



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
Τμήμα Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών,
Τηλεπικοινωνιών και Δικτύων**

Διδακτορική Διατριβή

**ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ
ΣΕ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΜΕ ΕΞΥΠΝΕΣ ΚΕΡΑΙΕΣ**

Αθανάσιος Κοράκης

Βόλος, Ιούνιος 2005



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 4832/1
Ημερ. Εισ.: 24-09-2007
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: Δ
004.62
ΚΟΡ

Στους Γονείς μου

Επιβλέπων Καθηγητής

Λέανδρος Τασιούλας, Καθηγητής

Τμήμα Η/Υ, Τηλεπικοινωνιών & Δικτύων, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τριμελής Επιτροπή Παρακολούθησης

Λέανδρος Τασιούλας, Καθηγητής

Τμήμα Η/Υ, Τηλεπικοινωνιών & Δικτύων, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Λεωνίδας Γεωργιάδης, Καθηγητής

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Η/Υ, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Λάζαρος Μεράκος, Καθηγητής

Τμήμα Πληροφορικής, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Επταμελής Εξεταστική Επιτροπή

Λέανδρος Τασιούλας, Καθηγητής

Τμήμα Η/Υ, Τηλεπικοινωνιών & Δικτύων, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Λεωνίδας Γεωργιάδης, Καθηγητής

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Η/Υ, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Λάζαρος Μεράκος, Καθηγητής

Τμήμα Πληροφορικής, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Γεώργιος Μουστακίδης, Καθηγητής

Τμήμα Η/Υ, Τηλεπικοινωνιών & Δικτύων, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μιχάλης Πατεράκης, Καθηγητής

Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών & Μηχανικών Η/Υ, Πολυτεχνείο Κρήτης

Αικατερίνη Χούστη, Καθηγήτρια

Τμήμα Η/Υ, Τηλεπικοινωνιών & Δικτύων, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ηλίας Χούστης, Καθηγητής

Τμήμα Η/Υ, Τηλεπικοινωνιών & Δικτύων, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Πρόλογος

Τα ασύρματα δίκτυα δεδομένων συγκεντρώνουν σήμερα μεγάλο ενδιαφέρον, μιας και επιτρέπουν στο χρήστη να μετακινείται, έχοντας συνεχή πρόσβαση στο δίκτυο. Οι χρήστες των δικτύων αυτών προσδοκούν σε μια ποιότητα υπηρεσιών, ανάλογη αυτής των ενσύρματων δικτύων, πράγμα που πολλές φορές είναι πολύ δύσκολο ή ανέφικτο να επιτευχθεί, εξαιτίας της ιδιομορφίας του ασύρματου μέσου. Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της μετάδοσης στον αέρα δημιουργούν προβλήματα στα κλασικά πρωτόκολλα δικτύων και πολλές φορές οδηγούν σε απρόβλεπτη συμπεριφορά του ασύρματου δικτύου. Για το λόγο αυτό, γίνεται επιτακτική η ανάγκη της ανάπτυξης μηχανισμών που, λαμβάνοντας υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της μετάδοσης στο ασύρματο μέσο, θα αντιμετωπίζουν με αποδοτικό τρόπο τα προβλήματα που προκύπτουν και θα αυξάνουν την απόδοση των ασύρματων δικτύων. Οι μηχανισμοί αυτοί είναι ποικίλοι και μπορούν να εφαρμοστούν σε διάφορα επίπεδα του μοντέλου του OSI. Αναμφισβήτητο όμως, ένα επίπεδο που παίζει βασικό ρόλο στην αύξηση της απόδοσης των ασύρματων δικτύων είναι το Επίπεδο Ελέγχου Πολλαπλής Πρόσβασης (MAC) το οποίο είναι υπεύθυνο για τις διαδικασίες που σχετίζονται με την πρόσβαση των χρηστών στο ασύρματο μέσο.

Η διατριβή αυτή ασχολείται με την ανάπτυξη μηχανισμών που λειτουργούν στο Επίπεδο Ελέγχου Πολλαπλής Πρόσβασης και σκοπό έχουν την αύξηση της απόδοσης των ασυρμάτων δικτύων. Οι μηχανισμοί αυτοί μπορούν από τη μια να λειτουργήσουν ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο προσθέτοντας ο καθένας από μόνος του ισχυρά πλεονεκτήματα στη λειτουργία των ασύρματων δικτύων. Από την άλλη, μπορούν να εφαρμοστούν σε συνδυασμό, αυξάνοντας έτσι σε πολλαπλά επίπεδα την επίδοση των συστημάτων αυτών. Τα θέματα με τα οποία ασχολείται η διατριβή αυτή είναι η χρονοδρομολόγηση της κίνησης ενός ασύρματου δικτύου από τον σταθμό βάσης, η χρήση κατευθυντικών κεραιών στα ασύρματα δίκτυα και η αποδοτική σύνδεση των σταθμών με τους γειτονικούς σταθμούς βάσης.

Στην περίπτωση της παροχής ποιότητας υπηρεσίας, προτείνεται ένας αλγόριθμος χρονοδρομολόγησης της κίνησης από το σταθμό βάσης ενός ασύρματου δικτύου, σύμφωνα με προσημωμένες απαιτήσεις των διαφόρων χρηστών. Ο προτεινόμε-

νος χρονοδρομολογητής εξυπηρετεί τους χρήστες σύμφωνα με τις βραχυπρόθεσμες και μακροπρόθεσμες απαιτήσεις τους, λαμβάνοντας υπόψη του την ποιότητα του καναλιού και μεγιστοποιώντας την χρήση του ασύρματου μέσου.

Στην περίπτωση των κατευθυντικών κεραιών, προτείνεται ένα ολόκληρο πλαίσιο σχεδιασμού του MAC πρωτοκόλλου, ώστε να υποστηρίζεται αποδοτικά η χρήση κατευθυντικών κεραιών στα ασύρματα δίκτυα. Το προτεινόμενο σχήμα είναι απλό στην υλοποίηση και εκμεταλλεύεται απόλυτα τα πλεονεκτήματα της χρήσης κατευθυντικών κεραιών, λύνοντας με αποδοτικό τρόπο τα διάφορα προβλήματα που προκύπτουν. Το νέο πρωτόκολλο εμπεριέχει αλγορίθμους προσαρμογής των κατευθυντικών κεραιών τόσο σε ad-hoc δίκτυα όσο και σε δίκτυα με υποδομή.

Τέλος, στην περίπτωση της σύνδεσης των σταθμών ενός ασύρματου δικτύου με τους γειτονικούς σταθμούς βάσης, προτείνεται ένας νέος αλγόριθμος σύνδεσης, αρκετά διαφορετικός από τους υπάρχοντες. Ο αλγόριθμος αυτός, λαμβάνοντας υπόψη του την ποιότητα του καναλιού, οδηγεί τους σταθμούς του δικτύου σε δυναμικές συνδέσεις με τους σταθμούς βάσης, μεγιστοποιώντας την ρυθμαπόδοση του κάθε σταθμού. Η αλλαγή των συνθηκών του καναλιού οδηγεί σε άμεση ανακατάταξη των συνδέσεων των διαφόρων σταθμών με τους σταθμούς βάσης της περιοχής, αλλάζοντας τη δυναμική του δικτύου, με γνώμονα πάντα την αύξηση της συνολικής ρυθμαπόδοσης.

Προσομοιώσεις των προτεινόμενων αλγορίθμων δείχνουν ότι η εφαρμογή τους οδηγεί σε σημαντική βελτίωση της απόδοσης των ασυρμάτων δικτύων και σε επίλυση διαφόρων προβλημάτων που παρουσιάζονται κατά τη λειτουργία των δικτύων αυτών και οδηγούν σε περιορισμό των δυνατοτήτων τους.

Ευχαριστίες

Κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διδακτορικής μου διατριβής πολλοί ήταν οι άνθρωποι που με βοήθησαν και στάθηκαν δίπλα μου, ο καθένας με το δικό του τρόπο. Αισθάνομαι λοιπόν την ανάγκη να τους ευχαριστήσω και από εδώ.

Πρώτα, πρώτα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ. Λεάνδρο Τασιούλα, ο οποίος εκτός από εξαιρετικός δάσκαλος, υπήρξε για μένα και ένας πολύ καλός φίλος. Η επιστημονική του καθοδήγηση, η αξιοπρέπεια και το ήθος του, μου δίδαξαν πολλά ως αναφορά την περαιτέρω πορεία μου ως επιστήμονας αλλά και ως άνθρωπος.

Με τον συμφοιτητή μου και καλό φίλο Gentian Jakllari μοιράστηκα εκτός από το κοινό γραφείο μας, τις σκέψεις, τους προβληματισμούς και τα όνειρά μου. Τον ευχαριστώ και του εύχομαι καλή επιτυχία στην νέα του ζωή στην Αμερική.

Ευχαριστώ τον καθηγητή κ. Srikanth Krishnamurthy, που με τη φιλοξενία του στο Πανεπιστήμιο της Καλιφόρνια στο Ρίβερσαϊντ, το καλοκαίρι του 2004, μου έδωσε την ευκαιρία να ζήσω μια σημαντική εμπειρία, εργαζόμενος στο ερευνητικό εργαστήριό του. Κατά την διάρκεια της παραμονής μου στο Πανεπιστήμιο αυτό, μου δώθηκε η ευκαιρία να συνεργαστώ και με τον καθηγητή κ. Ozgur Ercetin με τον οποίο αναπτύξαμε μια σημαντική, επιστημονική αλλά και φιλική σχέση.

Η τυχαία γνωριμία μου με τον Ντίνο Βλάχο στο Βόλο, εξελίχθηκε σε μια δυνατή φιλία. Τον ευχαριστώ για την βοήθειά και το ενδιαφέρον του, στο ξεκίνημα της ζωής μου στο Βόλο.

Με τους φίλους Δημήτρη Ζησιάδη, Φίλιππο Κόραβο και Σπύρο Κοψιδά μετατρέψαμε την τυπική συμβίωση τεσσάρων φοιτητών σε ένα κοινό γραφείο, σε μια ζεστή παρέα γεμάτη αισιοδοξία και χαμόγελο. Τους εύχομαι καλή τύχη στην συνέχεια των σπουδών τους.

Τελευταίο μα πολύ σημαντικό είναι το ευχαριστώ που θέλω να πω στους γονείς μου, στους ανθρώπους που με στήριξαν σε όλους τους τομείς, καθ'όλη τη διάρκεια της ζωής μου. Χωρίς την αγάπη τους, δεν θα έφτανα εδώ.

Θανάσης Κοράκης
Ιούνιος 2005

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	1
1.1	Γενικά	1
1.2	Ασύρματα Δίκτυα	3
1.2.1	Γενικά	3
1.2.2	Ιδιαιτερότητες της Επικοινωνίας στα Ασύρματα Δίκτυα	5
1.3	Το Πρωτόκολλο Πολλαπλής Πρόσβασης (MAC) στα Ασύρματα Δίκτυα	8
1.3.1	Γενικά	8
1.3.2	Προβλήματα στα MAC Πρωτόκολλα των Ασυρμάτων Δικτύων	9
1.4	Το Πρότυπο IEEE 802.11	14
1.4.1	Εισαγωγή	14
1.4.2	Αρχιτεκτονική Πρωτοκόλλων του 802.11	14
1.4.3	Αρχιτεκτονική του Συστήματος	15
1.4.4	Το Επίπεδο Ελέγχου Πολλαπλής Πρόσβασης (MAC)	17
1.5	Το Πρότυπο IEEE 802.11e	28
1.5.1	Εισαγωγή	28
1.5.2	Περιγραφή του IEEE 802.11e	29
1.5.3	Παροχή Ποιότητας Υπηρεσίας	30
1.5.4	Ρεύματα Κυκλοφορίας (Traffic Stream)	30
1.5.5	Αλλαγές στις Λειτουργίες Πρόσβασης	31
1.6	Το Πρότυπο IEEE 802.11h	36
1.6.1	Εισαγωγή	36
1.6.2	Έλεγχος Ισχύος Μετάδοσης (Transmission Power Control, TPC)	37
1.6.3	Δυναμική Επιλογή Συχνότητας (Dynamic Frequency Allocation, DFA)	41

- 2.1 Απαίτηση Ποιότητας Υπηρεσιών στα Ασύρματα Δίκτυα 802.11 46
- 2.2 Το Πρωτόκολλο MAC του 802.11 και η Ποιότητα του Καναλιού 48
- 2.3 Παρέχοντας Ποιότητα Υπηρεσιών στο 802.11e 49
- 2.4 Ο Αλγόριθμος Χρονοδρομολόγησης 53
 - 2.4.1 Χρονοδρομολόγηση με Βάση την Προθεσμία (Deadline) του Πακέτου 54
 - 2.4.2 Οι Προτεραιότητες στη Χρονοδρομολόγηση 57
 - 2.4.3 Η Διαδικασία της Χρονοδρομολόγησης 57
 - 2.4.4 Ο Καθορισμός του Χρόνου που Χρειάζεται η Μετάδοση ενός Πακέτου 58
 - 2.4.5 Ο Αλγόριθμος Εκχώρησης Χρόνου 60
- 2.5 Μοντέλο και Αποτελέσματα Προσομοιώσεων 63
 - 2.5.1 Μοντέλο Προσομοιώσεων 63
 - 2.5.2 Μοντέλο Καναλιού 64
 - 2.5.3 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων 65
- 2.6 Συμπεράσματα 73

- 3.1 Ο Ρόλος των Κατευθυντικών Κεραίων στα Ad-hoc Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα 74
- 3.2 Αλλαγές στο Πρωτόκολλο Πολλαπλής Πρόσβασης 75
 - 3.2.1 Προηγούμενη Δουλειά 75
 - 3.2.2 Προβλήματα στη Χρήση Κατευθυντικών Κεραίων 77
- 3.3 Το Μοντέλο Κατευθυντικών Κεραίων που Χρησιμοποιούμε 79
- 3.4 Το προτεινόμενο Πρωτόκολλο Πολλαπλής Πρόσβασης 80
 - 3.4.1 Κυκλικό κατευθυντικό RTS 81
 - 3.4.2 Καθορισμός της θέσης των γειτόνων 83
 - 3.4.3 Η χρήση του D-NAV 84
 - 3.4.4 Μερικές λεπτομέρειες του Πρωτοκόλλου 88
- 3.5 Μοντέλο και αποτελέσματα Προσομοιώσεων 89
 - 3.5.1 Μοντέλο Προσομοιώσεων 89
 - 3.5.2 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων 90
- 3.6 Συμπεράσματα 99

4	Κατευθυντικές Κεραίες σε Ασύρματα LAN με Υποδομή	100
4.1	Ο Ρόλος των Κατευθυντικών Κεραίων στα Ασύρματα LAN με Υποδομή	100
4.2	Προκλήσεις στη Χρήση Κατευθυντικών Κεραίων στα WLAN με Υποδομή	101
4.3	Το προτεινόμενο Πρωτόκολλο Πολλαπλής Πρόσβασης D-PCF	104
4.3.1	Μετάδοση Broadcast Πακέτων με Κατευθυντικές Κεραίες	104
4.3.2	Ο Μηχανισμός Polling με Χρήση Κατευθυντικών Κεραίων	104
4.3.3	Η Συμπεριφορά των Σταθμών	108
4.4	Μοντέλο και Αποτελέσματα Προσομοιώσεων	111
4.4.1	Μοντέλο Προσομοιώσεων	111
4.4.2	Αποτελέσματα Προσομοιώσεων	111
4.5	Συμπεράσματα	114
5	Σύνδεση ενός Σταθμού σε ένα 802.11h Δίκτυο	115
5.1	Η Ανάγκη Αλλαγών στην Διαδικασία Σύνδεσης του Κλασικού 802.11	115
5.2	Ο Προτεινόμενος Αλγόριθμος	116
5.3	Μοντέλο και Αποτελέσματα Προσομοιώσεων	121
5.3.1	Μοντέλο Προσομοιώσεων	121
5.3.2	Αποτελέσματα Προσομοιώσεων	122
5.4	Συμπεράσματα	126
6	Συμπεράσματα	127

Κατάλογος Σχημάτων

- 1.1 Ένα αδόμητο ασύρματο δίκτυο 4
- 1.2 Ένα ασύρματο δίκτυο με υποδομή 4
- 1.3 Το MAC επίπεδο στο μοντέλο του OSI 8
- 1.4 Το πρόβλημα του κρυμμένου κόμβου 10
- 1.5 Το πρόβλημα του εκτεθειμένου κόμβου 10
- 1.6 Σενάριο που αναδεικνύει διάφορα ζητήματα στο MAC επίπεδο 11
- 1.7 Η αρχιτεκτονική πρωτοκόλλων της οικογένειας IEEE 802 14
- 1.8 Οι επιλογές Φυσικού Επιπέδου της οικογένειας IEEE 802.11 15
- 1.9 Ένα Ανεξάρτητο Σύνολο Βασικής Υπηρεσίας (IBSS) 16
- 1.10 Ένα Σύνολο Βασικής Υπηρεσίας με υποδομή (BSS) 16
- 1.11 Ένα Εκτεταμένο Σύνολο Υπηρεσιών (ESS) 17
- 1.12 Η δομή πλαισίου στο MAC του 802.11 18
- 1.13 Η διαδικασία διασύνδεσης με ενεργή ανίχνευση 18
- 1.14 Η διαδικασία CSMA + Ack 20
- 1.15 Η συνολική διαδικασία μετάδοσης στο 802.11 21
- 1.16 Η διαδικασία κατακερματισμού 23
- 1.17 Η ιεραρχία των μεθόδων πρόσβασης στο 802.11 23
- 1.18 Η μέθοδος πρόσβασης PCF 24
- 1.19 Η μέθοδος εξοικονόμησης ενέργειας σε ένα δίκτυο με υποδομή 26
- 1.20 Η μέθοδος εξοικονόμησης ενέργειας σε ένα αδόμητο δίκτυο 27
- 1.21 Η δομή πλαισίου στο MAC του 802.11 34
- 1.22 Παράδειγμα μιας τυπικής διαδικασίας ψηφοφορίας στο 802.11e 35
- 1.23 Ο καθορισμός της Περιόδου Ησυχίας 42
- 1.24 Το λειτουργικό διάγραμμα της δυναμικής επιλογής συχνότητας 45

