο εκτεταμένου τύπου (long preamble, που υποστηρίζει τρία ανεξάρτητα κανάλια. Τέλος, ως πρωτόκολλο δρομολόγησης επιλέχθηκε το AODV.

Όσον αφορά την κατανομή που ακολουθεί η παραγόμενη κίνηση λ , αυτή εξαρτάται από διάφορα χαρακτηριστικά, συγκεκριμένα για κάθε δίκτυο, όπως χαρακτηριστικά κίνησης που παράγουν οι αισθητήρες, πρωτόκολλο επικοινωνίας μεταξύ αισθητήρων-συντονιστών, και χαρακτηριστικά της διαδικασίας επεξεργασίας πληροφορίας³. Προκειμένου η περίπτωση που εξετάζουμε να είναι όσο το δυνατό πιο γενική, χρησιμοποιείται η κατανομή Poisson με μέση τιμή λ πακέτα/s, για το χαρακτηρισμό της παραγόμενης κίνησης από τους συντονιστές. Κατά παρόμοιο τρόπο, η συνολική κίνηση που παράγεται από τους συντονιστές μιας κυψέλης ακτίνας r ακολουθεί την κατανομή Poisson με μέση τιμή g πακέτα/s. Επομένως, οι πιθανότητες p και p_1 που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη υποενότητα υπολογίζονται τώρα ως

³Ως επεξεργασία πληροφορίας εννοείται η διαδικασία κατά την οποία ο συντονιστής συλλέγει την παραγόμενη κίνηση από τους αισθητήρες της κυψέλης του, επεξεργάζεται την πληροφορία, προσθέτει τη δική του κίνηση ελέγχου και τελικά προωθεί τη συγκεντρωμένη κίνηση στους άλλους συντονιστές.

ακολουθώς:

$$\begin{aligned} p &= \frac{(g\tau)^0}{0!} e^{-g\tau} = e^{-g\tau}, \\ p_1 &= \frac{(g\tau)^1}{1!} e^{-g\tau} = g\tau e^{-g\tau}. \end{aligned} \quad (5.17)$$

Επιπλέον, το μέγεθος ωφέλιμου πακέτου ακολουθεί την Εκθετική κατανομή με μέση τιμή P bits. Η συγκεκριμένη κατανομή έχει αποδειχθεί εξαιρετικά ικανοποιητική για την περιγραφή μεγέθους πακέτων σε δίκτυα IEEE 802.11 [22]. Με βάση την παραπάνω παραδοχή, οι χρόνοι T_s και T_c μιας επιτυχούς μετάδοσης και μιας σύγκρουσης μπορούν να υπολογιστούν εύκολα συναρτήσει των παραμέτρων του φυσικού επιπέδου του προτύπου, της τιμής του κατωφλίου RTS_{Thr} και της πιθανότητας μετάδοσης με το βασικό μηχανισμό πρόσβασης, p_{bas} . Ο υπολογισμός πραγματοποιήθηκε στην υποενότητα 4.2.1 του Κεφαλαίου 4, μέσω των Εξισώσεων 4.15 ως 4.19. Παρακάτω παρατίθενται απλά οι τύποι, αναπροσαρμοσμένοι για την περίπτωση μιας και μοναδικής κατηγορίας προτεραιότητας, και υποθέτοντας, ομοίως με το συγγραφέα του άρθρου [22], ότι η πιθανότητα να εμπλέκονται παραπάνω από δυο κόμβοι σε μια σύγκρουση είναι απειροελάχιστη (οπότε, στην Εξίσωση 4.19 είναι $K = 2$).

$$\left\{ \begin{array}{l} T_s = p_{bas} T_s^{bas} + (1 - p_{bas}) T_s^{RTS}, \\ T_c = [1 - (1 - p_{bas})^2] T_c^{bas} + (1 - p_{bas})^2 T_c^{RTS}, \\ p_{bas} = 1 - e^{-RTS_{Thr}/P}, \\ T_s^{bas} = (PHY + MAC/R + P/R) + SIFS + (PHY + ACK/R) + DIFS, \\ T_c^{bas} = (PHY + MAC/R + P/R) + DIFS, \\ T_s^{RTS} = (PHY + RTS/R) + SIFS + (PHY + CTS/R) + SIFS + T_s^{bas}, \\ T_c^{RTS} = (PHY + RTS/R) + DIFS. \end{array} \right. \quad (5.18)$$

Τέλος, ο αριθμός των ενδιάμεσων κόμβων που διανύει ένα πακέτο μπορεί να περιγραφεί με τη Γεωμετρική κατανομή, ή ως ένας αριθμός δοκιμών Bernoulli μέχρι να φτάσει το πακέτο στον προορισμό του. Η υπόθεση αυτή αντικατοπτρίζει και το γεγονός ότι σε ένα WSN είναι πιο πιθανό για έναν συντονιστή να επικοινωνεί με γειτονικούς συντονιστές του, παρά με απομακρυσμένους. Πράγματι, κάθε είδους πληροφορία από τους αισθητήρες είναι συνήθως σχετική με μια συγκεκριμένη, περιορισμένη περιοχή, ενώ οι συντονιστικές ενέργειες εξαρτώνται από κριτήρια και πληροφορία που έχει να κάνει με μια συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή. Ας φανταστούμε για παράδειγμα ένα WSN που χρησιμοποιείται για πυρανίχνευση σε έναν δρυμό. Στην περίπτωση αυτή, το μεγαλύτερο ποσοστό της πληροφορίας ανταλλάσσεται μεταξύ γειτονικών συντονιστών που είναι υπεύθυνοι για την ασφάλεια της περιοχής που εκτείνεται γύρω τους και όχι μεταξύ απομακρυσμένων συντονιστών όπου είναι υπεύθυνοι για την ασφάλεια δυο εντελώς ανεξάρτητων περιοχών μεταξύ τους. Με άλλα λόγια, λοιπόν, η πιθανότητα $p_h[i]$ ένας συντονιστής να επικοινωνήσει με κάποιον άλλο που βρίσκεται i κόμβους μακριά ελαττώνεται καθώς ο αριθμός i των κόμβων αυξάνεται, και ακολουθεί τη Γεωμετρική κατανομή με παράμετρο $p_h[1]$. Ο μέσος αριθμός κόμβων h που διανύει ένα πακέτο από την αρχή μέχρι τον προορισμό του είναι τώρα $1/p_h[1]$.

Με βάση τα παραπάνω, στον Πίνακα 5.1 συνοψίζονται όλες οι παράμετροι του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διαδικασία της επαλήθευσής του. Με βάση το σενάριο που διαμορφώνεται διεξήχθησαν αρκετές προσομοιώσεις για διάφορες τιμές του φόρτου κίνησης, προσομοιώνοντας κάθε φορά μια ώρα πραγματικής λειτουργίας του δικτύου.

Στον Πίνακα 5.2 συνοψίζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα από την επαλήθευση του μοντέλου μέσω προσομοίωσης στο OPNET. Να σημειωθεί ότι η παραγόμενη κίνηση αναφέρεται στην παράμετρο λ που είναι η καθαρά παραγόμενη κίνηση από τους συντονιστές, χωρίς να περιλαμβάνεται η κίνηση που προωθούν εκ μέρους άλλων. Η ποσοστιαία διαφορά στις τιμές ορίζεται ως $(OP - MD)/MD$, όπου OP είναι η τιμή του OPNET και MD είναι η τιμή του μοντέλου. Η αρνητική τιμή στην ποσοστιαία διαφορά δηλώνει ότι οι τιμές του μοντέλου προκύπτουν μεγαλύτερες από τις πραγματικές. Όπως φαίνεται, σε όλες τις περιπτώσεις το μοντέλο είναι αρκετά ακριβές.

Παράμετρος	Τιμή
Διάρκεια χρονοθυρίδας (τ)	20 μ s
Διάστημα SIFS	10 μ s
Διάστημα DIFS	50 μ s
Διάρκεια επικεφαλίδας φυσικού επιπέδου (<i>PHY</i>)	192 μ s
Μήκος επικεφαλίδας MAC	272bits
Μήκος ACK	112bits
Μήκος RTS	160bits
Μήκος CTS	112bits
Ρυθμός μετάδοσης (<i>R</i>)	6Mb/s
Κατώφλι RTS	256Bytes
Ωφέλιμο μέγεθος πακέτου (<i>P</i>)	1024Bytes
Minimum contention window (<i>W</i>)	31
Ακτίνα ραδιοκάλυψης συντονιστή (<i>r</i>)	400m
Ακτίνα συστάδας	100m
Πυκνότητα συντονιστών στο δίκτυο (ρ)	3.18x10 ⁻⁵ συντ./m ²
$p_h[1]$	0.8

Πίνακας 5.1: Παράμετροι για την επαλήθευση του μοντέλου ενός καναλιού

Κίνηση (πακ./s)	Μοντέλο (ms)	OPNET (ms)	Διαφορά (%)
1.25	2.66	2.62	-1
2.50	4.54	4.36	-3
3.75	2.31	21.20	-4
5	322.10	303.29	-5

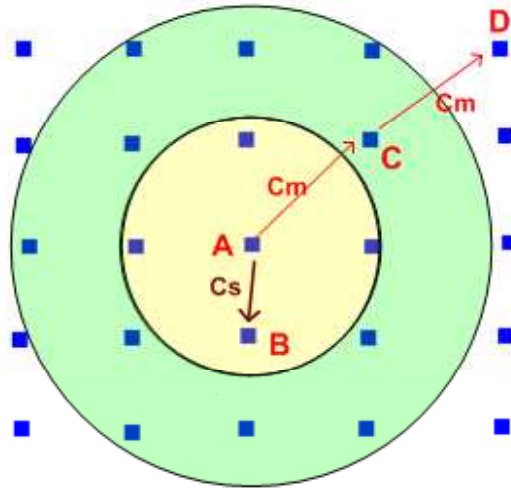
Πίνακας 5.2: Επαλήθευση του μέτρου της καθυστέρησης μετάδοσης - Επικοινωνία με ένα κανάλι

5.3 Σχεδιασμός και μοντελοποίηση σχήματος επικοινωνίας πολλαπλών καναλιών

Προχωρώντας ένα βήμα παραπάνω, στην συγκεκριμένη ενότητα λαμβάνουμε υπόψη όλα τα χαρακτηριστικά της επικοινωνίας μεταξύ των συντονιστών και εκμεταλλευόμαστε τα ανεξάρτητα κανάλια επικοινωνίας που προσφέρει η ζώνη συχνοτήτων ISM ώστε να προτείνουμε ένα αποδοτικό σχήμα πολλαπλών καναλιών. Απεναντίας με το σχήμα που προτάθηκε στην προηγούμενη ενότητα, στο συγκεκριμένο σχήμα έχουμε στη διάθεσή μας περισσότερα του ενός ανεξάρτητα κανάλια που μπορούμε να τα χρησιμοποιήσουμε για τη διοχέτευση ενός ποσού κίνησης, ώστε να αποσυμφορηθεί το βασικό κανάλι. Λογικά, όσα περισσότερα κανάλια επικοινωνίας χρησιμοποιούνται τόσο πιο αποδοτικό είναι το σχήμα, καθώς η χωρητικότητα αυξάνεται. Υπάρχει όμως και ο περιοριστικός παράγοντας ότι για να χρησιμοποιηθούν τα κανάλια επικοινωνίας ανεξάρτητα, πρέπει να υπάρχει και ο ανάλογος αριθμός ραδιο-διεπαφών στους συντονιστές. Συνεπώς, στην περίπτωση, για παράδειγμα, που χρησιμοποιούσαμε το πρότυπο IEEE 802.11a, που προσφέρει δώδεκα ανεξάρτητα κανάλια επικοινωνίας, θα ήταν αδύνατο να τα εκμεταλλευτούμε όλα, καθώς σε κάθε συντονιστή απαιτούνται δώδεκα κεραίες! Η χρυσή τομή βρίσκεται ανάμεσα στον αριθμό ραδιο-διεπαφών που μπορεί να έχει κάθε συσκευή και στην αποδοτικότητα που προσφέρει ο μεγάλος αριθμός ανεξάρτητων καναλιών. Για τη δική μας περίπτωση θα χρησιμοποιήσουμε δυο ανεξάρτητα κανάλια επικοινωνίας, οπότε κάθε συντονιστής απαιτείται να έχει δυο ραδιο-διεπαφές για επικοινωνία μεταξύ των συντονιστών συν άλλη μια για επικοινωνία με τους αισθητήρες της συστάδας του.

Το θέμα που τίθεται τώρα είναι ο βέλτιστος τρόπος που θα βοηθήσει το δεύτερο κανάλι στην αποσυμφόρηση της κίνησης. Για να το πετύχουμε αυτό εξετάζουμε ξανά τις ιδιαιτερότητες της επικοινωνίας μεταξύ των συντονιστών, και εμμένουμε στο γεγονός ότι η επικοινωνία αυτή είναι κατανεμημένη με μεγάλη πιθανότητα επικοινωνίας μεταξύ των γειτονικών συντονιστών. Η μετάφραση της παραπάνω παρατήρησης είναι ότι το μεγαλύτερο ποσοστό κίνησης περιορίζεται μεταξύ των γειτονικών συντονιστών. Η γειτονική αυτή επικοινωνία επηρεάζεται αρνητικά από την ύπαρξη επικοινωνίας μεταξύ απομακρυσμέ-

νων κόμβων, λόγω της κίνησης που προωθείται από συντονιστές που δρουν ως ενδιάμεσοι κόμβοι. Από την άλλη πλευρά, η επικοινωνία μεταξύ απομακρυσμένων συντονιστών επηρεάζεται και αυτή αρνητικά, καθώς τα πακέτα καθυστερούν να μεταδοθούν μεταξύ των ενδιάμεσων κόμβων λόγω της αυξημένης κίνησης που παρατηρείται μεταξύ των γειτονικών συντονιστών. Οι παραπάνω παρατηρήσεις οδηγούν στη σκέψη να διαχωριστεί η επικοινωνία μεταξύ γειτονικών συντονιστών από την επικοινωνία μεταξύ απομακρυσμένων. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας δυο ανεξάρτητα κανάλια επικοινωνίας όπου στο ένα θα μεταδίδονται πακέτα των οποίων ο παραλήπτης είναι ένας γειτονικός κόμβος ενώ στο άλλο θα μεταδίδονται τα πακέτα που απαιτούν περισσότερους του ενός ενδιάμεσους κόμβους μέχρι τον παραλήπτη. Πιο αναλυτικά, ας ρίξουμε μια ματιά στο Σχήμα 5.4 όπου απεικονίζεται η επικοινωνία με βάση το προτεινόμενο σχήμα πολλαπλών καναλιών.



Σχήμα 5.4: Επικοινωνία με χρήση πολλαπλών καναλιών

Σε κάθε συντονιστή ανατίθενται δυο κανάλια επικοινωνίας ονομαζόμενα C_s για επικοινωνία μεταξύ γειτονικών συντονιστών, και C_m για επικοινωνία μεταξύ απομακρυσμένων συντονιστών. Σύμφωνα με το συγκεκριμένο σχήμα, ένας συντονιστής θα χρησιμοποιήσει το κανάλι C_s αν η κίνηση που στέλνει προορίζεται σε έναν γειτονικό του συντονιστή (δεν απαιτεί ενδιάμεσους κόμβους) ενώ θα χρησιμοποιήσει το κανάλι C_m για να στείλει κίνηση που απαιτεί περισσότερους από έναν ενδιάμεσους κόμβους για τη μεταφορά της. Με αναφορά στο Σχήμα 5.4, ο συντονιστής A χρησιμοποιεί το κανάλι C_s για να στείλει πακέτα στο συντονιστή B που βρίσκεται εντός της περιοχής ραδιοκάλυψης του A. Προσοχή τώρα στην επικοινωνία μεταξύ απομακρυσμένων συντονιστών. Ο συντονιστής A θέλει να στείλει πακέτα στο συντονιστή D, ο οποίος βρίσκεται έξω από την περιοχή ραδιοκάλυψης του A. Στη συγκεκριμένη περίπτωση ο A χρησιμοποιεί το κανάλι C_m για να στείλει πακέτα σε κάποιον ενδιάμεσο κόμβο που καθορίζεται από το μηχανισμό δρομολόγησης, έστω το συντονιστή C. Εν συνεχεία ο C βλέπει ότι το πακέτο προορίζεται προς τον κόμβο D που βρίσκεται εντός της περιοχής ραδιοκάλυψής του. Παρ' όλο όμως που ο D είναι γειτονικός κόμβος για το C, ο C χρησιμοποιεί το κανάλι C_m για να στείλει πακέτα προς τον D διότι ο C δεν είναι ο αρχικός αποστολέας του πακέτου αλλά απλά προωθητής. Η χρήση του C_m σε αυτή την περίπτωση γίνεται αφ' ενός διότι η μεταβίβαση της κίνησης από το C_s στο C_m θα προσέθετε φόρτο στο σύστημα και αφ' εταίρου διότι το κανάλι C_s θα υπερφορτωνόταν με κίνηση της οποίας ο αρχικός αποστολέας και παραλήπτης δεν είναι γειτονικοί.

Ένα βασικό πλεονέκτημα που προσφέρει το παραπάνω σχήμα είναι η ρύθμιση του ρυθμού μετάδοσης και της ακτίνας ραδιοκάλυψης με βάση τη φύση της επικοινωνίας. Πράγματι, όταν η επικοινωνία περιορίζεται σε μεγάλο βαθμό μεταξύ των γειτονικών συντονιστών τότε χρειαζόμαστε ένα κανάλι C_s με υψηλό ρυθμό μετάδοσης. Απεναντίας, το κανάλι C_m βολεύει να έχει σχετικά χαμηλό ρυθμό μετάδοσης (αφού η κίνηση μεταξύ απομακρυσμένων συντονιστών είναι χαμηλή) ώστε να αυξηθεί η απόσταση ραδιοκάλυψης. Με αύξηση της απόστασης ραδιοκάλυψης ελαττώνεται ο αριθμός των απαιτούμενων ενδιάμεσων κόμβων οπότε ελαττώνεται και η κίνηση που παράγεται από προώθηση πακέτων. Απεναντίας, όταν ένα μεγαλύτερο ποσοστό της επικοινωνίας ευρύνεται μεταξύ απομακρυσμένων κόμβων τότε αυξάνουμε το ρυθμό μετάδοσης του C_m με μείωση της απόστασης ραδιοκάλυψης.

5.3.1 Υπολογισμός χρησιμοποίησης και καθυστέρησης πακέτου

Προχωράμε τώρα στην αναπροσαρμογή του μοντέλου της Ενότητας 5.2 για τον υπολογισμό της χρησιμοποίησης και της καθυστέρησης πακέτου για τα κανάλια C_s και C_m του σχήματος πολλαπλών καναλιών. Υπενθυμίζεται ότι ο αριθμός των κόμβων που διανύει ένα πακέτο από τον αποστολέα μέχρι τον παραλήπτη ακολουθεί τη Γεωμετρική κατανομή με παράμετρο $p_h[1]$. Συνεπώς ο μέσος αριθμός ενδιάμεσων κόμβων είναι $h = 1/p_h[1]$ και η πιθανότητα να σταλεί ένα πακέτο σε γειτονικό κόμβο είναι $p_h[1]$. Με βάση τα παραπάνω, κάθε συντονιστής θα παράγει στο κανάλι C_s κίνηση ίση με $\lambda p_h[1]$ και στο κανάλι C_m κίνηση ίση με $\lambda(1 - p_h[1])$. Υποθέτουμε ξανά ότι το δίκτυο αποτελείται από M συντονιστές. Καθώς τα πακέτα που παράγονται προς απομακρυσμένους συντονιστές απαιτούν κατά μέσο όρο h κόμβους για να φτάσουν στον προορισμό τους, η συνολική κίνηση στο δίκτυο που παράγεται από όλους τους συντονιστές στο κανάλι C_m και απαιτεί προώθηση είναι $M \cdot \lambda(1 - p_h[1]) \cdot h$ πακέτα/s. Καθώς τώρα κάθε συντονιστής έχει την ίδια πιθανότητα να δράσει ως ενδιάμεσος κόμβος, προωθεί στην ουσία κίνηση ίση με $\frac{1}{M} M \lambda h(1 - p_h[1])$. Προφανώς, η κίνηση που παράγεται στο κανάλι C_m από κάθε συντονιστή είναι $\lambda h(1 - p_h[1])$, η οποία, δεδομένου ότι $h = 1/p_h[1]$, είναι ίση με $\lambda(1/p_h[1] - 1)$.

Ας υποθέσουμε τώρα ότι οι ρυθμοί μετάδοσης και οι αποστάσεις ραδιοκάλυψης για τα κανάλια C_s και C_m είναι R_s, R_m, r_s, r_m αντίστοιχα. Με βάση τη χρήση δυο καναλιών επικοινωνίας ορίζονται τώρα δυο κυψέλες, μια για κάθε κανάλι επικοινωνίας. Η συνολική κίνηση που παράγεται στην κυψέλη που αφορά το κανάλι C_s είναι:

$$g_s = \lambda p_h[1] \rho \pi r_s^2, \quad (5.19)$$

ενώ η συνολική κίνηση που παράγεται στην κυψέλη που αφορά το κανάλι C_m είναι:

$$g_m = \lambda(1/p_h[1] - 1) \rho \pi r_m^2. \quad (5.20)$$

Μπορούμε τώρα εύκολα να υπολογίσουμε τη χρησιμοποίηση και την καθυστέρηση μετάδοσης για τα κανάλια C_s και C_m ξεχωριστά χρησιμοποιώντας τις Εξισώσεις 5.10 και 5.15 της Ενότητας 5.2 και αντικαθιστώντας την παράμετρο g με τη g_s ή τη g_m , την R με την R_s ή την R_m και την r με την r_s ή την r_m αντίστοιχα.

Τέλος, για να υπολογίσουμε την καθυστέρηση πακέτου στο σύστημα, ας σημειωθεί ότι ο αριθμός των κόμβων που απαιτούνται για να φτάσει ένα πακέτο στον προορισμό του είναι ανάλογος της απόστασης ραδιοκάλυψης. Προφανώς, στο σχήμα πολλαπλών καναλιών, ο αριθμός των κόμβων που απαιτούνται για να φτάσει ένα τυχαίο πακέτο στον προορισμό του είναι προσεγγιστικά r_s/r_m φορές μικρότερος από αυτόν του σχήματος ενός καναλιού. Ορίζοντας ως d_m^s και d_m^m την καθυστέρηση μετάδοσης στα κανάλια C_s και C_m αντίστοιχα, και $p_h[i], i = 1, 2, \dots$ την πιθανότητα ένα πακέτο να απαιτεί i κόμβους μέχρι τον προορισμό του, η καθυστέρηση στο σύστημα d_{ov}^m για το σχήμα πολλαπλών καναλιών είναι ίση με:

$$d_{ov}^m = p_h[1]d_m^s + \sum_{i=2}^{\infty} p_h[i] i \frac{r_s}{r_m} d_m^m = p_h[1]d_m^s + \frac{1 - p_h[1]^2}{p_h[1]} d_m^m \frac{r_s}{r_m} \quad (5.21)$$

5.3.2 Επαλήθευση του αναλυτικού μοντέλου

Η επαλήθευση του μοντέλου της προηγούμενης υποενοτήτας πραγματοποιήθηκε στην πλατφόρμα OPNET με τρόπο παρόμοιο με αυτόν της υποενοτήτας 5.2.3. Στην προκειμένη περίπτωση προστέθηκε ένα κανάλι C_m των 2Mb/s με απόσταση ραδιοκάλυψης 500m για επικοινωνία μεταξύ απομακρυσμένων συντονιστών. Στους Πίνακες 5.3 και 5.4 συγκεντρώνονται τα αριθμητικά αποτελέσματα από την επαλήθευση του μοντέλου μέσω προσομοίωσης στο OPNET. Σημειώνεται ξανά ότι η παραγόμενη κίνηση αναφέρεται στην παράμετρο λ που είναι η καθαρά κίνηση από τους συντονιστές, χωρίς να περιλαμβάνεται η κίνηση που προωθούν εκ μέρους άλλων. Η ποσοστιαία διαφορά στις τιμές ορίζεται ως $(OP - MD)/MD$, όπου OP είναι η τιμή του OPNET και MD είναι η τιμή του μοντέλου. Η αρνητική τιμή στην ποσοστιαία διαφορά δηλώνει ότι οι τιμές του μοντέλου προκύπτουν μεγαλύτερες από τις πραγματικές. Όπως φαίνεται, σε όλες τις περιπτώσεις το μοντέλο είναι αρκετά ακριβές. Με βάση τα σενάρια που διαμορφώνονται διεξήχθησαν αρκετές προσομοιώσεις για διάφορες τιμές του φόρτου κίνησης, προσομοιώνοντας κάθε φορά

μια ώρα πραγματικής λειτουργίας του δικτύου. Όπως φαίνεται και από τα αποτελέσματα της ποσοστιαίας διαφοράς, σε όλες τις περιπτώσεις το μοντέλο είναι αρκετά ακριβές.

Κίνηση (πακ./s)	Μοντέλο (ms)	OPNET (ms)	Διαφορά (%)
1.25	2.29	2.27	-1
2.50	2.50	2.43	-2
3.75	2.93	2.76	-5
5	3.46	3.26	-5

Πίνακας 5.3: Επαλήθευση του μέτρου της καθυστέρησης μετάδοσης - Κανάλι C_s

Κίνηση (πακ./s)	Μοντέλο (ms)	OPNET (ms)	Διαφορά (%)
1.25	8.83	8.57	-2
2.50	17.33	16.70	-3
3.75	37.15	37.15	-5
5	87.43	87.43	-6

Πίνακας 5.4: Επαλήθευση του μέτρου της καθυστέρησης μετάδοσης - Κανάλι C_m

5.4 Αξιολόγηση επίδοσης των δυο προτεινόμενων σχημάτων

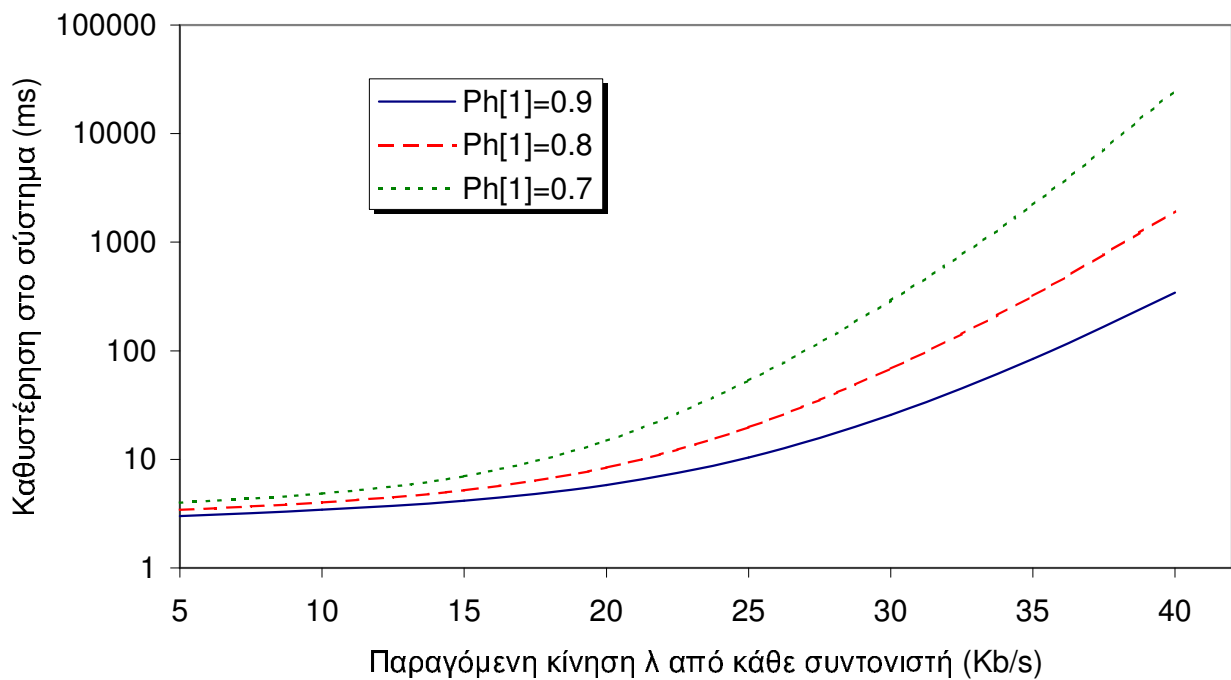
Έχοντας ολοκληρώσει την παρουσίαση και ανάλυση των προτεινόμενων σχημάτων επικοινωνίας, περνάμε στην παρούσα ενότητα όπου πραγματοποιείται συγκριτική αξιολόγηση επίδοσης μεταξύ των δυο προτεινόμενων σχημάτων με χρήση των αναλυτικών μοντέλων. Στο σημείο αυτό είναι εύλογο να αναρωτηθεί κανείς για το αν πράγματι είναι δίκαια ενός τέτοιου είδους σύγκριση, καθώς κάθε σχήμα με πολλά κανάλια είναι αναμενόμενο να έχει καλύτερη επίδοση από ένα σχήμα με ένα κανάλι. Η συγκεκριμένη παρατήρηση είναι σωστή. Προς την κατεύθυνση μιας δίκαιας σύγκρισης, όπως θα φανεί παρακάτω, συγκρίνουμε το σχήμα δυο καναλιών με το σχήμα ενός καναλιού στο οποίο το ένα και μοναδικό αυτό κανάλι έχει ρυθμό μετάδοσης ίσο ή και μεγαλύτερο από το άθροισμα των ρυθμών μετάδοσης των δυο καναλιών του σχήματος πολλαπλών καναλιών.