- 2.1 Ο ορισμός της προθεσμίας για ένα πακέτο 55

- 2.2 Ο κατά προσέγγιση υπολογισμός του χρόνου δημιουργίας των uplink πακέτων 57
- 2.3 Χρόνος που χρειάζεται να δεσμευτεί για διάφορων ειδών πακέτα 59
- 2.4 Χρόνος που χρειάζεται να δεσμευτεί στην περίπτωση χρήσης κατακερματισμού 60
- 2.5 Η εκχώρηση στην περίπτωση 1 61
- 2.6 Η εκχώρηση στην περίπτωση 2 62
- 2.7 Ενοποίηση δυο εκχωρήσεων του ίδιου σταθμού 63
- 2.8 Ο ρυθμός απόρριψης πακέτων σε ένα σενάριο με 1 μη περιοδική σύνδεση για κάθε σταθμό, καθώς ο αριθμός των σταθμών αυξάνεται 66
- 2.9 Η καθυστέρηση σε ένα σενάριο με 1 μη περιοδική σύνδεση για κάθε σταθμό, καθώς ο αριθμός των σταθμών αυξάνεται 67
- 2.10 Πως η προσεγγιστική εκτίμηση του χρόνου παραγωγής των πακέτων επηρεάζει το ρυθμός απώλειας πακέτων 68
- 2.11 Ο ρυθμός απόρριψης πακέτων σε ένα σενάριο με 2 συνδέσεις ανά σταθμό (μια περιοδική και μια μη περιοδική), καθώς ο αριθμός των σταθμών αυξάνεται 69
- 2.12 Τα εξυπηρετούμενα πακέτα σε ένα σενάριο με 2 μη περιοδικές συνδέσεις ανά σταθμό, μιας με και μιας χωρίς προθεσμία, καθώς ο αριθμός των σταθμών αυξάνεται 70
- 2.13 Ο ρυθμός απόρριψης πακέτων για τον έξυπνο και τον απλοϊκό χρονοδρομολογητή, καθώς η ποιότητα του καναλιού χειροτερεύει 71
- 2.14 Ο ρυθμός μετάδοσης που εκχωρείται σε κάθε σταθμό σε ένα σενάριο με δυο συνδέσεις ανά σταθμό, μιας της κατηγορίας 1 και μιας της κατηγορίας 2, για 10 σταθμούς και ποσοστό κακού καναλιού 10% 72

- 3.1 Η περιοχή κάλυψης ενός MAC πρωτοκόλλου που χρησιμοποιεί μη κατευθυντικό πακέτο RTS και κατευθυντικά πακέτα CTS, δεδομένων και Ack 78
- 3.2 Ένας κόμβος με M δέσμες ραδιοκύματος 80
- 3.3 Ένα σενάριο όπου φαίνεται το πρόβλημα του κρυμμένου κόμβου 85
- 3.4 Ένα σενάριο στο οποίο οι κόμβοι χρησιμοποιούν τους Πίνακες Θέσεων τους 86
- 3.5 Οι μεταδόσεις του σεναρίου του σχήματος 3.3 91
- 3.6 Ένα σενάριο γραμμικής τοπολογίας 92
- 3.7 Ένα τυχαίο σενάριο με 7 κόμβους 93

- 3.8 Ρυθμαπόδοση του προτεινόμενου πρωτοκόλλου με κεραιές 1, 4 και 8 στοιχείων για το τυχαίο σενάριο του σχήματος 3.7 94
- 3.9 Ρυθμαπόδοση του προτεινόμενου πρωτοκόλλου με κεραιές 1, 4 και 8 στοιχείων για τυχαίο σενάριο με 15 κόμβους 94
- 3.10 Το σενάριο πλέγματος 95
- 3.11 Η ρυθμαπόδοση του προτεινόμενου πρωτοκόλλου για το σενάριο του σχήματος 3.10 96
- 3.12 Ρυθμαπόδοση στο σενάριο 60 στατικών κόμβων 97
- 3.13 Ρυθμαπόδοση στο σενάριο 60 κινητών κόμβων 98
- 3.14 Ο αντίκτυπος της κινητικότητας στο προτεινόμενο πρωτόκολλο 99

- 4.1 Σύγκρουση κατά τη διάρκεια της PCF 102
- 4.2 Περιορισμός στην περιοχή κάλυψης ενός κελιού στην περίπτωση χρήσης μη κατευθυντικών μεταδόσεων για τα broadcast πακέτα 103
- 4.3 Ένα ασύρματο δίκτυο με ένα AP και τρεις σταθμούς 106
- 4.4 Ένα ασύρματο δίκτυο με ένα AP και δέκα σταθμούς 107
- 4.5 Δημιουργία DCF περιοχών κατά τη διάρκεια της PCF μετάδοσης 108
- 4.6 Η λειτουργία του D-NAV για τους σταθμούς 6 και 8 110
- 4.7 Σύγκριση του D-PCF με το 802.11 σε ένα σενάριο με 10 σταθμούς 112
- 4.8 Ανάλυση της ρυθμαπόδοσης σε ρυθμαπόδοση λόγω polling και σε ρυθμαπόδοση λόγω απ'ευθείας κατευθυντικών μεταδόσεων 113
- 4.9 Η επίδραση της κινητικότητας στο D-PCF 114

- 5.1 Το σύστημα πολλών κελιών των προσομοιώσεων μας 121
- 5.2 Η σύγκριση της ρυθμαπόδοσης καθώς ο αριθμός των σταθμών αυξάνεται 123
- 5.3 Η επί τοις εκατό αύξηση της ρυθμαπόδοσης καθώς ο αριθμός των σταθμών αυξάνεται 123
- 5.4 Η αύξηση της ρυθμαπόδοσης κατά την παρουσία παρεμβολών 124
- 5.5 Ο αριθμός των επανασυνδέσεων που η παρουσία ενός νέου σταθμού προκαλεί 125

Κατάλογος Πινάκων

- 1.1 Αντιστοιχία των Κατηγοριών Κυκλοφορίας σε Κατηγορίες Πρόσβασης 32
- 1.2 Τα κανάλια λειτουργίας στην συχνότητα των 5 GHz 38
- 1.3 Τα μέγιστα όρια στην ισχύ μετάδοσης 38
- 1.4 Κατηγορίες RSSRI 44
- 2.1 Τα χαρακτηριστικά της κίνησης των συνδέσεων που χρησιμοποιήθηκαν 64
- 3.1 Μια εγγραφή του Πίνακα Θέσεων του σταθμού Α στο σχήμα 3.3 83
- 3.2 Τμήματα των Πινάκων Θέσεων που διατηρούν οι κόμβοι Γ, Δ, Ε του σχήματος 3.4 87
- 3.3 Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του σεναρίου 3.3 που εξετάζει το πρόβλημα του κρυμμένου κόμβου λόγω ασυμμετρίας στο κέρδος 92
- 3.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης του σεναρίου του σχήματος 3.6 τα οποία δείχνουν τις επιπτώσεις του κυκλικού RTS 93
- 3.5 Η μείωση της ρυθμαπόδοσης στο σενάριο των 60 κινητών κόμβων 98
- 4.1 Ο Πίνακας Θέσεων του AP για το σενάριο του σχήματος 4.3 105
- 4.2 Πίνακας Ομαδοποίησης του AP για το σενάριο του σχήματος 4.4 107
- 4.3 Ο Πίνακας Polling του AP για το σενάριο του σχήματος 4.4 109

Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Τα ασύρματα δίκτυα είναι ένας τομέας των επικοινωνιών που συγκεντρώνει ιδιαίτερο ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια. Σκοπός της τεχνολογίας, είναι τα μελλοντικά ασύρματα δίκτυα να μπορούν να προσφέρουν στους χρήστες τους υπηρεσίες, ανάλογες με αυτές που προσφέρουν τα ενσύρματα δίκτυα. Τέτοιες υπηρεσίες είναι η μετάδοση δεδομένων, φωνής και βίντεο μέσω μιας ασύρματης γραμμής με υψηλές ταχύτητες. Υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον για τέτοια δίκτυα σε εμπορικές, ψυχαγωγικές και στρατιωτικές εφαρμογές, καθώς επίσης και σε περιβάλλοντα όπου η ύπαρξη ενσύρματης δικτυακής δομής είναι αδύνατη ή ασύμφορη. Επιθυμία των σύγχρονων χρηστών ηλεκτρονικών υπολογιστών, είναι να περιφέρονται στο χώρο εργασίας, ψυχαγωγίας ή μελέτης, χρησιμοποιώντας κάποια εξελιγμένη μορφή φορητού υπολογιστή και να απολαμβάνουν υπηρεσίες δικτύου όπως το ηλεκτρονικό ταχυδρομείο (e-mail), η τηλεδιάσκεψη (teleconference), ή η παρακολούθηση βίντεο μέσω δικτύου (video on demand), με την ίδια ευκολία που απολαμβάνουν τις υπηρεσίες αυτές από ένα σταθερό δίκτυο. Από την άλλη πλευρά, τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του ασύρματου καναλιού, καθώς επίσης και οι φυσικοί περιορισμοί στην ισχύ μετάδοσης στο ασύρματο μέσο, περιορίζουν τις δυνατότητες των ασύρματων δικτύων και δημιουργούν ιδιαίτερες σχεδιαστικές δυσκολίες στην ανάπτυξη τους.

Η μεγάλη εξάπλωση των ασύρματων δικτύων, καθώς και η πρόσφατη σημαντική βελτίωση των ταχυτήτων μετάδοσης στο φυσικό μέσο (ενδεικτικά αναφέρουμε ότι το IEEE 802.11a παρέχει ρυθμούς μετάδοσης μέχρι και 54 Mbps), δημιουργούν την ανάγκη ανάπτυξης μηχανισμών που θα βελτιώσουν τον τρόπο λειτουργίας των ασυρμάτων δικτύων και θα εκμεταλλευτούν τους υψηλούς αυτούς ρυθμούς μετάδοσης. Βασικό ρόλο στην κατεύθυνση αυτή παίζουν οι μηχανισμοί που ενεργοποιούνται στο Επίπεδο Ελέγχου Πολλαπλής Πρόσβασης (Multiple Access Control Layer, MAC) του μοντέλου OSI (Open System Interconnection). Οι μηχανισμοί αυτοί είναι υπεύθυνοι για θέματα πρόσβασης των χρηστών στο μέσο μετάδοσης και λόγω

του ότι η μετάδοση στο ασύρματο μέσο έχει πολλές ιδιαιτερότητες, ο σχεδιασμός τους σχετίζεται άμεσα με την αποδοτική λειτουργία των ασύρματων δικτύων.

Η διατριβή αυτή ασχολείται με την μελέτη και την ανάπτυξη τέτοιων μηχανισμών που σχετίζονται με τη βελτίωση της συμπεριφοράς του MAC πρωτοκόλλου ενός ασυρμάτου δικτύου. Οι μηχανισμοί αυτοί εφαρμόζονται σε τομείς όπως η δρομολόγηση της κίνησης με σκοπό την υποστήριξη Ποιότητας Υπηρεσίας (Quality of Service, QoS), η χρήση κατευθυντικών κεραιών (Directional Antennas) και η βελτίωση της διαδικασίας Σύνδεσης (Association) ενός σταθμού με το ασύρματο δίκτυο.

Η δομή της παρούσας διατριβής είναι η εξής: Στο υπόλοιπο του κεφαλαίου αυτού, περιγράφονται οι ιδιαιτερότητες της μετάδοσης στο ασύρματο μέσο και τα προβλήματα του MAC επιπέδου σε ένα ασύρματο δίκτυο. Έπειτα περιγράφεται το δημοφιλές πρότυπο IEEE 802.11 που φαίνεται να έχει επικρατήσει ως το κοινό πρότυπο ανάπτυξης ασυρμάτων δικτύων. Στη συνέχεια περιγράφονται τα πρότυπα IEEE 802.11e και IEEE 802.11h που καθορίζουν το πλαίσιο λειτουργίας του 802.11 ως αναφορά την υποστήριξη ποιότητας υπηρεσίας το πρώτο και τις διαδικασίες του ελέγχου της ισχύος μετάδοσης και της δυναμικής επιλογής συχνότητας το δεύτερο.

Στο κεφάλαιο 2 περιγράφεται ένας αλγόριθμος χρονοδρομολόγησης της κίνησης ενός IEEE 802.11 δικτύου, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την παροχή ποιότητας υπηρεσίας στους χρήστες, στα πλαίσια του προτύπου IEEE 802.11e. Ο χρονοδρομολογητής λειτουργεί στο σταθμό βάσης ενός ασύρματου δικτύου και καθορίζει τη χρονική στιγμή και τη διάρκεια της πρόσβασης του κάθε χρήστη στο ασύρματο μέσο, με βάση τις απαιτήσεις του, σε μακροπρόθεσμο αλλά και βραχυπρόθεσμο επίπεδο.

Στο κεφάλαιο 3 περιγράφεται ένα MAC πρωτόκολλο που υποστηρίζει τη χρήση κατευθυντικών κεραιών σε αδόμητα (ad-hoc) ασύρματα τοπικά δίκτυα. Το πρωτόκολλο αυτό, το οποίο είναι απλό στην υλοποίηση, επιτρέπει στο ασύρματο δίκτυο την πλήρη εκμετάλλευση των πλεονεκτημάτων που παρέχει η χρήση κατευθυντικών κεραιών στα ασύρματα δίκτυα.

Στο κεφάλαιο 4 περιγράφεται ένα MAC πρωτόκολλο που υποστηρίζει τη χρήση κατευθυντικών κεραιών σε ασύρματα τοπικά δίκτυα με υποδομή. Το πρωτόκολλο αυτό είναι μια επέκταση του πρωτοκόλλου που περιγράφεται στο προηγούμενο κεφάλαιο προς την κατεύθυνση της χρήσης σταθμού βάσης για τη διευθέτηση της πρόσβασης στο κανάλι. Το νέο πρωτόκολλο βελτιώνει τη λειτουργία του κλασικού 802.11 και αυξάνει την απόδοση του δικτύου.

Τέλος, στο κεφάλαιο 5 περιγράφεται ένας νέος αλγόριθμος Σύνδεσης (Association) ενός σταθμού με το ασύρματο δίκτυο, ο οποίος εκμεταλλεύεται τις πληρο-

φορίες που είναι πλέον διαθέσιμες από το IEEE 802.11h, σχετικά με την ποιότητα του καναλιού. Ο νέος αλγόριθμος Σύνδεσης, λαμβάνοντας υπόψη τη γνώση αυτή, βελτιώνει με δυναμικό τρόπο τις συνδέσεις των σταθμών με τους γειτονικούς σταθμούς βάσης, βελτιώνοντας έτσι την απόδοση του δικτύου.

1.2 Ασύρματα Δίκτυα

1.2.1 Γενικά

Ένα ασύρματο δίκτυο ορίζεται ως η τεχνολογία που επιτρέπει σε δύο ή περισσότερους υπολογιστές να επικοινωνήσουν μεταξύ τους χωρίς τη χρήση καλωδίων. Η σημερινή τεχνολογία επικεντρώνεται στην ανάπτυξη και χρήση Ασύρματων Τοπικών Δικτύων (Wireless Local Area Networks, WLANs) τα οποία είναι ασύρματα δίκτυα που αναπτύσσονται σε μια περιορισμένη σχετικά περιοχή όπως μια αίθουσα, ένα κτίριο ή η περιοχή ενός πανεπιστημιακού συγκροτήματος ή μιας εταιρίας.

Τα ασύρματα τοπικά δίκτυα χωρίζονται σε δυο κατηγορίες: Στα αδόμητα (ad-hoc) ασύρματα δίκτυα και στα ασύρματα δίκτυα με υποδομή.

Αδόμητα (Ad-Hoc) Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα

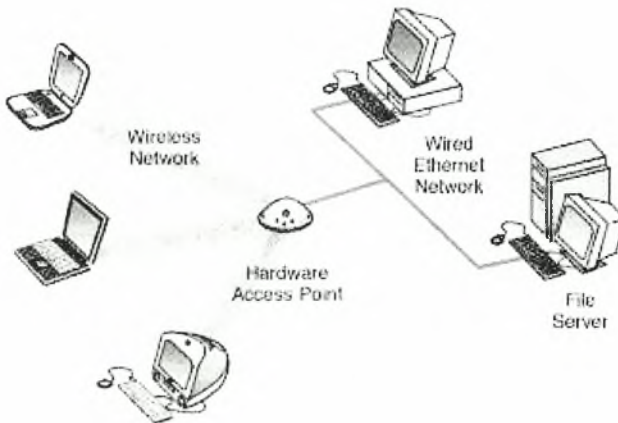
Τα αδόμητα ασύρματα δίκτυα αποτελούνται από έναν αριθμό υπολογιστών, καθένας από τους οποίους είναι εξοπλισμένος με μια κάρτα ασύρματης πρόσβασης (wireless networking interface card). Κάθε υπολογιστής μπορεί να επικοινωνήσει απ'ευθείας με οποιοδήποτε άλλο υπολογιστή. Με τον τρόπο αυτό, οι υπολογιστές του δικτύου μπορούν να έχουν πρόσβαση σε κοινούς πόρους, όπως αρχεία ή εκτυπωτές. Ενδεχομένως να μην έχουν τη δυνατότητα να επικοινωνήσουν με τον έξω κόσμο, εκτός και αν ένας από αυτούς είναι συνδεδεμένος με κάποιο ενσύρματο δίκτυο και παίζει έτσι το ρόλο της Γέφυρας (Bridge) μεταξύ των δυο δικτύων. Ένα παράδειγμα αδόμητου ασύρματου δικτύου φαίνεται στο σχήμα 1.1.

Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα με Υποδομή

Ένα ασύρματο δίκτυο με υποδομή (infrastructure wireless network) αποτελείται από ένα αριθμό από υπολογιστές που διαθέτουν κάρτες ασύρματης πρόσβασης και ένα ειδικό σταθμό που ονομάζεται Σημείο Πρόσβασης (Access Point, AP) ή Σταθμός Βάσης (Base Station, BS). Το AP είναι υπεύθυνο για τη διασύνδεση του ασύρματου δικτύου με το ενσύρματο δίκτυο, την διαχείριση των κοινών πόρων (αρχεία, εκτυπωτές) καθώς και τον τρόπο πρόσβασης του ασύρματου μέσου από τους χρήστες. Ένα παράδειγμα ασύρματου δικτύου με υποδομή φαίνεται στο σχήμα 1.2.



Σχήμα 1.1: Ένα αδόμητο ασύρματο δίκτυο



Σχήμα 1.2: Ένα ασύρματο δίκτυο με υποδομή

1.2.2 Ιδιαιτερότητες της Επικοινωνίας στα Ασύρματα Δίκτυα

Στα ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών, οι κόμβοι χρησιμοποιούν ράδιο-σήματα για την επικοινωνία τους. Σε ένα κλασικό μοντέλο ενός τέτοιου δικτύου, κάθε κόμβος μπορεί να μεταδίδει ή να λαμβάνει μια χρονική στιγμή αλλά όχι και τα δύο συγχρόνως. Η επικοινωνία μεταξύ των κινητών κόμβων περιορίζεται μέσα σε μια ορισμένη περιοχή κάλυψης. Όλοι οι κόμβοι χρησιμοποιούν την ίδια συχνότητα για να επικοινωνήσουν. Έτσι, μέσα στην περιοχή κάλυψης, χρησιμοποιείται ένα κανάλι μετάδοσης, καλύπτοντας ολόκληρο το εύρος ζώνης. Αντίθετα από τα ενσύρματα δίκτυα, η καθυστέρηση ενός πακέτου προκαλείται όχι μόνο από το φόρτο του τοπικού κόμβου, αλλά και από το φόρτο των γειτονικών κόμβων.

Ένα χαρακτηριστικό της μετάδοσης των πακέτων στα ασύρματα δίκτυα είναι η έννοια της τοπικότητας. Όταν κάποιος σταθμός μεταδίδει σε κάποιον άλλο, δεν είναι σίγουρο ότι ο παραλήπτης θα αντιληφθεί την εξελισσόμενη μετάδοση. Ανάλογα, δεν είναι σίγουρο ότι όλοι οι υπόλοιποι σταθμοί του δικτύου θα είναι ενήμεροι για την εν λόγω μετάδοση, οπότε θα αλλάξουν τη συμπεριφορά τους για να προσοματέψουν την μετάδοση αυτή. Το ποιοί σταθμοί θα "ακούσουν" τη μετάδοση εξαρτάται από τη θέση στην οποία βρίσκονται. Οι σταθμοί που βρίσκονται στην περιοχή εμβέλειας του αποστολέα θα ακούσουν την μετάδοση. Οι υπόλοιποι, παρόλο που ενδεχομένως μπορούν με κάποιο τρόπο να επηρεάσουν την μετάδοση, δεν είναι σε θέση να την αντιληφθούν, λόγω της θέσης στην οποία βρίσκονται. Αυτό το χαρακτηριστικό δεν παρατηρείται στα ενσύρματα δίκτυα, όπου όλοι οι σταθμοί που ανήκουν στο δίκτυο (και επομένως είναι συνδεδεμένοι στο καλώδιο) ακούνε οποιαδήποτε μετάδοση στο ενσύρματο μέσο. Η έννοια της τοπικότητας στη μετάδοση πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στο σχεδιασμό των αλγορίθμων που διέπουν τα πρωτόκολλα των ασυρμάτων δικτύων, ώστε να αντιμετωπίζονται τα προβλήματα που δημιουργούνται λόγω του ιδιαίτερου αυτού χαρακτηριστικού.

Συνέπεια της παραπάνω ιδιότητας, είναι το ότι όταν ο αποστολέας και ο παραλήπτης είναι μακριά ο ένας από τον άλλο, κάθε φορά που ένα πακέτο μεταδίδεται, πρέπει να αναμεταδίδεται διαδοχικά από ενδιάμεσους κόμβους, μέχρι να φτάσει στον παραλήπτη (multihop WLANs). Σε κάθε αναμετάδοση, ο αναμεταδότης έχει πρόσβαση στο ασύρματο μέσο. Η πρόσβαση του μέσου απαιτεί κατάλληλη ενημέρωση των γειτόνων του κόμβου που μεταδίδει, ώστε να προωθηθεί το πακέτο όσο το δυνατό ταχύτερα και παράλληλα να αποφευχθεί άσκοπη παρεμβολή στους γειτονικούς κόμβους. Με τη διαδικασία αυτή ασχολούνται τα πρωτόκολλα που ονομάζονται πρωτόκολλα δρομολόγησης (routing protocols). Τα πρωτόκολλα MAC ασχολούνται μόνο με την άμεση επικοινωνία μεταξύ δυο σταθμών και όχι με την από άκρο σε άκρο επικοινωνία.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό γνώρισμα των ασυρμάτων δικτύων είναι η ύπαρξη εξωτερικής παρεμβολής (interference). Σε ένα τέτοιο δίκτυο είναι πολύ πιθανό κάποιος κόμβος να βρίσκεται κοντά σε μια πηγή εξωτερικής παρεμβολής π.χ. φούρνος μικροκυμάτων ή κάποιο άλλο ασύρματο δίκτυο που λειτουργεί στην ίδια συχνότητα. Ως αποτέλεσμα, ο κόμβος αυτός επηρεάζεται από την παρεμβολή και έτσι δεν μπορεί να αντιληφθεί την μετάδοση κάποιου σταθμού του δικτύου του, για μικρά ή μεγάλα διαστήματα, ανάλογα με το είδος και τη διάρκεια της παρεμβολής. Αυτό είναι επίσης ένα χαρακτηριστικό που δεν συναντάται στα ενσύρματα δίκτυα, όπου το ενσύρματο μέσο είναι μονωμένο και έτσι προστατεύεται από εξωτερικές παρεμβολές. Το φαινόμενο της εξωτερικής παρεμβολής επηρεάζει πολύ τη συμπεριφορά των ασυρμάτων δικτύων και είναι ένα ακόμα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη από τα πρωτόκολλα στα ασύρματα δίκτυα ώστε να περιορίζονται, όσο το δυνατό περισσότερο, οι συνέπειές του.

Μια άλλη ιδιαιτερότητα των ασύρματων δικτύων, είναι το γεγονός ότι η μετάδοση στο ασύρματο μέσο επηρεάζεται ιδιαίτερα από την ηλεκτρομαγνητική διάδοση (electromagnetic propagation). Κάθε αντικείμενο στο περιβάλλον ενός ασύρματου δικτύου, ανακλά ή απορροφά το σήμα που μεταφέρει την πληροφορία. Το γεγονός αυτό μπορεί να δημιουργήσει σημαντικές αλλαγές στην ισχύ του σήματος που λαμβάνεται από έναν σταθμό, αποκόπτοντας πολλές φορές τον σταθμό από το υπόλοιπο δίκτυο. Στις συχνότητες που χρησιμοποιούν τα ασύρματα δίκτυα, μικρές αλλαγές στη θέση μπορούν να δημιουργήσουν μεγάλες αλλαγές στην ισχύ του λαμβανόμενου σήματος. Αυτό συμβαίνει γιατί το σήμα ταξιδεύει μέσω πολλών διαδρομών (multipath transmission), διαφορετικών μηκών για να φτάσει στον προορισμό του. Κάθε ανεξάρτητο λαμβανόμενο σήμα έχει λίγο διαφορετική φάση από όλα τα άλλα. Αθροίζοντας αυτές τις διαφορετικές φάσεις, ο παραλήπτης συνθέτει το σήμα που λαμβάνει. Λόγω του ότι αυτά τα ανεξάρτητα σήματα κάποια φορά φτάνουν στον παραλήπτη με μικρή διαφορά φάσης και κάποια με μεγάλη, το συνολικό σήμα είναι άλλοτε ισχυρό και άλλοτε ασθενές. Η μετακίνηση αντικειμένων στο περιβάλλον όπως άνθρωποι, πόρτες κ.λπ., μπορεί επίσης να επηρεάσει την ισχύ του σήματος στον παραλήπτη αλλάζοντας την ανάκλαση ή την απορρόφηση των πολλών ανεξάρτητων σημάτων.

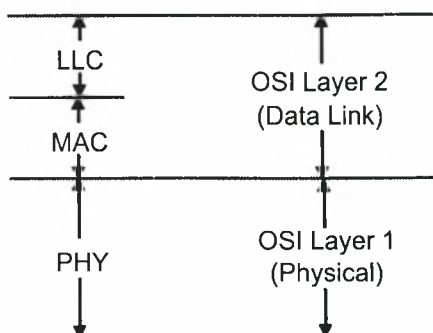
Τέλος, ένα ακόμη ιδιαίτερο χαρακτηριστικό στη λειτουργία των ασυρμάτων δικτύων είναι η κινητικότητα (mobility) των χρηστών. Ένας χρήστης ενός ασύρματου δικτύου δεν είναι συνδεδεμένος σε μια από τις πρίζες του δικτύου όπως συμβαίνει στα ενσύρματα δίκτυα. Αντίθετα, λαμβάνοντας το σήμα ασύρματα, μπορεί να κινείται οπουδήποτε στο χώρο εμβέλειας του δικτύου. Το χαρακτηριστικό αυτό είναι υπεύθυνο για πολλά από τα πλεονεκτήματα των ασυρμάτων δικτύων, αλλά παράλληλα αυξάνει σημαντικά την πολυπλοκότητα των μηχανισμών λειτουργίας

τους.

Το βασικό πλεονέκτημα της κινητικότητας είναι η δυνατότητα του χρήστη να κινείται στο χώρο, έχοντας συνεχή σύνδεση στο δίκτυο και χωρίς να χρειάζεται να αναζητά πρίζες ή να ενημερώνει τους διαχειριστές δικτύου (network administrators). Για έναν χρήστη που διαθέτει ένα φορητό υπολογιστή (laptop) με ασύρματη πρόσβαση, η σύνδεση στο δίκτυο είναι δυνατή στο διπλανό γραφείο, στο διάδρομο, στο εστιατόριο του κτιρίου, στο πάρκινγκ ή ακόμη και σε ένα άλλο κτίριο σε άλλη πόλη ή και σε άλλη χώρα.

Από την άλλη, όπως αναφέραμε η κινητικότητα δημιουργεί και σημαντικά μειονεκτήματα στη λειτουργία των ασύρματων δικτύων. Τα περισσότερα πρωτόκολλα δικτύων που έχουν δημιουργηθεί και λειτουργούν σήμερα, δεν έχουν σχεδιαστεί να λειτουργούν κάτω από καθεστώς κινητικότητας των χρηστών. Έχουν σχεδιαστεί με την υπόθεση ότι οι διευθύνσεις που δίνονται στους κόμβους του δικτύου θα παραμένουν σε σταθερές τοποθεσίες. Για παράδειγμα, τα πρώτα ασύρματα τοπικά δίκτυα επέτρεπαν σε έναν ασύρματο χρήστη να μετακινείται (roaming) σε περιοχές όπου το ασύρματο δίκτυο ήταν συνδεδεμένο με το ενσύρματο δίκτυο μέσω γεφυρών (bridges) του επιπέδου 2 μεταξύ των στοιχείων του ασύρματου δικτύου. Αυτή η απαίτηση υπήρχε λόγω του ότι δεν υπήρχε απλός τρόπος να αντιμετωπιστεί η αλλαγή των διευθύνσεων του επιπέδου 3, όταν ένας σταθμός περνούσε από ένα κομμάτι του δικτύου σε ένα άλλο, που ήταν συνδεδεμένα με μεταγωγέα (router). Σήμερα υπάρχουν τρόποι να αντιμετωπισθούν τα προβλήματα αυτά χρησιμοποιώντας νέα πρωτόκολλα όπως το DHCP και το Mobile-IP.

Ένα άλλο σημαντικό πρόβλημα που προκύπτει από την κινητικότητα των χρηστών, είναι το ότι οι υπηρεσίες που εξαρτώνται από τη θέση στην οποία βρίσκονται οι χρήστες, π.χ. η πρόσβαση των υπαλλήλων ενός γραφείου στον εκτυπωτή του γραφείου, χάνουν την αντιστοιχία τους με τη θέση του χρήστη μιας και τώρα οι διευθύνσεις του δικτύου δεν έχουν σχέση με τη φυσική θέση των χρηστών. Έτσι, έννοιες όπως ο κοντινότερος εκτυπωτής, πρέπει να ορισθούν με διαφορετικό τρόπο, μιας και η θέση ενός χρήστη μπορεί να αλλάζει συνεχώς. Το γεγονός αυτό αυξάνει την πολυπλοκότητα των πρωτοκόλλων αλλά υποστηρίζει τις ανάγκες του ασύρματου χρήστη.



Σχήμα 1.3: Το MAC επίπεδο στο μοντέλο του OSI

1.3 Το Πρωτόκολλο Πολλαπλής Πρόσβασης (MAC) στα Ασύρματα Δίκτυα

1.3.1 Γενικά

Το επίπεδο Ελέγχου Πολλαπλής Πρόσβασης (MAC) είναι ένα υποεπίπεδο του Επιπέδου Σύνδεσης (Data Link Layer, DLC), που είναι το 2ο κατά σειρά στο μοντέλο OSI. Από πάνω του βρίσκεται το υποεπίπεδο Ελέγχου Λογικής Σύνδεσης (Logical Link Control, LLC) και από κάτω του το Φυσικό Επίπεδο (Physical Layer, PHY), όπως φαίνεται στο σχήμα 1.3.

Σκοπός του MAC επιπέδου, είναι να παράσχει ένα μηχανισμό για την διευθέτηση της πρόσβασης των χρηστών στο κοινό ασύρματο μέσο. Ο μηχανισμός αυτός πρέπει να λαμβάνει υπόψη του τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της μετάδοσης στο ασύρματο μέσο. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι η τοπικότητα στη μετάδοση, η ύπαρξη εξωτερικής παρεμβολής, οι συνέπειες της ηλεκτρομαγνητικής διάδοσης (electromagnetic propagation) και η κινητικότητα των χρηστών. Στόχος του σχεδιασμού του MAC πρωτοκόλλου πρέπει να είναι η δημιουργία τέτοιων μηχανισμών, ώστε να ελαχιστοποιούνται οι αρνητικές συνέπειες των χαρακτηριστικών αυτών και να γίνεται εκμετάλλευση των πλεονεκτημάτων τους.

Τα πρωτόκολλα MAC μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες: σε σύγχρονα και ασύγχρονα. Στα σύγχρονα MAC πρωτόκολλα, η χωρητικότητα του μέσου μετάδοσης διαιρείται σε θυρίδες (slots) (π.χ. χρονοθυρίδες στο TDMA, θυρίδες συχνότητας στο FDMA, κλπ.) και οι κόμβοι είναι υποχρεωμένοι να χρησιμοποιούν μια από αυτές τις θυρίδες για να έχουν πρόσβαση στο μέσο μετάδοσης. Αυτές οι συγχρονισμένες θυρίδες ορίζονται από μια κεντρική μονάδα ελέγχου του συστήματος (π.χ. από τον Σταθμό Βάσης στο GSM). Αντίθετα, τα ασύγχρονα MAC πρωτόκολλα δεν διαθέτουν κανενός είδους συγχρονισμό στη λειτουργία τους. Στην περίπτωση των αδόμητων δικτύων, λόγω του ότι δεν προϋπάρχει μια συγκεκριμένη υποδομή, ο συγχρονισμός δεν είναι δυνατός, θέτοντας ως μόνη επιλογή για τα MAC

πρωτόκολλα σε τέτοια περιβάλλοντα τον ασύγχρονο τρόπο λειτουργίας.

Έτσι λοιπόν, στα ασύρματα δίκτυα, τα MAC πρωτόκολλα διέπονται από τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Τα δίκτυα αυτά λειτουργούν σε ένα ισχυρά ανταγωνιστικό περιβάλλον στο οποίο το μέσο μοιράζεται από όλους τους γειτονικούς κόμβους που προσπαθούν να καταλάβουν το κανάλι για να μεταδώσουν.
- Ο στόχος των MAC πρωτοκόλλων είναι, λαμβάνοντας υπόψη τους τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της μετάδοσης στο ασύρματο μέσο, να καθορίσουν ένα μηχανισμό για την διευθέτηση της χρήσης του μέσου με αποδοτικό τρόπο, αυξάνοντας παράλληλα τη ρυθμαπόδοση (throughput) του δικτύου.
- Τα MAC πρωτόκολλα μπορεί να είναι σύγχρονα ή ασύγχρονα. Ιδιαίτερα στα αδόμητα δίκτυα, δεν μπορούν να είναι σύγχρονα, λόγω της έλλειψης υποδομής. Έτσι λειτουργούν με ασύγχρονο τρόπο βασιζόμενα στον ανταγωνισμό (contention).

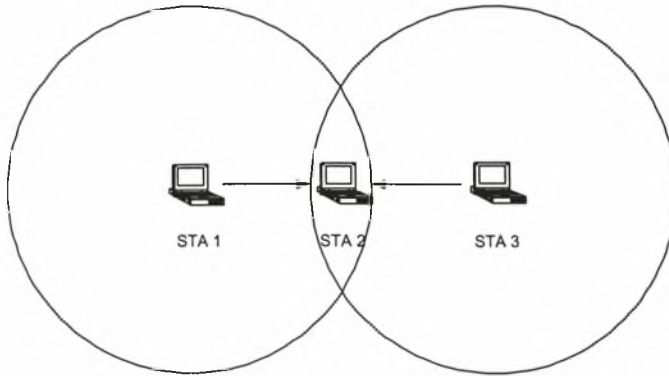
1.3.2 Προβλήματα στα MAC Πρωτόκολλα των Ασυρμάτων Δικτύων

Όπως είδαμε στην προηγούμενη παράγραφο, ο τρόπος λειτουργίας των MAC πρωτοκόλλων στα ασύρματα δίκτυα είναι αρκετά διαφορετικός από αυτόν στα ενσύρματα δίκτυα. Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που διέπουν τη μετάδοση στα ασύρματα δίκτυα δημιουργούν προβλήματα και προκλήσεις στο σχεδιασμό των MAC πρωτοκόλλων που δεν είχαν παρουσιαστεί κατά τη μελέτη των ενσύρματων τοπικών δικτύων. Τα προβλήματα αυτά θα μελετήσουμε σε αυτή την παράγραφο, αναδεικνύοντας μέσα από παραδείγματα τις βασικές ιδιαιτερότητες που πρέπει να αντιμετωπισθούν στο νέο περιβάλλον.

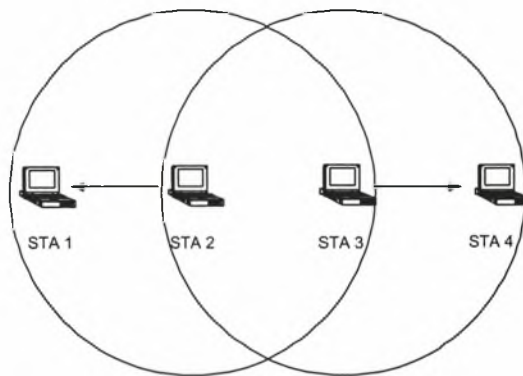
Το Πρόβλημα του Κρυμμένου Κόμβου (Hidden Terminal Problem)

Ας θεωρήσουμε το ασύρματο δίκτυο του σχήματος 1.4. Θεωρούμε ότι οι σταθμοί του σχήματος συμπεριφέρονται σεβόμενοι πλήρως τις εξελισσόμενες μεταδόσεις (σε αναλογία της συμπεριφοράς των σταθμών σε ένα ενσύρματο τοπικό δίκτυο). Αυτό σημαίνει ότι εάν ένας σταθμός αντιληφθεί ότι μια μετάδοση βρίσκεται σε εξέλιξη, αναβάλλει τη δική του μετάδοση, έως ότου η εξελισσόμενη μετάδοση να ολοκληρωθεί. Όπως φαίνεται στο σχήμα, η τοπολογία του δικτύου καθώς και η εμβέλεια του κάθε σταθμού είναι τέτοια, ώστε ο σταθμός 2 ακούει τους σταθμούς 1 και 3 ενώ οι σταθμοί 1 και 3 ακούνε μόνο το σταθμό 2.

Ας θεωρήσουμε το σενάριο όπου ο σταθμός 1 αρχίζει να μεταδίδει στον σταθμό 2 και αμέσως μετά ο σταθμός 3 προτίθεται να μεταδώσει επίσης στον σταθμό 2.