Για μια ολοκληρωμένη αξιολόγηση επίδοσης οργανώνονται δυο σενάρια που διαφέρουν στο ότι η επικοινωνία είναι λιγότερο και περισσότερο περιορισμένη γεωγραφικά (διαφορετική τιμή της παραμέτρου p_h [1]). Λόγω της διαφοράς αυτής χρησιμοποιούνται και διαφορετικές σχεδιαστικές παράμετροι όπως θα εξηγηθεί παρακάτω. Για κάθε σενάριο λαμβάνονται αριθμητικά αποτελέσματα χρησιμοποιώντας τα αναλυτικά μοντέλα των δυο προηγούμενων ενοτήτων για τα μέτρα της καθυστέρησης μετάδοσης και της καθυστέρησης στο σύστημα.

Όσον αφορά την παρουσίαση των αποτελεσμάτων, ας σημειωθεί ότι, παρ' ότι η παράμετρος λ ορίστηκε σε πακέτα/s, στις γραφικές παραστάσεις που θα ακολουθήσουν παρουσιάζεται σε Kb/s (πολλαπλασιασμένη με το μέγεθος πακέτου που είναι 1KB) ώστε να είναι ανεξάρτητη από το μέγεθος πακέτου και να υπάρχει μια σαφέστερη αντίληψη του φόρτου τηλεπικοινωνιακής κίνησης. Επιπλέον, οι τιμές των μέτρων αξιολόγησης παρουσιάζονται σε λογαριθμική κλίμακα για την αύξηση του εύρους των παρουσιαζόμενων αποτελεσμάτων.

Πριν προχωρήσουμε στη συγκριτική αξιολόγηση επίδοσης, ας ρίξουμε μια ματιά στο Σχήμα 5.5 όπου απεικονίζεται η καθυστέρηση στο σύστημα σε σχέση με την κίνηση λ που παράγει ο κάθε συντονιστής για διάφορες τιμές της παραμέτρου p_h [1], στην περίπτωση του σχήματος με ένα κανάλι. Το δίκτυο που χρησιμοποιήθηκε ήταν το ίδιο με αυτό της υποενότητας 5.2.3 με τις παραμέτρους του να συνοψίζονται στον Πίνακα 5.1.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα, όσο πιο περιορισμένη γεωγραφικά είναι η επικοινωνία μεταξύ των συντονιστών τόσο μικρότερη είναι η καθυστέρηση στο σύστημα, καθώς ο αριθμός των ενδιάμεσων κόμβων που απαιτεί ένα πακέτο μέχρι τον παραλήπτη του ελαττώνεται, οπότε ελαττώνεται και ο φόρτος κίνησης από προώθηση πακέτων. Η διαφορά στην καθυστέρηση είναι μικρή όταν πρόκειται για μικρό φόρτο κίνησης



Σχήμα 5.5: Καθυστέρηση στο σύστημα σε σχέση με την κίνηση λ - Επικοινωνία ενός καναλιού

αλλά αυξάνει εμφανώς όταν πρόκειται για τιμές μεγάλου φόρτου. Αναφορικά, όταν κάθε κόμβος παράγει 40Kb/s κίνησης, τότε η κίνηση που παράγεται σε μια κυψέλη είναι περίπου 640Kb/s. Στην περίπτωση αυτή, όταν η παράμετρος $p_h[1]$ ισούται με 0.9 η επιπλέον κίνηση που παράγεται από προώθηση πακέτων σε κάθε κυψέλη ισούται περίπου 72Kb/s ενώ όταν η παράμετρος $p_h[1]$ ισούται με 0.7 η συγκεκριμένη κίνηση ισούται περίπου με 275Kb/s. Η διαφορά στην παραγόμενη κίνηση είναι παραπάνω από 280%, προκαλώντας μια εξίσου μεγάλη διαφορά στην καθυστέρηση συστήματος ανάμεσα στις δυο περιπτώσεις (342ms έναντι 20s). Από το παραπάνω παράδειγμα φαίνεται ο μεγάλος βαθμός που επηρεάζει η παράμετρος $p_h[1]$ την επίδοση του συστήματος στο σχήμα ενός καναλιού.

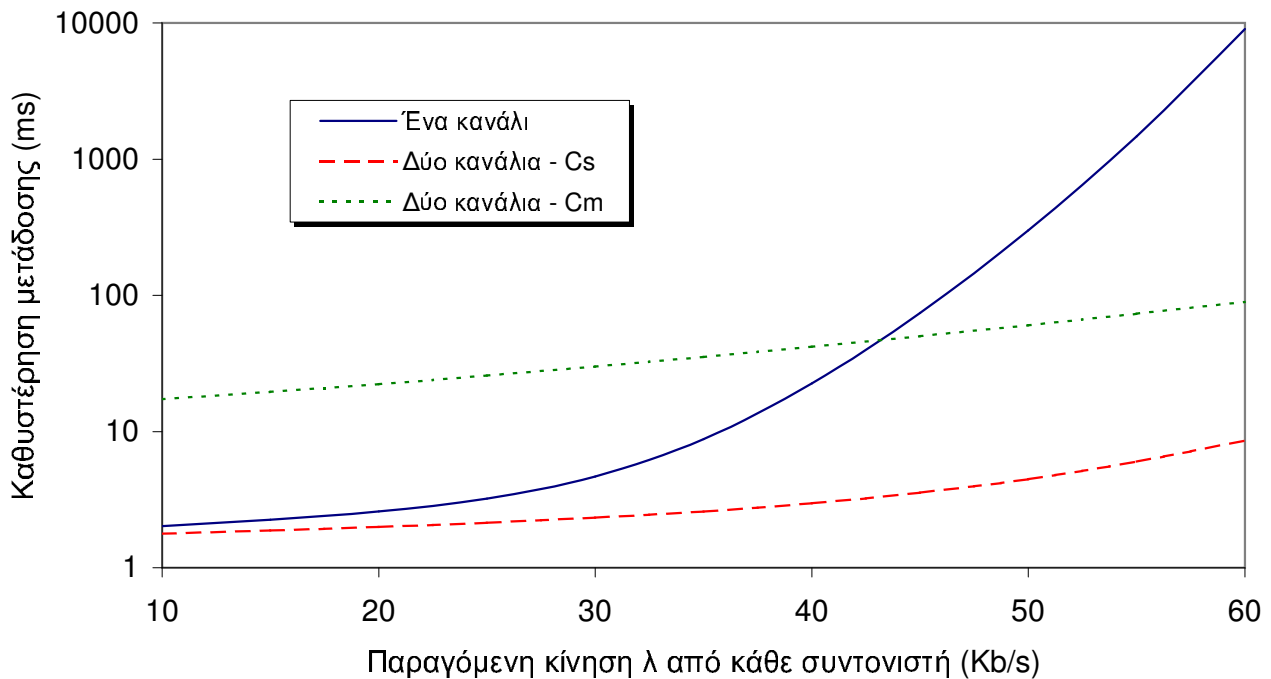
Προχωρώντας τώρα στη συγκριτική αξιολόγηση επίδοσης, ας επαναθεωρήσουμε το δίκτυο της υποενότητας 5.2.3 υποθέτοντας ότι η επικοινωνία περιορίζεται σε μεγάλο βαθμό μεταξύ των συντονιστών, έτσι ώστε η παράμετρος $p_h[1]$ να είναι 0.9. Καθώς η παράμετρος $p_h[1]$ είναι τόσο μεγάλη θεωρούμε ένα κανάλι C_s με ρυθμό 6Mb/s και ένα κανάλι C_m με πολύ μικρότερο ρυθμό, 2Mb/s. Για να γίνει μια δίκαια σύγκριση μεταξύ των δυο προτεινόμενων σχημάτων επικοινωνίας, υποθέτουμε ότι για το σχήμα ενός καναλιού, το ένα και μοναδικό κανάλι έχει ρυθμό 9Mb/s που είναι μεγαλύτερος από το άθροισμα των ρυθμών των δυο καναλιών του σχήματος πολλαπλών καναλιών. Στη δεύτερη στήλη του Πίνακα 5.5 συνοψίζονται οι παράμετροι για το συγκεκριμένο σενάριο αξιολόγησης.

Στο Σχήμα 5.6 απεικονίζεται η καθυστέρηση μετάδοσης σε σχέση με το ρυθμό γέννησης πακέτων σε κάθε συντονιστή. Τα αποτελέσματα αφορούν το σχήμα ενός καναλιού (χαρακτηριζόμενο στο Σχήμα 5.6 ως 'ένα κανάλι'), και το σχήμα επικοινωνίας δυο καναλιών όπου απεικονίζεται η καθυστέρηση μετάδοσης σε κάθε κανάλι ξεχωριστά (χαρακτηριζόμενα στο Σχήμα 5.6 ως 'δυο κανάλια - C_s και 'δυο κανάλια - C_m ').

Όπως μπορεί κανείς να παρατηρήσει, η καθυστέρηση μετάδοσης στο κανάλι C_s (σχήμα δυο καναλιών) είναι πολύ μικρότερη από την καθυστέρηση μετάδοσης στο σχήμα ενός καναλιού. Πράγματι, ενώ για χαμηλή κίνηση τα αποτελέσματα είναι παραπλήσια, όταν η κίνηση αυξάνεται, τα αποτελέσματα διαφέρουν ριζικά. Ενδεικτικά, για κίνηση 50Kb/s η καθυστέρηση μετάδοσης στο κανάλι C_s στο το σχήμα με δυο κανάλια είναι 4.5ms ενώ στο σχήμα επικοινωνίας με ένα κανάλι είναι 302ms. Από την άλλη πλευρά, η καθυστέρηση μετάδοσης στο κανάλι C_m είναι μεγαλύτερη από αυτή που παρουσιάζεται στο σχήμα ενός καναλιού. Η αιτία είναι η χωρητικότητα του καναλιού C_m η οποία δε μπορεί να αντέξει την κίνηση που προορίζεται σε απομακρυσμένους συντονιστές. Μετά από ένα σημείο όμως η καθυστέρηση μετάδοσης στο κανάλι C_m είναι μικρότερη από αυτή που παρουσιάζεται στο σχήμα ενός καναλιού. Αυτό είναι απόλυτα

Παράμετρος	Σενάριο 1	Σενάριο 2
Διάρκεια χρονοθυρίδας (τ)	20 μ s	20 μ s
Διάστημα SIFS	10 μ s	10 μ s
Διάστημα DIFS	50 μ s	50 μ s
Διάρκεια επικεφαλίδας φυσικού επιπέδου (<i>PHY</i>)	192 μ s	192 μ s
Μήκος επικεφαλίδας MAC	272bits	272bits
Μήκος ACK	112bits	112bits
Μήκος RTS	160bits	160bits
Μήκος CTS	112bits	112bits
Ρυθμός μετάδοσης καναλιού C_s (R_s)	6Mb/s	6Mb/s
Ρυθμός μετάδοσης καναλιού C_m (R_m)	2Mb/s	6Mb/s
Ρυθμός μετάδοσης για το σχήμα ενός καναλιού (R)	9Mb/s	12Mb/s
Κατώφλι RTS	256Bytes	256Bytes
Ωφέλιμο μέγεθος πακέτου (P)	1024Bytes	1024Bytes
Minimum contention window (W)	31	31
Ακτίνα ραδιοκάλυψης συντονιστή για το C_s (r_s)	400m	400m
Ακτίνα ραδιοκάλυψης συντονιστή για το C_m (r_m)	500m	400m
Ακτίνα ραδιοκάλυψης συντονιστή για το σχήμα ενός καναλιού (r)	300m	250m
Ακτίνα συστάδας	100m	100m
Πυκνότητα συντονιστών στο δίκτυο (ρ) (συντονιστές/ m^2)	3.18×10^{-5}	3.18×10^{-5}
$p_h[1]$	0.9	0.7

Πίνακας 5.5: Παράμετροι για την επαλήθευση του μοντέλου ενός καναλιού

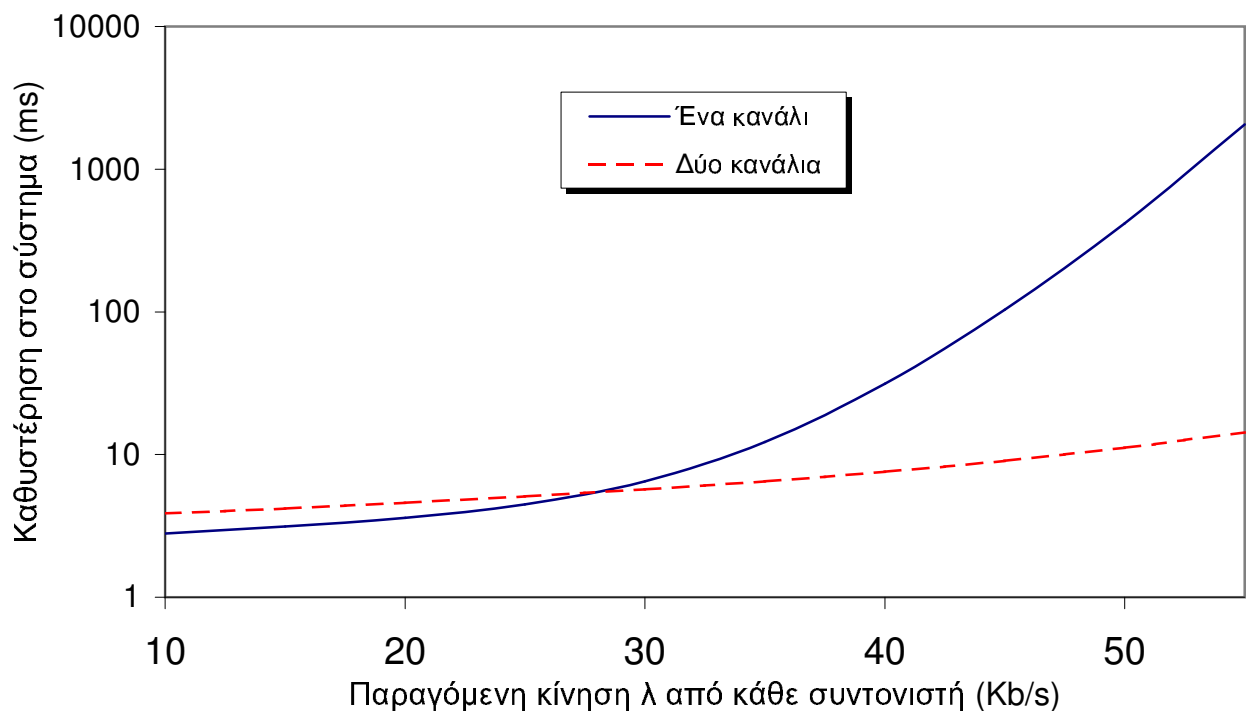


Σχήμα 5.6: Καθυστερήση μετάδοσης σε σχέση με την κίνηση λ - Σενάριο 1

λογικό καθώς κατά την επικοινωνία με ένα κανάλι, η αύξηση της προσφερόμενης κίνησης επηρεάζει και των δυο ειδών τις επικοινωνίες (μεταξύ απομακρυσμένων και μεταξύ γειτονικών συντονιστών). Συνεπώς, όσο η κίνηση αυξάνεται στο κανάλι των 9Mb/s τόσο μεγαλύτερη είναι η καθυστέρηση των πακέτων, είτε πρόκειται για πακέτα που προορίζονται σε γειτονικούς συντονιστές είτε για πακέτα που προορίζονται σε απομακρυσμένους. Στο σχήμα δυο καναλιών όμως, η αύξηση της κίνησης στο κανάλι C_m δεν είναι δραματική καθώς στο συγκεκριμένο κανάλι προορίζεται μόνο το 10% της κίνησης. Με άλλα λόγια, στο σχήμα ενός καναλιού, το οποίο εξυπηρετεί το 100% της προσφερόμενης κίνησης, μια αύξηση από 30Kb/s σε 50Kb/s σημαίνει πράγματι μια αύξηση 20Kb/s. Στο σχήμα δυο καναλιών όμως, που εξυπηρετείται το 10% της προσφερόμενης κίνησης ($p_h[1] = 0.9$), μια αύξηση από 30Kb/s σε 50Kb/s σημαίνει στην πραγματικότητα αύξηση ίση με $20\text{Kb/s} \times 10\% = 2.1\text{Kb/s}$ (βλ. Εξίσωση 5.20), επομένως η καθυστέρηση μετάδοσης δεν αυξάνεται δραματικά.

Συνοψίζοντας λοιπόν, για την επικοινωνία που απευθύνεται σε γειτονικούς κόμβους συνίσταται η χρήση του σχήματος δυο καναλιών. Για την επικοινωνία μεταξύ απομακρυσμένων συντονιστών συνίσταται η χρήση του σχήματος ενός καναλιού για χαμηλή κίνηση και η χρήση του σχήματος δυο καναλιών για υψηλή κίνηση.

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω, δε μπορούμε να αποφανθούμε σε γενικά συμπεράσματα όσον αφορά την καταλληλότητα χρήσης του κάθε σχήματος. Αυτό θα είναι εφικτό αφού εξετάσουμε την επίδοση των δυο σχημάτων μέσω του μέτρου της καθυστέρησης στο σύστημα, που δίνει τη μέση καθυστέρηση ενός τυχαίου πακέτου από το συντονιστή-αποστολέα μέχρι το συντονιστή-λήπτη. Στο Σχήμα 5.7 απεικονίζεται η καθυστέρηση στο σύστημα σε σχέση με το ρυθμό γέννησης πακέτων σε κάθε συντονιστή.



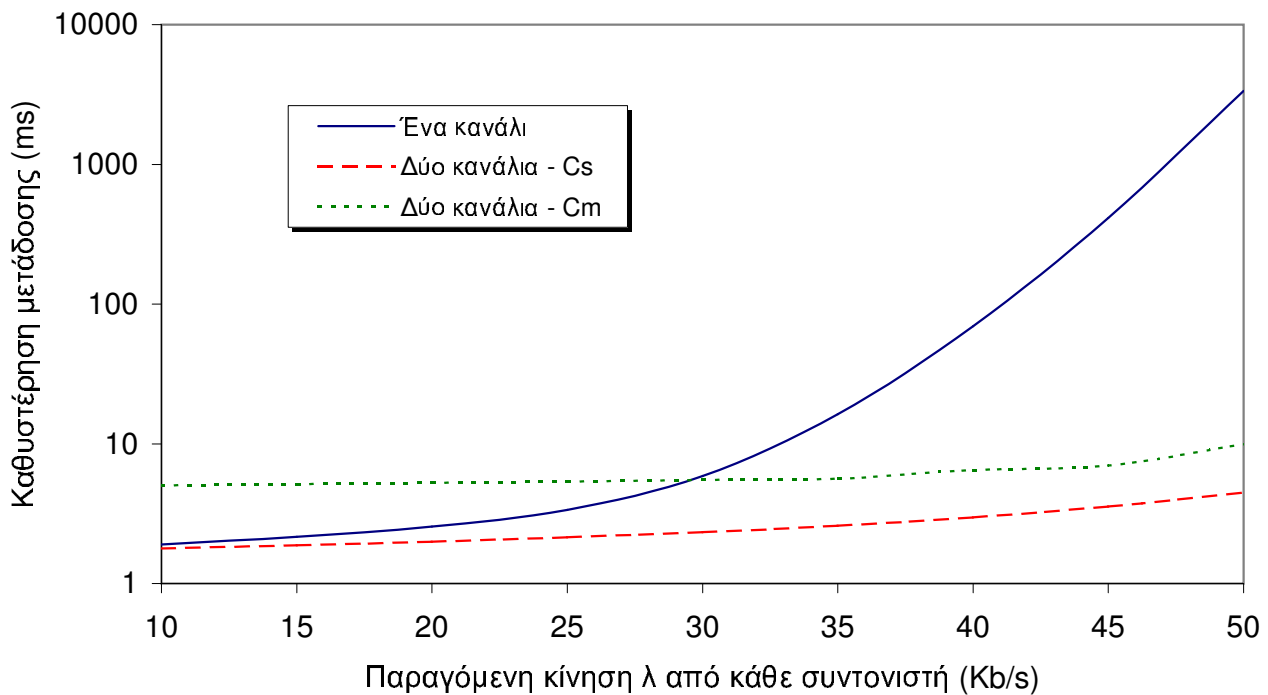
Σχήμα 5.7: Καθυστέρηση στο σύστημα σε σχέση με την κίνηση λ - Σενάριο 1

Όπως φαίνεται, η γενική επίδοση του κάθε σχήματος εξαρτάται από την προσφερόμενη κίνηση. Για παραγόμενη κίνηση μέχρι 25Kb/s είναι κατάλληλο το σχήμα ενός καναλιού (αν και τα αποτελέσματα μεταξύ των δυο σχημάτων επικοινωνίας δε διαφέρουν ριζικά). Αντιθέτως, για παραγόμενη κίνηση πάνω από 25Kb/s το σχήμα δυο καναλιών είναι πιο αποδοτικό. Όσο μάλιστα αυξάνεται η προσφερόμενη κίνηση, η διαφορά μεταξύ των αποτελεσμάτων γίνεται όλο και πιο αισθητή. Για παράδειγμα, με προσφερόμενη κίνηση 50Kb/s η καθυστέρηση στο σύστημα για το σχήμα δυο καναλιών είναι μόνο 11ms ενώ για το σχήμα ενός καναλιού ξεπερνά τα 400ms.

Ας εξετάσουμε τώρα ένα δεύτερο σενάριο όπου η επικοινωνία είναι λιγότερο περιορισμένη γεωγραφικά έτσι ώστε η παράμετρος $p_h[1]$ να ισούται τώρα με 0.7. Καθώς η πιθανότητα επικοινωνίας με απομακρυ-

σμένους κόμβους αυξάνεται, θα αυξάνεται και η προσφερόμενη κίνηση στο κανάλι C_m του σχήματος δυο καναλιών. Για το λόγο αυτό επιλέγουμε το κανάλι C_s με χωρητικότητα 6Mb/s και το κανάλι C_m επίσης με χωρητικότητα 6Mb/s. Για μια δίκαια σύγκριση με το σχήμα ενός καναλιού, επιλέγουμε το ρυθμό μετάδοσης του καναλιού του τελευταίου ίσο με 12Mb/s. Οι υπόλοιπες παράμετροι που χρησιμοποιούνται στα αναλυτικά μοντέλα συνοψίζονται στην τρίτη στήλη του Πίνακα 5.5.

Στο Σχήμα 5.8 απεικονίζεται η καθυστέρηση μετάδοσης σε σχέση με την κίνηση λ . Τα αποτελέσματα αφορούν το σχήμα με ένα κανάλι (χαρακτηριζόμενο στο Σχήμα 5.6 ως 'ένα κανάλι'), και το σχήμα με δυο κανάλια όπου απεικονίζεται η καθυστέρηση μετάδοσης σε κάθε κανάλι ξεχωριστά (χαρακτηριζόμενα στο Σχήμα 5.6 ως 'δυο κανάλια - C_s ' και 'δυο κανάλια - C_m ').



Σχήμα 5.8: Καθυστέρηση μετάδοσης σε σχέση με την κίνηση λ - Σενάριο 2

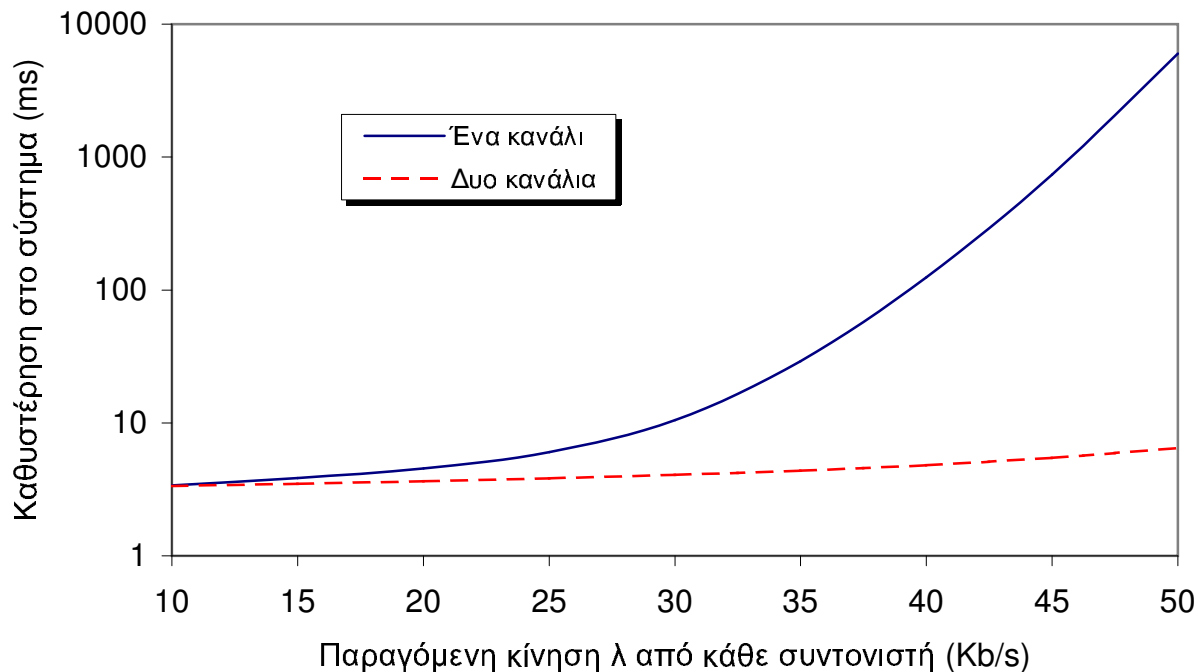
Τα δυο σχήματα συμπεριφέρονται κατά τρόπο παρόμοιο με αυτόν του προηγούμενου σεναρίου. Στη συγκεκριμένη περίπτωση όμως η καθυστέρηση μετάδοσης για το σχήμα ενός καναλιού είναι πιο αυξημένη από την αντίστοιχη στο πρώτο σενάριο. Πράγματι, για προσφερόμενη κίνηση ίση με 40Kb/s, η καθυστέρηση μετάδοσης στο πρώτο σενάριο είναι ίση με 22Kb/s ενώ στο δεύτερο σενάριο είναι ίση με 69Kb/s. Ο λόγος είναι προφανώς διότι η επικοινωνία τώρα δεν είναι τόσο περιορισμένη γεωγραφικά καθώς η παράμετρος $p_h[1]$ είναι ίση με 0.7 αντί για 0.9. Η αλλαγή αυτή δημιουργεί μια επιπλέον κίνηση προώθησης πακέτων στο μέσο. Αναφορικά, για προσφερόμενη κίνηση 40Kb/s, η επιπλέον κίνηση που παράγει κάθε συντονιστής από προώθηση πακέτων είναι 4.44Kb/s για το πρώτο σενάριο και 17.14Kb/s για το δεύτερο (βλ. Εξ. 5.1). Η επιπλέον αυτή κίνηση στο δίκτυο αυξάνει επίσης και την καθυστέρηση μετάδοσης των πακέτων.

Από την άλλη πλευρά, η καθυστέρηση μετάδοσης στο κανάλι C_s είναι τώρα μικρότερη από την αντίστοιχη στο σενάριο 1. Η διαφορά αυτή είναι λογική καθώς έχουμε τώρα λιγότερη κίνηση η οποία προορίζεται σε γειτονικούς συντονιστές. Τέλος, ενώ θα περιμέναμε η καθυστέρηση μετάδοσης στο κανάλι C_m να είναι μεγαλύτερη από αυτή του σεναρίου 1, είναι στην πραγματικότητα μικρότερη διότι αυξήθηκε η χωρητικότητα του καναλιού από 2Mb/s σε 6Mb/s.

Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε ότι για παραγόμενη κίνηση μέχρι 30Kb/s είναι κατάλληλο το σχήμα ενός καναλιού. Αντιθέτως, για παραγόμενη κίνηση πάνω από 30Kb/s το σχήμα δυο καναλιών είναι πιο αποδοτικό. Όσο μάλιστα αυξάνεται η προσφερόμενη κίνηση, η διαφορά μεταξύ των αποτελεσμάτων γίνεται όλο και πιο αισθητή.

Ας εξετάσουμε τώρα το μέτρο της καθυστέρησης στο σύστημα ώστε να εξάγουμε συμπεράσματα για την

καταλληλότητα του κάθε σχήματος, σε γενικές γραμμές. Στο Σχήμα 5.9 απεικονίζεται η καθυστέρηση στο σύστημα σε σχέση με το ρυθμό γέννησης πακέτων σε κάθε συντονιστή.



Σχήμα 5.9: Καθυστέρηση στο σύστημα σε σχέση με την κίνηση λ - Σενάριο 2

Όπως φαίνεται στην προκειμένη περίπτωση, το σχήμα δυο καναλιών φαίνεται πιο κατάλληλο για χρήση, ανεξάρτητα από την προσφερόμενη κίνηση. Επιπλέον, η καθυστέρηση στο σύστημα για το σχήμα ενός καναλιού είναι τώρα αρκετά μεγαλύτερη από την αντίστοιχη στο σενάριο 1, λόγω της κίνησης που προωθείται από κάθε συντονιστή αλλά και λόγω του μεγαλύτερου αριθμού ενδιάμεσων κόμβων που διανύει ένα τυχαίο πακέτο. Αναφορικά, για προσφερόμενη κίνηση 40Kb/s, η καθυστέρηση στο σύστημα για το πρώτο σενάριο είναι ίση με 31ms ενώ στο δεύτερο σενάριο είναι ίση με 124ms. Θα περιμέναμε λογικά να γίνεται κάτι ανάλογο και στο σχήμα δυο καναλιών. Στην πραγματικότητα όμως συμβαίνει το αντίθετο, καθώς η καθυστέρηση στο σύστημα στο δεύτερο σενάριο είναι μικρότερη από αυτή στο πρώτο. Αυτό εξηγείται αν λάβουμε υπόψη ότι διαθέσαμε ένα κανάλι C_m των 6Mb/s, ικανό να αντέξει την αυξημένη κίνηση που λαμβάνει χώρα μεταξύ απομακρυσμένων συντονιστών. Επομένως, ακόμη κι αν η κίνηση που προωθείται μέσω των ενδιάμεσων κόμβων αυξάνεται, το κανάλι C_m μπορεί να την αντέξει, κρατώντας έτσι το στατιστικό μέσο όρο της καθυστέρησης από τον αποστολέα μέχρι τον παραλήπτη μικρό.

Κλείνοντας την παρούσα ενότητα θα συνοψίσουμε τονίζοντας ότι η καταλληλότητα χρήσης του κάθε σχήματος δεν είναι κανόνας αλλά εξαρτάται από τις σχεδιαστικές παραμέτρους του δικτύου και την προσφερόμενη κίνηση. Σε γενικότερες γραμμές το σχήμα δυο καναλιών συμπεριφέρεται καλύτερα, ιδίως σε συνθήκες αυξημένης κίνησης.

5.5 Σύνοψη

Κλείνοντας το παρόν κεφάλαιο, θα κάνουμε μια σύντομη ανασκόπηση της εργασίας που πραγματοποιήθηκε και θα αναφέρουμε επιγραμματικά τα συμπεράσματα που προέκυψαν.

Η ανάπτυξη των τηλεπικοινωνιών και της ηλεκτρονικής κατέστησαν δυνατή τη δημιουργία των WSNs, που είναι μια εξέλιξη των δικτύων αισθητήρων. Αν και τα συγκεκριμένα δίκτυα άρχισαν να αναπτύσσονται πολύ πρόσφατα, αναμένεται να διαδραματίσουν καταληκτικό ρόλο στους χώρους που έχουν σχέση με την έννοια της κλασσικής συσκευής αισθητήρα.

Οι κόμβοι των εν λόγω δικτύων χωρίζονται σε αισθητήρες και συντονιστές ενώ η επικοινωνία τους μπορεί

να είναι κεντροποιημένη ή κατανεμημένη. Συνδυασμοί των ειδών επικοινωνίας για τα δυο είδη κόμβων που υπάρχουν στο δίκτυο δίνουν τα διάφορα σχήματα επικοινωνίας.

Στο παρόν κεφάλαιο, στην προσπάθεια εφαρμογής του προτύπου IEEE 802.11 στα WSNs, προτάθηκαν δυο σχήματα που αφορούν την κατανεμημένη επικοινωνία μεταξύ των συντονιστών και χρησιμοποιούν ένα και δυο κανάλια μετάδοσης δεδομένων αντίστοιχα. Από τη συγκριτική αξιολόγηση επίδοσης που πραγματοποιήθηκε, προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Ο φόρτος κίνησης που προέρχεται από προώθηση πακέτων σε απομακρυσμένους κόμβους είναι ένας καθοριστικός παράγοντας στην επίδοση του δικτύου.
- Το σχήμα δυο καναλιών είναι γενικώς πιο ευέλικτο, καθώς δίνει τη δυνατότητα της ρύθμισης του ρυθμού μετάδοσης του κάθε καναλιού ξεχωριστά, ανάλογα με το πόσο περιορισμένη γεωγραφικά είναι η ανταλλαγή της πληροφορίας.
- Για την κίνηση που απευθύνεται σε γειτονικούς συντονιστές, το σχήμα δυο καναλιών αποδεικνύεται πιο αποδοτικό σε όλες τις περιπτώσεις.
- Για την κίνηση που απευθύνεται σε απομακρυσμένους συντονιστές, το σχήμα ενός καναλιού αποδεικνύεται πιο αποδοτικό μέχρι ένα σημείο φόρτου κίνησης, ενώ σε περαιτέρω αύξηση της κίνησης αποδεικνύεται πιο αποδοτικό το σχήμα δυο καναλιών.
- Αξιολογώντας την επίδοση του δικτύου σε γενικές γραμμές, η επίδοση του σχήματος δυο καναλιών είναι καλύτερη.

Τέλος, παρά τα παραπάνω ειδικά συμπεράσματα, η καταλληλότητα χρήσης του κάθε σχήματος δεν είναι κανόνας αλλά εξαρτάται από τις σχεδιαστικές παραμέτρους του δικτύου και την προσφερόμενη κίνηση. Συνεπώς, η τακτική που θα πρέπει να ακολουθεί ο σχεδιαστής του WSN πρέπει να είναι η ακόλουθη:

- Καθορίζεται ο φόρτος κίνησης, ο μέσος αριθμός ενδιαμέσων κόμβων h , που χαρακτηρίζει τη γεωγραφική ευρύτητα της επικοινωνίας, και ο αριθμός των κόμβων στο δίκτυο.
- Επιλέγονται εμπειρικά ρυθμοί μετάδοσης για τα κανάλια και των δυο σχημάτων επικοινωνίας.
- Πραγματοποιείται αξιολόγηση επίδοσης των δυο σχημάτων με βάση τα προτεινόμενα μοντέλα.
- Ανάλογα με τα αποτελέσματα της αξιολόγησης αναπροσαρμόζονται οι ρυθμοί μετάδοσης και επαναλαμβάνεται η αξιολόγηση ώστε να προκύψουν βέλτιστα αποτελέσματα.

Ολοκληρώνοντας το πρώτο μέρος της εργασίας που αφορά την εφαρμογή του προτύπου IEEE 802.11 σε WSNs, θα προχωρήσουμε στο επόμενο κεφάλαιο, όπου προτείνεται ένα αποδοτικό σχήμα επικοινωνίας για γενικευμένα, πλέον, δίκτυα ακαθόριστης διασύνδεσης.

Βιβλιογραφικές Αναφορές

- [1] R. Ramanathan and J. Redi, "A brief Overview of Ad hoc Networks: Challenges and Directions," *IEEE Communications Magazine*, vol. 40, no. 5, pp. 20–22, May 2002.
- [2] M. Tubaishat and S. Madria, "Sensor Networks: An Overview," *IEEE Potentials*, vol. 22, no. 2, pp. 20–23, Apr. 2003.
- [3] I. F. Akyldiz *et al.*, "A Survey on Sensor Networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 40, no. 8, pp. 102–114, Aug. 2002.
- [4] I. F. Akyldiz and I. H. Kasimoglu, "Wireless Sensor and Actor Networks: Research Challenges," *Ad Hoc Networks*, Oct. 2004.

- [5] W. Hu, N. Bulusu, and S. Jha, "A Communication Paradigm for Hybrid Sensor/Actuator Networks," in *Proc. IEEE PIMRC*, Barcelona, Spain, Sep. 2004.
- [6] M. D. Lemmon, Q. Ling, and Y. Sun, "Overload Management in Sensor-Actuator Networks Used for Spatially-Distributed Control Systems," in *Proc. ACM SenSys*, UCLA, USA, Nov. 2003.
- [7] V. Raykar, I. Kozintsev, and R. Lienhart, "Position Calibration of Audio Sensors and Actuators in a Distributed Computing Platform," in *Proc. ACM Multimedia*, 2003.
- [8] R. Lienhart and I. Kozintsev, "Self-aware Distributed AV Sensor and Actuator Networks for Improved Media Adaptation," in *Proc. ICME*, Taiwan, Korea, Jun. 2004.
- [9] C. M. E. Mackensen, W. Kuntz, "Smart Wireless Autonomous Microsystems (SWAMs) for Sensor Actuator Networks," in *Proc. Sensors for Industry Conference (SICON)*, New Orleans, USA, Jan. 2004.
- [10] K. Taylor *et al.*, "Sensor/Actuator Networks Supporting Agents for Distributed Energy Management," in *Proc. 29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks (LCN)*, Tampa, USA, Nov. 2004.
- [11] M. Rahimi *et al.*, "A Testbed for Experiments with Sensor/Actuator Networks," University of Southern California, Department of Computer Science, Tech. Rep. IRIS-02-417, 2002.
- [12] W. Zhang, G. Kantor, and S. Singh, "Demo Abstract: Integrated Wireless Sensor/Actuator Networks in an Agricultural Application," in *Proc. ACM SenSys*, Baltimore, USA, Nov. 2004.
- [13] E. Jurdak *et al.*, "A Survey, Classification and Comparative Analysis of Medium Access Control Protocols for Ad Hoc Networks," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 6, no. 1, pp. 2–16, First Quarter 2004.
- [14] H. Zhai *et al.*, "Medium Access Control in Mobile Ad Hoc Networks: Challenges and Solutions," *Wireless Communications and Mobile Computing*, To appear.
- [15] L. Feeney *et al.*, "Analysis and Protocol Design for Rate Adaptation for Simple Relay Networks," in *Proc. 4th Scandinavian Workshop on Wireless Ad-hoc Networks (ADHOC '04)*, Johannesburg Estate, Stockholm, May. 2004.
- [16] S. Mengesha, H. Karl, and A. Wolisz, "Capacity Increase of Multi-hop Cellular WLANs Exploiting Data Rate Adaptation and Frequency Recycling," Technical University of Berlin, Tech. Rep. TKN-03-015, Sep. 2003.
- [17] D. Vassiss, G. Kormentzas, and C. Skianis, "Performance Evaluation of Single and Multi-Channel Actor to Actor Communication for Wireless Sensor Actor Networks," *Ad Hoc Networks*, To appear.
- [18] C. Barrett and M. Drozda, "Characterizing the Interaction Between Routing and MAC Protocols in Adhoc Networks," in *Proc. ACM MOBIHOC*, Louisiana, USA, Jun. 2002.
- [19] J. Li *et al.*, "Performance Evaluation of Modified IEEE 802.11 MAC for Multi-Channel Multi-Hop Ad Hoc Networks," in *Proc. 17th International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA)*, Xi'an, China, Mar 2003.
- [20] L. Kleinrock and F. Tobagi, "Packet Switching in Radio Channels: Part I-Carrier Sense Multiple Access Models and their Throughput-Delay Characteristics," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 23, no. 12, pp. 1400–1416, Dec. 1975.
- [21] F. Tobagi and L. Kleinrock, "Packet Switching in Radio Channels: Part II-The Hidden Terminal Problem in Carrier Sense Multiple Access and the Busy-Tone Solution," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 23, no. 12, pp. 1417–1433, Dec. 1975.
- [22] G. Bianchi, "Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function," *IEEE Journal on Selected Areas of Communications*, vol. 18, no. 3, pp. 535–547, 2000.

Κεφάλαιο 6

Δίκτυα IEEE 802.11 Ακαθόριστης Διασύνδεσης - Σχεδιασμός και Ανάλυση Επίδοσης Σχημάτων Επικοινωνίας για Δίκτυα Ακαθόριστης Διασύνδεσης με Υποδομή

6.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο θα συνεχιστεί η εργασία που ξεκίνησε στο Κεφάλαιο 5 για την εφαρμογή του προτύπου IEEE 802.11 σε δίκτυα ακαθόριστης διασύνδεσης. Φεύγοντας από την ειδική περίπτωση των ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων-συντονιστών, στο παρόν κεφάλαιο θα διεκρινούμε τη μελέτη, εξετάζοντας δίκτυα *ad hoc* πιο γενικευμένου τύπου, που βρίσκουν εφαρμογές σε περισσότερα πεδία.

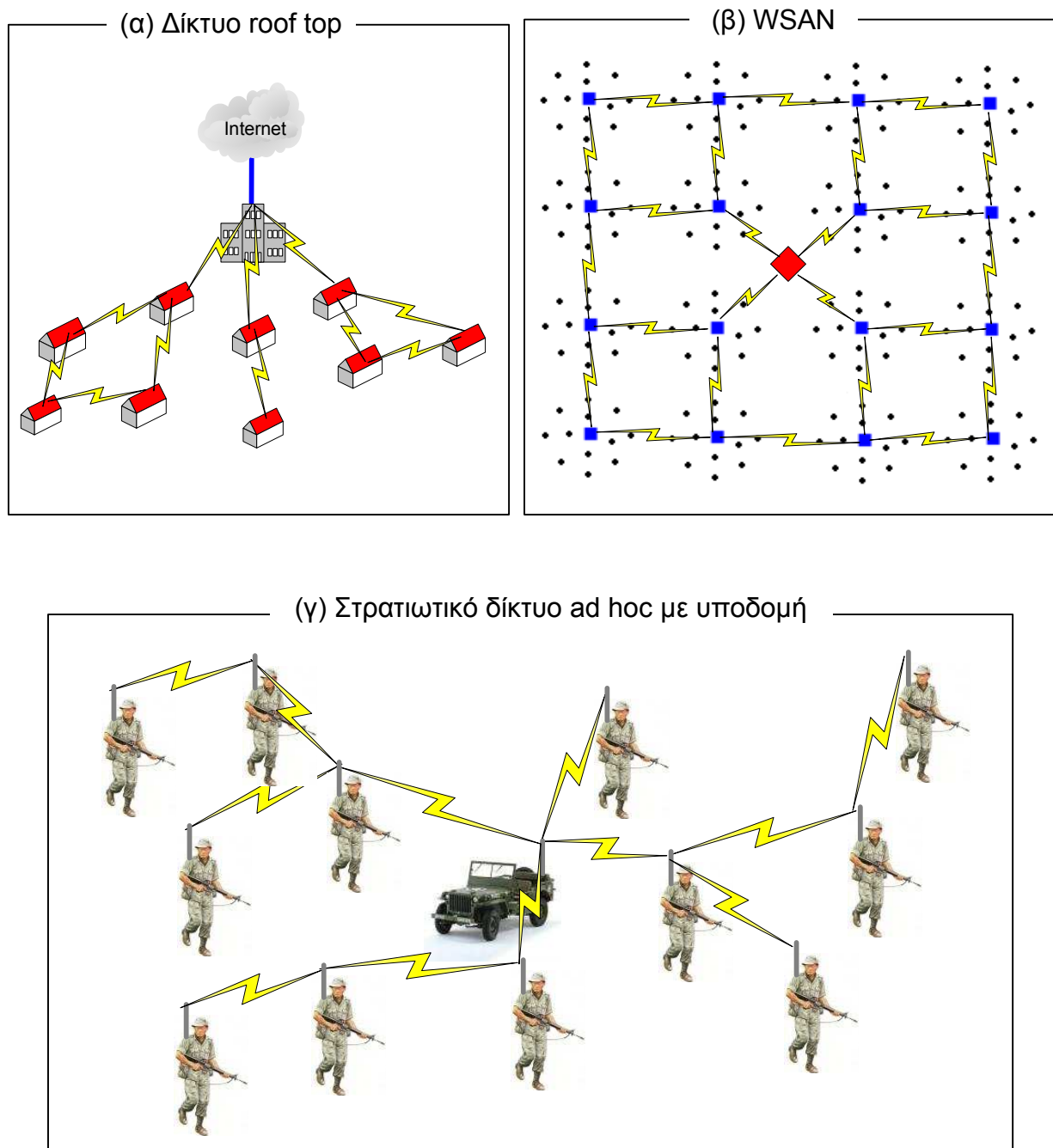
Προς τη συγκεκριμένη κατεύθυνση, στο παρόν κεφάλαιο θα εξετάσουμε τα δίκτυα *ad hoc* με υποδομή. Όπως ειπώθηκε και στο εισαγωγικό κεφάλαιο, ο όρος ‘με υποδομή’ μεταφράζει τον ξένο όρο ‘*infrastructure*’ που υπονοεί ότι υπάρχει ένας κεντρικός σταθμός ο οποίος συλλέγει όλη την ωφέλιμη πληροφορία από τους τερματικούς κόμβους και μεταδίδει όλη την ωφέλιμη πληροφορία προς αυτούς. Με τον τρόπο αυτό, δεν υπάρχει απευθείας επικοινωνία μεταξύ των τερματικών κόμβων (επικοινωνία *peer to peer*), αλλά μόνο μεταξύ τερματικών και κεντρικού σταθμού.

Σε ένα δίκτυο *ad hoc* με υποδομή, οι κόμβοι μπορεί να είναι πολλοί και να μην είναι δυνατή η απευθείας επικοινωνία με τον κεντρικό σταθμό. Για το λόγο αυτό [1], οι ίδιοι οι τερματικοί κόμβοι παίζουν το ρόλο των δρομολογητών, προκειμένου η πληροφορία να μεταδοθεί στον κεντρικό σταθμό ή αντίστροφα. Συνεπώς, όταν λέμε ότι δεν υπάρχει επικοινωνία μεταξύ τερματικών κόμβων το εννοούμε για τα στρώματα OSI που ευρίσκονται άνω του στρώματος δικτύου. Με άλλα λόγια, σε μια διαδικασία μετάδοσης πακέτου, ο αρχικός αποστολέας ή ο τελικός παραλήπτης είναι πάντα ο κεντρικός σταθμός. Για τη διεκπεραίωση, βέβαια, της μετάδοσης από άκρο σε άκρο, μπορεί να παρεμβάλλονται και ενδιάμεσοι κόμβοι ως δρομολογητές. Είναι τώρα προφανές ότι σε δίκτυα *ad hoc* με υποδομή που αποτελούνται από πολλούς κόμβους, ένα πακέτο διανύει ενδεχομένως περισσότερους του ενός κόμβων για να φτάσει στον προορισμό του. Όπως ειπώθηκε και σε προηγούμενα κεφάλαια, η επικοινωνία αυτή ονομάζεται *επικοινωνία πολλαπλών βημάτων* (*multi-hop communication*).

Τα δίκτυα *ad hoc* με υποδομή βρίσκουν εφαρμογές σε διάφορους τύπους δικτύων όπου απαιτείται κεντροποιημένη επικοινωνία. Τα πιο αντιπροσωπευτικά από αυτά είναι τα δίκτυα αισθητήρων (ή αισθητήρων-συντονιστών) που εξετάσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, τα δίκτυα στρατιωτικών εφαρμογών και τα δίκτυα διασύνδεσης οικιών μέσω κεραίων οροφής (*roof top networks*) [2], [3]. Τα τελευταία είναι δίκτυα τα οποία διασυνδέουν σπίτια μεταξύ τους με εξωτερικές κεραίες, όπου οι χρήστες των σπιτιών συνιστούν

ένα τοπικό δίκτυο. Η πιο συνηθισμένη χρήση των δικτύων αυτών είναι η παροχή ασύρματου internet σε περιοχές όπου η καλωδίωση είναι δύσκολη. Ο κεντρικός σταθμός στην περίπτωση αυτή είναι μια πύλη στην οποία εγκαθίσταται μια σύνδεση ευρείας ζώνης για πρόσβαση στο internet, η χωρητικότητα της οποίας μοιράζεται ασύρματα στους τερματικούς κόμβους.

Παραδείγματα δικτύων ad hoc με υποδομή φαίνονται στο Σχήμα 6.1. Στο Σχήμα 6.1α απεικονίζεται ένα δίκτυο roof top. Στο Σχήμα 6.1β απεικονίζεται ένα δίκτυο αισθητήρων συντονιστών κεντροποιημένης επικοινωνίας. Οι αισθητήρες απεικονίζονται με μικρές κουκκίδες, οι συντονιστές με τετράγωνα, ενώ ο κεντρικός συντονιστής με ρόμβο, στη μέση του δικτύου. Το δίκτυο ad hoc με υποδομή συνίσταται μεταξύ των συντονιστών και του κεντρικού συντονιστή. Τέλος, στο Σχήμα 6.1γ απεικονίζεται ένα στρατιωτικό δίκτυο ad hoc με υποδομή.



Σχήμα 6.1: Απλό δίκτυο IEEE 802.11 ad hoc με υποδομή

Με βάση τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι τα δίκτυα ad hoc με υποδομή απαιτούν ένα κατάλληλο πρωτόκολλο στα δυο πρώτα στρώματα OSI, που να καλύπτει τις απαιτήσεις για επικοινωνία multi-hop και για ακαθόριστη διασύνδεση. Το πρότυπο IEEE 802.11 είναι ιδανικό για το σκοπό αυτό, λόγω της

ασύρματης φύσης επικοινωνίας και της φύσης broadcast που υποστηρίζει. Παρ' όλ' αυτά, ο επιπλέον φόρτος κίνησης που υπεισέρχεται λόγω της προώθησης πακέτων από ενδιάμεσους κόμβους μειώνει σε μεγάλο βαθμό την επίδοση του δικτύου [4]. Για το λόγο αυτό απαιτούνται αποδοτικά πρωτόκολλα πρόσβασης μέσου, που να επεκτείνουν το υπάρχον του IEEE 802.11, τα οποία να δίνουν βάση στη φύση της επικοινωνίας multi-hop. Προς τη συγκεκριμένη κατεύθυνση έχει πραγματοποιηθεί αρκετή εργασία, όπου στην πλειονότητα των περιπτώσεων χρησιμοποιούνται τα πολλαπλά κανάλια που υπάρχουν στις ζώνες ISM και U-NII, που λειτουργεί η οικογένεια προτύπων IEEE 802.11. Οι πιο αντιπροσωπευτικές εργασίες παρουσιάζονται παρακάτω.

Το άρθρο [5] διεξάγει ανάλυση επίδοσης των δικτύων multi-hop ad hoc IEEE 802.11. Οι συγγραφείς του άρθρου [6] υπολογίζουν με προσομοίωση τη χωρητικότητα των δικτύων ad hoc IEEE 802.11 πολλαπλών καναλιών. Το άρθρο [7] προτείνει μια δομή για δίκτυα IEEE 802.11 ad hoc με υποδομή. Στο άρθρο [8] παρουσιάζεται ένα σχήμα πολλαπλών καναλιών για τη διαχείριση προβλημάτων όπως αυτό του κρυφού κόμβου σε δίκτυα multi-hop. Οι συγγραφείς του άρθρου [9] παρουσιάζουν ένα σχήμα 'δέσμευσης επόμενου κόμβου' για δίκτυα ad hoc multi-hop. Στο άρθρο [10] προτείνεται αλγόριθμος για ανάθεση καναλιών κατ' απαίτηση, προκειμένου να βελτιωθεί η επίδοση των δικτύων multi-hop ad hoc. Το άρθρο [11] προτείνει έναν κατανεμημένο αλγόριθμο πολλαπλών καναλιών για βελτίωση της επίδοσης των εν λόγω δικτύων. Κατά τον ίδιο τρόπο, το άρθρο [12] προτείνει μια επέκταση του πρωτοκόλλου MAC του IEEE 802.11 που εκμεταλλεύεται δυο κανάλια επικοινωνίας. Στο άρθρο [13] παρουσιάζεται ένα σχήμα επικοινωνίας για δίκτυα multi-hop ad hoc το οποίο έχει και δυνατότητες διαχείρισης ενέργειας. Οι συγγραφείς του άρθρου [14], βασισμένοι στα δίκτυα ad hoc με υποδομή, προτείνουν μια αρχιτεκτονική για ενοποιημένα δίκτυα ad hoc ευρείας ζώνης. Περισσότερα σχήματα MAC που αφορούν δίκτυα ad hoc με υποδομή μπορούν να βρεθούν στις ανασκοπήσεις των άρθρων [15] και [16] όπου παρουσιάζονται πάνω από 100 άρθρα που αφορούν τη συγκεκριμένη ερευνητική περιοχή.