Σχήμα 1.4: Το πρόβλημα του κρυμμένου κόμβου



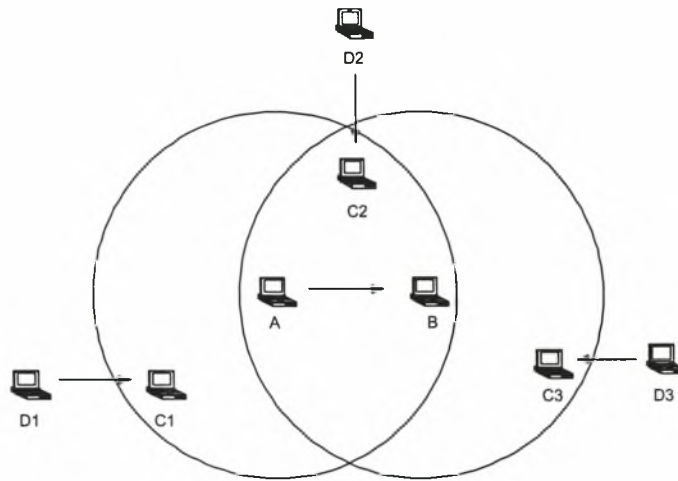
Σχήμα 1.5: Το πρόβλημα του εκτεθειμένου κόμβου

Λόγω του ότι ο 3 δεν είναι σε θέση να ακούσει τη μετάδοση του 1, θεωρεί το κανάλι ελεύθερο, μεταδίδει στον 2 και δημιουργεί σύγκρουση. Ο σταθμός 3 είναι κρυμμένος κόμβος για τον σταθμό 1 και αντίστροφα. Το σενάριο αυτό ονομάζεται πρόβλημα του κρυμμένου κόμβου, αποτελεί βασικό πρόβλημα στο χώρο των ασυρμάτων δικτύων και υπάρχουν αρκετές εργασίες που ασχολούνται με την αντιμετώπισή του [TK75], [FGLA97].

Το Πρόβλημα του Εκτεθειμένου Κόμβου (Exposed Terminal Problem)

Ας θεωρήσουμε τώρα το ασύρματο δίκτυο του σχήματος 1.5

Στην περίπτωση του σεναρίου αυτού κάνουμε την ίδια υπόθεση με το προηγούμενο σενάριο, δηλαδή ότι οι σταθμοί συμπεριφέρονται σεβόμενοι πλήρως τις εξελισσόμενες μεταδόσεις γύρω τους. Όπως φαίνεται στο σχήμα, η τοπολογία του δικτύου καθώς και η εμβέλεια του κάθε σταθμού είναι τέτοια, ώστε ο κάθε σταθμός ακούει τους άμεσους γείτονες του (π.χ. ο σταθμός 2 ακούει τους 1 και 3).



Σχήμα 1.6: Σενάριο που αναδεικνύει διάφορα ζητήματα στο MAC επίπεδο

Ας θεωρήσουμε το σενάριο όπου ο σταθμός 2 αρχίζει να μεταδίδει στο σταθμό 1 και αμέσως μετά ο σταθμός 3 προτίθεται να μεταδώσει στο σταθμό 4. Λόγω του ότι ο 3 ακούει τη μετάδοση του 2 θεωρεί ότι το κανάλι δεν είναι ελεύθερο και αναβάλλει τη μετάδοση του μέχρι την ολοκλήρωση της μετάδοσης του 2. Η συμπεριφορά αυτή αρχικά φαίνεται σωστή. Εάν όμως προσέξουμε καλύτερα την τοπολογία του σχήματος, θα διαπιστώσουμε ότι η μετάδοση του σταθμού 3 δεν επηρεάζει καθόλου την εξελισσόμενη μετάδοση από τον 2 στον 1. Αυτό σημαίνει ότι ο 3 θα μπορούσε κάλλιστα να μεταδώσει στον 4 παράλληλα με την μετάδοση από τον 2 στον 1, αυξάνοντας έτσι την απόδοση του δικτύου. Στην περίπτωση αυτή λοιπόν έχουμε μια άσκοπη φίμωση του σταθμού 3, ο οποίος ονομάζεται εκτεθειμένος κόμβος. Το σενάριο αυτό ονομάζεται πρόβλημα του εκτεθειμένου κόμβου και αποτελεί επίσης πρόβλημα στο χώρο των ασυρμάτων δικτύων, μιας και μειώνει άσκοπα την απόδοσή τους.

Άλλα Ζητήματα που Πρέπει να Αντιμετωπισθούν

Ας θεωρήσουμε το σχήμα 1.6, όπου ο σταθμός A θέλει να μεταδώσει στο σταθμό B.

Παρατηρώντας το σενάριο του σχήματος προκύπτουν τα παρακάτω ζητήματα που πρέπει αν επιλυθούν από το MAC πρωτόκολλο που θα χρησιμοποιηθεί:

- Πώς ο A θα αντιληφθεί την κατάσταση του καναλιού πριν μεταδώσει, καθώς ενδεχομένως και άλλοι κόμβοι να προσπαθούν να μεταδώσουν στον B;
- Να αρχίσει η διαδικασία μετάδοσης από τον αποστολέα, με την μετάδοση από

τον Α ενός πακέτου ελέγχου Request to Send, RTS (Αίτηση για Μετάδοση) που ζητάει από τον Β την άδεια να μεταδώσει;

- Να αρχίσει η διαδικασία μετάδοσης από τον παραλήπτη, με τη μετάδοση από τον Β ενός πακέτου ελέγχου Ready to Receive, RTR (Έτοιμότητα για Λήψη) που δηλώνει στον Α την διαθεσιμότητα του;
- Πώς θα ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα σύγκρουσης των πακέτων ελέγχου στον παραλήπτη; Πώς θα μειωθεί η περίοδος ανταγωνισμού;
- Πώς θα αποτραπεί η μετάδοση των κρυμμένων κόμβων;
- Πώς θα επιτραπεί η μετάδοση των εκτεθειμένων κόμβων;
- Θα χρησιμοποιηθεί ένα κανάλι ή περισσότερα για τη μετάδοση των πακέτων δεδομένων και των πακέτων ελέγχου;
- Αν ένας κόμβος δεν μπορεί να μεταδώσει ούτε να λάβει λόγω εξωτερικής παρεμβολής, θα εξεταστεί το ενδεχόμενο να πάψει η λειτουργία του κόμβου; Αν ναι, ποιο από τα δυο κανάλια θα πάψει να λειτουργεί, το κανάλι δεδομένων, το κανάλι ελέγχου ή και τα δύο και για πόσο χρόνο;
- Πως θα υπάρξει ενημέρωση ότι το κανάλι είναι ξανά ελεύθερο μετά από την ολοκλήρωση μιας μετάδοσης;

Ένα αποδοτικό MAC πρωτόκολλο για ασύρματα τοπικά δίκτυα, πρέπει να λάβει υπόψη του όλα τα προβλήματα που αναφέρθηκαν και να προσπαθήσει να τα λύσει με τον καλύτερο τρόπο. Η μη εξέταση των προβλημάτων αυτών, μπορεί να οδηγήσει σε λύσεις που μειώνουν τους παράγοντες αξιολόγησης της επίδοσης ενός τέτοιου συστήματος και επομένως, στην ανάπτυξη μη αποδοτικών ασυρμάτων δικτύων.

Οι παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά για την αξιολόγηση της επίδοσης ενός MAC πρωτοκόλλου είναι οι εξής:

- Μέση καθυστέρηση από άκρο σε άκρο (end to end delay): Ο μέσος χρόνος που χρειάζεται για τη μετάδοση ενός πακέτου από τον αποστολέα στον παραλήπτη.
- Ρυθμαπόδοση (throughput): Τα πακέτα που ελήφθησαν επιτυχώς χωρίς να υποστούν σύγκρουση.
- Χρήση του ασύρματου μέσου από τα πακέτα ελέγχου (control overhead).

- Διατήρηση ισχύος (power conservation).

Υπήρξαν έως τώρα πολλές προσεγγίσεις αλγορίθμων για την επίλυση των αναφερόμενων προβλημάτων και την ανάπτυξη αποδοτικών MAC πρωτοκόλλων για ασύρματα δίκτυα. Μπορούμε να χωρίσουμε τα πρωτόκολλα αυτά σε δυο κατηγορίες. Σε αυτά που χρησιμοποιούν το ίδιο κανάλι για τα πακέτα δεδομένων και τα πακέτα ελέγχου και σε αυτά που χρησιμοποιούν ξεχωριστό κανάλι για την κυκλοφορία δεδομένων και ξεχωριστό για την κυκλοφορία ελέγχου. Στην πρώτη κατηγορία ενδεικτικά αναφέρουμε τα Medium Access Protocol with Collision Avoidance (MACA) [Kar90], MACA By Invitation (MACA-BI) [TG97], Floor Acquisition Multiple Access (FAMA) [FGLA95]. Στη δεύτερη κατηγορία ενδεικτικά αναφέρουμε τα πρωτόκολλα Dual Busy Tone Multiple Access (DBTMA) [ZJH02], Power Aware Multi-Access protocol with Signaling (PAMAS) [SR99].

Αποτέλεσμα της μελέτης των παραπάνω πρωτοκόλλων από την ερευνητική κοινότητα της IEEE είναι η δημιουργία ενός προτύπου που φαίνεται να επικρατεί στην αγορά και να αποτελεί μια καθολική λύση στο σχεδιασμό και την υλοποίηση των ασυρμάτων δικτύων. Το πρωτόκολλο αυτό ονομάζεται IEEE 802.11 [IEE99a], εγκρίθηκε το 1997 και συνεχώς βελτιώνεται με σκοπό να παρέχει ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο για την ανάπτυξη ασυρμάτων τοπικών δικτύων.

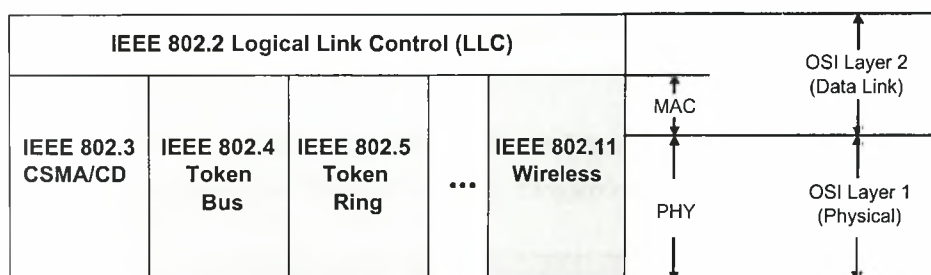
1.4 Το Πρότυπο IEEE 802.11

1.4.1 Εισαγωγή

Στην παράγραφο αυτή δίνουμε μια επισκόπηση του προτύπου IEEE 802.11 [IEE99a], [OP99], που εγκρίθηκε από την IEEE το 1997. Ειδικότερα, θα εστιάσουμε στο Επίπεδο Πολλαπλής Πρόσβασης (MAC) και θα δώσουμε μια συνοπτική περιγραφή όλων των χαρακτηριστικών γνωρισμάτων του. Αρχικά δίνεται μια περιγραφή της στοίβας πρωτοκόλλων του προτύπου, ακολουθούμενη από μια γενική περιγραφή της αρχιτεκτονικής του συστήματος.

1.4.2 Αρχιτεκτονική Πρωτοκόλλων του 802.11

Το 802.11 είναι ένα πρότυπο που καθορίζει τη λειτουργία του Φυσικού Επιπέδου (PHY) και του Επιπέδου Ελέγχου Πολλαπλής Πρόσβασης (MAC) ενός ασύρματου τοπικού δικτύου. Πάνω από αυτά τα επίπεδα, το πρότυπο υποθέτει την ύπαρξη του Επιπέδου Ελέγχου Λογικών Συνδέσεων (LLC), το οποίο καθορίζεται από το πρότυπο IEEE 802.2. Η αρχιτεκτονική των πρωτοκόλλων της οικογένειας IEEE 802 (συμπεριλαμβανομένου και του IEEE 802.11) φαίνεται στο σχήμα 1.7.



Σχήμα 1.7: Η αρχιτεκτονική πρωτοκόλλων της οικογένειας IEEE 802

Το Φυσικό Επίπεδο του IEEE 802.11 χρησιμοποιεί μια από τις παρακάτω τεχνολογίες:

- Frequency Hopping, FH
- Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS
- Υπέρυθρη Ακτινοβολία (Infrared Light, IR)

Πρόσφατα εγκρίθηκαν τρία ακόμα πρότυπα που καθορίζουν τη χρήση νέων τεχνολογιών για το Φυσικό Επίπεδο του IEEE 802.11, με σκοπό την αύξηση των

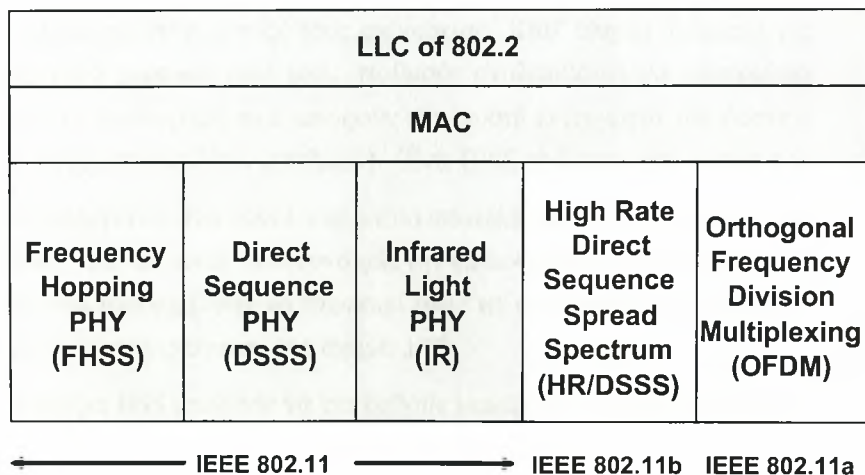
ταχυτήτων που προσφέρει το Φυσικό Επίπεδο στο Επίπεδο Πολλαπλής Πρόσβασης. Τα νέα πρότυπα είναι τα IEEE 802.11a [IEE00], 802.11b [IEE99b], 802.11g [IEE03a]. Τα εν λόγω πρότυπα χρησιμοποιούν το MAC πρωτόκολλο του IEEE 802.11 και διαφοροποιούν τον τρόπο λειτουργίας του Φυσικού Επιπέδου, ανάλογα με την τεχνολογία στην οποία στηρίζονται, τους ρυθμούς μετάδοσης που επιτυγχάνουν και την περιοχή συχνοτήτων στην οποία λειτουργούν. Συνοπτικά, οι επιλογές του προτύπου ως αναφορά τη λειτουργία του Φυσικού Επιπέδου φαίνονται στο σχήμα 1.8.

1.4.3 Αρχιτεκτονική του Συστήματος

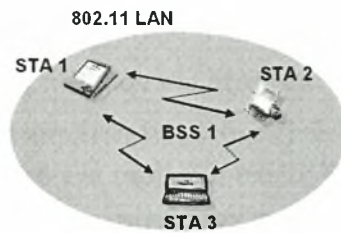
Ένα τυπικό σύστημα που ακολουθεί το πρότυπο IEEE 802.11, αποτελείται από τις ακόλουθες οντότητες:

- Ο σταθμός (Station, STA): Το αντικείμενο της επικοινωνίας, γενικά ένας κινητός σταθμός
- Σημείο Πρόσβασης (Access Point, AP) : Ο συντονιστής μιας ομάδας σταθμών
- Πύλη (Portal, PT): Ένας συγκεκριμένο AP που διασυνδέει ένα 802.11 ασύρματο δίκτυο με άλλα 802 τοπικά δίκτυα.

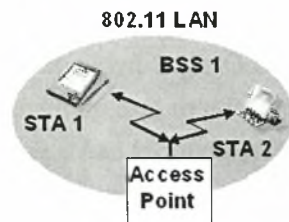
Ένα σύνολο από σταθμούς και ενδεχομένως και ένα Σημείο Πρόσβασης - AP, αποτελούν ένα Σύνολο Βασικής Υπηρεσίας (Basic Service Set, BSS) που είναι η



Σχήμα 1.8: Οι επιλογές Φυσικού Επιπέδου της οικογένειας IEEE 802.11



Σχήμα 1.9: Ένα Ανεξάρτητο Σύνολο Βασικής Υπηρεσίας (IBSS)



Σχήμα 1.10: Ένα Σύνολο Βασικής Υπηρεσίας με υποδομή (BSS)

βασική δομή ενός IEEE 802.11 τοπικού δικτύου. Μπορούμε να έχουμε δύο ειδών BSS. Το Ανεξάρτητο Σύνολο Βασικής Υπηρεσίας (Independent BSS, IBSS) και το BSS με υποδομή.

Το IBSS είναι ένα σύνολο από σταθμούς που συνδέονται μεταξύ τους απ' ευθείας. Η δημιουργία ενός τέτοιου συνόλου είναι δυναμική και δεν χρειάζεται την ύπαρξη κάποιας συγκεκριμένης υποδομής. Οι σταθμοί σε ένα τέτοιο δίκτυο είναι ισοδύναμοι και επικοινωνούνε μεταξύ τους απ'ευθείας. Κάθ' όλη τη διάρκεια της λειτουργίας ενός IBSS κάποιος από τους σταθμούς αναλαμβάνει να υλοποιήσει κάποιες οργανωτικές λειτουργίες που αφορούν την σωστή λειτουργία του δικτύου (π.χ. διαδικασία συγχρονισμού των σταθμών). Ένα IBSS φαίνεται στο σχήμα 1.9

Το BSS με υποδομή είναι ένα σύνολο το οποίο αποτελείται από ένα AP και από κάποιους σταθμούς. Το AP είναι υπεύθυνο για την επικοινωνία των σταθμών που ανήκουν στο BSS και αναλαμβάνει να υλοποιεί όλες τις οργανωτικές λειτουργίες του. Ένα BSS με υποδομή φαίνεται στο σχήμα 1.10

Δύο ή περισσότερα BSS μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους χρησιμοποιώντας κάποιο δίκτυο ραχοκοκαλιάς το οποίο στην ονοματολογία του 802.11 ονομάζεται Σύστημα Διανομής (Distribution System, DS). Το συνολικό διασυνδεδεμένο σύστημα αναγνωρίζεται σαν ένα ολοκληρωμένο ασύρματο τοπικό δίκτυο και ονομάζεται Εκτεταμένο Σύνολο Υπηρεσιών (Extended Service Set, ESS). Το ολοκληρωμένο σύστημα φαίνεται στο σχήμα 1.11.

1.4.4 Το Επίπεδο Ελέγχου Πολλαπλής Πρόσβασης (MAC)

Η γενική δομή ενός πλαισίου του MAC στο 802.11 φαίνεται στο σχήμα 1.12.