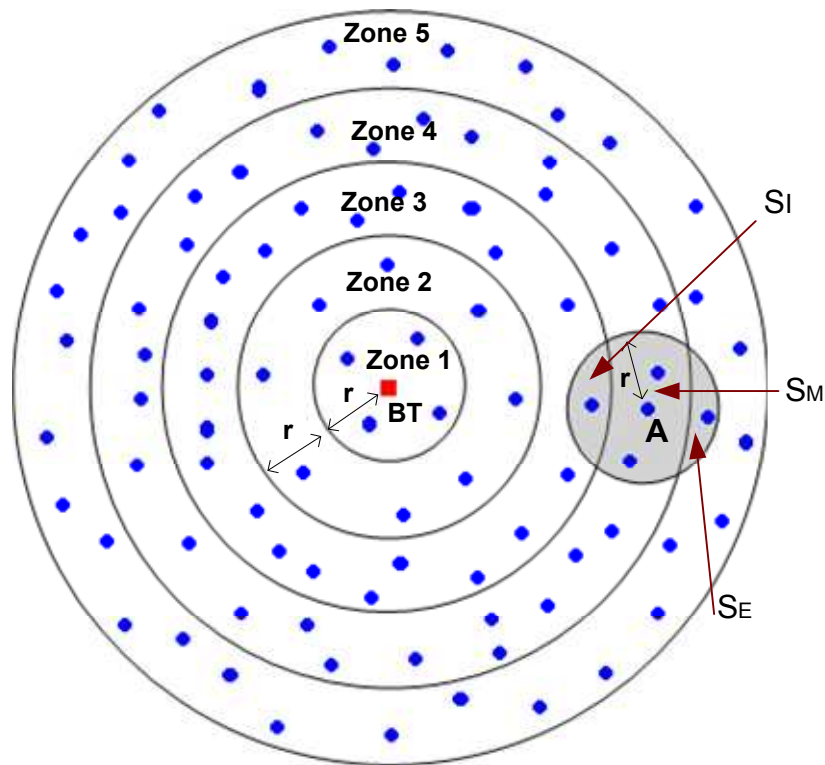
Συνεισφέροντας στις παραπάνω δραστηριότητες, το συγκεκριμένο κεφάλαιο της διατριβής [17] προτείνει ένα αποδοτικό σχήμα επικοινωνίας στο στρώμα πρόσβασης μέσου, για δίκτυα IEEE 802.11 ad hoc με υποδομή. Το εν λόγω σχήμα, ονομαζόμενο *MAWA (Multi-channel Ad hoc Wireless Access)*, χρησιμοποιεί πολλαπλά κανάλια επικοινωνίας για βελτίωση της επίδοσης του δικτύου. Το κλειδί της αποδοτικότητας του σχήματος είναι το ειδικό βάρος που δίνεται στην κίνηση που προωθείται από ενδιάμεσους κόμβους. Προς την κατεύθυνση αυτή, το δίκτυο χωρίζεται γεωγραφικά σε ζώνες και γίνεται προσπάθεια απομόνωσης της κάθε ζώνης από τις γειτονικές της. Για το σωστό και τεκμηριωμένο σχεδιασμό του προτεινόμενου σχήματος αρχικά πραγματοποιείται μοντελοποίηση ενός απλού δικτύου IEEE 802.11 ad hoc με υποδομή και επαλήθευση του μοντέλου μέσω προσομοίωσης στην πλατφόρμα OPNET. Στη συνέχεια το μοντέλο επεκτείνεται για την υποστήριξη του προτεινόμενου σχήματος. Τέλος, με βάση το αναλυτικό μοντέλο, πραγματοποιείται αξιολόγηση επίδοσης του σχήματος MAWA, συγκρίνοντάς το με άλλα σχήματα επικοινωνίας πολλαπλών καναλιών.

Με βάση τα παραπάνω, το υπόλοιπο του παρόντος κεφαλαίου διαρθρώνεται ως ακολούθως: Στην Ενότητα 6.2 σχεδιάζεται ένα αναλυτικό μοντέλο για απλά, συμβατικά δίκτυα IEEE 802.11 με υποδομή. Στην ίδια ενότητα πραγματοποιείται και η επαλήθευση του εν λόγω μοντέλου, μέσω προσομοίωσης στο OPNET. Στην Ενότητα 6.3 παρουσιάζεται το προτεινόμενο σχήμα. Η Ενότητα 6.4 διεξάγει την αξιολόγηση επίδοσης του MAWA. Αρχικά παρουσιάζονται δυο άλλα απλά, γενικά σχήματα επικοινωνίας πολλαπλών καναλιών για δίκτυα ad hoc με υποδομή, με τα οποία θα συγκριθεί το προτεινόμενο σχήμα. Εν συνεχεία, επεκτείνεται το μοντέλο της Ενότητας 6.2 ώστε να υποστηρίζει το MAWA και τα δυο γενικά σχήματα πολλαπλών καναλιών. Με βάση το νέο, εκτεταμένο μοντέλο, πραγματοποιείται η συγκριτική αξιολόγηση επίδοσης του προτεινόμενου σχήματος. Τέλος, το παρόν Κεφάλαιο κλείνει με την Ενότητα 6.5 όπου γίνεται μια ανασκόπηση της εργασίας που πραγματοποιήθηκε και παρατίθενται τα συμπεράσματα που προέκυψαν.

6.2 Μοντελοποίηση απλού δικτύου ad hoc IEEE 802.11 με υποδομή

Στην παρούσα ενότητα θα σχεδιάσουμε αναλυτικό μοντέλο για ένα απλό, συμβατικό δίκτυο IEEE 802.11 ad hoc με υποδομή, στο οποίο χρησιμοποιείται ένα κανάλι επικοινωνίας. Το μοντέλο αυτό θα επεκταθεί

στην Ενότητα 6.4, ώστε να προσαρμοστεί στα πιο σύνθετα χαρακτηριστικά του προτεινόμενου σχήματος. Ας θεωρήσουμε, λοιπόν, ένα απλό δίκτυο IEEE 802.11 ad hoc με υποδομή όπως αυτό που φαίνεται στο Σχήμα 6.2.



Σχήμα 6.2: Απλό δίκτυο IEEE 802.11 ad hoc με υποδομή

Το δίκτυο αποτελείται από έναν αριθμό διασκορπισμένων τερματικών κόμβων και έναν κεντρικό σταθμό. Ο κεντρικός σταθμός λαμβάνει όλη την πληροφορία από τους τερματικούς και στέλνει όλη την πληροφορία που προορίζεται σε αυτούς. Με άλλα λόγια, πληροφορία δεν ανταλλάσσεται απευθείας μεταξύ των τερματικών κόμβων (peer to peer traffic), αλλά μόνο μεταξύ τερματικών και κεντρικού σταθμού. Επειδή η απόσταση ραδιοκάλυψης (r) είναι μεγαλύτερη από την απόσταση των τερματικών από τον κεντρικό σταθμό, οι ίδιοι οι τερματικοί κόμβοι χρησιμοποιούνται ως ενδιάμεσοι για την επικοινωνία κάποιων άλλων κόμβων με τον κεντρικό σταθμό.

Με βάση τις παραπάνω διευκρινίσεις, για το σχεδιασμό του προτεινόμενου μοντέλου, είναι λογικό να υποθέσουμε ότι το δίκτυο του Σχήματος 6.2 χωρίζεται σε ζώνες, ανάλογα με τον αριθμό των κόμβων που απαιτούνται για να φτάσει ένα πακέτο από τον τερματικό κόμβο στον κεντρικό σταθμό ή αντίστροφα. Για παράδειγμα, ένας κόμβος ανήκει στη ζώνη 3 αν απαιτούνται τρεις κόμβοι (συμπεριλαμβανομένου και του παραλήπτη) για να στείλει ένα πακέτο στον κεντρικό σταθμό. Τέλος, για απλοποίηση της ανάλυσης και χωρίς βλάβη της γενικότητας υποθέτουμε ότι όλοι οι κόμβοι είναι σταθεροί.

Το προτεινόμενο μοντέλο για το παραπάνω δίκτυο έγκειται στον υπολογισμό δυο αναλυτικών μέτρων που αφορούν την καθυστέρηση πακέτου. Το πρώτο ονομάζεται *καθυστέρηση μετάδοσης* και είναι ο χρόνος από την αρχή της μετάδοσης του πακέτου από τον αποστολέα μέχρι την επιτυχή λήψη του από τον επόμενο κόμβο (ενδιάμεσος κόμβος ή τελικός παραλήπτης). Το δεύτερο μέτρο ονομάζεται *συνολική καθυστέρηση* και αφορά το χρόνο που απαιτείται από την αρχή της μετάδοσης του πακέτου από τον αποστολέα μέχρι την επιτυχή λήψη του από τον τελικό παραλήπτη. Ας σημειωθεί ότι, αν αγνοήσουμε το χρόνο που απαιτείται για την επεξεργασία του πακέτου σε κάθε κόμβο, η συνολική καθυστέρηση είναι το άθροισμα της καθυστέρησης μετάδοσης σε κάθε ενδιάμεσο κόμβο.

Ας επιστρέψουμε τώρα στο δίκτυο του Σχήματος 6.2, όπου οι κόμβοι είναι σταθεροί και ομοιόμορφα κατανομημένοι με πυκνότητα ρ . Ας ορίσουμε επίσης ως r την ακτίνα ραδιοκάλυψης του κάθε κόμβου και ως R το ρυθμό μετάδοσης στο ασύρματο μέσο. Για την κίνηση που κάθε κόμβος στέλνει προς τον κεντρικό σταθμό (*ανοδική κίνηση* - *upload traffic*) και για την κίνηση που στέλνει ο κεντρικός σταθμός

σε κάθε κόμβο (καθοδική κίνηση - *download traffic*), καθεμιά από αυτές ακολουθεί μια γενικευμένη κατανομή με μέση τιμή λ_u και λ_d πακέτα/s αντίστοιχα. Το μέγεθος ωφέλιμου πακέτου υποθέτουμε ότι ακολουθεί επίσης μια γενικευμένη κατανομή με μέση τιμή P bits. Τέλος, θεωρούμε το δίκτυο υπό συνθήκες πεπερασμένου φόρτου κίνησης, οπότε μπορούμε με ασφάλεια να υποθέσουμε ότι η ουρά του πομποδέκτη δεν γεμίζει και δεν απορρίπτονται πακέτα.

Στο σημείο αυτό η παραγόμενη κίνηση στο δίκτυο πρέπει να υπολογιστεί λαμβάνοντας υπόψη το φόρτο κίνησης λόγω δρομολόγησης και το φόρτο κίνησης λόγω προώθησης πακέτων εκ μέρους άλλων κόμβων (*relay traffic*). Η προσέγγιση είναι παρόμοια με αυτή του Κεφαλαίου 5. Όσον αφορά το φόρτο δρομολόγησης πραγματοποιήθηκαν σενάρια προσομοίωσης με πρωτόκολλο δρομολόγησης το AODV (λόγω της καλύτερης επίδοσής του σε δίκτυα IEEE 802.11 [18]). Η κίνηση που οφειλόταν στη δρομολόγηση των πακέτων ήταν λιγότερη από 1Kb/s ανά κόμβο, η οποία είναι αμελητέα σε σχέση με τη χωρητικότητα του καναλιού. Όπως ειπώθηκε και στο Κεφάλαιο 5, σύμφωνα με το άρθρο [19], η κίνηση αυτή μπορεί να αγνοηθεί με ασφάλεια.

Όσον αφορά τώρα το φόρτο κίνησης λόγω προώθησης πακέτων εκ μέρους άλλων κόμβων (*relay traffic*), καθώς η πυκνότητά τους είναι σταθερή σε όλη την περιοχή του δικτύου, μπορεί να υποθεθεί ότι όλοι οι κόμβοι μιας συγκεκριμένης ζώνης δρουν ισοπίθانا ως προωθητές και, συνεπώς, προωθούν σε άλλους την ίδια, κατά μέσο όρο, κίνηση. Τονίζουμε και πάλι ότι, παρ' ότι η υπόθεση αυτή δεν ισχύει γενικώς για ένα συγκεκριμένο πακέτο, είναι αποδεκτή όταν μελετάμε μεγάλα δίκτυα σε έκταση, όπου τα προβλήματα ακμών¹ μπορούν να αγνοηθούν.

Στο υπόλοιπο της ενότητας ο σχεδιασμός του μοντέλου χωρίζεται σε δυο μέρη: στο μοντέλο κίνησης και στο μοντέλο δικτύου. Το μοντέλο κίνησης λαμβάνει ως είσοδο όλα τα χαρακτηριστικά κίνησης του δικτύου και υπολογίζει ως έξοδο την πραγματική κίνηση που παράγει κάθε κόμβος. Το μοντέλο δικτύου λαμβάνει ως είσοδο την έξοδο του μοντέλου κίνησης και υπολογίζει τα ζητούμενα αναλυτικά μέτρα της καθυστέρησης πακέτου.

6.2.1 Μοντέλο κίνησης

Ας θεωρήσουμε ξανά το δίκτυο του Σχήματος 6.2 που αποτελείται από H ζώνες και τον κόμβο A που ανήκει στη ζώνη i , όπου $1 \leq i \leq H$. Η συνολική κίνηση που παράγει ο κόμβος A είναι το άθροισμα:

- Της ανοδικής κίνησης που παράγει ο κόμβος προς τον κεντρικό σταθμό, λ_u .
- Της ανοδικής κίνησης που προωθεί ο συγκεκριμένος κόμβος προς τον κεντρικό σταθμό εκ μέρους άλλων κόμβων που ανήκουν σε εξωτερικές ζώνες (δηλαδή στις ζώνες $[i + 1, H]$). Η συνολική επιφάνεια του δικτύου που ευρύνεται έξω από τη ζώνη i είναι $\pi(rH)^2 - \pi(ri)^2 = \pi r^2(H^2 - i^2)$. Η συνολική ανοδική κίνηση που παράγεται τώρα από κόμβους που ανήκουν στις εξωτερικές ζώνες είναι $\lambda_u \rho \pi r^2(H^2 - i^2)$. Δεδομένου ότι στη ζώνη i υπάρχουν $\rho\{\pi(ri)^2 - \pi[r(i-1)]^2\} = \rho \pi r^2(2i-1)$ κόμβοι και η κίνηση προωθείται ισοπίθانا από όλους τους κόμβους κάθε ζώνης, η ανοδική κίνηση που προωθεί κάθε κόμβος μιας ζώνης i είναι $\lambda_u \rho \pi r^2(H^2 - i^2) / \rho \pi r^2(2i-1) = \lambda_u(H^2 - i^2) / (2i-1)$.
- Της καθοδικής κίνησης που ο συγκεκριμένος κόμβος προωθεί στις εξωτερικές ζώνες εκ μέρους του κεντρικού σταθμού. Δεδομένου ότι η καθοδική κίνηση που προορίζεται σε κάθε κόμβο είναι λ_d , η καθοδική κίνηση που προορίζεται στις εξωτερικές ζώνες είναι $\lambda_d \rho \pi r^2(H^2 - i^2)$. Ακολουθώντας το ίδιο σκεπτικό με την προηγούμενη περίπτωση, η καθοδική κίνηση που προωθεί κάθε κόμβος της ζώνης i είναι $\lambda_d(H^2 - i^2) / (2i-1)$.

¹Πρόβλημα ακμών ονομάζεται το πρόβλημα όπου η συμπεριφορά του δικτύου αλλάζει στα γεωγραφικά του όρια, λόγω απότομης αλλαγής της γεωγραφικής κατανομής των κόμβων.

Σύμφωνα λοιπόν με τα παραπάνω, η συνολική κίνηση ανόδου ($\Lambda_{u,i}$) και καθόδου ($\Lambda_{d,i}$) που παράγει ένας κόμβος της ζώνης i είναι:

$$\begin{cases} \Lambda_{u,i} = \lambda_u + \lambda_u \frac{H^2 - i^2}{2i - 1} = \lambda_u (1 + \frac{H^2 - i^2}{2i - 1}), \\ \Lambda_{d,i} = \lambda_d \frac{H^2 - i^2}{2i - 1}. \end{cases} \quad (6.1)$$

Ας θεωρήσουμε τώρα μια κυψέλη που περιέχει όλους τους κόμβους που υπάρχουν στην περιοχή ραδιοκαλυψής του κόμβου Α. Οι κόμβοι εντός της συγκεκριμένης κυψέλης ανήκουν είτε στη ζώνη i , είτε στη ζώνη $i - 1$, είτε στη ζώνη $i + 1$ και, συνεπώς, δεν παράγουν την ίδια κίνηση. Ας είναι S_I , S_M , S_E οι περιοχές που ορίζονται από την τομή της εν λόγω κυψέλης (περιοχή ραδιοκαλυψής του Α) και τις ζώνες $i - 1$, i , $i + 1$ αντίστοιχα (βλ. Σχήμα 6.2). Μπορεί να αποδειχθεί ότι τα εμβαδά των παραπάνω περιοχών είναι $S_I = 0.50r^2$, $S_M = 1.91r^2$, $S_E = 0.73r^2$, $S_{I,1} = 1.83r^2$, και $S_{E,1} = 1.30r^2$, όπου $S_{I,1}$, και $S_{E,1}$ είναι οι περιοχές S_M και S_E που ορίζονται για τη ζώνη 1 (για τη συγκεκριμένη ζώνη δεν ορίζεται επιφάνεια S_M). Η απόδειξη των παραπάνω τιμών θα γίνει στην υποενότητα 6.2.3, ώστε να μην αυξήσουμε σε όγκο γεωμετρικών πράξεων τη συγκεκριμένη υποενότητα και να μην αποσπαστεί η προσοχή μας από τη δικτυακή ανάλυση που διεξάγεται σε αυτό το σημείο.

Η συνολική κίνηση που παράγεται, τώρα, στην κυψέλη i (ως κυψέλη i εννοούμε μια κυψέλη που ορίζεται από την περιοχή ραδιοκαλυψής ενός κόμβου που ανήκει στη ζώνη i) χωρίζεται σε κίνηση ανόδου και κίνηση καθόδου. Η εν λόγω συνολική κίνηση g_i , η κίνηση ανόδου $g_{u,i}$ και η κίνηση καθόδου $g_{d,i}$ σε κάθε κυψέλη i είναι:

$$\begin{cases} g_i = g_{u,i} + g_{d,i}, \\ g_{u,i} = \rho S_I \Lambda_{u,i-1} + \rho S_M \Lambda_{u,i} + \rho S_E \Lambda_{u,i+1}, \\ g_{d,i} = \rho S_I \Lambda_{d,i-1} + \rho S_M \Lambda_{d,i} + \rho S_E \Lambda_{d,i+1}, \\ g_{u,1} = (\rho S_{I,1} - 1) \Lambda_{u,1} + \rho S_{E,1} \Lambda_{u,2}, \\ g_{d,1} = (\rho S_{I,1} - 1) \Lambda_{d,1} + \rho S_{E,1} \Lambda_{d,2} + \rho \pi r^2 H^2 \lambda_d. \end{cases} \quad (6.2)$$

Στις εξισώσεις για τις $g_{u,1}$ και $g_{d,1}$, ο πρώτος όρος είναι $(\rho S_{I,1} - 1)$ και όχι $\rho S_{I,1}$, καθώς εξαιρείται ως κόμβος ο κεντρικός σταθμός. Επιπλέον, ο τελευταίος όρος της εξίσωσης για την $g_{d,1}$ αφορά την κίνηση που παράγει ο κεντρικός σταθμός προς όλους τους κόμβους του δικτύου.

Η κίνηση g που ορίστηκε και υπολογίστηκε στην Εξίσωση 6.2 θα χρησιμοποιηθεί ως είσοδος στο μοντέλο δικτύου της υποενότητας 6.2.2 που ακολουθεί.

6.2.2 Μοντέλο δικτύου

Στη συνέχεια θα σχεδιάσουμε το μοντέλο δικτύου, το οποίο παίρνει ως βασική είσοδο την παράμετρο g που ορίστηκε στην Εξίσωση 6.2, και υπολογίζει τα δυο αναλυτικά μέτρα της καθυστέρησης πακέτου. Για τον υπολογισμό της καθυστέρησης μετάδοσης, το συγκεκριμένο μοντέλο είναι πανομοιότυπο με αυτό που σχεδιάστηκε στην Ενότητα 5.2 του Κεφαλαίου 5. Πράγματι, και στις δυο περιπτώσεις τα δίκτυα έχουν την ίδια τοπολογία (ad hoc), λειτουργούν με το ίδιο πρωτόκολλο (IEEE 802.11), χρησιμοποιούν ένα κανάλι, και το αναλυτικό μέτρο που θέλουμε να εξάγουμε είναι το ίδιο (καθυστέρηση πακέτου). Παρακάτω παρατίθενται εν συντομία οι τύποι του Κεφαλαίου 5 για τον υπολογισμό της καθυστέρησης πακέτου στην περίπτωσή μας.

$$\begin{aligned} d_m &= \frac{(\frac{gP}{UR} - 1)[T_c + \tau \frac{W}{2}(2^{\frac{gP}{UR}-1} - 1)] + T_s}{1 - (g - \frac{UR}{P})[T_s + (\frac{gP}{UR} - 1)T_c]}, \\ U &= \frac{S}{(B + I)^N} I^{N-1} p^{(N-1)T_s/\tau}. \end{aligned} \quad (6.3)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις, d_m είναι η καθυστέρηση μετάδοσης, U είναι η χρησιμοποίηση του καναλιού που επιτυγχάνεται μέσα σε μια κυψέλη, g είναι η κίνηση που παράγει η συγκεκριμένη κυψέλη (ορίστηκε

στην Εξίσωση 6.2), P είναι το μέγεθος ωφέλιμου πακέτου, R ο ρυθμός του καναλιού, T_s, T_c οι διάρκειες επιτυχούς μετάδοσης και σύγκρουσης αντίστοιχα (θα οριστούν επακριβώς στη συνέχεια) και N είναι το πλήθος των κόμβων που μπορούν να επηρεάσουν την επικοινωνία ενός κόμβου A προς τους κόμβους που υπάρχουν στην κυψέλη με κέντρο τον A . Για τη συγκεκριμένη περίπτωση, όπως και για το δίκτυο αισθητήρων-συντονιστών ενός καναλιού, ισχύει $N = 4$. Οι υπόλοιπες παράμετροι, W, B, I, S ορίστηκαν στο Κεφάλαιο 5 ως ενδιάμεσοι παράμετροι για τον υπολογισμό της χρησιμοποίησης και της καθυστέρησης μετάδοσης. Οι παράμετροι αυτοί μπορούν να υπολογιστούν από τις αντίστοιχες εξισώσεις των υποενότητων 5.2.1 και 5.2.2.

Στην περίπτωση μας, η καθυστέρηση μετάδοσης (αλλά και η χρησιμοποίηση) είναι διαφορετικές για κάθε κυψέλη και εξαρτώνται από την προσφερόμενη κίνηση g_i σε κάθε ζώνη. Για να τονίσουμε το συγκεκριμένο γεγονός χρησιμοποιούμε τον ορισμό $d_{m,i}$ για την καθυστέρηση μετάδοσης ενός πακέτου σε κάθε ζώνη i .

Με βάση το παραπάνω είναι εύκολος ο υπολογισμός της συνολικής καθυστέρησης, που είναι το άθροισμα της καθυστέρησης μετάδοσης σε κάθε ζώνη. Καθώς, τώρα, η κίνηση ανόδου και καθόδου δεν είναι συμμετρικές, η συνολική καθυστέρηση ανόδου και καθόδου είναι διαφορετικές. Η συνολική καθυστέρηση ανόδου $d_{tu,i}$ ορίζεται ως η καθυστέρηση που υφίσταται ένα πακέτο για να φτάσει από κάποιον τερματικό κόμβο-αποστολέα, στον κεντρικό σταθμό. Η καθυστέρηση αυτή είναι ίση με το άθροισμα της καθυστέρησης μετάδοσης $d_{m,i}$ σε κάθε ζώνη που προωθείται το πακέτο (υπόψη ότι στη ζώνη 1 το πακέτο προωθείται από τους κόμβους της συγκεκριμένης ζώνης στον κεντρικό σταθμό). Συνεπώς:

$$d_{tu,i} = \sum_{j=1}^i d_{m,j} \quad (6.4)$$

Η συνολική καθυστέρηση καθόδου ορίζεται ως η καθυστέρηση που υφίσταται ένα πακέτο για να φτάσει από τον κεντρικό σταθμό στον τελικό κόμβο-παραλήπτη. Δεδομένου ότι η λήψη ενός πακέτου ‘καθόδου’ γίνεται από κάποιον κόμβο-προωθητή που ανήκει στην εσωτερική ζώνη, η συνολική καθυστέρηση καθόδου $d_{td,i}$ ορίζεται ως το άθροισμα της καθυστέρησης μετάδοσης σε κάθε ζώνη $(i-1)$. Στο άθροισμα αυτό όμως πρέπει να συμπεριλάβουμε και τη μετάδοση του κεντρικού σταθμού, που τον θεωρούμε κόμβο της ζώνης 1, ο οποίος προωθεί τα πακέτα σε κόμβους-προωθητές της συγκεκριμένης ζώνης. Με βάση τα παραπάνω:

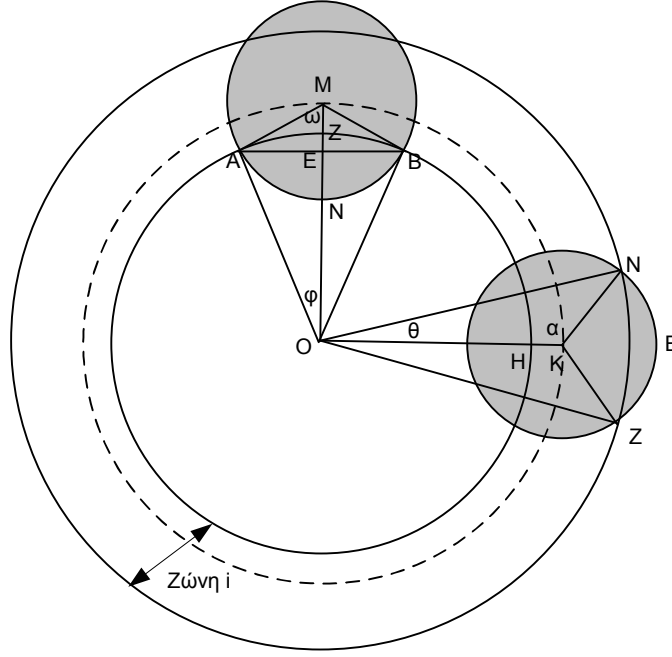
$$\begin{cases} d_{td,i} = d_{m,1} + \sum_{j=1}^{i-1} d_{m,j}, & i \neq 1, \\ d_{td,i} = d_{m,1}, & i = 1. \end{cases} \quad (6.5)$$

6.2.3 Υπολογισμός των εμβαδών S_I, S_M και S_E

Ο υπολογισμός των εμβαδών των περιοχών S_I, S_M και S_E , που χρειάζονται στην Εξίσωση 6.2, θα γίνει μέσω τριγωνομετρικής ανάλυσης της τοπολογίας του δικτύου. Ας θεωρήσουμε το Σχήμα 6.3 όπου στα σημεία O και K βρίσκονται ο κεντρικός σταθμός και ένας κόμβος που ανήκει στη ζώνη i αντίστοιχα. Η περιοχή ραδιοκάλυψης του κόμβου απεικονίζεται με το γκρι κύκλο.

Θα υπολογίσουμε αρχικά την περιοχή S_E , που περιέχει τους κόμβους της ζώνης $i + 1$ που βρίσκονται στην περιοχή ραδιοκάλυψης του κόμβου K . Ορίζουμε ως x την απόσταση του εν λόγω κόμβου από το εσωτερικό όριο της ζώνης i , δηλαδή $x = HK$, $0 \leq x \leq r$. Επιπλέον, $KN = r$, (ακτίνα ραδιοκάλυψης του κόμβου) και $ON = OE = ir$. Συνεπώς έχουμε:

$$\begin{aligned} S_E &= (KNEZ) - (KNZ), \\ (KNEZ) &= KN^2 \cdot 2(\pi - \hat{\alpha}), \\ (KNZ) &= (ONZ) - 2(ONK), \\ (ONZ) &= ON^2 \cdot \hat{\beta}, \\ (ONK) &= \frac{1}{2} OK \cdot KN \sin \hat{\alpha}. \end{aligned} \quad (6.6)$$



Σχήμα 6.3: Τριγωνομετρική ανάλυση της τοπολογίας του δικτύου

Από το νόμο των συνημιτόνων στο τρίγωνο ONK έχουμε:

$$\begin{aligned} ON^2 &= OK^2 + KN^2 - 2 \cdot OK \cdot KN \cdot \cos \hat{\alpha} \Rightarrow \hat{\alpha} = \arccos \left[\frac{OK^2 + KN^2 - ON^2}{2 \cdot OK \cdot KN} \right], \\ KN^2 &= OK^2 + ON^2 - 2 \cdot OK \cdot ON \cdot \cos \hat{\theta} \Rightarrow \hat{\theta} = \arccos \left[\frac{OK^2 + ON^2 - KN^2}{2 \cdot OK \cdot ON} \right]. \end{aligned} \quad (6.7)$$

Συνδυάζοντας τα παραπάνω, η περιοχή S_E είναι ίση με:

$$\begin{aligned} S_E &= 2r^2(\pi - \hat{\alpha}) - i^2r^2 + \arccos \left[\frac{i^2r^2 + [(i-1)r + x]^2 - r^2}{ir[(i-1)r + x]} \right] + \\ &+ r[(i-1)r + x] \sin \left\{ \arccos \left[\frac{[(i-1)r + x]^2 + r^2 - i^2r^2}{r[(i-1)r + x]} \right] \right\}. \end{aligned} \quad (6.8)$$

Θα υπολογίσουμε τώρα την περιοχή S_I που περιλαμβάνει τους κόμβους της ζώνης $i-1$ που βρίσκονται στην περιοχή ραδιοκάλυψης του υπό μελέτη κόμβου. Για να μην περιπλέξουμε το σχήμα, υποθέτουμε ότι ο κόμβος βρίσκεται στο σημείο M. Το εμβαδό S_I ορίζεται τώρα από την περιοχή (AZBN). Ισχύει:

$$\begin{aligned} (AZBN) &= (OAZB) - (OANB), \\ (OANB) &= (OAMB) - (AMNB), \\ (OAZB) &= OA^2 \cdot \hat{\phi}, \\ (OAMB) &= 2(OAM) = OM \cdot OA \cdot \sin \hat{\phi}, \\ (AMNB) &= MA^2 \cdot \hat{\omega}. \end{aligned} \quad (6.9)$$

Από το νόμο των συνημιτόνων στο τρίγωνο OAM έχουμε:

$$\begin{aligned} AM^2 &= OA^2 + OM^2 - 2 \cdot OA \cdot OM \cdot \cos \hat{\phi} \Rightarrow \hat{\phi} = \arccos \left[\frac{OA^2 + OM^2 - AM^2}{2 \cdot OA \cdot OM} \right], \\ OA^2 &= OM^2 + AM^2 - 2 \cdot OM \cdot AM \cdot \cos \hat{\omega} \Rightarrow \hat{\omega} = \arccos \left[\frac{OM^2 + AM^2 - OA^2}{2 \cdot OM \cdot AM} \right]. \end{aligned} \quad (6.10)$$

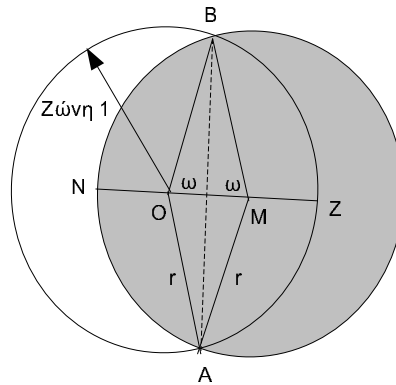
Έχοντας επίσης υπόψη ότι $OA = (i-1)r$, $OM = (i-1)r + x$, $AM = r$, έχουμε:

$$\begin{aligned}
 S_I = & (i-1)^2 r^2 \text{acos}\left[\frac{[(i-1)r+x]^2 + (i-1)^2 r^2 - r^2}{2(i-1)r[(i-1)r+x]}\right] - \\
 & - (i-1)[(i-1)r+x]r^2 \sin\left\{\text{acos}\left[\frac{[(i-1)r+x]^2 + (i-1)^2 r^2 - r^2}{2(i-1)r[(i-1)r+x]}\right]\right\} + \\
 & + r^2 \text{acos}\left[\frac{[(i-1)r+x]^2 + r^2 - (i-1)^2 r^2}{2[(i-1)r+x]r}\right].
 \end{aligned} \quad (6.11)$$

Τέλος, η περιοχή S_M που περιλαμβάνει τους κόμβους που ανήκουν στη ζώνη i και βρίσκονται στην περιοχή ραδιοκάλυψης του υπό μελέτη κόμβου, είναι ίση με:

$$S_M = \pi r^2 - S_I - S_E. \quad (6.12)$$

Ας σημειώσουμε τώρα ότι οι παραπάνω υπολογισμοί ισχύουν για όλες τις ζώνες εκτός από την πρώτη. Ειδικά για την πρώτη ζώνη, οι υπολογισμοί διαφέρουν και θα διεξαχθούν παρακάτω με βάση το Σχήμα 6.4. Στα σημεία O και M του συγκεκριμένου σχήματος απεικονίζονται αντίστοιχα ο κεντρικός σταθμός και ένας κόμβος που ανήκει στη ζώνη 1.



Σχήμα 6.4: Τριγωνομετρική ανάλυση της τοπολογίας του δικτύου για την πρώτη ζώνη

Η περιοχή $S_{I,1}$ που περιλαμβάνει τους κόμβους της ζώνης 1 που βρίσκονται στην περιοχή ραδιοκάλυψης του υπό μελέτη κόμβου ορίζεται από το σχήμα ($ANBZ$). Ορίζοντας ως $x = OM$ την απόσταση του κόμβου από τον κεντρικό σταθμό έχουμε:

$$\begin{aligned}
 (ANBZ) &= 2(ANBM) - (AOBM), \\
 (ANBM) &= (AZBO) = r^2 \hat{\omega}, \\
 (AOBM) &= 2(OBM) = xrsin\hat{\omega}.
 \end{aligned} \quad (6.13)$$

Από το νόμο των συνημιτόνων στο τρίγωνο OBM είναι $\hat{\omega} = \text{acos}\left[\frac{x}{2r}\right]$. Συνεπώς,

$$S_{I,1} = 2r^2 \text{acos}\left[\frac{x}{2r}\right] - xrsin\left\{\text{acos}\left[\frac{x}{2r}\right]\right\}. \quad (6.14)$$

Η περιοχή $S_{E,1}$ τώρα, που περιλαμβάνει τους κόμβους της ζώνης 2 που βρίσκονται στην περιοχή ραδιοκάλυψης του υπό μελέτη κόμβου είναι:

$$S_{E,1} = \pi r^2 - S_{I,1} = \pi r^2 - 2r^2 \text{acos}\left[\frac{x}{2r}\right] + xrsin\left\{\text{acos}\left[\frac{x}{2r}\right]\right\}. \quad (6.15)$$

Με βάση τις εξισώσεις 6.8, 6.11, 6.12, 6.14 και 6.15 μπορούμε να υπολογίσουμε τα ζητούμενα εμβαδά για οποιαδήποτε ζώνη. Το πρόβλημα όμως είναι ότι ο υπολογισμός εξαρτάται από την παράμετρο x , πράγμα που αυξάνει σε μεγάλο βαθμό την πολυπλοκότητα του μοντέλου. Για απλοποίηση της όλης ανάλυσης και χωρίς βλάβη της γενικότητας θα υπολογίσουμε τα ζητούμενα εμβαδά για τη μέση τιμή του x , ήτοι $\bar{x}$.

Για να υπολογίσουμε τη μέση τιμή $\bar{x}$, πρέπει να υπολογίσουμε την πιθανότητα ένας κόμβος που βρίσκεται στη ζώνη i να απέχει x από το εσωτερικό σύνορο της ζώνης. Οι κόμβοι που βρίσκονται σε απόσταση x από το εσωτερικό σύνορο της ζώνης περιλαμβάνονται σε έναν μικρό δακτύλιο με ακτίνα $(i-1)r+x$ και πάχος dx . Ο ο αριθμός των κόμβων που βρίσκονται εκεί είναι ίσος με $\rho \cdot 2\pi[(i-1)r+x]dx$. Από την άλλη πλευρά, ο συνολικός αριθμός των κόμβων της ζώνης i είναι $\rho \cdot [\pi(ir)^2 - \pi(i-1)^2r^2] = \rho\pi(2i-1)r^2$. Η πιθανότητα ένας κόμβος που βρίσκεται στη ζώνη i να απέχει x από το εσωτερικό σύνορό της είναι τώρα ίση με τον αριθμό των κόμβων που βρίσκονται στο δακτύλιο με πάχος dx προς τον αριθμό των κόμβων της ζώνης, δηλαδή $\frac{2[(i-1)r+x]dx}{(2i-1)r^2}$. Από τον ορισμό του στατιστικού μέσου όρου έχουμε:

$$\bar{x} = \int_0^r p(x) \cdot x \cdot dx = \int_0^r \frac{2[(i-1)r+x]}{(2i-1)r^2} x dx = \frac{3i-1}{3(2i-1)}r \quad (6.16)$$

Αντικαθιστώντας την παραπάνω τιμή του x στις εξισώσεις 6.8, 6.11, 6.12, 6.14 και 6.15 μπορούμε να υπολογίσουμε τα ζητούμενα εμβαδά. Ας σημειωθεί παρ' όλ' αυτά ότι οι τιμές του $\bar{x}$ εξαρτώνται από την τιμή του i , πράγμα που απαιτεί ξεχωριστό υπολογισμό για τους κόμβους κάθε ζώνης. Στην πραγματικότητα όμως οι τιμές των εμβαδών δε διαφέρουν ριζικά για τις διάφορες τιμές του i . Συνεπώς, το μοντέλο μπορεί να απλοποιηθεί με βάση κάποιες προσεγγιστικές λύσεις. Η απόφαση, βέβαια για το αν θα χρησιμοποιηθούν προσεγγιστικές λύσεις ή θα υπολογίζονται τα εμβαδά ξεχωριστά για τις διάφορες τιμές του i είναι υποκειμενική.

Στον Πίνακα 6.1 παρατίθενται η μέση τιμή (mean) και η διάμεσος (median) των ζητούμενων εμβαδών, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως προσεγγιστικές τιμές, ανεξάρτητες από το i . Για τον υπολογισμό τους ελήφθησαν τα αποτελέσματα για $i = 1 \dots 7$. Επιπλέον, σε περίπτωση που κρίνεται ότι οι παραπάνω τιμές αλλοιώνουν την ακρίβεια του μοντέλου, παρατίθενται και κάποιες προσεγγιστικές συναρτήσεις για τον υπολογισμό των εμβαδών, βασισμένες στη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Τέλος, σε περίπτωση που προτιμάται η χρήση των ακριβών τιμών, αυτές παρατίθενται στον Πίνακα 6.2. Ο λόγος για τον οποίο επιλέχθηκαν τιμές του i από 1 ως 7 είναι γιατί θεωρείται απίθανο ένα δίκτυο να έχει παραπάνω από 7 ζώνες. Οφείλεται να τονιστεί ότι, στη δική μας περίπτωση, για την επαλήθευση του μοντέλου της προηγούμενης ενότητας και για την αξιολόγηση επίδοσης τα εμβαδά υπολογίστηκαν με βάση τις μέσες τιμές.

S	Μέση τιμή	Διάμεσος	Προσεγγιστική Συνάρτηση
S_I	$0.50r^2$	$0.52r^2$	$S_I = 0.07\ln(i)r^2 + 0.40r^2$
S_M	$1.91r^2$	$1.91r^2$	$S_M = 1.91r^2$
S_E	$0.73r^2$	$0.71r^2$	$S_E = -0.08\ln(i)r^2 + 0.84r^2$
$S_{I,1}$	$1.83r^2$	$1.83r^2$	$1.83r^2$
$S_{E,1}$	$1.30r^2$	$1.30r^2$	$1.30r^2$

Πίνακας 6.1: Προσεγγιστικές μέθοδοι για τον υπολογισμό των εμβαδών

i	1	2	3	4	5	6	7
S_I	$1.83r^2$	$0.38r^2$	$0.47r^2$	$0.51r^2$	$0.53r^2$	$0.54r^2$	$0.55r^2$
S_M	-	$1.91r^2$	$1.91r^2$	$1.91r^2$	$1.91r^2$	$1.91r^2$	$1.91r^2$
S_E	$1.30r^2$	$0.85r^2$	$0.76r^2$	$0.71r^2$	$0.69r^2$	$0.68r^2$	$0.67r^2$

Πίνακας 6.2: Ακριβείς τιμές των εμβαδών

Στην επόμενη ενότητα ακολουθεί η επαλήθευση του μοντέλου.

6.2.4 Επαλήθευση του αναλυτικού μοντέλου

Η επαλήθευση του αναλυτικού μοντέλου που σχεδιάστηκε παραπάνω πραγματοποιείται μέσω προσομοίωσης στην πλατφόρμα OPNET. Ως πρότυπο για το ασύρματο μέσο επιλέχθηκε το IEEE 802.11a που υποστηρίζει ρυθμούς μέχρι 54Mb/s. Ως πρωτόκολλο δρομολόγησης επιλέχθηκε το AODV.

Όσον αφορά την κατανομή που ακολουθεί η παραγόμενη κίνηση λ , όπως και στην περίπτωση του δικτύου αισθητήρων-συντονιστών του Κεφαλαίου 5, εξαρτάται από διάφορα χαρακτηριστικά, συγκεκριμένα για κάθε δίκτυο. Προκειμένου η περίπτωση που εξετάζουμε να είναι όσο το δυνατό πιο γενική, χρησιμοποιείται κι εδώ η κατανομή Poisson με μέση τιμή λ πακέτα/s, για το χαρακτηρισμό της κίνησης που παράγει κάθε κόμβος. Κατά παρόμοιο τρόπο, η συνολική κίνηση που παράγεται από τους συντονιστές μιας κυψέλης ακτίνας r ακολουθεί την κατανομή Poisson με μέση τιμή g πακέτα/s. Με τον τρόπο αυτό, οι πιθανότητες p και p_1 που απαιτούνται για τον υπολογισμό της χρησιμοποίησης και της καθυστέρησης μετάδοσης (βλ. Κεφ. 5) υπολογίζονται από την Εξίσωση 5.17.

Επιπλέον, το μέγεθος ωφέλιμου πακέτου ακολουθεί την Εκθετική κατανομή με μέση τιμή P bits. Η συγκεκριμένη κατανομή έχει αποδειχθεί εξαιρετικά ικανοποιητική για την περιγραφή μεγέθους πακέτων σε δίκτυα IEEE 802.11 [20]. Με βάση την παραπάνω παραδοχή, οι χρόνοι T_s και T_c μιας επιτυχούς μετάδοσης και μιας σύγκρουσης μπορούν να υπολογιστούν εύκολα συναρτήσει των παραμέτρων του φυσικού επιπέδου του προτύπου, της τιμής του κατώφλιού RTS_{thr} και της πιθανότητας μετάδοσης με το βασικό μηχανισμό πρόσβασης, p_{bas} . Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν ήδη στο Κεφάλαιο 5 και συγκεκριμένα στην Εξίσωση 5.18.

Με βάση τα παραπάνω, στον Πίνακα 6.3 συνοψίζονται όλες οι παράμετροι του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διαδικασία της επαλήθευσής του, για δυο διαφορετικά σενάρια. Με βάση το κάθε σενάριο, διεξήχθησαν αρκετές προσομοιώσεις για διάφορες τιμές του φόρτου κίνησης, προσομοιώνοντας κάθε φορά μια ώρα πραγματικής λειτουργίας του δικτύου.

Παράμετρος	Σενάριο 1	Σενάριο 2
Διάρκεια χρονοθυρίδας (τ)	9 μ s	9 μ s
Διάστημα SIFS	16 μ s	16 μ s
Διάστημα DIFS	34 μ s	34 μ s
Διάρκεια επικεφαλίδας φυσικού επιπέδου (PHY)	20 μ s	20 μ s
Μήκος επικεφαλίδας MAC	272bits	272bits
Μήκος ACK	112bits	112bits
Μήκος RTS	160bits	160bits
Μήκος CTS	112bits	112bits
Ρυθμός μετάδοσης (R)	12Mb/s	54Mb/s
Κατώφλι RTS	128Bytes	128Bytes
Ωφέλιμο μέγεθος πακέτου (P)	512Bytes	512Bytes
Minimum contention window (W)	15	15
Ακτίνα ραδιοκάλυψης συντονιστή (r)	200m	30m
Πυκνότητα συντονιστών στο δίκτυο (ρ)	5 $\times 10^{-5}$ συντ./m ²	2 $\times 10^{-3}$ συντ./m ²
Αριθμός ζωνών	3	3

Πίνακας 6.3: Παράμετροι για την επαλήθευση του μοντέλου ενός καναλιού

Στους Πίνακες 6.4, 6.5, 6.6 και 6.7 συγκεντρώνονται τα αριθμητικά αποτελέσματα από το μοντέλο και την προσομοίωση, που αφορούν την επαλήθευση του μέτρου της συνολικής καθυστέρησης (ανόδου και καθόδου) για την τρίτη ζώνη. Επιλέξαμε το συγκεκριμένο μέτρο και για τη ζώνη 3, ως το πιο αντιπροσωπευτικό, αφού, για να φτάσει ένα πακέτο από τη ζώνη 3 στον κεντρικό σταθμό (και αντίστροφα), πρέπει να διανύσει όλες τις υπόλοιπες ζώνες. Να σημειωθεί ότι η παραγόμενη κίνηση αναφέρεται στην παράμετρο λ που είναι η καθαρά παραγόμενη κίνηση από τους κόμβους, χωρίς να περιλαμβάνεται η κίνηση που προωθούν εκ μέρους άλλων. Η ποσοστιαία διαφορά στις τιμές ορίζεται ως $(OP - MD)/MD$, όπου OP είναι η τιμή του OPNET και MD είναι η τιμή του μοντέλου. Όπως φαίνεται, σε όλες τις περιπτώσεις το μοντέλο είναι αρκετά ακριβές.

Κίνηση ανόδου (πακ./s)	Κίνηση καθόδου (πακ./s)	Μοντέλο (ms)	OPNET (ms)	Διαφορά (%)
4	2	2.60	2.86	10
6	3	9.30	10.23	10
8	4	120.20	131.02	9
9	4.5	606.60	649.06	7
10	5	3877.00	4148.39	7

Πίνακας 6.4: Επαλήθευση του μέτρου της καθυστέρησης ανόδου - Σενάριο 1

Κίνηση ανόδου (πακ./s)	Κίνηση καθόδου (πακ./s)	Μοντέλο (ms)	OPNET (ms)	Διαφορά (%)
10	5	1.73	1.94	12
17	8.5	50.48	50.53	10
19	9.5	188.92	207.81	10
20	10	385.86	416.73	8
22	11	1826.69	1972.83	8

Πίνακας 6.5: Επαλήθευση του μέτρου της καθυστέρησης ανόδου - Σενάριο 2

Κίνηση ανόδου (πακ./s)	Κίνηση καθόδου (πακ./s)	Μοντέλο (ms)	OPNET (ms)	Διαφορά (%)
1	0.5	1.83	2.04	11
2	1	2.26	2.44	8
4	2	9.36	10.11	8
6	3	303.90	325.17	7
7	3.5	3070.00	3254.20	6

Πίνακας 6.6: Επαλήθευση του μέτρου της καθυστέρησης καθόδου - Σενάριο 1

Κίνηση ανόδου (πακ./s)	Κίνηση καθόδου (πακ./s)	Μοντέλο (ms)	OPNET (ms)	Διαφορά (%)
5	2.5	1.15	1.28	11
10	5	13.72	15.09	10
12	6	65.33	69.25	6
14	7	386.50	409.69	6
15	7.5	1030.00	1071.20	4

Πίνακας 6.7: Επαλήθευση του μέτρου της καθυστέρησης καθόδου - Σενάριο 2

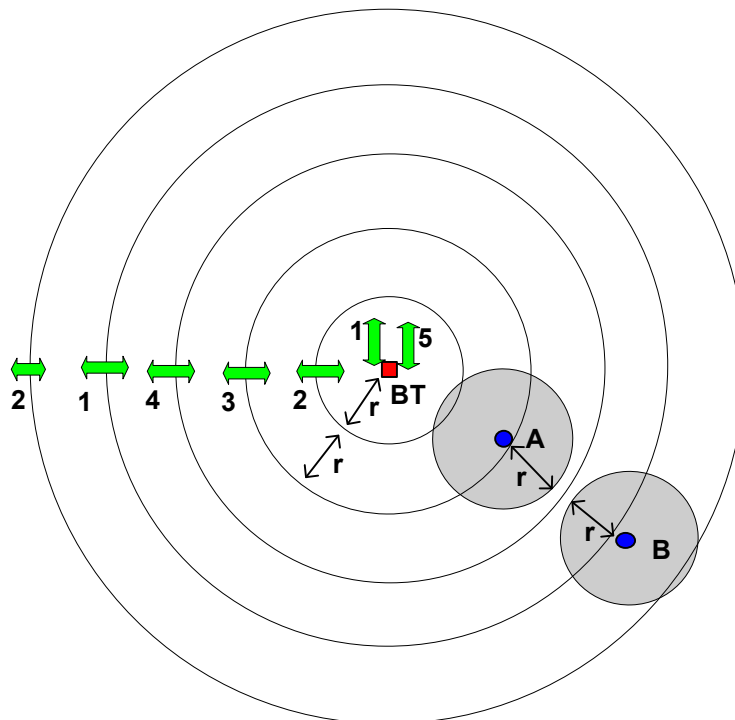
6.3 MAWA: Το προτεινόμενο σχήμα επικοινωνίας πολλαπλών καναλιών

Έχοντας αναλύσει τον απλό, συμβατικό τρόπο επικοινωνίας ενός καναλιού σε δίκτυα ad hoc με υποδομή, θα παρουσιάσουμε, στην παρούσα ενότητα, το προτεινόμενο σχήμα επικοινωνίας πολλαπλών καναλιών, για βελτίωση της επίδοσης του δικτύου. Ονομάζουμε το εν λόγω σχήμα MAWA από τα αρχικά *Multi-channel Ad hoc Wireless Access*.

Όπως είναι ήδη γνωστό, οι ζώνες ISM και UN-II στις οποίες λειτουργεί το πρότυπο IEEE 802.11 προσφέρουν περισσότερα του ενός κανάλια τα οποία, αν χρησιμοποιηθούν αποδοτικά, μπορούν να αυξήσουν την επίδοση του συστήματος.

Για το σχεδιασμό ενός αποδοτικού σχήματος επικοινωνίας θα πρέπει να εστιάσουμε στις ιδιαιτερότητες των δικτύων ad hoc με υποδομή, και με βάση αυτές, να καλυφθούν τα μειονεκτικά σημεία που ελαττώνουν την επίδοση. Τα δίκτυα ad hoc με υποδομή έχουν την ιδιαιτερότητα ότι η κίνηση προωθείται από τους εξωτερικούς κόμβους στον κεντρικό σταθμό και αντίστροφα, πράγμα που αυξάνει την προσφερόμενη κίνηση στο κανάλι. Ανατρέχοντας ξανά στην Εξίσωση 6.2 που προσδιορίζει την προσφερόμενη κίνηση σε κάθε κυψέλη, θα δούμε ότι αυτή προέρχεται από διαφορετικές ζώνες. Η παρατήρηση αυτή μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι υπάρχει μια μεγάλη εξάρτηση μεταξύ των ζωνών του δικτύου, η οποία μειώνει την επίδοσή του. Την εξάρτηση αυτή μεταξύ των ζωνών, προσδοκούμε να την εξαλείψουμε μέσω του σχήματος MAWA.

Πιο συγκεκριμένα, το προτεινόμενο σχήμα χρησιμοποιεί δυο κανάλια επικοινωνίας σε κάθε κόμβο, προκειμένου να απομονώσει κάθε ζώνη από τις γειτονικές της. Ας δούμε αναλυτικά πώς επιτυγχάνεται αυτό. Σε κάθε ζώνη ανατίθενται δυο κανάλια, ονομαζόμενα C_I και C_E . Το C_I χρησιμοποιείται για την επικοινωνία μεταξύ της συγκεκριμένης ζώνης με την εσωτερική της, ενώ το C_E χρησιμοποιείται για την επικοινωνία της συγκεκριμένης ζώνης με την εξωτερική της. Με τον τρόπο αυτό, δυο γειτονικές ζώνες χρησιμοποιούν το ίδιο κανάλι για τη μεταξύ τους επικοινωνία, αλλά διαφορετικά κανάλια για επικοινωνία με τις υπόλοιπες ζώνες, όντας, κατά κάποιο τρόπο, απομονωμένες μεταξύ τους. Για επικοινωνία μεταξύ των κόμβων που ανήκουν στην ίδια ζώνη χρησιμοποιείται το C_I . Αν το C_I είναι κατειλημμένο, τότε χρησιμοποιείται το C_E . Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να πούμε ότι, υπό συνθήκες πεπερασμένου φόρτου κίνησης, η κίνηση μεταξύ των κόμβων της ίδιας ζώνης μοιράζεται περίπου εξ' ίσου μεταξύ των δυο καναλιών. Η λειτουργία του προτεινόμενου σχήματος απεικονίζεται στο Σχήμα 6.5.



Σχήμα 6.5: Το προτεινόμενο σχήμα MAWA

Με βάση το παραπάνω σχήμα επικοινωνίας, τα απαιτούμενα κανάλια για την κάλυψη όλου του δικτύου είναι ανάλογα του αριθμού των ζωνών του δικτύου (π.χ. στη ζώνη 1 δίνουμε τα κανάλια με αριθμό 1 (C_I) και 2 (C_E), στη ζώνη 2 δίνουμε τα κανάλια με αριθμό 2 (C_I) και 3 (C_E), στη ζώνη 3 τα κανάλια με αριθμό 3 (C_I) και 4 (C_E), στη ζώνη 4 τα κανάλια με αριθμό 4 (C_I) και 5 (C_E) κ.ο.κ. Με τον τρόπο αυτό είναι αδύνατο να υλοποιηθεί το σχήμα, καθώς τα κανάλια που απαιτούνται είναι πολλά. Για το λόγο αυτό σχεδιάζεται αλγόριθμος επαναχρησιμοποίησης συχνότητας, ώστε να μειωθεί ο αριθμός των απαιτούμενων καναλιών. Με αναφορά στο Σχήμα 6.5, βλέπουμε ότι η ελάχιστη απόσταση που μπορούν να έχουν δυο κόμβοι ώστε να μην επηρεάζουν ο ένας τον άλλο είναι $2r$. Δεδομένου ότι το πάχος κάθε ζώνης είναι r , κάθε τέσσερις ζώνες μπορούμε να επαναχρησιμοποιήσουμε τα διαθέσιμα κανάλια. Με τον τρόπο αυτό, τα απαιτούμενα κανάλια είναι τώρα τέσσερα στον αριθμό.

Ας έχουμε υπόψη μας τώρα το γεγονός ότι, στη ζώνη 1, ο φόρτος είναι υπερβολικά αυξημένος, λόγω της κίνησης που παράγει ο κεντρικός σταθμός προς όλους τους κόμβους. Για το λόγο αυτό προσθέτουμε ένα επιπλέον κανάλι, ονόματι κανάλι 5. Με την παρουσία του νέου αυτού καναλιού, κάποιιοι κόμβοι θα επικοινωνούν μεταξύ τους χρησιμοποιώντας το κανάλι 1, ενώ οι υπόλοιποι χρησιμοποιώντας το κανάλι 5. Ο κεντρικός σταθμός επικοινωνεί με τους κόμβους της ζώνης 1 χρησιμοποιώντας ένα από τα δυο κανάλια. Ο αλγόριθμος ανάθεσης καναλιών σε κάθε ζώνη είναι εναλλακτικός. Ας υποθέσουμε ότι κάποιος κόμβος θέλει να ενταχθεί στη ζώνη 1. Τότε, αν στον προηγούμενο κόμβο που εντάχθηκε αποδόθηκε το κανάλι 1, σε αυτόν αποδίδεται το κανάλι 5, και αντίστροφα. Με τον τρόπο αυτό η προσφερόμενη κίνηση μοιράζεται εξ' ίσου μεταξύ των δυο καναλιών.

Ας θεωρήσουμε τώρα τα πέντε διαθέσιμα κανάλια με χαρακτηριστικούς αριθμούς 1, 2, 3, 4, 5 αντίστοιχα. Επίσης ας ορίσουμε ως $C_{I,i}$ και $C_{E,i}$ τους αριθμούς των καναλιών C_I και C_E αντίστοιχα (δηλαδή 1, 2, 3, 4 ή 5). Ειδικά για την πρώτη ζώνη, ορίζονται δυο κανάλια με ονόματα $C_{I,1A}$ και $C_{I,1B}$ αντίστοιχα. Ο αλγόριθμος ανάθεσης καναλιών στους κόμβους, όπως αυτός απεικονίζεται στο Σχήμα 6.5 έχει ως εξής:

- Για τον κεντρικό σταθμό: $C_{I,1A} = 1$ και $C_{I,1B} = 5$.
- Για τους υπόλοιπους κόμβους: Αν $(i == 1)$ τότε:
 - Αν για τον προηγούμενο κόμβο που εντάχθηκε: $(C_{I,1} == 1)$ τότε: $C_{I,1} = 5$, αλλιώς $C_{I,1} = 1$.
 - $C_{E,1} = 2$.
- Αν $(i > 1)$ τότε: $C_{I,i} = C_{E,i-1}$ και $C_{E,i} = C_{I,i} \bmod 4 + 1$.