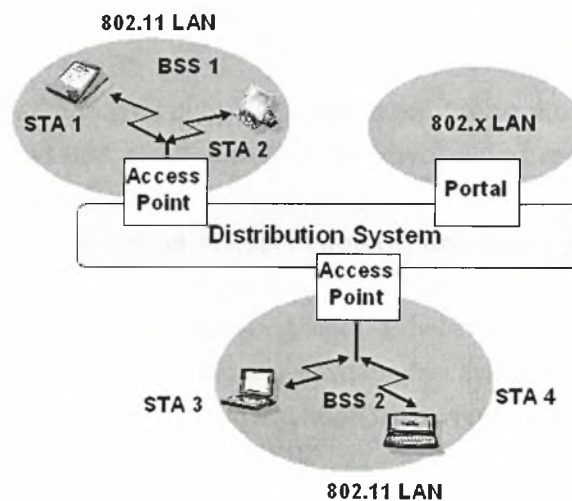
Ακολουθεί η περιγραφή των λειτουργιών του επιπέδου MAC με τη σειρά που αυτές καλούνται από ένα σταθμό ο οποίος θέλει να συμμετέχει σε ένα ασύρματο 802.11 δίκτυο. Από αυτήν την άποψη, η πρώτη διαδικασία που εκτελείται από ένα σταθμό είναι η Σύνδεση του σταθμού (Association) με ένα BSS.

Η Υπηρεσία Σύνδεσης (Association)

Αυτή η υπηρεσία ενεργοποιείται είτε μετά το άνοιγμα ενός σταθμού, είτε μετά την εισαγωγή του σε μια περιοχή BSS. Ο σταθμός στη φάση αυτή πρέπει να λάβει πληροφορίες συγχρονισμού από το AP (ή από κάποιο άλλο σταθμό, εάν βρίσκεται σε IBSS). Αυτό γίνεται μέσω της υπηρεσίας Σύνδεσης.

Καταρχήν ο σταθμός λαμβάνει αυτές τις πληροφορίες ανιχνεύοντας όλα τα κανάλια μέσω ενός από τα παρακάτω σχήματα, ανάλογα με την τιμή της παραμέτρου ScanMode:

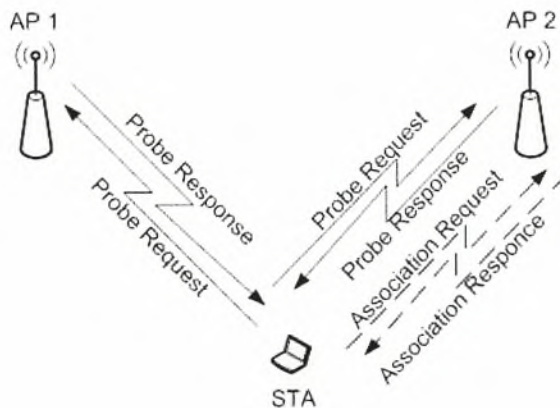
- **Παθητική Ανίχνευση:** Ο σταθμός ακούει τα διάφορα διαθέσιμα κανάλια, αναζητώντας πλαίσια Χαιρετισμού (Beacon frames) για να συλλέξει πληροφορίες συγχρονισμού και πληροφορίες που σχετίζονται με την ύπαρξη BSS στη γειτονιά του.
- **Ενεργή Ανίχνευση:** Ο σταθμός μεταδίδει πλαίσια Διερεύνησης (Probe frames) που περιέχουν την επιθυμητή ταυτότητα υπηρεσιών (Service Set ID, SSID) και



Σχήμα 1.11: Ένα Εκτεταμένο Σύνολο Υπηρεσιών (ESS)

Octets:2	2	6	6	6	2	6 or 0	0-2312	4
Frame Control	Duration/ ID	Addr 1	Addr 2	Addr 3	Sequence Control	Addr 4	Frame Body	FCS

Σχήμα 1.12: Η δομή πλαισίου στο MAC του 802.11



Σχήμα 1.13: Η διαδικασία διασύνδεσης με ενεργή ανίχνευση

περιμένει να λάβει ένα πλαίσιο Απάντησης Διερεύνησης (Probe Response frame) από τα BSS που βρίσκονται στην περιοχή. Τα πλαίσια Απάντησης Διερεύνησης στέλνονται είτε από το AP ενός BSS με υποδομή είτε από το σταθμό που έστειλε το τελευταίο πλαίσιο Χαιρετισμού σε ένα IBSS.

Γενικά, τα πλαίσια Χαιρετισμού καθώς και τα πλαίσια Διερεύνησης περιέχουν πληροφορίες που σχετίζονται με τις υπηρεσίες και τα χαρακτηριστικά του BSS, στο οποίο ανήκει το AP που τα μεταδίδει.

Ο σταθμός, έπειτα από την διαδικασία ανίχνευσης που περιγράψαμε και αφού έχει ενημερωθεί για τα γειτονικά BSS, επιλέγει το BSS που ικανοποιεί τις ανάγκες του. Αμέσως μετά, στέλνει ένα πλαίσιο Αιτήματος Σύνδεσης (Association Request frame) στο BSS που έχει επιλέξει και περιμένει την αντίστοιχη απάντηση. Το AP του του BSS απαντά στο σταθμό στέλνοντάς του ένα πακέτο ελέγχου που ονομάζεται πλαίσιο Απάντησης Σύνδεσης (Association Response frame). Εάν δεν υπάρχει BSS που ικανοποιεί τα αιτήματά ενός σταθμού, αυτός μπορεί να αρχίσει ένα IBSS με τα δικά του χαρακτηριστικά. Στο σχήμα 1.13 φαίνεται ένα παράδειγμα της διαδικασίας Σύνδεσης ενός σταθμού.

Ένας σταθμός μπορεί να ενεργοποιήσει δυο ακόμη ανάλογες υπηρεσίες, την Επανασύνδεση (Reassociation) και την Αποσύνδεση (Disassociation). Η Επανασύνδεση ενεργοποιείται όταν ο σταθμός κινείται από ένα BSS σε ένα άλλο ή όταν

ο σταθμός θέλει να αλλάξει συνθήκες λειτουργίας στο ίδιο BSS. Η διαδικασία της Αποσύνδεσης ενεργοποιείται όταν ο σταθμός θέλει να βγει εκτός λειτουργίας.

Η Υπηρεσία Πιστοποίησης (Authentication)

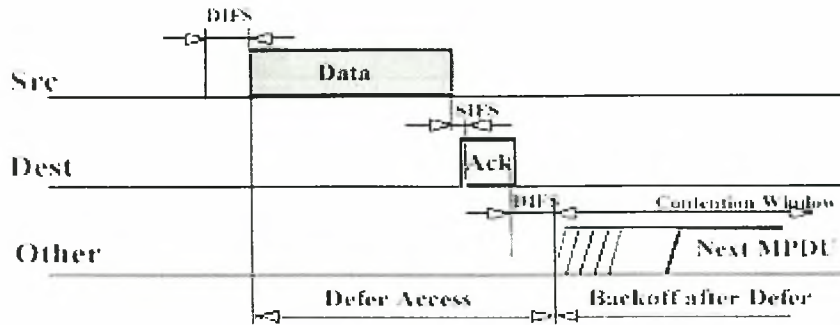
Το 802.11 προσφέρει την δυνατότητα του ελέγχου της πρόσβασης στο ασύρματο τοπικό δίκτυο μέσω της υπηρεσίας της Πιστοποίησης. Η υπηρεσία αυτή ενεργοποιείται από ένα σταθμό με σκοπό να ανταλλάξει στοιχεία ταυτοποίησης με έναν άλλο σταθμό ή με ένα AP, ώστε να γίνει μέλος ενός IBSS ή ενός BSS αντίστοιχα.

Υπάρχουν δύο τεχνικές Πιστοποίησης:

- **Πιστοποίηση Ανοιχτού Συστήματος (Open System):** Αυτή είναι η προεπιλεγμένη τεχνική. Ο σταθμός που έχει ενεργοποιήσει την διαδικασία Πιστοποίησης μεταδίδει ένα πλαίσιο το οποίο ακολουθείται από ένα πλαίσιο απάντησης από τον αντίστοιχο σταθμό ή AP. Το τελευταίο αποτελεί το αποτέλεσμα της Πιστοποίησης. Εάν το αποτέλεσμα είναι επιτυχές, οι σταθμοί είναι αμοιβαία πιστοποιημένοι.
- **Πιστοποίηση Διαμοιραζόμενου Κλειδιού (Shared key):** Είναι η πιο ασφαλής τεχνική. Υλοποιείται με την ανταλλαγή μιας σειράς πλαισίων χρησιμοποιώντας πληροφορίες από ένα μυστικό κλειδί. Εάν οι δυο σταθμοί διαπιστώσουν ότι διαθέτουν το ίδιο μυστικό κλειδί τότε πιστοποιούνται αμοιβαία. Η Πιστοποίηση Διαμοιραζόμενου Κλειδιού απαιτεί τη χρήση ενός μηχανισμού που ονομάζεται WEP (Wired Equivalent Privacy). Ο μηχανισμός WEP χρησιμοποιείται από τους σταθμούς, προκειμένου να υπάρξει εμπιστευτική ανταλλαγή πληροφοριών. Χρησιμοποιεί ένα μυστικό κλειδί 40 δυαδικών ψηφίων και κρυπτογραφεί μόνο το ωφέλιμο κομμάτι των πλαισίων δεδομένων.

Η Βασική Μέθοδος Πρόσβασης DCF

Η βασική μέθοδος πρόσβασης που χρησιμοποιείται στο IEEE 802.11 ονομάζεται Λειτουργία Κατανομημένου Συντονισμού (Distributed Coordination Function, DCF). Η Μέθοδος αυτή στηρίζεται στο πρωτόκολλο Πολλαπλής Πρόσβασης με Ανίχνευση Φέροντος και Αποφυγή Σύγκρουσης (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance, CSMA/CA). Σύμφωνα με το πρωτόκολλο αυτό ένας σταθμός που προτίθεται να μεταδώσει, ανιχνεύει το ασύρματο μέσο. Αν το μέσο είναι κατειλημμένο, ο σταθμός αναβάλλει τη μετάδοσή του και εκτελεί έναν αλγόριθμο Υποχώρησης (Back-off algorithm) τον οποίο θα περιγράψουμε στη συνέχεια. Αν το μέσο είναι ελεύθερο για έναν προκαθορισμένο χρόνο που ονομάζεται Κατανομημένο Ενδιάμεσο Διάστημα (Distributed Inter Frame Space, DIFS), ο σταθμός



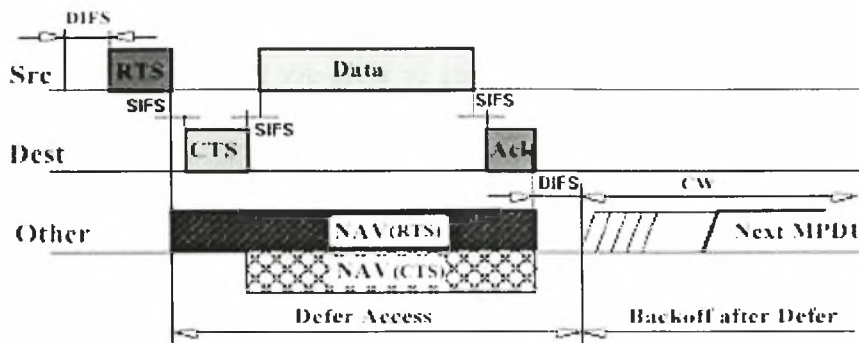
Σχήμα 1.14: Η διαδικασία CSMA + Ack

μεταδίδει το πακέτο δεδομένων του (Data). Ο παραλήπτης, λαμβάνοντας το πακέτο από τον αποστολέα στέλνει ένα πακέτο Επιβεβαίωσης (Acknowledgment) για να επιβεβαιώσει τη σωστή λήψη του πακέτου. Ο αποστολέας, για λόγους αποφυγής συγχρονισμού με άλλους σταθμούς, μετά τη σωστή λήψη του Ack εκτελεί τον αλγόριθμο υποχώρησης, πριν επιχειρήσει τη μετάδοση νέου πακέτου. Η διαδικασία φαίνεται στο σχήμα 1.14.

Λόγω του ότι η φύση του ασύρματου μέσου είναι πολύ διαφορετική από αυτή του ενσύρματου, ένα αποτελεσματικό MAC πρωτόκολλο για ασύρματα δίκτυα καλείται να αντιμετωπίσει τα εξής προβλήματα που εμφανίζονται στο περιβάλλον αυτό:

- Αναποτελεσματικότητα της Ανίχνευσης Σύγκρουσης (Collision Detection)
- Αύξηση της πιθανότητας συγκρούσεων
- Πρόβλημα του κρυμμένου κόμβου

Το IEEE 802.11 αντιμετωπίζει τα παραπάνω προβλήματα χρησιμοποιώντας την Αποφυγή Σφάλματος (Collision Avoidance). Η μέθοδος αυτή υλοποιείται με την χρήση ενός σχήματος που ονομάζεται Εικονική Ανίχνευση Καναλιού (Virtual Carrier Sense). Σύμφωνα με το σχήμα αυτό, ένας σταθμός που προτίθεται να στείλει ένα πακέτο δεδομένων ανιχνεύει το ασύρματο μέσο. Αν το μέσο είναι κατειλημμένο, ο σταθμός αναβάλλει τη μετάδοσή του και εκτελεί τον αλγόριθμο υποχώρησης. Αν το μέσο είναι ελεύθερο για χρόνο μεγαλύτερο από DIFS, ο σταθμός μεταδίδει ένα πακέτο ελέγχου που ονομάζεται Πακέτο Αίτησης για Μετάδοση (Request to Send, RTS). Εάν δεν υπάρξει σύγκρουση στη μετάδοση και ο παραλήπτης λάβει κανονικά το πακέτο, απαντάει με ένα πακέτο που ονομάζεται Πακέτο Καθαρού Μέσου για Μετάδοση (Clear to Send, CLS) δηλώνοντας στον αποστολέα ότι μπορεί



Σχήμα 1.15: Η συνολική διαδικασία μετάδοσης στο 802.11

να προχωρήσει με την μετάδοση του πακέτου δεδομένων. Ο αποστολέας λαμβάνοντας το CTS μεταδίδει το πακέτο δεδομένων το οποίο ακολουθείται από το πακέτο Ack σε περίπτωση επιτυχημένης λήψης. Η διαδικασία αποστολής αυτών των τεσσάρων πακέτων για την επιτυχή μετάδοση ενός πακέτου δεδομένων ονομάζεται Χειραψία Τεσσάρων Πακέτων (Four Way Handshake).

Στην επικεφαλίδα των πακέτων RTS, CTS καθώς και του πακέτου δεδομένων, περιλαμβάνεται η υπολειπόμενη διάρκεια της εξελισσόμενης χειραψίας τεσσάρων πακέτων. Οι γείτονες σταθμοί του αποστολέα και του παραλήπτη, ακούγοντας κάποιο από τα πακέτα αυτά, αναβάλλουν την μετάδοσή τους για όσο χρονικό διάστημα πρόκειται να κρατήσει η εξελισσόμενη μετάδοση. Αυτό επιτυγχάνεται με την ενεργοποίηση ενός μετρητή που ονομάζεται Διάνυσμα Δέσμευσης του Δικτύου (Network Allocation Vector, NAV) για διάστημα ίσο με το χρόνο που υποδεικνύεται στο λαμβανόμενο πακέτο. Με τον τρόπο αυτό, το ζεύγος των σταθμών που επικοινωνούν, δεσμεύουν το κανάλι καθ' όλη τη διάρκεια της επικοινωνίας τους. Ο συνολικός μηχανισμός φαίνεται στο σχήμα 1.15.

Η αποτελεσματικότητα του σχήματος RTS-CTS έγκειται στο γεγονός ότι τα πακέτα αυτά είναι συνήθως πολύ μικρότερα από ένα πακέτο δεδομένων. Έτσι μια ενδεχόμενη σύγκρουση στα πακέτα αυτά έχει μικρότερο κόστος στην άσκοπη χρήση του μέσου λόγω της μετάδοσης του κατεστραμμένου πακέτου. Παρόλα αυτά, δίνεται η δυνατότητα στον διαχειριστή του δικτύου να απενεργοποιήσει το μηχανισμό RTS-CTS σε περίπτωση που τα πακέτα δεδομένων είναι αρκετά μικρά. Αυτό γίνεται με τη χρήση μιας παραμέτρου που ονομάζεται κατώφλι χρήσης RTS (RTS Threshold). Εάν το πακέτο δεδομένων είναι μεγαλύτερο του κατωφλίου μεταδίδεται RTS, αλλιώς όχι.

Στο προηγούμενο σχήμα, εκτός του DIFS παρατηρούμε τη χρήση ενός ακόμη ενδιάμεσου διαστήματος που ονομάζεται Μικρό Ενδιάμεσο Διάστημα (Small Inter

Frame, SIFS). Αυτό είναι το μικρότερο διάστημα μεταξύ διαδοχικών πακέτων που χρησιμοποιείται στο 802.11. Σκοπός του είναι να χωρίζει τη μετάδοση πακέτων που ανήκουν στον ίδιο διάλογο (π.χ. RTS-CTS ή Data-Ack). Η τιμή του διαστήματος αυτού είναι σταθερή και ισούται με το χρόνο που χρειάζεται ένας σταθμός που μεταδίδει να μεταβεί από κατάσταση μετάδοσης σε κατάσταση λήψης και να αποκωδικοποιήσει το λαμβανόμενο πακέτο.

Ο Αλγόριθμος Υποχώρησης (Back-off)

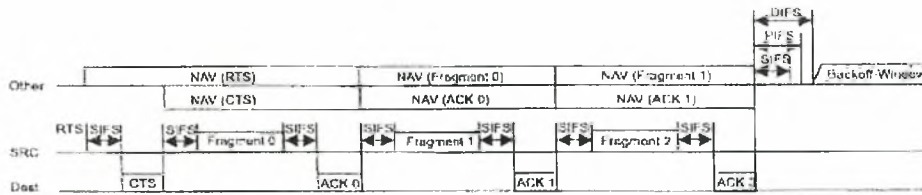
Το 802.11 χρησιμοποιεί έναν εκθετικό αλγόριθμο υποχώρησης (back-off) ο οποίος ενεργοποιείται κάθε φορά που μια από τις παρακάτω συνθήκες ισχύει:

- Όταν ένας σταθμός ανιχνεύει το μέσο και το βρίσκει κατειλημμένο
- Όταν για κάποιο λόγο διακόπτεται η ανταλλαγή των πακέτων της χειραψίας
- Έπειτα από κάθε μετάδοση
- Έπειτα από κάθε επαναμετάδοση

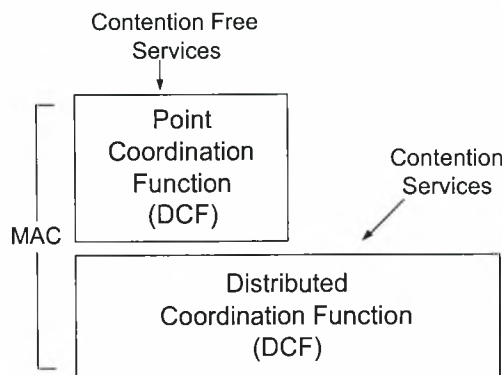
Ο κάθε σταθμός διατηρεί έναν μετρητή που ονομάζεται Παράθυρο Ανταγωνισμού (Contention Window, CW). Η τιμή του CW κυμαίνεται στο διάστημα [7, 255] με αρχική τιμή το 7. Όταν ο σταθμός εκτελεί τον αλγόριθμο, δημιουργεί έναν τυχαίο αριθμό (n) στο διάστημα από [0, CW). Έπειτα, αναβάλλει τη μετάδοση του για διάρκεια ίση με n χρονοθυρίδες (slots). Κάθε φορά που ο σταθμός εκτελεί τον αλγόριθμο, διπλασιάζει το CW. Όταν συμβεί επιτυχής μετάδοση ενός πακέτου (επιτυχής ανταλλαγή των πακέτων της χειραψίας) το CW επανέρχεται στην αρχική του τιμή. Με τη χρήση του αλγορίθμου απόσυρσης αποφεύγεται η σύγκρουση λόγω ανταγωνισμού μεταξύ σταθμών που έχουν αναβάλλει τη μετάδοσή τους λόγω του ίδιου γεγονότος.