Ολοκληρώνοντας την παρουσίαση του προτεινόμενου σχήματος, τονίζουμε ότι, καθώς το σχήμα MAWA απαιτεί την ύπαρξη πέντε ανεξάρτητων καναλιών, το μόνο πρότυπο της οικογένειας IEEE 802.11 που μπορεί να το υποστηρίξει, είναι το IEEE 802.11a, το οποίο προσφέρει 12 ανεξάρτητα κανάλια.

Θα περάσουμε τώρα στη σύγκρισή του προτεινόμενου σχήματος με άλλα σχήματα επικοινωνίας πολλαπλών καναλιών.

6.4 Σύγκριση του προτεινόμενου σχήματος με άλλα σχήματα επικοινωνίας πολλαπλών καναλιών

Προκειμένου να αξιολογήσουμε το σχήμα MAWA που προτάθηκε στην προηγούμενη ενότητα, θα το συγκρίνουμε με δυο άλλα, απλά, γενικά σχήματα επικοινωνίας πολλαπλών καναλιών για δίκτυα ad hoc με υποδομή. Προς τη συγκεκριμένη κατεύθυνση, στο υπόλοιπο της ενότητας, αρχικά παρουσιάζονται και μοντελοποιούνται καθένα από τα σχήματα (μαζί με το MAWA) και στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας τα αναλυτικά μοντέλα, διενεργείται συγκριτική αξιολόγηση επίδοσης.

6.4.1 Παρουσίαση και μοντελοποίηση των σχημάτων επικοινωνίας πολλαπλών καναλιών

Το πρώτο γενικό σχήμα αφορά τη χρήση δυο καναλιών που χρησιμοποιούνται τυχαία από κάθε κόμβο που θέλει να μεταδώσει (συμπεριλαμβανομένου και του κεντρικού σταθμού). Αυτό σημαίνει ότι κάθε κόμβος, όταν θέλει να μεταδώσει ένα πακέτο, επιλέγει τυχαία ένα από τα δυο κανάλια. Ορίζουμε το σχήμα αυτό ως *'RANDOM'*. Για τη μοντελοποίηση του σχήματος αυτού, η μόνη διαφορά με το μοντέλο της Ενότητας 6.2 έγκειται στο μοντέλο κίνησης, όπου η κίνηση σε κάθε κυψέλη και για καθένα από τα δυο κανάλια είναι η μισή από αυτή που ορίζεται στην Εξίσωση 6.2. Αυτό συμβαίνει διότι κάθε κόμβος επιλέγει με ίση πιθανότητα ένα από τα δυο κανάλια για να στείλει το πακέτο του. Η καθυστέρηση μετάδοσης (που είναι, θεωρητικά, ίδια σε κάθε κανάλι) υπολογίζεται από την Ενότητα 6.2 αντικαθιστώντας στην Εξίσωση 6.2: $g = g/2$.

Το δεύτερο σχήμα αφορά τη χρήση δυο καναλιών όπου, απλά, το ένα χρησιμοποιείται για την κίνηση ανόδου και το άλλο για την κίνηση καθόδου. Ας ορίσουμε το συγκεκριμένο σχήμα ως *'UP/DOWN'*. Για το αναλυτικό μοντέλο του σχήματος αυτού, η μόνη διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι τώρα υπάρχουν δυο διαφορετικά κανάλια, ένα για την κίνηση ανόδου και ένα για την κίνηση καθόδου. Η καθυστέρηση μετάδοσης είναι τώρα διαφορετική για άνοδο και για κάθοδο και δίνεται από την Ενότητα 6.2 αντικαθιστώντας στην Εξίσωση 6.2 το g με g_u ή g_d αντίστοιχα.

Τέλος, ας αναδιαρθρώσουμε το μοντέλο της Ενότητας 6.2 για τη μοντελοποίηση του MAWA. Δεδομένου ότι σε κάθε ζώνη χρησιμοποιούνται δυο ξεχωριστά κανάλια για επικοινωνία με τις εσωτερικές και εξωτερικές ζώνες, η Εξίσωση 6.2 πρέπει να αναθεωρηθεί. Στη συγκεκριμένη περίπτωση έχουμε να κάνουμε με τη συνολική κίνηση που παράγεται στο κανάλι κάθε ζώνης (C_I, C_M). Ας ορίσουμε λοιπόν τη μέση τιμή της προσφερόμενης κίνησης σε μια κυψέλη- i ως $g_{CI,i}$ (για το κανάλι C_I) και ως $g_{CE,i}$ (για το κανάλι C_E). Ειδικά στην πρώτη ζώνη όπου υπάρχουν δυο κανάλια για επικοινωνία με τον κεντρικό σταθμό ($C_{I,1A}$ και $C_{I,1B}$), η κίνηση που παράγεται στο κανάλι C_I στη ζώνη 1 είναι η κίνηση που παράγεται ή στο κανάλι $C_{I,1A}$ ή στο $C_{I,1B}$, ανάλογα με το κανάλι που χρησιμοποιεί ο κόμβος. Με βάση την ανάλυση που προηγήθηκε, η προσφερόμενη κίνηση σε κάθε κανάλι υπολογίζεται τώρα ως εξής:

$$\begin{cases} g_{CI,i} = \rho S_M \Lambda_{u,i} + \rho S_I \Lambda_{d,i-1}, \\ g_{CE,i} = \rho S_E \Lambda_{u,i+1} + \rho S_I \Lambda_{d,i}, \\ g_{CI,1} = g_{CI,1A} = g_{CI,1B} = \frac{1}{2}[(\rho S_{I,1} - 1)\Lambda_{u,1} + \rho \pi r^2 H^2 \lambda_d], \\ g_{CE,1} = (\rho S_{I,1} - 1)\Lambda_{d,1} + \rho S_{E,1} \Lambda_{u,2}. \end{cases} \quad (6.17)$$

Μια τελευταία αλλαγή στην ανάλυση της Ενότητας 6.2, όσον αφορά την καθυστέρηση μετάδοσης, έχει να κάνει με την τιμή της παραμέτρου N της Εξίσωσης 6.3. Για τη συγκεκριμένη περίπτωση δεν ισχύει πια $N = 4$, καθώς το πηλίκο των κόμβων που μπορούν να επηρεάσουν την επικοινωνία ενός κόμβου Α προς τους κόμβους που υπάρχουν στην κυψέλη με κέντρο τον Α αλλάζει. Για να βρούμε το συγκεκριμένο πηλίκο, δεδομένου ότι όλοι οι κόμβοι που μπορούν να επηρεάσουν την επικοινωνία ενός κόμβου βρίσκονται σε απόσταση $2r$ από αυτόν (βλ. Εν. 5.2.1), πρέπει να υπολογίσουμε τον αριθμό των κόμβων που εκτείνονται σε απόσταση $2r$ από έναν συγκεκριμένο κόμβο και επικοινωνούν με αυτόν μέσω του ίδιου καναλιού. Ακολουθώντας παρόμοια ανάλυση με αυτή της υποενότητας 6.2.3, υπολογίζεται ότι τα εμβαδά που αφορούν τους κόμβους αυτούς είναι, προσεγγιστικά, ίσα με: $S_I^{INT} = 3S_I$, $S_M^{INT} = 3S_M$, $S_E^{INT} = 3S_E$, $S_{I,1}^{INT} = 4S_{I,1}$, $S_{E,1}^{INT} = 3S_{E,1}$. Συνεπώς, η τιμή του N είναι τώρα:

$$\begin{cases} N_{CI} = \frac{S_I^{INT} + S_M^{INT}}{S_I + S_M} = 3, \\ N_{CE} = \frac{S_M^{INT} + S_E^{INT}}{S_M + S_E} = 3. \end{cases} \quad (6.18)$$

Οι τιμές αυτές ισχύουν για όλες τις ζώνες εκτός από την πρώτη, στην οποία η αντίστοιχη τιμή του N προκύπτει $N = 4$.

Με βάση τα παραπάνω μπορούμε να υπολογίσουμε την καθυστέρηση μετάδοσης $d_{CI,i}$ και $d_{CE,i}$ για τα κανάλια C_I και C_E αντίστοιχα.

Από την καθυστέρηση μετάδοσης, υπολογίσουμε, τέλος, τη συνολική καθυστέρηση ανόδου και καθόδου, όπως στις Εξισώσεις 6.4 και 6.5:

$$\begin{cases} d_{tu,i} = \sum_{j=1}^i d_{CI,j}, \\ d_{td,i} = d_{CI,1} + \sum_{j=1}^{i-1} d_{CE,j}, & i \neq 1, \\ d_{td,i} = d_{CI,1}, & i = 1. \end{cases} \quad (6.19)$$

Στην επόμενη υποενότητα ακολουθεί η αξιολόγηση επίδοσης του σχήματος MAWA, συγκρίνοντάς το με τα δυο άλλα σχήματα επικοινωνίας πολλαπλών καναλιών.

6.4.2 Συγκριτική αξιολόγηση επίδοσης

Χρησιμοποιώντας το αναλυτικό μοντέλο που σχεδιάστηκε στις προηγούμενες ενότητες, θα διεξάγουμε τώρα αξιολόγηση επίδοσης του προτεινόμενου σχήματος MAWA, συγκρίνοντάς το με τα άλλα δυο σχήματα επικοινωνίας πολλαπλών καναλιών. Η αξιολόγηση αφορά την εφαρμογή των τριών σχημάτων σε δυο διαφορετικά δίκτυα.

Το πρώτο είναι ένα δίκτυο roof top, προσωπικών επικοινωνιών, όπου οι τερματικοί κόμβοι συνδέονται μέσω του κεντρικού σταθμού (πύλη) στο internet. Η περιοχή στην οποία εκτείνεται το δίκτυο θεωρείται ότι είναι αστική και πυκνοκατοικημένη. Καθώς η απόσταση μεταξύ των σπιτιών είναι αρκετά μικρή, χρησιμοποιούμε κανάλι των 54Mb/s με ακτίνα ραδιοκάλυψης 30m. Οι υπηρεσίες που χρησιμοποιούνται είναι κατά κόρο πλοήγηση στο διαδίκτυο, email και ftp downloading, και κατά δεύτερο λόγο, email και ftp uploading. Για το λόγο αυτό, η καθοδική κίνηση είναι πολύ μεγαλύτερη της ανοδικής. Συγκεκριμένα θεωρούμε ότι ο λόγος ανοδικής προς καθοδική κίνηση είναι 1/9.

Το δεύτερο δίκτυο αφορά ένα δίκτυο αισθητήρων (ή αισθητήρων-συντονιστών) κεντροποιημένης επικοινωνίας, που σημαίνει ότι οι τερματικοί αισθητήρες (ή συντονιστές) επικοινωνούν με έναν κεντρικό σταθμό και όχι μεταξύ τους. Στο συγκεκριμένο δίκτυο υποτίθεται ότι οι τερματικοί κόμβοι στέλνουν στον κεντρικό σταθμό πληροφορία που συλλέγουν από το περιβάλλον. Για το λόγο αυτό, η ανοδική κίνηση είναι πολύ μεγαλύτερη από την καθοδική. Συγκεκριμένα, θεωρούμε ότι ο λόγος ανοδικής προς καθοδική κίνηση είναι 9/1. Το δίκτυο εκτείνεται σε μια αγροτική ή δασική περιοχή, όπου η πυκνότητα των αισθητήρων είναι σχετικά αραιή. Συνεπώς, είναι εύλογο να χρησιμοποιήσουμε κανάλι των 6Mb/s με ακτίνα ραδιοκάλυψης 300m.

Στον πίνακα 6.8 συνοψίζονται οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο και για τα δυο δίκτυα. Για κάθε δίκτυο λαμβάνονται αριθμητικά αποτελέσματα χρησιμοποιώντας τα αναλυτικά μοντέλα των προηγούμενων ενοτήτων για το μέτρο της συνολικής καθυστέρησης ανόδου και καθόδου, ειδικά για την τρίτη ζώνη. Τα αποτελέσματα λαμβάνονται σε συνάρτηση με την κίνηση ανόδου (λ_u) ή την κίνηση καθόδου (λ_d) κάθε κόμβου.

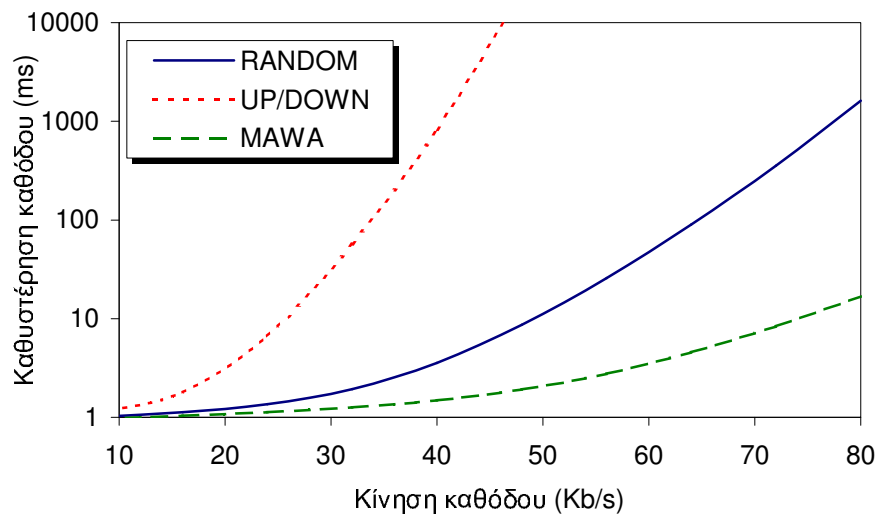
Όσον αφορά την παρουσίαση των αποτελεσμάτων, ας σημειωθεί ότι, παρ' ότι η παράμετρος λ ορίστηκε σε πακέτα/s, στις γραφικές παραστάσεις που θα ακολουθήσουν παρουσιάζεται σε Kb/s (πολλαπλασιασμένη με το μέγεθος πακέτου) ώστε να είναι ανεξάρτητη από το μέγεθος πακέτου και να υπάρχει μια σαφέστερη αντίληψη του φόρτου τηλεπικοινωνιακής κίνησης. Επιπλέον, οι τιμές των μέτρων αξιολόγησης παρουσιάζονται σε λογαριθμική κλίμακα για την αύξηση του εύρους των παρουσιαζόμενων αποτελεσμάτων.

Στο Σχήμα 6.6 παρουσιάζεται η καθυστέρηση καθόδου για τους κόμβους της τρίτης ζώνης και για το δίκτυο roof top, σε συνάρτηση με την προσφερόμενη κίνηση καθόδου (download traffic) κάθε κόμβου. Υπενθυμίζεται ότι η καθυστέρηση καθόδου αφορά την καθυστέρηση που υφίσταται ένα πακέτο κατά τη μετάδοσή του από τον κεντρικό σταθμό μέχρι τον τελικό κόμβο-παραλήπτη.

Όπως φαίνεται και από την εικόνα, το σχήμα UP/DOWN παρουσιάζει σαφώς χειρότερη επίδοση από τα δυο άλλα. Αυτό είναι λογικό, καθώς σε ένα κανάλι συγκεντρώνεται το μεγαλύτερο ποσοστό της κίνησης,

Παράμετρος	Roof top network	Sensor network
Διάρκεια χρονοθυρίδας (τ)	9 μ s	9 μ s
Διάστημα SIFS	16 μ s	16 μ s
Διάστημα DIFS	34 μ s	34 μ s
Διάρκεια επικεφαλίδας φυσικού επιπέδου (PHY)	20 μ s	20 μ s
Μήκος επικεφαλίδας MAC	272bits	272bits
Μήκος ACK	112bits	112bits
Μήκος RTS	160bits	160bits
Μήκος CTS	112bits	112bits
Ρυθμός μετάδοσης (R)	54Mb/s	6Mb/s
Κατώφλι RTS	256Bytes	128Bytes
Ωφέλιμο μέγεθος πακέτου (P)	1024Bytes	512Bytes
Minimum contention window (W)	15	15
Ακτίνα ραδιοκάλυψης συντονιστή (r)	30m	300m
Πυκνότητα συντονιστών στο δίκτυο (ρ)	5.3 $\times 10^{-3}$ συντ./m ²	3.5 $\times 10^{-5}$ συντ./m ²
Λόγος ανοδικής προς καθοδική κίνηση	1/9	9/1
Αριθμός ζωνών	3	3

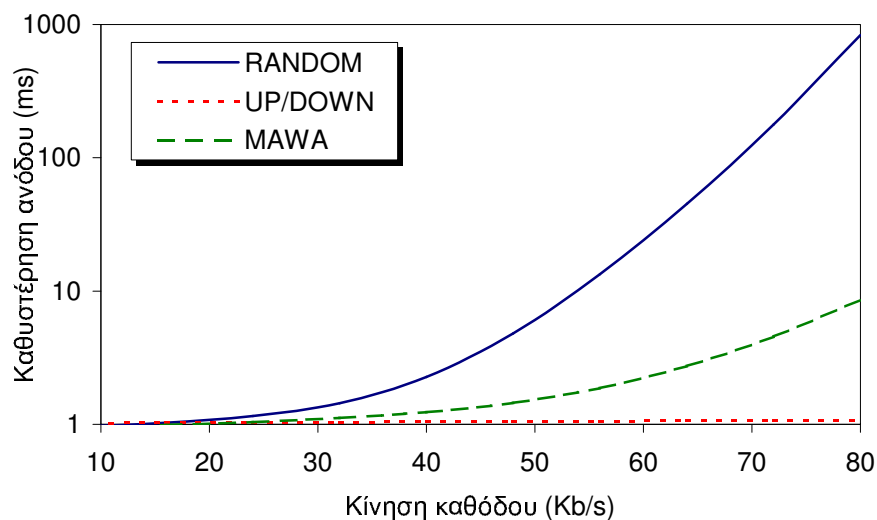
Πίνακας 6.8: Παράμετροι για την αξιολόγηση επίδοσης του σχήματος MAWA



Σχήμα 6.6: Καθυστερήση καθόδου σε σχέση με την κίνηση καθόδου λ_d - Δίκτυο roof top

ενώ το άλλο παραμένει αχρησιμοποίητο. Από την άλλη πλευρά, το σχήμα MAWA παρουσιάζει καλύτερη επίδοση και από τα άλλα δυο. Πράγματι, τη στιγμή που κάθε κόμβος κατεβάζει δεδομένα φόρτου 80Kb/s, η καθυστέρηση για το σχήμα UP/DOWN πρακτικά απειρίζεται, για το σχήμα RANDOM κυμαίνεται γύρω στο 1s, ενώ για το MAWA περιορίζεται μόλις στα 17ms. Παρατηρώντας περαιτέρω το Σχήμα 6.6, μπορούμε να δούμε ότι, χρησιμοποιώντας το σχήμα UP/DOWN, οι χρήστες μπορούν να κατεβάσουν δεδομένα με ανεκτική καθυστέρηση με ρυθμό μέχρι 5Kb/s περίπου (από το σημείο αυτό και μετά η καθυστέρηση ξεπερνά τα 100ms, πράγμα που καθιστά δύσχρηστη την υπηρεσία που εκτελείται). Αντίθετα, με το σχήμα RANDOM οι χρήστες μπορούν να κατεβάσουν άνετα με ρυθμό μέχρι και 60Kb/s, ενώ με το MAWA ο ρυθμός εκτείνεται μέχρι και τα 100Kb/s, που είναι 66% παραπάνω (δυστυχώς δε μπορεί να απεικονιστεί στην εικόνα, καθώς στα 100Kb/s η καθυστέρηση για το UP/DOWN απειρίζεται). Ο ρυθμός αυτός είναι ικανοποιητικός ακόμη και για υπηρεσίες μετάδοσης ασπρόμαυρης εικόνας χαμηλής ανάλυσης σε πραγματικό χρόνο.

Ας περάσουμε τώρα στην καθυστέρηση ανόδου που παρατηρείται στο δίκτυο roof top. Η σχετική γραφική παράσταση φαίνεται στο Σχήμα 6.7, όπου παρουσιάζεται η καθυστέρηση ανόδου για τους κόμβους της τρίτης ζώνης και για το δίκτυο roof top, σε συνάρτηση με την προσφερόμενη κίνηση καθόδου (download traffic) κάθε κόμβου. Υπενθυμίζεται ότι η καθυστέρηση ανόδου αφορά την καθυστέρηση που υφίσταται ένα πακέτο κατά τη μετάδοσή του από τον κόμβο-αποστολέα μέχρι τον κεντρικό σταθμό.

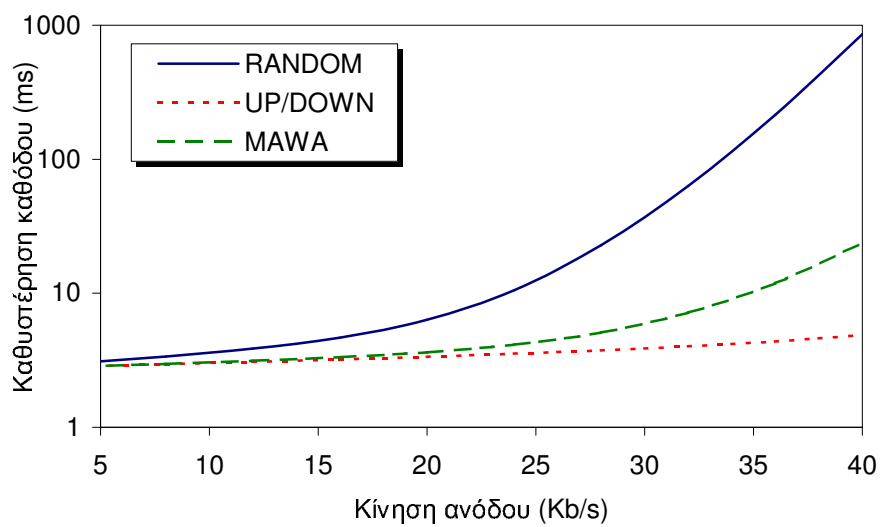


Σχήμα 6.7: Καθυστέρηση ανόδου σε σχέση με την κίνηση καθόδου λ_d - Δίκτυο roof top

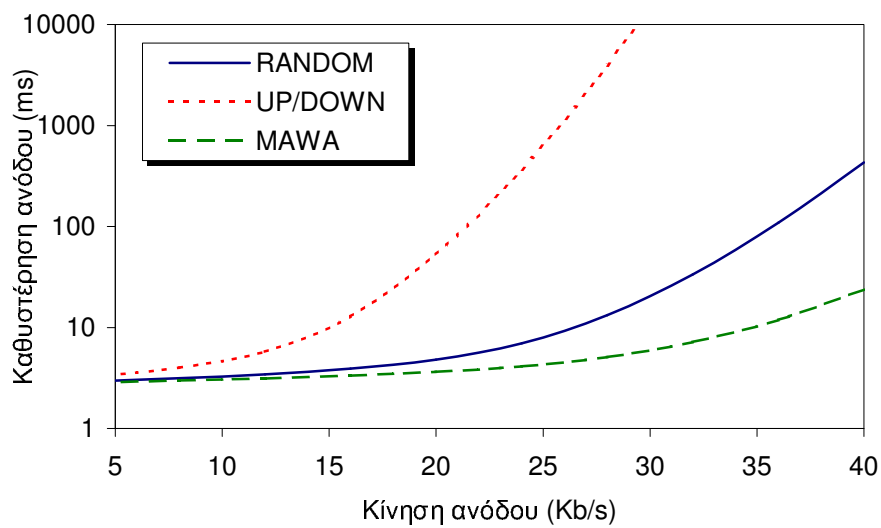
Είναι λογικό το σχήμα UP/DOWN να συμπεριφέρεται πολύ καλύτερα από τα άλλα δυο, καθ' όσον για την ελάχιστη κίνηση ανόδου που υπάρχει, αφιερώνεται ένα ολόκληρο κανάλι των 54Mb/s. Από την άλλη πλευρά, το MAWA συμπεριφέρεται καλύτερα από το RANDOM. Συγκεκριμένα, για κίνηση καθόδου 80Kb/s, που σημαίνει κίνηση ανόδου 8.8Kb/s, η καθυστέρηση ανόδου είναι περίπου 1s για το RANDOM και λιγότερο από 10ms για το MAWA. Επιπλέον, οι χρήστες μπορούν να ανεβάζουν δεδομένα, με ανεκτή καθυστέρηση, με ρυθμό μέχρι 60Kb/s για το RANDOM και μέχρι 100Kb/s για το MAWA, που είναι 66% παραπάνω.

Ας εξετάσουμε τώρα το δεύτερο δίκτυο, όπου η κίνηση ανόδου είναι πολύ μεγαλύτερη από την κίνηση καθόδου. Στο Σχήμα 6.8 απεικονίζεται η καθυστέρηση καθόδου σε σχέση με την κίνηση ανόδου κάθε κόμβου. Όπως παρατηρούμε, το σχήμα UP/DOWN συμπεριφέρεται πολύ καλύτερα από τα άλλα δυο. Αυτό είναι λογικό, καθώς ένα κανάλι των 6Mb/s αφιερώνεται για να εξυπηρετεί κίνηση της τάξης μόλις των 3kb/s. Όσον αφορά τη σύγκριση RANDOM με MAWA, το MAWA παρουσιάζεται καλύτερο. Συγκεκριμένα, για κίνηση ανόδου 40Kb/s (που σημαίνει κίνηση καθόδου 4.5Kb/s), η καθυστέρηση καθόδου για το MAWA είναι μόλις 23ms, ενώ για το RANDOM κυμαίνεται στο 1s. Ο κεντρικός σταθμός μπορεί να στέλνει άνετα δεδομένα συντονισμού με το σχήμα RANDOM μέχρι τα 35Kb/s (όπου η καθυστέρηση δεν ξεπερνά τα 100ms) ενώ με το MAWA ο ρυθμός εκτείνεται μέχρι και τα 45Kb/s, δηλαδή 28% παραπάνω.

Τέλος, στο σχήμα 6.9 απεικονίζεται η καθυστέρηση ανόδου σε σχέση με την κίνηση ανόδου κάθε κόμβου.



Σχήμα 6.8: Καθυστερήση καθόδου σε σχέση με την κίνηση ανόδου λ_u - Δίκτυο αισθητήρων



Σχήμα 6.9: Καθυστερήση ανόδου σε σχέση με την κίνηση ανόδου λ_u - Δίκτυο αισθητήρων

Όπως φαίνεται, το σχήμα UP/DOWN έχει τη χειρότερη επίδοση, καθώς το κανάλι των 6Mb/s δεν είναι ικανό να αντέξει την κίνηση ανόδου όλων των κόμβων. Το σχήμα MAWA, από την άλλη πλευρά, συμπεριφέρεται καλύτερα από το RANDOM. Για κίνηση ανόδου 40Kb/s, η καθυστέρηση ανόδου με το RANDOM είναι περίπου 500ms, ενώ με το MAWA είναι μόνο 25ms. Επιπλέον, ένας κόμβος μπορεί να ανεβάζει άνετα δεδομένα μέχρι 35Kb/s, ενώ με το MAWA μπορεί μέχρι και 48Kb/s, δηλαδή 37% παραπάνω.

Το γενικό συμπέρασμα που προκύπτει από την παραπάνω συγκριτική αξιολόγηση επίδοσης είναι ότι το MAWA συμπεριφέρεται καλύτερα από το RANDOM σε όλες τις περιπτώσεις. Κρίνοντας από το ποσοστό αύξησης του ρυθμού μετάδοσης μέχρι τον οποίο η υπηρεσία γίνεται ανεκτή, μπορούμε να πούμε ότι το MAWA συμπεριφέρεται καλύτερα στο δίκτυο roof top, όπου η προσφερόμενη κίνηση είναι μεγαλύτερη.

Συγκρίνοντας γενικά το MAWA με το UP/DOWN, μπορούμε να πούμε ότι το MAWA υπερέχει. Ο λόγος είναι διότι οι περιπτώσεις που υπερέχει το UP/DOWN δεν είναι αυτές που καθορίζουν την επιθυμητή επίδοση του δικτύου. Πράγματι, στο δίκτυο roof top μας ενδιαφέρει περισσότερο η καθυστέρηση καθόδου, παρά η καθυστέρηση ανόδου, ενώ το αντίθετο συμβαίνει στο δίκτυο αισθητήρων.

6.5 Σύνοψη

Θα κλείσουμε το παρόν κεφάλαιο με μια ανασκόπηση της εργασίας που πραγματοποιήθηκε και με κάποια συμπεράσματα, τα οποία παρουσιάζονται στην παρούσα ενότητα.

Τα δίκτυα ad hoc με υποδομή, που μελετήθηκαν στο παρόν κεφάλαιο, είναι τα δίκτυα ακαθόριστης διασύνδεσης που χαρακτηρίζονται από την ύπαρξη κάποιου κεντρικού σταθμού με τον οποίο επικοινωνούν όλοι οι τερματικοί κόμβοι. Τα συγκεκριμένα δίκτυα βρίσκουν εφαρμογές σε δίκτυα roof top, σε δίκτυα αισθητήρων και σε στρατιωτικά δίκτυα. Σε γενικές γραμμές, το βασικό πρόβλημα επίδοσης που παρουσιάζεται στα δίκτυα ad hoc με υποδομή είναι η αύξηση του φόρτου κίνησης λόγω προώθησης πακέτων, προκειμένου να φτάνουν και να φεύγουν τα πακέτα προς και από τον κεντρικό σταθμό αντίστοιχα.

Όσον αφορά την κάλυψη των δυο πρώτων στρωμάτων OSI για τα δίκτυα ad hoc με υποδομή, το πρότυπο IEEE 802.11 κρίνεται κατάλληλο, λόγω της ασύρματης φύσης επικοινωνίας και της φύσης anycast που πρεσβεύει. Προκειμένου όμως η επίδοσή του να είναι ικανοποιητική, κρίνονται απαραίτητες επεκτάσεις στο στρώμα MAC, ώστε να εξαλειφθεί το πρόβλημα της ελάττωσης επίδοσης λόγω φόρτου προώθησης πακέτων. Προς τη συγκεκριμένη κατεύθυνση, στο παρόν κεφάλαιο της διατριβής παρουσιάστηκε ένα σχήμα επικοινωνίας πολλαπλών καναλιών για βελτίωση της καθυστέρησης πακέτου. Το εν λόγω σχήμα, ονόματι MAWA, αξιολογήθηκε μέσω αναλυτικού μοντέλου (που σχεδιάστηκε για το συγκεκριμένο σκοπό), και συγκρίθηκε με δυο άλλα σχήματα πολλαπλών καναλιών, όπου και αποδείχθηκε η υπεροχή του.

Από την αξιολόγηση επίδοσης του προτεινόμενου σχήματος, προέκυψε το συμπέρασμα ότι, με χρήση του MAWA, η καθυστέρηση πακέτου ελαττώνεται σε εκθετικό βαθμό. Επιπροσθέτως, αυξάνονται τα όρια προσφερόμενης κίνησης για τα οποία η απόδοση του δικτύου είναι ικανοποιητική. Η αύξηση αυτή κυμαίνεται από 28% μέχρι και 66%.

Όσον αφορά θέματα εφαρμογής του προτεινόμενου σχήματος, μπορούμε να πούμε ότι αυτό είναι εύκολα υλοποιήσιμο, καθώς το πρότυπο IEEE 802.11a προσφέρει 12 ανεξάρτητα κανάλια επικοινωνίας ενώ στο εγγύς μέλλον, οι περισσότερες δικτυακές διεπαφές για IEEE 802.11 θα είναι εξοπλισμένες με δυο ανεξάρτητους πομποδέκτες.

Στο σημείο αυτό, με την ολοκλήρωση της μελέτης γύρω από τα δίκτυα ad hoc με υποδομή, έχει περατωθεί, στην ουσία, και η όλη ερευνητική εργασία της παρούσας διατριβής. Στο κεφάλαιο που ακολουθεί παρουσιάζονται γενικά συμπεράσματα που αφορούν ολόκληρη τη διατριβή.

Βιβλιογραφικές Αναφορές

- [1] R. Ramanathan and J. Redi, “A brief Overview of Ad hoc Networks: Challenges and Directions,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 40, no. 5, pp. 20–22, May 2002.
- [2] P. Ratanchandani and R. Kravets, “A hybrid Approach for Internet Connectivity for Mobile Ad Hoc Networks,” in *Proc. IEEE WCNC*, Louisiana, USA, Mar. 2003.
- [3] C. Perkins, E. Belding-Royer, and Y. Sun, “Internet Connectivity for Ad Hoc Mobile Networks,” *International Journal of Wireless Information Networks*, Apr. 2002.
- [4] P. Gupta and S. Kumar, “The Capacity of Wireless Networks,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 46, no. 2, Mar 2000.
- [5] Y. Barowski, S. Biaz, and P. Agrawal, “Towards the Performance Analysis of IEEE 802.11 in Multi-hop Ad-Hoc Networks,” in *Proc. IEEE WCNC*, New Orleans USA, Mar. 2005.
- [6] J. Li, Z. Haas, and M. Sheng, “Capacity Evaluation of Multi-Channel Multi-Hop Ad Hoc Networks,” in *Proc. ICPW*, Delhi, India, Dec 2002.
- [7] J. Chen *et al.*, “Mixed-mode WLAN: The integration of Ad Hoc Mode with Wireless LAN Infrastructure,” in *IEEE GLOBECOM*, San Francisco, USA, Dec. 2003.
- [8] J. So and N. Vaidya, “Multi-Channel MAC for Ad Hoc Networks: Handling Multi-Channel Hidden Terminals Using A Single Transceiver,” in *Proc. ACM MOBIHOC*, Tokyo, Japan, May. 2004.
- [9] Z. Tang and J. Garcia-Luna-Aceves, “Hop-Reservation Multiple Access (HRMA) for Multichannel Packet Radio Networks,” *Computer Communications (Elsevier)*, vol. 23, no. 10, pp. 877–886, May. 2000.
- [10] S. Wu *et al.*, “A New Multi-Channel MAC Protocol with On-Demand Channel Assignment for Multi-Hop Mobile Ad Hoc Networks,” in *Proc. International Symposium on Parallel Architectures Algorithms and Networks*, 2000.
- [11] S. Hsuan *et al.*, “A Multi-Channel MAC Protocol Using Maximal Matching for Ad Hoc Networks,” in *Proc. IEEE ICDCSW*, vol. 4, no. 4, 2004, pp. 505–510.
- [12] H. Zhai *et al.*, “A Dual-Channel MAC Protocol for Mobile Ad Hoc Networks,” in *Proc. IEEE GLOBECOM*, Dallas, USA, Nov. 2004.
- [13] S. Wu *et al.*, “A Multi-Channel MAC Protocol with Power Control for Multi-Hop Mobile Ad Hoc Networks,” *Computer Journal*, vol. 45, pp. 101–110, 2002.
- [14] A. Raniwala and T. Chiueh, “Architecting a High-Capacity Last-Mile Wireless Mesh Network,” in *Proc. ACM MOBIHOC*, Tokyo, Japan, May. 2004.
- [15] E. Jurdak *et al.*, “A Survey, Classification and Comparative Analysis of Medium Access Control Protocols for Ad Hoc Networks,” *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 6, no. 1, pp. 2–16, First Quarter 2004.
- [16] H. Zhai *et al.*, “Medium Access Control in Mobile Ad Hoc Networks: Challenges and Solutions,” *Wireless Communications and Mobile Computing*, To appear.
- [17] D. Vassis and G. Kormentzas, “Delay Performance Analysis of Single and Multi-Channel Communication Schemes for Ad Hoc Networks with Infrastructure Support,” *Wireless Communications and Mobile Computing*, Submitted for publication.
- [18] C. Barrett and M. Drozda, “Characterizing the Interaction Between Routing and MAC Protocols in Adhoc Networks,” in *Proc. ACM MOBIHOC*, Louisiana, USA, Jun. 2002.

- [19] J. Li *et al.*, “Performance Evaluation of Modified IEEE 802.11 MAC for Multi-Channel Multi-Hop Ad Hoc Networks,” in *Proc. 17 th International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA)*, Xi'an, China, Mar 2003.
- [20] G. Bianchi, “Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function,” *IEEE Journal on Selected Areas of Communications*, vol. 18, no. 3, pp. 535–547, 2000.

Κεφάλαιο 7

Συμπεράσματα και Θέματα για Μελλοντική Έρευνα

7.1 Εισαγωγή

Έχοντας ολοκληρώσει την έρευνα που πραγματοποιήθηκε στη συγκεκριμένη διατριβή, είμαστε σε θέση να παρουσιάσουμε τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εργασία (τα οποία παρουσιάστηκαν και ξεχωριστά στην ενότητα 'Σύνοψη' του κάθε κεφαλαίου) και να συζητήσουμε θέματα για μελλοντική έρευνα. Τα παραπάνω πραγματοποιούνται ξεχωριστά για κάθε θεματική περιοχή που μελετήθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια. Σε κάθε ενότητα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και τα θέματα για μελλοντική εργασία που αφορούν καθένα από τα προηγούμενα τέσσερα κεφάλαια.

7.2 Εξέλιξη του IEEE 802.11 στο φυσικό στρώμα

Το τελευταίο ολοκληρωμένο πρότυπο της οικογένειας IEEE 802.11 για αύξηση των ρυθμών μετάδοσης είναι το IEEE 802.11g. Έχοντας υπόψη την ευρεία αποδοχή του προτύπου αυτού εμπορικά, η συγκεκριμένη διατριβή, συνεχίζοντας προγενέστερες εργασίες που αφορούν τα πρότυπα IEEE 802.11, IEEE 802.11a, και IEEE 802.11b, ασχολήθηκε με την αξιολόγηση επίδοσης του προτύπου IEEE 802.11g. Συγκεκριμένα, έγινε μια σύντομη παρουσίαση των νέων χαρακτηριστικών του προτύπου και πραγματοποιήθηκε μια αξιολόγησή του μέσω προσομοίωσης στην πλατφόρμα Pythagor.

7.2.1 Συμπεράσματα

Από τον τρόπο λειτουργίας του προτύπου, από τη μελέτη των νέων χαρακτηριστικών που υποστηρίζει και από την αξιολόγηση επίδοσης που πραγματοποιήθηκε προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Το IEEE 802.11g είναι ένας συγκεκριασμός των IEEE 802.11a και IEEE 802.11b. Πράγματι, με τα τέσσερα διαφορετικά φυσικά στρώματα που υποστηρίζει, προσφέρει τους υψηλούς ρυθμούς του IEEE 802.11a υποστηρίζοντας παράλληλα και συμβατότητα με παλιές δικτυακές διεπαφές IEEE 802.11 ή IEEE 802.11b. Συνεπώς, είναι αναμφισβήτητα η πιο ολοκληρωμένη, μέχρι στιγμής, λύση σχετική με το φυσικό στρώμα IEEE 802.11.
- Η παράμετρος ERP αυξάνει κατά πολύ τη χωρητικότητα του καναλιού. Πράγματι, με την κατάλληλη ρύθμιση της διάρκειας χρονοθυρίδας και του minimum contention window επιτυγχάνεται επίδοση σχεδόν ίση με αυτή του IEEE 802.11a.
- Η χρήση short preamble βελτιώνει τη χωρητικότητα του καναλιού σε σχέση με τη χρήση long preamble, με τη βελτίωση να φτάνει μέχρι και 22%.

- Η χρήση του τύπου φυσικού στρώματος DSSS-OFDM δεν είναι τόσο αποδοτική όσο η χρήση του ERP-OFDM. Η διαφορά της χωρητικότητας του καναλιού μεταξύ των δυο περιπτώσεων μπορεί να φτάσει μέχρι και 57%.
- Ο μηχανισμός πρόσβασης CTS-to-Self είναι αρκετά αποδοτικός όταν δεν υπάρχουν κρυφοί κόμβοι. Η βελτίωση στη χωρητικότητα του καναλιού σε σχέση με το μηχανισμό RTS-CTS μπορεί να φτάσει και 18%. Όταν όμως υπάρχουν κρυφοί κόμβοι ο μηχανισμός CTS-to-Self είναι αναποτελεσματικός και δε θα πρέπει σε καμιά περίπτωση να χρησιμοποιείται.
- Η ύπαρξη κόμβων που μεταδίδουν με χαμηλούς ρυθμούς σε ένα δίκτυο IEEE 802.11g, επηρεάζει αρνητικά τους ίδιους, τους κόμβους που μεταδίδουν με υψηλούς ρυθμούς, και τη χωρητικότητα του καναλιού. Μάλιστα, η διαφορά στη χωρητικότητα μεταξύ της ύπαρξης ενός και κανενός κόμβου που μεταδίδει με χαμηλό ρυθμό είναι πολύ μεγαλύτερη από τη διαφορά στη χωρητικότητα μεταξύ της ύπαρξης ενός και δυο κόμβων ή δυο και τριών κόμβων κ.ο.κ.

Η ερευνητική χρησιμότητα της παραπάνω εργασίας είναι διπλή. Πρώτον, για επιστήμονες μη σχετικούς με το χώρο του IEEE 802.11 που θέλουν όμως να ενημερωθούν για την κατάσταση που επικρατεί, η παρούσα εργασία χρησιμεύει ως ένα απλό κείμενο αναφοράς, όπου περιγράφονται απλά και κατανοητά σε οποιονδήποτε σχετικό με δίκτυα επικοινωνιών, τα νέα χαρακτηριστικά του προτύπου IEEE 802.11g. Δεύτερον, για την έρευνα που πραγματοποιείται πάνω στο πρότυπο IEEE 802.11, η αξιολόγηση επίδοσης που διεξάγεται παρέχει ακριβή μέτρα και σταθμά με βάση τα οποία οι επιστήμονες μπορούν να ενημερωθούν για τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του προτύπου IEEE 802.11g, έναντι των προγενέστερών του, αλλά και να τα λάβουν υπόψη τους για μεταγενέστερα πρότυπα που θα δημοσιευθούν.

7.2.2 Μελλοντική έρευνα

Το επόμενο βήμα, που συνεχίζει την εργασία της διατριβής πάνω στην εξέλιξη του προτύπου IEEE 802.11 στο φυσικό στρώμα, είναι, προφανώς, η ενασχόληση με το υπό εξέλιξη πρότυπο IEEE 802.11n. Προς την κατεύθυνση αυτή πρέπει να μελετηθεί λεπτομερώς η τεχνολογία κεραιών MIMO, κάτω από την οποία λειτουργεί το εν λόγω πρότυπο. Επιπλέον, πρέπει να μελετηθεί με κάθε λεπτομέρεια το IEEE 802.11n draft και να εντοπιστούν τα καινοτομικά του σημεία. Στη συνέχεια είναι απαραίτητη η επέκταση της πλατφόρμας Pythagor, όπου θα ενσωματωθεί η τεχνολογία MIMO και η λειτουργία του IEEE 802.11n. Τέλος, βάσει διαφόρων σεναρίων προσομοίωσης, θα αξιολογηθεί το εν λόγω πρότυπο και θα συγκριθεί με τα προηγούμενα της κατηγορίας του.

7.3 Εξέλιξη του IEEE 802.11 στο στρώμα MAC

Η εξέλιξη του προτύπου IEEE 802.11 στο στρώμα MAC μεταφράζεται με την αναμενόμενη έκδοση του IEEE 802.11e, το οποίο παρέχει ποιότητα υπηρεσίας μέσω διαφοροποίησης υπηρεσιών. Η βασική μέθοδος πρόσβασης, σύμφωνα με το πρότυπο IEEE 802.11e, είναι η EDCA. Η επίδοση της συγκεκριμένης μεθόδου έχει αναλυθεί σε διάφορες εργασίες, η συντριπτική πλειονότητα των οποίων χρησιμοποιεί ως μέτρο τη διέλευση σε συνθήκες κορεσμού. Η συγκεκριμένη διατριβή, προσπαθώντας να συνδράμει στη μαθηματική ανάλυση της EDCA, εν αντιθέσει με τις υπόλοιπες ερευνητικές εργασίες, υπολογίζει αναλυτικά το μέτρο της καθυστέρησης πακέτου σε συνθήκες πεπερασμένου φόρτου κίνησης. Συγκεκριμένα, λαμβάνοντας υπόψη τις νέες παραμέτρους του προτύπου IEEE 802.11e, ορίζονται τρία μέτρα της καθυστέρησης πακέτου και διεξάγεται πιθανοτική ανάλυση για τον υπολογισμό τους. Το κλειδί για το σχεδιασμό του μοντέλου είναι η προσέγγιση του προβλήματος από δυο διαφορετικές οπτικές γωνίες, βάσει των οποίων:

- Κάτω από συνθήκες πεπερασμένου φόρτου κίνησης, ο πομποδέκτης ενός κόμβου μπορεί να μοντελοποιηθεί με σύστημα αναμονής G/G/1.
- Ο backoff counter κάθε κόμβου μπορεί να μοντελοποιηθεί μέσω μιας διακριτής Μαρκοβιανής αλυσίδας.

Ο συνδυασμός των δυο προσεγγίσεων καταλήγει σε ένα σύστημα μη γραμμικών εξισώσεων, απ' όπου υπολογίζονται τα τρία οριζόμενα μέτρα καθυστέρησης πακέτου. Το προτεινόμενο αναλυτικό μοντέλο επαληθεύεται μέσω προσομοίωσης στην πλατφόρμα OPNET, όπου και αποδεικνύεται η εγκυρότητά του ώστε να χρησιμοποιηθεί με ασφάλεια για την αξιολόγηση επίδοσης της μεθόδου EDCA.

7.3.1 Συμπεράσματα

Χρησιμοποιώντας το προαναφερόμενο αναλυτικό μοντέλο, πραγματοποιήθηκε αξιολόγηση επίδοσης της EDCA, απ' όπου προέκυψαν τα εξής βασικά συμπεράσματα:

- Η μέθοδος EDCA πραγματοποιεί διαφοροποίηση των υπηρεσιών τόσο σε επίπεδο καθυστέρησης μετάδοσης πακέτου όσο και σε επίπεδο καθυστέρησης αναμονής του πακέτου στον καταχωρητή του πομποδέκτη. Η διαφορά στην καθυστέρηση πακέτου μεταξύ των κόμβων των διαφόρων κατηγοριών πρόσβασης είναι αισθητή, σε βαθμό που να εγγυάται την μικρή καθυστέρηση πακέτου σε υπηρεσίες που το απαιτούν.
- Ο τρόπος με τον οποίο η μέθοδος πρόσβασης EDCA διαχειρίζεται τη διαφοροποίηση των υπηρεσιών είναι ο εξής: Η υπηρεσία με την υψηλότερη προτεραιότητα ευνοείται κατά το μέγιστο, επιτυγχάνοντας χαμηλή καθυστέρηση πακέτου. Οι υπηρεσίες μέσης προτεραιότητας επηρεάζονται σε μικρό βαθμό από την εφαρμογή της μεθόδου. Η καθυστέρηση πακέτου για τις υπηρεσίες αυτές είναι παραπλήσια (λίγο μεγαλύτερη ή λίγο μικρότερη) από αυτή που θα παρουσίαζαν αν το δίκτυο λειτουργούσε υπό τη μέθοδο DCF. Οι υπηρεσίες με τη χαμηλότερη προτεραιότητα επηρεάζονται αρνητικά από την εφαρμογή της EDCA καθώς η καθυστέρηση πακέτου αυξάνεται αισθητά σε σχέση με την καθυστέρηση που θα παρουσίαζαν σε λειτουργία υπό τη μέθοδο DCF. Το γεγονός αυτό πηγάζει από την προσπάθεια να ελαττωθεί η καθυστέρηση πακέτου στην κατηγορία υψηλότερης προτεραιότητας και να κρατηθεί σε χαμηλό βαθμό η καθυστέρηση πακέτου για τις υπηρεσίες μέσης προτεραιότητας.

Η χρησιμότητα του παραπάνω αναλυτικού μοντέλου είναι διπλή. Πρώτον, μέσω αυτού, γίνεται αξιολόγηση επίδοσης της EDCA απ' όπου προκύπτουν συμπεράσματα για τον τρόπο λειτουργίας της, την ευελιξία, την αποτελεσματικότητα, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της. Δεύτερον, το συγκεκριμένο μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τους σχεδιαστές δικτύων για την πρόβλεψη της καθυστέρησης μετάδοσης των υπηρεσιών που θέλουν να εφαρμόσουν. Καθώς το μοντέλο δέχεται έναν μεγάλο αριθμό παραμέτρων εισόδου (ρυθμός άφιξης και μέγεθος πακέτων, αριθμός κόμβων, πιθανοτικές κατανομές) και είναι πλήρως παραμετροποιήσιμο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κάθε δίκτυο IEEE 802.11 όπου απαιτείται διαφοροποίηση υπηρεσιών.

7.3.2 Μελλοντική έρευνα

Παρά τα παραπάνω, η ακρίβεια ενός αναλυτικού μοντέλου πάντα μπορεί να βελτιωθεί, ενώ η αξιολόγηση επίδοσης ενός μηχανισμού είναι μια διαδικασία με απεριόριστο εύρος χρήσιμων αποτελεσμάτων. Προς την κατεύθυνση αυτή, προτείνονται κάποια βασικά σημεία μελλοντικής έρευνας, τα οποία οδηγούν στη βελτίωση του μοντέλου και στην απλούστερη χρήση του.

Μια σημαντική βελτίωση στην ακρίβεια και την πιστότητα του μοντέλου θα ήταν ο αναλυτικός υπολογισμός της κατανομής που ακολουθεί η καθυστέρηση μετάδοσης. Όπως τονίστηκε και στην υποενότητα 4.2.2, η γνώση της διασποράς του συγκεκριμένου μέτρου είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό της καθυστέρησης αναμονής. Λόγω της πολυπλοκότητας του προβλήματος, η κατανομή της καθυστέρησης μετάδοσης υπολογίστηκε στατιστικά, μέσω σεναρίων προσομοίωσης. Ο αναλυτικός υπολογισμός της διασποράς θα επέφερε μια θετική βελτίωση της ακρίβειας του μοντέλου.

Από την άλλη πλευρά, αναγκαία κρίνεται και η αξιολόγηση επίδοσης της EDCA σε μεγαλύτερο εύρος σεναρίων. Ας έχουμε υπόψη ότι, το μοντέλο που σχεδιάστηκε, προορίζεται για γενική χρήση, και για το λόγο αυτό υποθέσαμε ότι η εισερχόμενη κίνηση ακολουθεί κατανομή Poisson. Για ένα μεγαλύτερο εύρος

αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων, πρέπει να οριστούν κατανομές πιθανότητας για διάφορους τύπους κίνησης, όπως video, φωνή, http, ftp, email κ.α. Με βάση τις κατανομές αυτές, πρέπει να διεξαχθεί ένας μεγάλος αριθμός από σενάρια αξιολόγησης επίδοσης και να μελετηθούν τα αποτελέσματα για διάφορους συνδυασμούς τύπων κίνησης.

Τέλος, ανοιχτό παραμένει και το γεγονός της ενσωμάτωσης του μοντέλου σε κάποια δικτυακή συσκευή, για την αυτόματη πρόβλεψη διαφόρων παραμέτρων (DIFS, CWmin κ.α.). Για να γίνει αυτό όμως θα πρέπει να απλοποιηθούν οι υπολογισμοί που γίνονται στο μοντέλο. Πράγματι, ένα σύστημα μη γραμμικών εξισώσεων έχει μεγάλες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ και δε μπορεί εύκολα να ενσωματωθεί σε συσκευή. Για το λόγο αυτό, σε μελλοντικό στάδιο θα ήταν απαραίτητη η απλοποίηση των υπολογισμών (π.χ. με μετασχηματισμούς) και η κατάληξη σε εξισώσεις βελτιστοποίησης, με βάση τις οποίες υπολογίζονται οι βέλτιστες τιμές των δικτυακών παραμέτρων σε σχέση με την προσφερόμενη κίνηση και τους ρυθμούς μετάδοσης.

7.4 Εφαρμογή του IEEE 802.11 σε WSAWs

Η ανάπτυξη των τηλεπικοινωνιών και της ηλεκτρονικής κατέστησαν δυνατή τη δημιουργία των WSAWs, που είναι μια εξέλιξη των δικτύων αισθητήρων. Αν και τα συγκεκριμένα δίκτυα άρχισαν να αναπτύσσονται πολύ πρόσφατα, αναμένεται να διαδραματίσουν καταληκτικό ρόλο στους χώρους που έχουν σχέση με την έννοια της κλασσικής συσκευής αισθητήρα. Έχοντας υπόψη τα συγκεκριμένα, στην παρούσα διατριβή έγινε προσπάθεια εφαρμογής του προτύπου IEEE 802.11 στα WSAWs. Προς τη συγκεκριμένη κατεύθυνση προτάθηκαν δυο σχήματα που αφορούν την κατανομημένη επικοινωνία μεταξύ των συντονιστών και χρησιμοποιούν ένα και δυο κανάλια μετάδοσης δεδομένων αντίστοιχα. Για την αξιολόγηση επίδοσης των προτεινόμενων σχημάτων σχεδιάστηκε αναλυτικό μοντέλο που υπολογίζει δυο μέτρα σχετικά με την καθυστέρηση πακέτου. Η ακρίβεια του μοντέλου επαληθεύτηκε μέσω προσομοίωσης στο OPNET. Με βάση το μοντέλο που σχεδιάστηκε, πραγματοποιήθηκε αξιολόγηση επίδοσης των δυο σχημάτων.

7.4.1 Συμπεράσματα

Από τη συγκριτική αξιολόγηση επίδοσης που πραγματοποιήθηκε, προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Ο φόρτος κίνησης που προέρχεται από προώθηση πακέτων σε απομακρυσμένους κόμβους είναι ένας καθοριστικός παράγοντας στην επίδοση του δικτύου.
- Το σχήμα δυο καναλιών είναι γενικώς πιο ευέλικτο, καθώς δίνει τη δυνατότητα της ρύθμισης του ρυθμού μετάδοσης του κάθε καναλιού ξεχωριστά, ανάλογα με το πόσο περιορισμένη γεωγραφικά είναι η ανταλλαγή της πληροφορίας.
- Για την κίνηση που απευθύνεται σε γειτονικούς συντονιστές, το σχήμα δυο καναλιών αποδεικνύεται πιο αποδοτικό σε όλες τις περιπτώσεις.
- Για την κίνηση που απευθύνεται σε απομακρυσμένους συντονιστές, το σχήμα ενός καναλιού αποδεικνύεται πιο αποδοτικό μέχρι ένα σημείο φόρτου κίνησης, ενώ σε περαιτέρω αύξηση της κίνησης αποδεικνύεται πιο αποδοτικό το σχήμα δυο καναλιών.
- Αξιολογώντας την επίδοση του δικτύου σε γενικές γραμμές, η επίδοση του σχήματος δυο καναλιών είναι καλύτερη.

Τέλος, παρά τα παραπάνω ειδικά συμπεράσματα, η καταλληλότητα χρήσης του κάθε σχήματος δεν είναι κανόνας αλλά εξαρτάται από τις σχεδιαστικές παραμέτρους του δικτύου και την προσφερόμενη κίνηση. Συνεπώς, η ταχτική που θα πρέπει να ακολουθεί ο σχεδιαστής του WSAW πρέπει να είναι η ακόλουθη:

- Καθορίζεται ο φόρτος κίνησης, ο μέσος αριθμός ενδιάμεσων κόμβων h , που χαρακτηρίζει τη γεωγραφική ευρύτητα της επικοινωνίας, και ο αριθμός των κόμβων στο δίκτυο.