Κατακερματισμός

Ο κατακερματισμός (Fragmentation) είναι μια τεχνική που έχει σκοπό την μείωση της άσκοπης χρήσης του μέσου (overhead) λόγω επαναμεταδόσεων που οφείλονται στον υψηλό ρυθμό λάθους (Bit Error Rate, BER) που συναντάμε στο ασύρματα μέσο. Κατά την τεχνική αυτή, το πακέτο δεδομένων διαιρείται σε κομμάτια και μεταδίδεται κομμάτι-κομμάτι. Η επιτυχημένη μετάδοση κάθε κομματιού, επιβεβαιώνεται από ένα Ack πακέτο. Σε περίπτωση που ο αποστολέας αντιληφθεί ότι κάποιο από τα κομμάτια δεν παραλήφθηκε σωστά (μη λαμβάνοντας για αυτό Ack), επαναμεταδίδει το συγκεκριμένο κομμάτι και όχι ολόκληρο το πακέτο από την αρχή. Η διαδικασία του κατακερματισμού φαίνεται στο σχήμα 1.16.



Σχήμα 1.16: Η διαδικασία κατακερματισμού

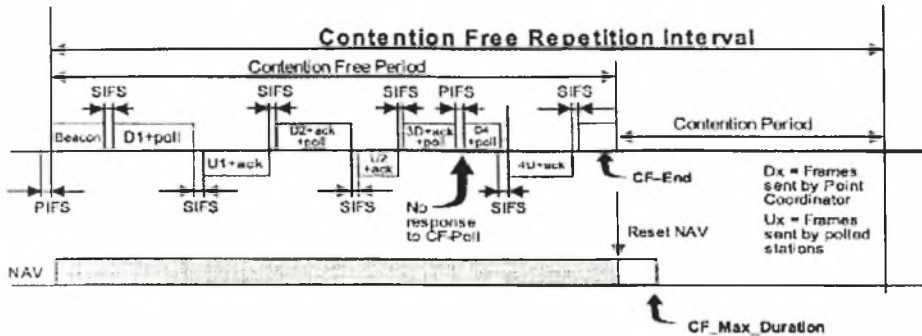


Σχήμα 1.17: Η ιεραρχία των μεθόδων πρόσβασης στο 802.11

Η Μέθοδος Πρόσβασης PCF

Το 802.11 διαθέτει μια επιπλέον μέθοδο πρόσβασης που ονομάζεται Λειτουργία Κεντροκοιμημένου Συντονισμού (Point Coordination Function PCF). Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται σε ασύρματα δίκτυα με υποδομή, όπου το AP συμμετέχει στη διαδικασία ελέγχου του κελιού. Η PCF υλοποιείται βασισμένη στην λειτουργία της DCF, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.17. Σκοπός της είναι να υποστηρίξει υπηρεσίες που απαιτούν χρονικές εγγυήσεις στη μετάδοση των πακέτων.

Κατά τη λειτουργία αυτή, το AP διαθέτει μεγαλύτερη προτεραιότητα έναντι των άλλων σταθμών του κελιού (cell). Η προτεραιότητα αυτή επιτυγχάνεται λόγω του γεγονότος ότι το AP πρέπει να περιμένει για χρονικό διάστημα ίσο με μια νέα παράμετρο που λέγεται Κεντροκοιμημένο Ενδιάμεσο Διάστημα (Point Inter Frame Space, PIFS) το οποίο είναι μικρότερο του DIFS. Έτσι το AP καταφέρνει και λαμβάνει τον έλεγχο του μέσου νωρίτερα από τους άλλους σταθμούς. Κάθε φορά που αυτό συμβαίνει, το AP ενημερώνει τους υπόλοιπους σταθμούς για την ανάληψη από αυτό του ελέγχου του μέσου. Οι άλλοι σταθμοί σέβονται τους κανόνες που το AP ορίζει, θέτοντας το NAV τους ενεργό καθ'όλη τη διάρκεια της PCF. Αυτό σημαίνει ότι οι σταθμοί αναβάλλουν τη μετάδοσή τους για όσο χρόνο το μέσο



Σχήμα 1.18: Η μέθοδος πρόσβασης PCF

ελέγχεται από το AP.

Κατά τη διάρκεια της PCF το AP καλεί τους σταθμούς του κελιού του, τον έναν μετά τον άλλο να μεταδώσουν ένα πακέτο τους, στέλνοντας τους ένα πακέτο ελέγχου που ονομάζεται Poll. Κάθε σταθμός που λαμβάνει ένα Poll απαντά με ένα πακέτο δεδομένων στο AP και ξανασωπαίνει. Το AP μπορεί, σε συνδυασμό με το πακέτο Poll, να στείλει και δεδομένα στο σταθμό που καλεί καθώς και επιβεβαίωση λήψης (Ack) στον προηγούμενο σταθμό. Από την πλευρά του ο σταθμός μπορεί με το μεταδιδόμενο πακέτο δεδομένων, να στείλει και επιβεβαίωση (Ack) λήψης για το πακέτο δεδομένων που έλαβε από το AP. Η συνολική λειτουργία της PCF φαίνεται στο σχήμα 1.18. Όπως φαίνεται στο σχήμα αυτό, η περίοδος κατά την οποία είναι ενεργή η PCF ονομάζεται Περίοδος Χωρίς Ανταγωνισμό (Contention Free Period, CFP), ενώ η περίοδος κατά την οποία η DCF είναι ενεργή ονομάζεται Περίοδος Ανταγωνισμού (Contention Period, CP).

Για να επιτευχθεί ο συγχρονισμός των σταθμών ενός κελιού καθώς και η ενημέρωσή τους με άλλες πληροφορίες ελέγχου, το AP μεταδίδει ανά τακτά χρονικά διαστήματα ένα πακέτο ελέγχου που ονομάζεται πλαίσιο Χαιρετισμού (Beacon). Το πλαίσιο αυτό περιέχει πληροφορίες συγχρονισμού, υποστηριζόμενων υπηρεσιών, υποστηριζόμενων ρυθμών μετάδοσης κ.α.

Συγχρονισμός

Όπως αναφέραμε, κάθε AP μεταδίδει ένα πλαίσιο Χαιρετισμού (Beacon) ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Ένα από τα πεδία του πλαισίου αυτού είναι ο χρονικός προσδιορισμός (time stamp) ο οποίος επιτρέπει στους σταθμούς του κελιού να συντονιστούν σε ένα κοινό ρολόι. Η μετάδοση του πλαισίου Χαιρετισμού μπορεί να αναβληθεί μόνο εάν την προκαθορισμένη χρονική στιγμή μετάδοσής του υπάρχει κάποια εξελισσόμενη μετάδοση από άλλο σταθμό.

Στη λειτουργία DCF το πλαίσιο Χαιρετισμού μπορεί να μεταδοθεί από οποιονδήποτε σταθμό. Μετά από κάθε ενδιάμεση περίοδο μεταξύ πλαισίων Χαιρετισμού (Beacon Interval), κάθε σταθμός ανταγωνίζεται να μεταδώσει το πλαίσιο Χαιρετισμού, ακολουθώντας τη διαδικασία του αλγορίθμου υποχώρησης. Ο πρώτος από τους σταθμούς που καταφέρνει να πάρει τον έλεγχο του καναλιού μεταδίδει το πλαίσιο Χαιρετισμού, ενώ οι άλλοι ακυρώνουν τη μετάδοσή τους και συντονίζονται τα ρολόγια τους με το χρόνο που περιέχει το πλαίσιο Χαιρετισμού που μόλις μεταδόθηκε.

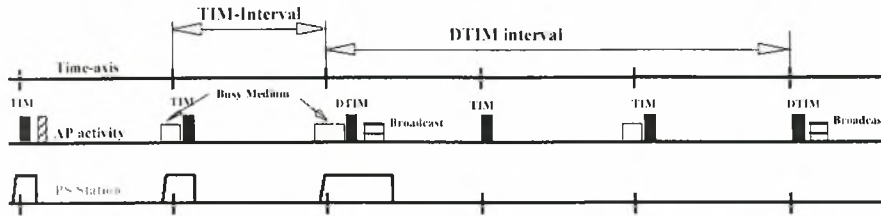
Κινητικότητα

Ένας σταθμός μπορεί να αλλάξει το BSS στο οποίο είναι συνδεδεμένος, χρησιμοποιώντας την ενεργητική ή την παθητική ανίχνευση (Active - Passive Scanning) και την διαδικασία της Επανασύνδεσης (Reassociation Procedure). Συγκεκριμένα, ενώ ο σταθμός είναι συνδεδεμένος με ένα BSS, μπορεί να αποφασίσει ότι η ποιότητα σύνδεσης είναι κακή και έτσι να ανιχνεύσει το κανάλι για να αναζητήσει μια πιο αξιόπιστη σύνδεση. Εάν η αναζήτηση είναι θετική, μπορεί να αποφασίσει να χρησιμοποιήσει τη διαδικασία της Επανασύνδεσης (Reassociation) για να αιτηθεί σύνδεση στο νέο AP. Εάν η απάντηση στο αίτημα της επανασύνδεσης είναι επιτυχής, ο σταθμός συνδέεται στο νέο AP, το οποίο είναι επιφορτισμένο με το ρόλο να ενημερώσει το DS για την νέα σύνδεση. Έτσι, το παλιό AP ειδοποιείται μέσω του DS για την αποσύνδεση του σταθμού και την επανασύνδεση του με το νέο AP. Διαφορετικά, εάν το αίτημα της επανασύνδεσης αποτύχει, ο σταθμός ψάχνει για νέο BSS.

Εξοικονόμηση Ενέργειας

Ένας σταθμός που ανήκει σε ένα IEEE 802.11 δίκτυο βρίσκεται σε μια από τις δυο ακόλουθες καταστάσεις ως αναφορά την κατανάλωση ενέργειας:

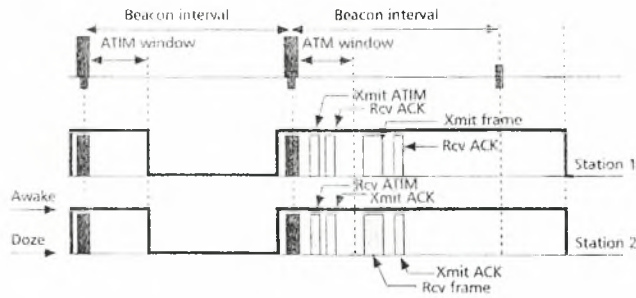
- **Κατάσταση Εξοικονόμησης Ενέργειας (Power Saving Mode, PS):** Στην κατάσταση αυτή ο σταθμός απενεργοποιεί (switch off) τη λειτουργία των συστημάτων του που σχετίζονται με την μετάδοση και τη λήψη. Ο σταθμός δεν έχει τη δυνατότητα ούτε να μεταδώσει ούτε να λάβει πακέτα. Στην κατάσταση αυτή ο σταθμός καταναλώνει τη λιγότερη δυνατή ενέργεια.
- **Κατάσταση Αφύπνισης (Awake Mode):** Στην κατάσταση αυτή όλα τα συστήματα του σταθμού είναι ενεργά. Ο σταθμός μπορεί και να μεταδώσει και να λάβει πακέτα.



Σχήμα 1.19: Η μέθοδος εξοικονόμησης ενέργειας σε ένα δίκτυο με υποδομή

Ο μηχανισμός Εξοικονόμησης Ενέργειας (Power Saving, PS) στο IEEE 802.11 βασίζεται σε μια λειτουργία που ονομάζεται Λειτουργία Συγχρονισμού (Time Synchronization Function, TSF). Στην TSF, σε ένα δίκτυο υποδομής που χρησιμοποιεί την PCF, το AP είναι η καρδιά του συστήματος. Εάν ένας σταθμός θέλει να μεταβεί σε κατάσταση εξοικονόμησης ενέργειας, ενημερώνει το AP μέσω ενός πακέτου ελέγχου. Σε αυτήν την περίπτωση το AP θα αποθηκεύει τα πλαίσια που προορίζονται για το σταθμό αυτό ο οποίος βρίσκεται τώρα σε κατάσταση Εξοικονόμησης Ενέργειας (Power Saving, PS). Έπειτα, κατά τη διάρκεια της μετάδοσης του πλαισίου Χαιρετισμού (Beacon), το AP μεταδίδει προς όλες τις κατευθύνσεις έναν Χάρτη Ένδειξης Κυκλοφορίας (Traffic Indication Map, TIM) που περιέχει μια περιγραφή των σταθμών για τους οποίους υπάρχουν αποθηκευμένα πακέτα στο AP. Κάθε σταθμός που βρίσκεται σε κατάσταση εξοικονόμησης ενέργειας, ξυπνάει ανά τακτά χρονικά διαστήματα, με σκοπό να λάβει το πλαίσιο Χαιρετισμού (Beacon) του AP. Εάν λαμβάνοντας το πακέτο αυτό διαπιστώνει ότι υπάρχουν αποθηκευμένα πλαίσια για αυτόν, ζητάει τη μετάδοση των πακέτων αυτών από το AP με ένα πακέτο ελέγχου που ονομάζεται PS-Poll και παραμένει ξύπνιος για να παραλάβει τα πακέτα αυτά. Εάν δεν υπάρχουν αποθηκευμένα πακέτα για το σταθμό, αυτός επανέρχεται σε κατάσταση εξοικονόμησης ενέργειας. Αυτή η λειτουργία λαμβάνει χώρα όταν τα πακέτα που είναι αποθηκευμένα στο AP έχουν παραλήπτη ένα μοναδικό σταθμό (unicast).

Όταν τα πακέτα έχουν ως παραλήπτες περισσότερους από έναν (multicast) ή όλους τους σταθμούς του κελιού (broadcast), η διαδικασία είναι διαφορετική. Υπάρχει μια χρονική περίοδος που ονομάζεται Delivery TIM η οποία είναι πολλαπλάσια της TIM περιόδου και στο τέλος της οποίας το AP μεταδίδει όλα τα multicast ή broadcast πακέτα του. Όλοι οι σταθμοί ξυπνάνε στο τέλος των περιόδων αυτών για να λάβουν τα multicast ή broadcast πακέτα που τους αντιστοιχούμε. Ο μηχανισμός της Εξοικονόμησης Ενέργειας σε ένα ασύρματο δίκτυο με υποδομή φαίνεται στο σχήμα 1.19



Σχήμα 1.20: Η μέθοδος εξοικονόμησης ενέργειας σε ένα αδόμενο δίκτυο

Η διαδικασία εξοικονόμησης ενέργειας (Power Saving, PS) στα αδόμετα δίκτυα στηρίζεται στην ίδια φιλοσοφία με την διαδικασία των δικτύων με υποδομή. Στην περίπτωση αυτή υπάρχει ένα νέο πακέτο ελέγχου που ονομάζεται ATIM και μεταδίδεται από έναν σταθμό ο οποίος έχει αποθηκευμένα πακέτα για κάποιον άλλο σταθμό. Η ενδιαμέση περίοδος μεταξύ των πλαισίων Χαιρετισμού (Beacon Interval) αρχίζει με ένα χρονικό διάστημα που ονομάζεται παράθυρο ATIM. Κατά τη διάρκεια του χρονικού αυτού διαστήματος, όλοι οι σταθμοί παραμένουν σε κατάσταση αφύπνισης, για να παραλάβουν ενδεχόμενα ATIM πακέτα. Αντίστοιχα, οι σταθμοί που έχουν αποθηκευμένα πακέτα δεδομένων για κάποιους άλλους σταθμούς, στέλνουν κατά τη διάρκεια αυτού του διαστήματος τα αντίστοιχα ATIM πακέτα. Οι σταθμοί που λαμβάνουν ένα ATIM πακέτο παραμένουν ξύπνιοι ώστε να λάβουν τα πακέτα δεδομένων που αναμένουν να μεταδοθούν, ενώ οι σταθμοί που δεν έλαβαν ATIM πακέτο, επανέρχονται στην κατάσταση εξοικονόμησης ενέργειας. Η διαδικασία εξοικονόμησης ενέργειας στα αδόμετα δίκτυα φαίνεται στο σχήμα 1.20

1.5 Το Πρότυπο IEEE 802.11e

1.5.1 Εισαγωγή

Η ραγδαία αύξηση των ταχυτήτων των ασύρματων συνδέσεων - ενδεικτικά αναφέρουμε το 802.11a που παρέχει ρυθμούς μετάδοσης μέχρι και 54 Mbps [IEE00] - καθώς επίσης και η ευρεία διάδοση των ασυρμάτων τοπικών δικτύων, δημιουργούν μια αυξανόμενη ανάγκη για παροχή ποιότητας υπηρεσιών (QoS) σε αυτά τα συστήματα. Οι παραδοσιακές υπηρεσίες καλύτερης προσπάθειας (best effort) στα ασύρματα δίκτυα δεν επαρκούν πλέον. Ως εκ τούτου, πρέπει να αντικατασταθούν με πιο περίπλοκες υπηρεσίες που παρέχουν εγγυήσεις σε ένα ευρύ φάσμα χαρακτηριστικών της ποιότητας υπηρεσίας, όπως το εύρος ζώνης, η καθυστέρηση, η απόκλιση (jitter) και ο χρόνος παράδοσης πακέτων. Τα διαφορετικά είδη πληροφοριών όπως η φωνή, τα δεδομένα, η εικόνα και το βίντεο έχουν διαφορετικές απαιτήσεις ως αναφορά τα χαρακτηριστικά αυτά. Τα ασύρματα δίκτυα πρέπει να υποστηρίζουν υπηρεσίες που χειρίζονται αυτές τις μορφές πληροφορίας, με τις διαφορετικές απαιτήσεις και τις διαφορετικές προτεραιότητες, δίνοντας εγγυήσεις για την ποιότητα της υπηρεσίας, ενώ παράλληλα πρέπει να λύνουν τα ζητήματα δικαιοσύνης που προκύπτουν μεταξύ των ασύρματων χρηστών.

Το 802.11 [IEE99a] είναι το δημοφιλέστερο πρότυπο τοπικών ασυρμάτων δικτύων. Σκοπός του είναι να καθορίζει τη λειτουργία του φυσικού επιπέδου (PHY) καθώς επίσης και του επιπέδου πολλαπλής πρόσβασης (MAC) για τα δίκτυα αυτά. Το MAC πρωτόκολλο του 802.11 παρέχει όπως αναφέραμε παραπάνω δύο τρόπους πρόσβασης στο μέσο: Την Λειτουργία Κατανεμημένου Συντονισμού (Distributed Coordination Function, DCF) και τη Λειτουργία Κεντροικοποιημένου Συντονισμού (Point Coordination Function PCF). Η DCF είναι η θεμελιώδης μέθοδος που καθορίζει την πρόσβαση στα αδόμητα δίκτυα καθώς επίσης και την πρόσβαση κατά τη διάρκεια της περιόδου ανταγωνισμού (Contention Period, CP) των δικτύων υποδομής (όπου δηλαδή συμμετέχει και ένα AP). Η PCF είναι η μέθοδος προσπέλασης που χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια της Περιόδου Χωρίς Ανταγωνισμό (Contention Free Period, CFP) ενός δικτύου υποδομής και παρέχει μια κάποια έννοια ποιότητας υπηρεσιών (QoS) στους ασύρματους σταθμούς, δίνοντας την ευκαιρία στο AP να τους καλέσει να μεταδώσουν διαδοχικά, τον ένα μετά τον άλλο.

Είναι γνωστό ότι το 802.11 αντιμετωπίζει ορισμένα βασικά μειονεκτήματα ως αναφορά την υποστήριξη του QoS:

- Στο βασικό μηχανισμό πρόσβασης DCF, το MAC πρωτόκολλο του 802.11 αδυνατεί να παράσχει οποιαδήποτε μορφή δικαιοσύνης στους σταθμούς. Δεν παρέχεται ούτε βραχυπρόθεσμη ούτε μακροπρόθεσμη δικαιοσύνη ως ανα-

φορά είτε συνδέσεις του ίδιου σταθμού είτε σταθμούς του ίδιου BSS.

- Τα πακέτα που μεταδίδονται και λαμβάνονται από έναν σταθμό ανήκουν σε μια από τις δύο βασικές κατηγορίες: "Με Ανταγωνισμό" (Contention) ή "Χωρίς Ανταγωνισμό" (Contention Free). Δεν υπάρχει κανένας άλλος μηχανισμός που να παρέχει πληροφορίες για την ποιότητα υπηρεσίας των πακέτων και την προτεραιότητά τους στο δίκτυο.
- Η PCF είναι μια αρκετά στατική διαδικασία για την παροχή ποιότητας υπηρεσίας με αποδοτικό τρόπο. Κάθε σταθμός μπορεί να μεταδώσει μόνο ένα πακέτο ανά Περίοδο Χωρίς Ανταγωνισμό (CFP), μετά από το κάλεσμά του (Polling) από το AP.
- Ένας σταθμός δεν μπορεί να διαχειριστεί αποτελεσματικά διαφορετικές συνδέσεις (και επομένως διαφορετικές ανάγκες QoS), δεδομένου ότι η PCF δεν μπορεί να χειριστεί με διαφορετικό τρόπο τα διαφορετικά πακέτα του ίδιου σταθμού.
- Η PCF μπορεί να εγγυηθεί τη μετάδοση ενός πακέτου ανά περίοδο super-frame (CFP + CP). Εάν μια υπηρεσία είναι ευαίσθητη στο χρόνο και χρειάζεται συχνότερη μετάδοση πακέτων, το υπάρχον πλαίσιο δεν μπορεί να την υποστηρίξει.

Για την αντιμετώπιση των παραπάνω προβλημάτων θεσπίστηκε η ομάδα εργασίας 802.11e (Task Group e, TGe). Η ομάδα αυτή έχει ως σκοπό να ενισχύσει το τρέχον 802.11 MAC πρωτόκολλο ώστε αυτό να υποστηρίζει αποτελεσματικά εφαρμογές με QoS απαιτήσεις [IEE02]. Το TGe έχει προσθέσει διάφορες νέες λειτουργίες στο MAC του 802.11 προκειμένου να επιτραπεί η υποστήριξη διαφορετικών απαιτήσεων από διαφορετικές κατηγορίες κυκλοφορίας [MCM⁺02].

Η παροχή ποιότητας υπηρεσίας είναι χαρακτηριστικό της οντότητας του χρονοπρογραμματιστή [BBKT96, AP02, LBS99], ο οποίος βρίσκεται στο σημείο πρόσβασης (AP) ενός δικτύου υποδομής. Η ευθύνη του χρονοπρογραμματιστή είναι η διαχείριση της πρόσβασης των χρηστών στους πόρους του δικτύου, καθώς επίσης και η εγγύηση δίκαιης κατανομής των πόρων αυτών στους διάφορους χρήστες.

1.5.2 Περιγραφή του IEEE 802.11e

Σε αυτή την παράγραφο δίνουμε μια συνοπτική περιγραφή των νέων χαρακτηριστικών γνωρισμάτων που έχουν προστεθεί στο MAC πρωτόκολλο του 802.11 από το TGe, προκειμένου να υποστηριχθεί αποδοτικά η παροχή ποιότητας υπηρεσίας. Υπάρχουν μερικές αλλαγές στις συντημήσεις που χρησιμοποιούνται για μερικές από

τις έννοιες του 802.11 ώστε να καταδικνύεται το νέο χαρακτηριστικό γνώρισμα της υποστήριξης QoS. Έτσι τώρα, ο σταθμός (STA) που λειτουργεί κάτω από το πλαίσιο του 802.11e καλείται QSTA (που σημαίνει STA που υποστηρίζει QoS). Ένα BSS (Basic Service Set) που λειτουργεί κάτω από το πλαίσιο του 802.11e καλείται QBSS (BSS που υποστηρίζει QoS). Το πακέτο δεδομένων που υποστηρίζει το 802.11e καλείται τώρα QoS πακέτο δεδομένων.

1.5.3 Παροχή Ποιότητας Υπηρεσίας

Το 802.11e ορίζει δύο ειδών υποστήριξη ποιότητας υπηρεσίας για την κυκλοφορία ενός QBSS:

QoS Προτεραιοτήτων: Στο QoS προτεραιοτήτων το κύριο ζήτημα στον καθορισμό του QoS είναι η προτεραιότητα ενός πλαισίου δεδομένων σε σχέση με ένα άλλο. Κάτω από αυτό το πλαίσιο ορίζονται οκτώ κατηγορίες κίνησης (Traffic Categories, TC). Μια κατηγορία κυκλοφορίας είναι ένα σύνολο ανεξάρτητων πλαισίων δεδομένων, τα οποία αντιμετωπίζονται από το επίπεδο MAC με την ίδια προτεραιότητα. Η προτεραιότητα αυτή υποδεικνύεται από τον Προσδιοριστή Κατηγορίας Κυκλοφορίας (Traffic Category IDentified, TCID) για τη συγκεκριμένη κατηγορία, μέσω προκαθορισμένης αντιστοίχισης προτεραιοτήτων. Η τιμή του TCID κυμαίνεται από 0 έως 7. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του TCID, τόσο μεγαλύτερη είναι η προτεραιότητα του πακέτου.

Παραμετροποιημένη QoS: Στην παραμετροποιημένη παροχή ποιότητας υπηρεσίας, πακέτα δεδομένων με κοινά χαρακτηριστικά κυκλοφορίας ομαδοποιούνται σε κατηγορίες που ονομάζονται ρεύματα κυκλοφορίας (Traffic Streams, TS). Η παροχή QoS γίνεται με τον ορισμό των χαρακτηριστικών της κυκλοφορίας (μέσο μέγεθος πακέτου, μέσος ρυθμός δεδομένων, επιτρεπόμενα όρια στην καθυστέρηση, κ.λπ.) των ρευμάτων κυκλοφορίας που χρησιμοποιούνται σε ένα QBSS. Ένα ρεύμα κυκλοφορίας είναι ένα ρεύμα πακέτων δεδομένων που πρέπει να παραδοθούν στον παραλήπτη, πληρώντας μια παραμετροποιημένη QoS. Το κάθε ρεύμα κυκλοφορίας καθορίζεται από ένα Προσδιοριστή Ρεύματος Κυκλοφορίας (Traffic Stream IDentifier, TSID). Ο Προσδιοριστής Ρεύματος Κυκλοφορίας (TSID) είναι ένας προσδιοριστής που χρησιμοποιείται από τις οντότητες των υψηλότερων επιπέδων για να δείξει στο επίπεδο MAC το ρεύμα κυκλοφορίας στο οποίο ένα πλαίσιο ανήκει καθώς και τις QoS απαιτήσεις για τη μετάδοση του. Η τιμή του TSID κυμαίνεται μεταξύ 8 και 15.

1.5.4 Ρεύματα Κυκλοφορίας (Traffic Stream)

Δημιουργία ενός Ρεύματος Κυκλοφορίας: Η δημιουργία ενός ρεύματος κυκλοφορίας αποφασίζεται από τα υψηλότερα στρώματα, έπειτα από το αίτημα μιας εφαρ-

μογής. Αυτό το αίτημα δίνεται στη Οντότητα Διαχείρισης (Station Management Entity, SME) του QSTA. Μετά από το αίτημα αυτό, η SME ζητά από το MAC επίπεδο να παράγει ένα νέο ρεύμα κυκλοφορίας με τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Αυτά τα χαρακτηριστικά δίνονται στο MAC από την SME και ο καθορισμός τους καλείται Καθορισμός Κυκλοφορίας.

Καθορισμός Κυκλοφορίας (Traffic Specification, TSPEC) ενός TS: Είναι ο καθορισμός των χαρακτηριστικών αυτού του TS, δηλαδή οι παράμετροι που καθορίζουν το είδος κυκλοφορίας που θα παραχθεί και θα ανταλλαχθεί μέσω αυτού του TS. Αυτές οι παράμετροι μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία είναι μια κατηγορία παραμέτρων που περιγράφει τα γενικά χαρακτηριστικά του TS. Περιλαμβάνει τη διεύθυνση αποστολέα και παραλήπτη, την κατεύθυνση του ρεύματος, το είδος επιβεβαίωσης (acknowledgment) που απαιτείται από τα πακέτα αυτού του ρεύματος (ένα νέο χαρακτηριστικό του 802.11e που υποστηρίζει τις εξής εναλλακτικές λύσεις: κανένα ack, κανονικό ack, καθυστερημένο ack), και το είδος του TS (περιοδικό ή όχι). Η δεύτερη κατηγορία παραμέτρων περιλαμβάνει παραμέτρους σχετικές με τα χαρακτηριστικά των πακέτων για το συγκεκριμένο TS καθώς και τις απαιτήσεις σχετικά με τη μετάδοσή τους. Περιλαμβάνει το διάστημα μεταξύ δυο διαδοχικών αφίξεων (interarrival interval), το μέσο μέγεθος πακέτου, τον ελάχιστο ρυθμό μετάδοσης, το μέσο ρυθμό μετάδοσης, το μέγιστο μήκος ριπής (maximum burst size), το επιτρεπόμενο όριο στην καθυστέρηση, κ.λπ. Η τελευταία, είναι μια παράμετρος που καθορίζει το μέγιστο χρονικό διάστημα που επιτρέπεται να παραμείνει ένα πακέτο στις ουρές αναμονής του MAC επιπέδου του αποστολέα QSTA, πριν από τη μετάδοσή του.

1.5.5 Αλλαγές στις Λειτουργίες Πρόσβασης

Το 802.11e προτείνει τη χρήση μιας νέας λειτουργίας πρόσβασης στο μέσο που ονομάζεται Λειτουργία Υβριδικού Συντονισμού (Hybrid Coordination Function, HCF). Η HCF είναι μια ενισχυμένη λειτουργία, η οποία περιλαμβάνει δύο διαφορετικές μεθόδους πρόσβασης που διαφοροποιούνται ανάλογα με τη μέθοδο προσπέλασης που χρησιμοποιούν. Η πρώτη μέθοδος ονομάζεται Ενισχυμένη Κατανομημένη Πρόσβαση Καναλιού (Enhanced Distributed Channel Access, EDCA) και είναι μια τροποποίηση της υπάρχουσας DCF για την υποστήριξη QoS. Η δεύτερη μέθοδος καλείται Πρόσβαση Καναλιού Ελεγχόμενη από την HCF (HCF Controlled Channel Access, HCCA), είναι μια επέκταση της PCF και σκοπό έχει να προσφέρει παραμετροποιημένη QoS. Το όνομα HCF απεικονίζει τη δυνατότητά της νέας λειτουργίας να λάβει χώρα και στην Περίοδο Χωρίς Ανταγωνισμό (CFP) και στην Περίοδο Ανταγωνισμού (CP). Για την υλοποίηση των αναφερθέντων μεθόδων γίνεται χρήση μιας νέας έννοιας που ονομάζεται Ευκαιρία Μετάδοσης (Transmit

Priority	Traffic Category	Access Category	Designation
Lower	1	AC.BK	Background
	2	AC.BK	Background
	0	AC.BE	Best Effort
	3	AC.BE	Best Effort
	4	AC.VI	Video
	5	C.VI	Video
Highest	6	AC.VO	Voice
	7	AC.VO	Voice

Πίνακας 1.1: Αντιστοιχία των Κατηγοριών Κυκλοφορίας σε Κατηγορίες Πρόσβασης

Opportunity, TXOP).

Ευκαιρία Μετάδοσης (Transmit Opportunity, TXOP)

Η Ευκαιρία Μετάδοσης (TXOP) είναι ένα χρονικό διάστημα στην Περίοδο Ανταγωνισμού (CP) ή στην Περίοδο χωρίς Ανταγωνισμό (CFP), που καθορίζεται από την χρονική στιγμή έναρξης του και τη μέγιστη διάρκειά του. Κατά τη διάρκεια αυτού του διαστήματος, ένας συγκεκριμένος QSTA έχει το δικαίωμα να χρησιμοποιήσει το ασύρματο μέσο όπως αυτός επιθυμεί. Μέσα στα χρονικά όρια κάθε TXOP, οι αποφάσεις σχετικά με τα πακέτα που θα μεταδοθούν λαμβάνονται τοπικά από τον συγκεκριμένο QSTA. Έτσι όταν ένας QSTA λαμβάνει το δικαίωμα να μεταδώσει, αντί της μετάδοσης ενός πλαισίου το οποίο αμέσως μετά ακολουθείται από ένα Ack, μπορεί να μεταδώσει περισσότερα πλαίσια, το ένα μετά από άλλο, στον ίδιο ή σε διαφορετικούς παραλήπτες, έως ότου το TXOP τελειώσει. Οι μεταδόσεις μέσα σε ένα TXOP χωρίζονται με SIFS.

Ενισχυμένη Κατανεμημένη πρόσβαση καναλιού (Enhanced Distributed Channel Access, EDCA)

Αυτή η λειτουργία είναι μια βελτίωση της βασικής DCF με σκοπό να υποστηρίξει τις Κατηγορίες Κυκλοφορίας (TC) που περιγράφηκαν παραπάνω και να παράσχει δικαιοσύνη στη μετάδοση των πακέτων. Η EDCA παρέχει διαφοροποιημένη DCF πρόσβαση στο ασύρματο μέσο για κάθε κατηγορία κυκλοφορίας. Για την υποστήριξη της EDCA το 802.11e καθορίζει 4 Κατηγορίες Πρόσβασης (Access Categories, AC). Κάθε κατηγορία κυκλοφορίας αντιστοιχίζεται σε μια κατηγορία πρόσβασης σύμφωνα με τον πίνακα 1.1.

Ένας QSTA λειτουργεί υπό τους ίδιους γενικούς κανόνες που διέπουν την DCF, διαθέτοντας τέσσερις διαφορετικές ουρές, μια ανά κατηγορία πρόσβασης. Κάθε ουρά ανταγωνίζεται για το ασύρματο μέσο χρησιμοποιώντας (αντί για DIFS) ένα διαφορετικό ενδιάμεσο διάστημα που ονομάζεται Ενδιάμεσο Διάστημα Διαιτησίας (Arbitration IFS), μεγαλύτερο από DIFS. Υπάρχει ένα AIFS (AIFS(i), $1 \leq i \leq$

4) για κάθε κατηγορία πρόσβασης (AC). Εάν $AC(i) < AC(j)$ (η κατηγορία i έχει χαμηλότερη προτεραιότητα από την κατηγορία j) τότε $AIFS(i) > AIFS(j)$. Αυτό σημαίνει ότι για τη μετάδοση των πακέτων της κατηγορίας i πρέπει ο σταθμός να βρει το μέσο ελεύθερο για χρονικό διάστημα που είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο χρονικό διάστημα για την κατηγορία j . Με αυτό τον τρόπο η EDCA δίνει προτεραιότητα στην πρόσβαση του μέσου στα πακέτα με την υψηλότερη σχετική προτεραιότητα.

Κάθε ουρά έχει το δικό της παράθυρο υποχώρησης (back-off), το δικό της μετρητή υποχώρησης, CW_{min} και CW_{max} , τη δική της λειτουργία υποχώρησης και μεταδίδει στον μέσο ανεξάρτητα η μια από την άλλη, όταν ο μετρητής υποχώρησης της φτάσει στο μηδέν. Κατ' αυτό τον τρόπο μια σύνδεση κυκλοφορίας με υψηλή προτεραιότητα θα έχει στατιστικά μικρότερα παράθυρα υποχώρησης από μια άλλη με χαμηλότερη προτεραιότητα. Ο τρόπος αύξησης του υποχώρησης δεν είναι εκθετικός όπως στην DCF. Κάθε παράθυρο υποχώρησης αντί να διπλασιάζεται σε κάθε σύγκρουση, υπολογίζεται από τον πολλαπλασιασμό του προηγούμενου παραθύρου με έναν παράγοντα που ονομάζεται Παράγοντας Εμμονής (Persistence Factor, PF). Υπάρχει ένας PF ($PF(i)$, $1 \leq i \leq 4$) για κάθε κατηγορία πρόσβασης (AC). Εάν οι μετρητές υποχώρησης δύο διαφορετικών ουρών του ίδιου σταθμού φτάσουν συγχρόνως στο μηδέν, θα μεταδώσει η ουρά με τη μεγαλύτερη προτεραιότητα. Η ουρά με τη χαμηλότερη προτεραιότητα αντιλαμβάνεται το συμβάν αυτό ως σύγκρουση και συμπεριφέρεται σαν να υπήρξε μια εξωτερική σύγκρουση στο ασύρματο μέσο. Η διαδικασία αυτή καλείται εσωτερική επίλυση σύγκρουσης.

Εάν ένας QSTA κερδίζει έναν EDCA ανταγωνισμό κατά τη διάρκεια του CP και λάβει έτσι το δικαίωμα πρόσβασης στο μέσο, αντί της αποστολής ενός απλού πλαισίου, έχει το δικαίωμα της χρήσης του μέσου για μια χρονική περίοδο ίση με τη μέγιστη διάρκεια της TXOP. Αυτό σημαίνει ότι ο QSTA αποκτά μια TXOP (ευκαιρία μετάδοσης), κατά τη διάρκεια της οποίας μπορεί να αρχίσει μια ή περισσότερες ακολουθίες ανταλλαγής πλαισίων με έναν ή περισσότερους παραλήπτες. Ο QSTA λαμβάνει εξ ολοκλήρου τις αποφάσεις σχετικά με το ποιά πλαίσια θα μεταδοθούν κατά τη διάρκεια αυτής της TXOP. Κάθε άλλος QSTA θα αναβάλλει τη μετάδοσή του, θέτοντας το NAV του με τη γνωστή διαδικασία της DCF. Οι πληροφορίες για τη μέγιστη διάρκεια της TXOP, το $Cw_{min}[i]$, το $Cw_{max}[i]$, το $AIFS[i]$ και το $PF[i]$ μεταδίδονται με κάθε πλαίσιο Χαιρετισμού μέσω ενός νέου Στοιχείου Πληροφοριών (Information Element) που ονομάζεται Στοιχείο Παραμέτρων QoS και έχει προστεθεί στα πλαίσια Χαιρετισμού του 802.11e.