- Επιλέγονται εμπειρικά ρυθμοί μετάδοσης για τα κανάλια και των δυο σχημάτων επικοινωνίας.
- Πραγματοποιείται αξιολόγηση επίδοσης των δυο σχημάτων με βάση τα προτεινόμενα μοντέλα.
- Ανάλογα με τα αποτελέσματα της αξιολόγησης αναπροσαρμόζονται οι ρυθμοί μετάδοσης και επαναλαμβάνεται η αξιολόγηση ώστε να προκύψουν βέλτιστα αποτελέσματα.

Η χρησιμότητα της εργασίας που πραγματοποιήθηκε πάνω στα WSANs έγκειται στην πρόταση σχημάτων επικοινωνίας για WSANs, ειδικά μέσω του προτύπου IEEE 802.11. Πράγματι, το πρότυπο IEEE 802.11 είναι ήδη αποδεκτό εμπορικά, επομένως μια σύγκλιση WSANs και IEEE 802.11 οδηγεί σε μεγαλύτερη ευκολία κατασκευής προϊόντων αλλά και σε διαλειτουργία μεταξύ WSANs και άλλων δικτύων IEEE 802.11, όπως δικτύων προσωπικών επικοινωνιών. Όσον αφορά την αποδοτικότητα και τον καινοτομικό σχεδιασμό των προτεινόμενων σχημάτων, ας έχουμε υπόψη ότι τα WSANs βρίσκονται ακόμη σε αρχικά στάδια ανάπτυξης. Συνεπώς, παρά την απλή φιλοσοφία σχεδιασμού και τη γενικότητα τους, τα προτεινόμενα σχήματα αποτελούν μια καλή αρχή για επέκταση, όπου θα δοθεί βάση στη λύση συγκεκριμένων προβλημάτων με πιο αποδοτικούς αλγόριθμους. Σημαντικό ρόλο στο παραπάνω διαδραματίζει το μοντέλο που σχεδιάστηκε. Πράγματι, χάρη στη φιλοσοφία γενικευμένης εφαρμογής του, μπορεί εύκολα να επεκταθεί ώστε να υποστηρίζεται οποιοδήποτε σχήμα επικοινωνίας για WSANs υπό το πρότυπο IEEE 802.11.

7.4.2 Μελλοντική έρευνα

Η όλη βάση που δόθηκε για το σχεδιασμό των σχημάτων σε όσο το δυνατό πιο γενική κλίμακα, επιφέρει διάφορα θέματα για μελλοντική εργασία.

Όπως και στην περίπτωση του μοντέλου που σχεδιάστηκε για την EDCA, έτσι και στη συγκεκριμένη περίπτωση, μπορούν να ληφθούν πιο ειδικά αποτελέσματα αν οριστούν συγκεκριμένες κατανομές για την εισερχόμενη κίνηση. Για να γίνει όμως αυτό πρέπει να προηγηθεί ένα μεγάλο στάδιο μελέτης της κίνησης που παράγεται στα WSANs. Προς τη συγκεκριμένη κατεύθυνση πρέπει να αναλυθεί η κίνηση που παράγουν οι αισθητήρες, να αναλυθεί η διαδικασία επεξεργασίας της κίνησης στους συντονιστές, και τέλος, να βρεθεί η κατανομή που ακολουθεί η κίνηση που στέλνουν οι συντονιστές μεταξύ τους.

Από την άλλη πλευρά, το μοντέλο ορίζει την πιθανότητα $p_h[i]$, μέσω της οποίας ορίζεται η 'τοπικότητα' της επικοινωνίας. Με βάση την πιθανότητα αυτή, μπορούν να οριστούν διάφορα άλλα σενάρια επικοινωνίας, ορίζοντας για την $p_h[i]$ διαφορετική κατανομή από τη Γεωμετρική.

Τέλος, μεγάλη βάση αξίζει να δοθεί στην επέκταση των προτεινόμενων σχημάτων, σχεδιάζοντας έξυπνους αλγόριθμους για δυναμική ρύθμιση των ρυθμών μετάδοσης. Πράγματι, το προτεινόμενο σχήμα δυο καναλιών δίνει τη δυνατότητα της ρύθμισης των ρυθμών μετάδοσης για βέλτιστη επίδοση του δικτύου. Έξυπνοι αλγόριθμοι που θα εκτελούσαν τη ρύθμιση αυτή δυναμικά, θα βελτίωναν την επίδοση του σχήματος σε μεγάλο βαθμό.

7.5 Εφαρμογή του IEEE 802.11 σε δίκτυα ad hoc με υποδομή

Τα δίκτυα ad hoc με υποδομή είναι τα δίκτυα ακαθόριστης διασύνδεσης που χαρακτηρίζονται από την ύπαρξη κάποιου κεντρικού σταθμού με τον οποίο επικοινωνούν όλοι οι τερματικοί κόμβοι. Τα συγκεκριμένα δίκτυα βρίσκουν εφαρμογές σε δίκτυα roof top, σε δίκτυα αισθητήρων και σε στρατιωτικά δίκτυα. Σε γενικές γραμμές, το βασικό πρόβλημα επίδοσης που παρουσιάζεται στα δίκτυα ad hoc με υποδομή είναι η αύξηση του φόρτου κίνησης λόγω προώθησης πακέτων, προκειμένου να φτάνουν και να φεύγουν τα πακέτα προς και από τον κεντρικό σταθμό αντίστοιχα. Έχοντας υπόψη το συγκεκριμένο πρόβλημα, στην παρούσα διατριβή σχεδιάστηκε ένα σχήμα επικοινωνίας πολλαπλών καναλιών για βελτίωση της καθυστέρησης πακέτου. Το εν λόγω σχήμα, ονόματι MAWA, αξιολογήθηκε μέσω αναλυτικού μοντέλου (που σχεδιάστηκε για το συγκεκριμένο σκοπό), και συγκρίθηκε με δυο άλλα σχήματα πολλαπλών καναλιών, όπου και αποδείχθηκε η υπεροχή του.

7.5.1 Συμπεράσματα

Από την αξιολόγηση επίδοσης του προτεινόμενου σχήματος, προέκυψε το συμπέρασμα ότι, με χρήση του MAWA, η καθυστέρηση πακέτου ελαττώνεται σε εκθετικό βαθμό. Επιπροσθέτως, αυξάνονται τα όρια προσφερόμενης κίνησης για τα οποία η απόδοση του δικτύου είναι ικανοποιητική. Η αύξηση αυτή κυμαίνεται από 28% μέχρι και 66%.

Όσον αφορά θέματα εφαρμογής του προτεινόμενου σχήματος, μπορούμε να πούμε ότι αυτό είναι εύκολα υλοποιήσιμο, καθώς το πρότυπο IEE 802.11a προσφέρει 12 ανεξάρτητα κανάλια επικοινωνίας ενώ στο εγγύς μέλλον, οι περισσότερες δικτυακές διεπαφές για IEEE 802.11 θα είναι εξοπλισμένες με δυο ανεξάρτητους πομποδέκτες.

Η χρησιμότητα της παρούσας εργασίας κρίνεται, προφανώς, στο σχεδιασμό του προτεινόμενου σχήματος. Παρά το γεγονός ότι, τη συγκεκριμένη στιγμή, η χρήση του σχήματος MAWA ίσως κρίνεται υπερβολική, μελλοντικά, οι περισσότερες συσκευές θα έχουν δυο ή περισσότερους πομποδέκτες. Συνεπώς, έχοντας υπόψη και την ανάπτυξη που θα έχουν τα δίκτυα ad hoc, η χρήση ενός σχήματος πολλαπλών καναλιών, σαν το προτεινόμενο, θα είναι απαραίτητη.

7.5.2 Μελλοντική έρευνα

Προκειμένου το σχήμα MAWA να είναι εφαρμόσιμο σήμερα, απαιτείται η λειτουργία του με έναν πομποδέκτη, καθώς οι περισσότερες συσκευές σήμερα υποστηρίζουν ένα κανάλι. Προς την κατεύθυνση αυτή, θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί ένας διαφορετικός σχεδιασμός, όπου το MAWA θα εκμεταλλευόταν πάλι δυο κανάλια επικοινωνίας, αλλά όχι ταυτόχρονα, καθώς τα δυο αυτά κανάλια θα χρησιμοποιούνταν από τον ίδιο πομποδέκτη.

Επιπλέον με το παραπάνω, θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί ένας επανασχεδιασμός του προτεινόμενου σχήματος ώστε να είναι απαραίτητα τρία ή λιγότερα κανάλια από τη μικροκυματική ζώνη. Με τον τρόπο αυτό θα ήταν δυνατή η εφαρμογή του και στη ζώνη ISM που υπάρχουν τρία κανάλια.

Τέλος, εκτός από το σχεδιασμό του MAWA, ιδιαίτερο βάρος αξίζει να δοθεί και στο αναλυτικό μοντέλο που σχεδιάστηκε, το οποίο μπορεί εύκολα να επεκταθεί, με σκοπό να ερευνηθούν διάφορα προβλήματα σε δίκτυα ad hoc. Ένα τέτοιο πρόβλημα, που αξίζει να ερευνηθεί σε μελλοντικό στάδιο, είναι αυτό του εκτεθειμένου κόμβου. Προς την κατεύθυνση αυτή, το αναλυτικό μοντέλο θα μπορούσε εύκολα να επεκταθεί ώστε να αναλυθεί το συγκεκριμένο πρόβλημα. Με βάση τα αποτελέσματα του μοντέλου, θα κρίνόταν η σημασία που έχει το πρόβλημα για την επίδοση του δικτύου. Προχωρώντας ένα βήμα παραπάνω, πολύ σημαντική θα ήταν και η πρόταση ενός σχήματος το οποίο θα αντιμετώπιζε το πρόβλημα του εκτεθειμένου κόμβου.

Παράρτημα Α

Παρουσίαση των Εργαλείων Προσομοίωσης που Χρησιμοποιήθηκαν στη Διατριβή

Καταληκτικό ρόλο, σε όλη την έρευνα που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα διατριβή, διαδραματίζει η διαδικασία της προσομοίωσης. Η προσομοίωση χρησιμοποιείται είτε για την απευθείας αξιολόγηση επίδοσης του εκάστοτε υπό μελέτη πρωτοκόλλου, είτε για την επαλήθευση του εκάστοτε αναλυτικού μοντέλου που προτείνεται.

Στην παρούσα διατριβή, χρησιμοποιήθηκαν δυο πλατφόρμες προσομοίωσης, ονόματι OPNET και Pythagor. Σκοπός του συγκεκριμένου παραρτήματος είναι να γίνει μια συνοπτική αναφορά στις εν λόγω πλατφόρμες με παρουσίαση των πιο βασικών τους χαρακτηριστικών.

A.1 Η πλατφόρμα προσομοίωσης OPNET

A.2 Η συγκεκριμένη πλατφόρμα είναι το εμπορικά διαθέσιμο εργαλείο προσομοίωσης που προσφέρει η εταιρία *OPNET (Optimized Network Engineering Tools)* [1]. Η επίσημη ονομασία του είναι OPNET Modeler, αλλά είναι ευρύτερα γνωστό, απλά, ως OPNET. Στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιήθηκε για την επαλήθευση όλων των αναλυτικών μοντέλων που σχεδιάστηκαν στα Κεφάλαια 4 ως 6.

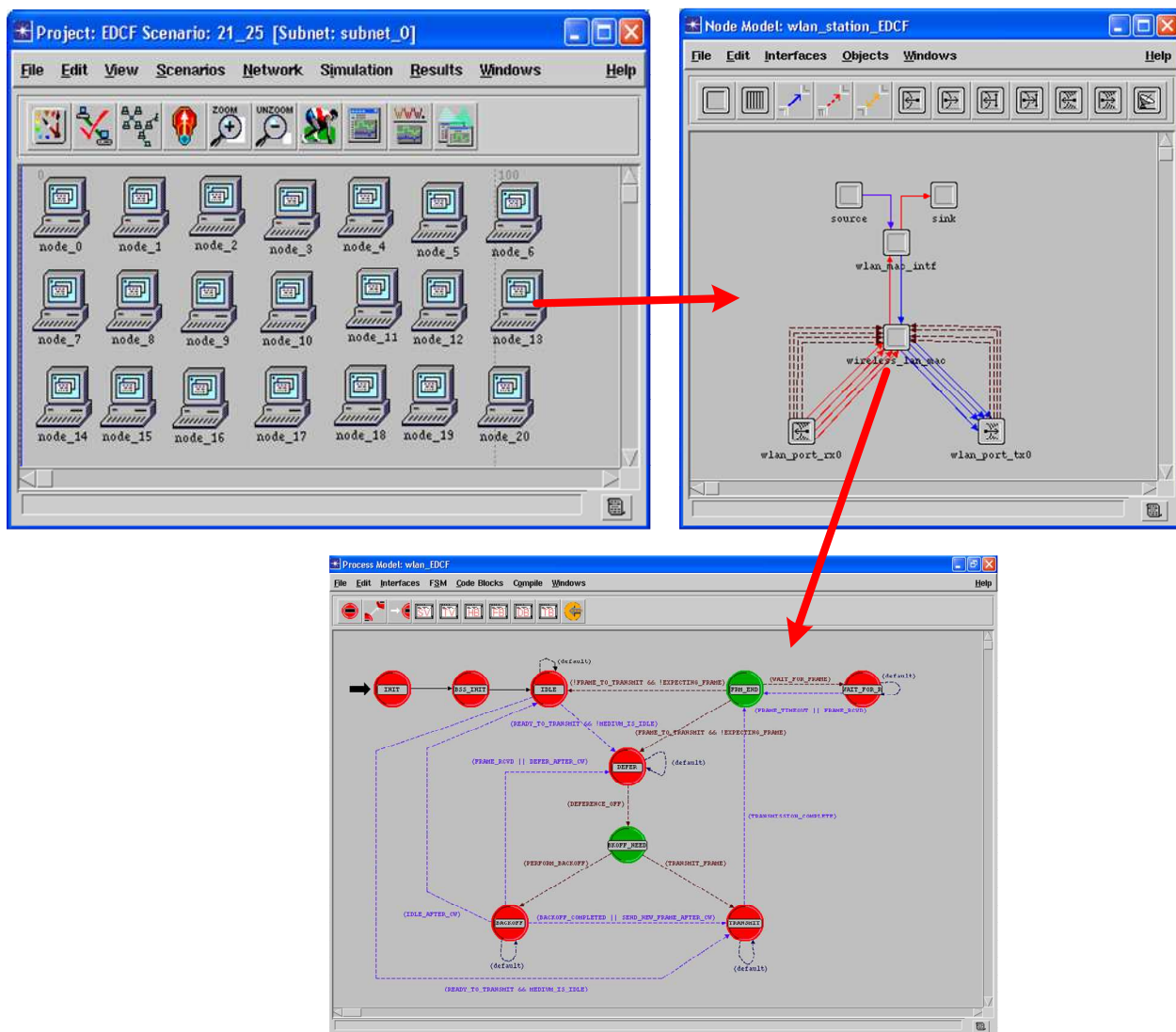
Το OPNET δημιουργήθηκε αρχικά στο πανεπιστήμιο MIT και, το 1987, έγινε το πρώτο εμπορικά διαθέσιμο εργαλείο προσομοίωσης. Σήμερα θεωρείται η πιο ολοκληρωμένη πλήρης πλατφόρμα προσομοίωσης για δίκτυα επικοινωνιών. Το εύρος των τεχνολογιών που μπορεί να προσομοιώσει ευρύνεται σε όλα τα στρώματα OSI και σε οποιαδήποτε τεχνολογία φυσικού στρώματος (3G, WLANs, DSL, WDM, SDH κ.α.).

Το κλειδί που το καθιστά ξεχωριστό από τα υπόλοιπα εργαλεία είναι η ευκολία στη χρήση του (γραφικό περιβάλλον) και ο αντικειμενοστραφής τρόπος παραμετροποίησης των σεναρίων προσομοίωσης. Στο Σχήμα A.1 φαίνεται η διαδικασία δημιουργίας του σεναρίου προσομοίωσης για το WLAN του Κεφαλαίου 4.

Πάνω αριστερά φαίνεται το δίκτυο των 21 κόμβων. Κάθε κόμβος μπορεί επιπλέον να παραμετροποιηθεί, αλλάζοντας κάποιο δομικό του στοιχείο. Η δομή του κόμβου φαίνεται πάνω δεξιά. Επιπλέον, η λειτουργία κάθε δομικού στοιχείου του κόμβου (πομποδέκτης, ουρά πακέτων, δομή MAC) είναι φτιαγμένο με διάγραμμα καταστάσεων. Στην κάτω εικόνα φαίνεται το διάγραμμα καταστάσεων της δομής MAC του κόμβου. Σε τελικό στάδιο, κάθε κατάσταση μπορεί να παραμετροποιηθεί, προγραμματίζοντάς τη σε γλώσσα C.

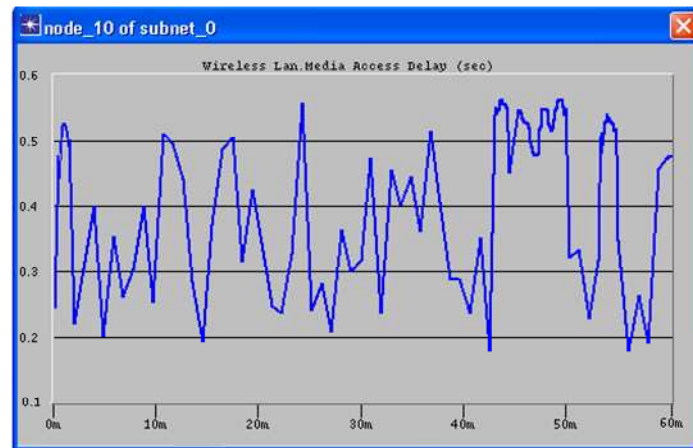
Όσον αφορά την παραμετροποίηση της εισερχόμενης κίνησης, υποστηρίζεται ένα μεγάλο πλήθος από διαφορετικούς τύπους κίνησης και διαφορετικές πιθανοτικές κατανομές.

Τέλος, εξίσου σημαντικό πλεονέκτημα του OPNET είναι το πλήθος μέτρων αξιολόγησης που προσφέρει και η ποικιλία τρόπων που απεικονίζει κάθε μέγεθος. Για παράδειγμα, αν επιλέξουμε να μετρήσουμε



Σχήμα Α.1: Διαδικασία σχεδιασμού προσομοίωσης στο OPNET

τη διέλευση ενός δικτύου, αυτή μπορεί να απεικονιστεί ως έχει, στη διάρκεια του χρόνου, με τη μέση τιμή της, με την πυκνότητα πιθανότητάς της, κ.α. Στο Σχήμα Α.2 φαίνεται η γραφική παράσταση της καθυστέρησης μετάδοσης σε σχέση με το χρόνο, όπως αυτή εμφανίζεται από το OPNET, για έναν κόμβο του δικτύου του Κεφαλαίου 4. Επεξεργάζοντας τη γραφική παράσταση με εργαλεία του OPNET μπορούμε να λάβουμε διάφορα χρήσιμα στατιστικά αποτελέσματα.



Σχήμα Α.2: Γραφική παράσταση της καθυστέρησης μετάδοσης σε σχέση με το χρόνο στο OPNET

Α.2 Η πλατφόρμα προσομοίωσης Pythagor

Η συγκεκριμένη πλατφόρμα προσομοίωσης σχεδιάστηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής και χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση επίδοσης του προτύπου IEEE 802.11g. Η πλατφόρμα *Pythagor* [2] είναι ένα ολοκληρωμένο εργαλείο προσομοίωσης για WLANs. Έχει τη δυνατότητα προσομοίωσης οποιουδήποτε φυσικού στρώματος, περιλαμβάνοντας τα πρότυπα IEEE 802.11, IEEE 802.11a, IEEE 802.11b και IEEE 802.11g. Λειτουργεί υπό το λειτουργικό σύστημα Windows (95/98/Millennium/2K/XP/2003) και είναι γραμμένο σε γλώσσα C++ και Visual Basic.

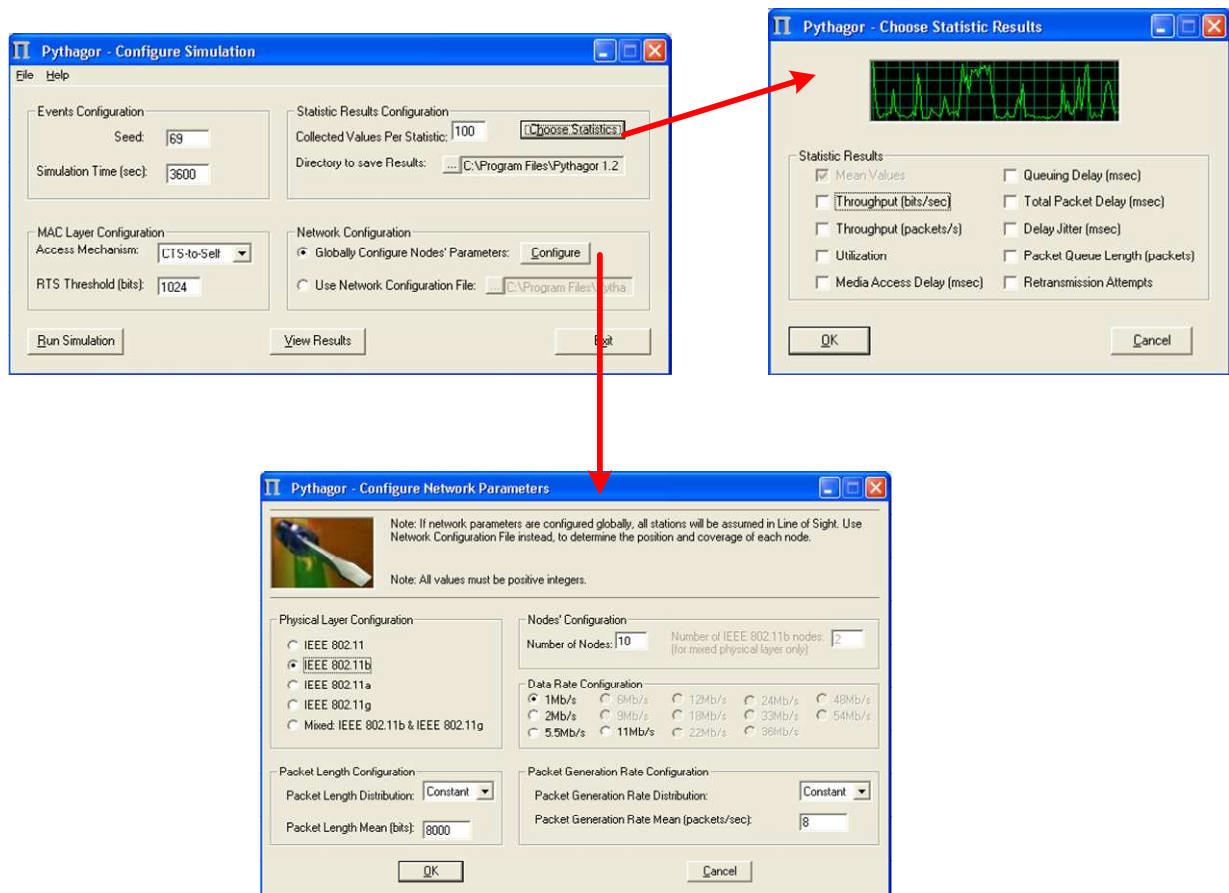
Το γραφικό περιβάλλον του Pythagor καθιστά εύκολη τη δημιουργία σεναρίων προσομοίωσης, ενώ, παράλληλα, υποστηρίζεται ένας ικανοποιητικός αριθμός από διάφορα μέτρα αξιολόγησης, όπως διέλευση, καθυστέρηση μετάδοσης, καθυστέρηση αναμονής, μήκος καταχωρητή πακέτων, μέσος αριθμός επαναμεταδόσεων κ.α.

Στο Σχήμα Α.3 φαίνεται η παραθυρική εφαρμογή της πλατφόρμας. Το κεντρικό παράθυρο είναι το πάνω αριστερά, όπου ορίζονται διάφορες γενικές παράμετροι. Το πάνω δεξιά παράθυρο χρησιμεύει για την επιλογή των επιθυμητών μέτρων αξιολόγησης. Στο κάτω παράθυρο γίνεται η παραμετροποίηση του δικτύου (ρυθμός μετάδοσης, φυσικό στρώμα, εισερχόμενη κίνηση κ.α.).

Τέλος, αξίζει να ειπωθεί ότι η πλατφόρμα Pythagor είναι πλήρως επεκτάσιμη, καθώς ο κώδικας υλοποίησης είναι διαθέσιμος ανοιχτά (open source).

Βιβλιογραφικές Αναφορές

- [1] "Optimized Network Engineering Tools (OPNET)." [Online]. Available: <http://www.opnet.com>
- [2] "Pythagor simulation tool." [Online]. Available: <http://www.icsd.aegean.gr/telecom/pythagor/index.htm>



Σχήμα Α.3: Δημιουργία σεναρίων προσομώσεως μέσω του Pythagor

ΣΥΝΤΟΜΟ ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ

ΔΗΜΗΤΡΗ ΕΛ. ΒΑΣΣΗ

Ο Δημήτρης Βάσσης γεννήθηκε στα Ιωάννινα στις 23 Ιουνίου 1978. Αποφοίτησε από το 1^ο Γενικό Λύκειο Ιωαννίνων το 1996.

Τον Οκτώβριο του ίδιου έτους ξεκίνησε τις σπουδές του στη Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Τον Οκτώβριο του 2001 απέκτησε το δίπλωμα του Μηχανικού από τη συγκεκριμένη σχολή.

Τον ίδιο μήνα ξεκίνησε να εργάζεται ως επιστημονικός συνεργάτης στο Ερευνητικό Πανεπιστημιακό Ινστιτούτο Συστημάτων Επικοινωνιών και Υπολογιστών (ΕΠΙΣΕΥ) του ΕΜΠ, όπου, μέχρι το Μάιο του 2003, ασχολήθηκε με σχεδιασμό ευρυζωνικών ασυρμάτων δικτύων και δικτύων οπτικών ινών, πανελλαδικής κάλυψης.

Το Φεβρουάριο του 2002 εισήχθη στο διατμηματικό μεταπτυχιακό πρόγραμμα 'Τεχνοοικονομικά Συστήματα' των πανεπιστημίων ΕΜΠ - ΑΣΟΕΕ - ΠΑΠΕΙ, απ' όπου απέκτησε το μεταπτυχιακό τίτλο σπουδών το Μάρτιο του 2004.

Τον Οκτώβριο του 2002 έγινε δεκτός ως υποψήφιος διδάκτορας στη Σχολή Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων του Πανεπιστημίου Αιγαίου, όπου, μέχρι σήμερα, εκπονεί τη διδακτορική του διατριβή.

Από το Σεπτέμβριο του 2003 μέχρι τον Ιούλιο του 2004 εργάστηκε ως εξωτερικός συνεργάτης στην Αρχή Διασφάλισης Απορρήτου Επικοινωνιών του Υπουργείου Δικαιοσύνης για την καταγραφή και οριοθέτηση των μέτρων ασφαλείας τηλεπικοινωνιών στην Ελλάδα.

Τον Οκτώβριο του 2004 άρχισε να εργάζεται στην εταιρία 'KINTEC - Ηλεκτρονικά Συστήματα Ασφαλείας' ως διαχειριστής του δικτύου υπολογιστών και για την υποστήριξη των δικτυακών προϊόντων της εταιρίας. Στο συγκεκριμένο χώρο εργάζεται μέχρι σήμερα.

Το ερευνητικό αντικείμενο του Δημήτρη Βάσση έγκειται στη διαχείριση πόρων και ανάλυση επίδοσης ασυρμάτων δικτύων ευρείας ζώνης. Στη συγκεκριμένη ερευνητική περιοχή έχει τέσσερις δημοσιεύσεις σε επιστημονικά περιοδικά και τέσσερις δημοσιεύσεις σε πρακτικά συνεδρίων.