Πρόσβαση Καναλιού ελεγχόμενη από την Λειτουργία Υβριδικού Συντονισμού (HCF Controlled Channel Access, HCCA)

Το 802.11e παρέχει μια νέα λειτουργία που ονομάζεται Πρόσβαση Καναλιού ελεγχόμενη από την Λειτουργία Υβριδικού Συντονισμού (HCCA). Η HCCA είναι μια μέθοδος προσπέλασης του μέσου που χρησιμοποιείται για να παρέχει ποιότητα υπηρεσίας στους σταθμούς ενός QBSS με υποδομή. Η HCCA μπορεί να συνυπάρξει με την PCF και η κύρια λειτουργία της είναι να προσφέρει Ευκαιρίες Μετάδοσης (TXOP) στους σταθμούς του κελιού, σύμφωνα με τις ανάγκες τους. Αν και η HCCF μπορεί να συνυπάρξει με την PCF, η χρήση και των δύο δεν είναι αποδοτική, δεδομένου ότι η HCCA παρέχει περισσότερες δυνατότητες από ότι η PCF και έτσι μπορεί να την αντικαταστήσει. Η HCCA χρησιμοποιεί έναν Κεντρικοποιημένο Συντονιστή (Point Coordinator, PC), ο οποίος ονομάζεται Υβριδικός Συντονιστής (Hybrid Coordinator, HC). Ο HC, ο οποίος βρίσκεται στο AP του κελιού, χρησιμοποιεί την υψηλή προτεραιότητα του AP για πρόσβαση στο μέσο (ακούει το μέσο για PIFS αντί DIFS). Λαμβάνοντας τον έλεγχο του μέσου, παρέχει Ευκαιρίες Μετάδοσης (TXOP) στους σταθμούς, μέσω ενός ενισχυμένου μηχανισμού polling. Τα TXOP παρέχονται στις κατάλληλες χρονικές στιγμές ώστε να καλυφθούν οι προκαθορισμένες απαιτήσεις ρυθμού και καθυστέρησης του κάθε ρεύματος κυκλοφορίας.

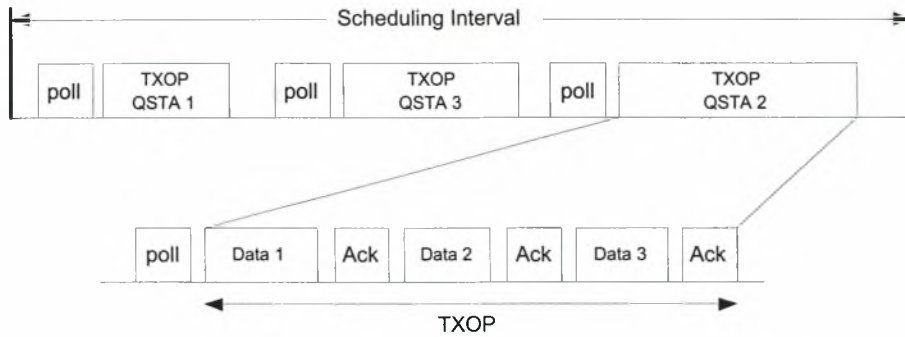
Η καθολική γνώση του HC σχετικά με την ποσότητα δεδομένων που περιμένουν στις ουρές των σταθμών, είναι απαραίτητη για τη σωστή κατανομή των TXOPs. Αυτή η γνώση περνιέται από τους σταθμούς του κελιού στο HC μέσω του ακόλουθου μηχανισμού: Κάθε πλαίσιο που μεταδίδεται από κάποιον σταθμό στο HC, περιέχει στην επικεφαλίδα του ένα νέο πεδίο, μέσω του οποίου ο σταθμός ενημερώνει το HC για την ποσότητα των δεδομένων που περιμένουν προς μετάδοση στην ουρά της αντίστοιχης ροής κυκλοφορίας. Η MAC επικεφαλίδα ενός QoS πακέτου δεδομένων, απεικονίζεται στο σχήμα 1.21.

Octets:2	2	6	6	6	2	6 or 0	2	0-2312	4
Frame Control	Dur./ ID	Addr 1	Addr 2	Addr 3	Sequence Control	Addr 4	QoS Control	Frame Body	FCS

Σχήμα 1.21: Η δομή πλαισίου στο MAC του 802.11

Όπως φαίνεται από το σχήμα, στο νέο QoS πεδίο περιέχεται η κατηγορία κυκλοφορίας (1-7) ή το ρεύμα κυκλοφορίας (8-15) στην οποία το πακέτο ανήκει, καθώς και το μέγεθος της ουράς του σταθμού (μετρημένο σε ψηφιολέξεις) για τη συγκεκριμένη κατηγορία ή ρεύμα. Ένας σταθμός που θέλει να ζητήσει μια νέα ευκαιρία μετάδοσης (TXOP) από το HC, μπορεί να στείλει ένα QoS πλαίσιο δεδομένων χωρίς πληροφορία, δηλώνοντας την ανάγκη αυτή.

Η HCCA προστατεύει κάθε TXOP χρησιμοποιώντας έναν μηχανισμό ανάλογο



Σχήμα 1.22: Παράδειγμα μιας τυπικής διαδικασίας ψηφοφορίας στο 802.11e

αυτού που το 802.11 χρησιμοποιεί για την προστασία των πακέτων της PCF. Έτσι ενεργοποιεί το NAV όλων των γειτονικών σταθμών κατά τη διάρκεια του εκάστοτε TXOP. Η διαφορά είναι ότι τώρα ο NAV ενεργοποιείται κάθε φορά που ένα TXOP αρχίζει, αντί να ενεργοποιείται για όλη τη διάρκεια της λειτουργίας της HCF. Με αυτό τον τρόπο η HCCA παράγει χρονικές περιόδους που ονομάζονται Φάσεις Ελεγχόμενης Πρόσβασης (Controlled Access Phases, CAPs) κατά τη διάρκεια των οποίων το HC έχει τον έλεγχο του μέσου και δίνει στους σταθμούς τη δυνατότητα να μεταδίδουν πακέτα χρησιμοποιώντας τις ευκαιρίες μετάδοσης (TXOP).

Το HC χρησιμοποιεί ένα νέο πλαίσιο για polling (QoS-poll) μέσω του οποίου εκχωρεί στον εκάστοτε σταθμό το δικαίωμα να χρησιμοποιήσει το κανάλι. Μέσω του πλαισίου αυτού, το HC δηλώνει την ταυτότητα του σταθμού που θα χρησιμοποιήσει την ευκαιρία μετάδοσης (TXOP), καθώς και τη διάρκεια της. Όπως έχουμε πει, κατά τη διάρκεια της περιόδου αυτής, ο σταθμός θα αποφασίσει για τα πλαίσια που θα μεταδώσει, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.22. Οι άλλοι σταθμοί χρησιμοποιούν τις πληροφορίες που σχετίζονται με τη διάρκεια της TXOP για να ενεργοποιήσουν το NAV μετρητή τους.

1.6 Το Πρότυπο IEEE 802.11h

1.6.1 Εισαγωγή

Το πρότυπο 802.11h [IEEE03b] καθορίζει ένα νέο πλαίσιο λειτουργιών, που σκοπό έχει την υποστήριξη δυο βασικών μηχανισμών, που σχετίζονται άμεσα με τη διαχείριση του δικτύου. Οι μηχανισμοί αυτοί είναι ο Έλεγχος Ισχύος Μετάδοσης (Transmission Power Control, TPC) και η Δυναμική Επιλογή Συχνότητας (Dynamic Frequency Allocation, DFA). Οι αλλαγές που προτείνονται, επηρεάζουν το επίπεδο πολλαπλής πρόσβασης (MAC) του προτύπου IEEE 802.11 καθώς επίσης και το πρότυπο IEEE 802.11a. Το 802.11a επηρεάζεται λόγω του γεγονότος ότι σκοπός του 802.11h είναι η παροχή ενός πλαισίου υλοποίησης των δύο μηχανισμών στη συχνότητα των 5 GHz, εκεί δηλαδή που λειτουργεί το 802.11a. Αναλόγως, παρόμοια πρωτόκολλα θα ακολουθήσουν που θα υιοθετήσουν πολλές από τις προτάσεις του 802.11h προκειμένου να παρέχουν ένα πλαίσιο υλοποίησης των αναφερθέντων μηχανισμών στη συχνότητα των 2.4 GHz.

Το 802.11h σχεδιάστηκε από την Ομάδα Εργασίας h (Task Group h, TGH) [802] για δύο κύριους λόγους: Ο πρώτος λόγος είναι η πρόθεση για επέκταση της χρήσης του πρωτοκόλλου 802.11 στην Ευρώπη. Ο ευρωπαϊκός νόμος στον τομέα των τηλεπικοινωνιών είναι διαφορετικός από τον αμερικάνικο. Τα προϊόντα λοιπόν που έχουν ως στόχο την ευρωπαϊκή αγορά, πρέπει να ακολουθούν άλλο νομικό πλαίσιο σε σχέση με τα αντίστοιχα αμερικάνικα. Η οργάνωση που είναι αρμόδια για τον καθορισμό του πλαισίου που διέπει τις τηλεπικοινωνίες στην Ευρώπη είναι η Επιτροπή Ηλεκτρονικών Επικοινωνιών (Electronic Communications Committee, ECC) και λειτουργεί υπό την εποπτεία της Ευρωπαϊκής Επιτροπής Ταχυδρομικών και Τηλεπικοινωνιών Υπηρεσιών (European Conference of Postal and Telecommunications Administrations, ECPT). Αποστολή της είναι να αναπτύξει ένα κοινό πλαίσιο στον τομέα των επικοινωνιών σε ευρωπαϊκό επίπεδο, λαμβάνοντας υπόψη της την ευρωπαϊκή και διεθνή νομοθεσία. Μεταξύ των υποχρεωτικών κανόνων που διέπουν τη λειτουργία ασυρμάτων τοπικών δικτύων (LAN) είναι το ότι κάθε δίκτυο τέτοιου τύπου που λειτουργεί στη συχνότητα των 5 GHz, πρέπει να χρησιμοποιεί τους μηχανισμούς Ελέγχου Ισχύος Μετάδοσης (TPC) και Δυναμικής Κατανομής Συχνότητας (DFA).

Ο δεύτερος λόγος της δημιουργίας του 802.11h είναι η προσπάθεια αύξησης της απόδοσης της λειτουργίας των 802.11 ασύρματων δικτύων στη συχνότητα των 5 GHz. Η χρήση κατάλληλων μηχανισμών για τον καθορισμό της ισχύος μετάδοσης των ασύρματων σταθμών ενός δικτύου, καθώς και η σωστή επιλογή των κατάλληλων συχνοτήτων για τη λειτουργία ενός ασύρματου τοπικού δικτύου, μπορούν να οδηγήσουν σε φαινόμενα όπως η μείωση της παρεμβολής (interference), ο έλεγχος

της περιοχής κάλυψης και η βελτιστοποίηση της ισχύος. Αυτά τα τρία φαινόμενα είναι θεμελιώδη για την αποδοτική λειτουργία ενός ασύρματου τοπικού δικτύου.

Το νέο πρότυπο καθορίζει το πλαίσιο για την υλοποίηση των δυο αναφερθέντων μηχανισμών. Δεν ορίζει κανένα συγκεκριμένο αλγόριθμο. Οι αλγόριθμοι για τη λειτουργία κάθε διαδικασίας μπορούν να αναπτυχθούν ανεξάρτητα από τον εκάστοτε κατασκευαστή των συστημάτων. Ακολουθώντας αυτή την πολιτική, το 802.11h δεν καθορίζει έναν συγκεκριμένο τρόπο για την υλοποίηση κάθε δομής στο σύστημα, αλλά δίνει μόνο τις γενικές κατευθύνσεις. Έτσι, το νέο πρότυπο, από τη μια δίνει στους κατασκευαστές την ευελιξία να αναπτύξουν αποδοτικούς αλγορίθμους βασισμένους στην έρευνά τους, ενώ από την άλλη εξασφαλίζει, ότι τα διάφορα μελλοντικά προϊόντα που θα ακολουθούν το πρωτόκολλο θα είναι συμβατά μεταξύ τους.

1.6.2 Έλεγχος Ισχύος Μετάδοσης (Transmission Power Control, TPC)

Ο Έλεγχος Ισχύος Μετάδοσης (TPC) είναι ένας θεμελιώδης μηχανισμός για την αποδοτική χρήση ενός ασύρματου τοπικού δικτύου. Μέχρι τώρα δεν υπήρχε κανένας κανόνας στο 802.11 που να καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο ένας σταθμός θα ενεργήσει για να επιλέξει την ισχύ μετάδοσης του, τις ικανότητες που πρέπει να έχει ένας σταθμός όταν διαθέτει Έλεγχο Ισχύος Μετάδοσης, καθώς επίσης και τις διαδικασίες που πρέπει να υποστηριχθούν από κάθε σταθμό σε ένα τέτοιο περιβάλλον. Το 802.11h καθορίζει αυτά τα θέματα, δημιουργώντας ένα πλαίσιο για την αποδοτική λειτουργία του TPC.

Στον πίνακα 1.2 μπορούμε να δούμε τα επιτρεπόμενα κανάλια συχνότητας και την αρίθμησή τους στη ζώνη των 5 GHz, όπως αυτά καθορίζονται από τις αντίστοιχες επιτροπές στην Αμερική και την Ευρώπη.

Το 802.11h καθορίζει ορισμένους κανόνες, ακολουθώντας τις απαιτήσεις των ρυθμιστικών αρχών. Έτσι, περιορίζει τη μέγιστη ισχύ μετάδοσης ανάλογα με τις συνθήκες του περιβάλλοντος και τη συχνότητα. Στον πίνακα 1.3 μπορούμε να δούμε αυτούς τους περιορισμούς. Το 802.11h, ακολουθώντας επίσης τους κανόνες του ECC, καθορίζει ότι πρέπει να υπάρξει ένας παράγοντας εξισορρόπησης (mitigation factor) τουλάχιστον 3 dB στη μέση εξερχόμενη ισχύ. Επίσης ορίζει ότι πρέπει να υπάρξει μηχανισμός ελέγχου της ισχύος μετάδοσης (TPC) και στο uplink και στο downlink κανάλι.

Το 802.11h καθορίζει ένα πλαίσιο το οποίο έχει επιπτώσεις σε πολλές διαδικασίες ενός σταθμού. Έτσι, το νέο πρότυπο έχει επιπτώσεις στον τρόπο λειτουργίας ενός σταθμού ή ενός Σταθμού Βάσης (AP) σε διάφορες περιπτώσεις. Μια διαδικασία στην οποία το νέο πλαίσιο έχει άμεσες επιπτώσεις είναι αυτή της

Regulatory Domain	Band	Operating Channel No	Channel Center Frequencies
USA Europe	U-NII lower band 5.15-5.25 GHz	36	5,180 MHz
		40	5,200 MHz
		44	5,220 MHz
		48	5,240 MHz
USA Europe	U-NII middle band 5.25-5.35 GHz	52	5,260 MHz
		56	5,280 MHz
		60	5,300 MHz
		64	5,320 MHz
Europe	5.47-5.725 GHz	100	5,500 MHz
		104	5,520 MHz
		108	5,540 MHz
		112	5,560 MHz
		116	5,580 MHz
		120	5,600 MHz
		124	5,620 MHz
		128	5,640 MHz
		132	5,660 MHz
		136	5,680 MHz
USA Europe	U-NII upper band 5.15-5.25 GHz	149	5,745 MHz
		153	5,765 MHz
		157	5,785 MHz
		161	5,805 MHz

Πίνακας 1.2: Τα κανάλια λειτουργίας στην συχνότητα των 5 GHz

Channel	Use	Max.Tr.Power
5150-5350 MHz	indoor	200 mW
5470-5725 MHz	outdoor and indoor	1 W

Πίνακας 1.3: Τα μέγιστα όρια στην ισχύ μετάδοσης

Σύνδεσης (Association) των σταθμών με το δίκτυο. Υπό τους νέους κανόνες, κατά τη διάρκεια της σύνδεσης (Association) ή της επανασύνδεσης (Reassociation) ενός σταθμού με ένα AP, ο σταθμός πρέπει να παρέχει στο AP πληροφορίες για την **Ικανότητά Μετάδοσης Μέγιστης Ισχύος (Maximum Transmit Power Capability)** τουλάχιστον για το τρέχον κανάλι. Αυτό γίνεται μέσω της αποστολής των γνωστών πλαισίων Αίτησης Σύνδεσης (Association Request) που ενισχύονται τώρα με ένα νέο στοιχείο πληροφορίας (Information Element) για την υποστήριξη αυτής της νέας λειτουργίας.

Το AP χρησιμοποιεί τις πληροφορίες που λαμβάνει από κάθε ένα από τους σταθμούς που συνδέονται μαζί του, για τον προσδιορισμό του **Τοπικού Μέγιστου Επιπέδου Ισχύος Μετάδοσης (Local Maximum Transmit Power Level)**. Αυτό το άνω όριο στην ισχύ μετάδοσης, επιβάλλεται σε όλους τους σταθμούς του κελιού, όπως θα δούμε στην επόμενη παράγραφο. Ένα AP μπορεί να απορρίψει μια αίτηση σύνδεσης ή επανασύνδεσης από ένα σταθμό, βασιζόμενο στις πληροφορίες που έχει για την ικανότητά του σταθμού ως αναφορά την ισχύ μετάδοσης.

Η επόμενη σημαντική αλλαγή στη συμπεριφορά ενός AP σε ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο 802.11h είναι ότι τώρα το AP πρέπει να γνωρίζει το **Ρυθμιστικό Επίπεδο Ισχύος Μετάδοσης (Regulatory Transmit Power Level)** και να το διαδώσει στους σταθμούς του κελιού του. Όπως αναφέραμε, κάθε ρυθμιστική αρχή καθορίζει αυτό το ρυθμιστικό μέγιστο επίπεδο ισχύος μετάδοσης, για κάθε κανάλι. Αυτή η πληροφορία πρέπει να μεταδοθεί προς όλες τις κατευθύνσεις από το AP χρησιμοποιώντας τα πλαίσια Χαιρετισμού (Beacons) και τα πλαίσια Απάντησης Διερεύνησης (Probe Response frame). Έτσι, γίνεται η προσθήκη ενός νέου στοιχείου πληροφορίας (information element) σε αυτά τα πλαίσια, το οποίο περιέχει αυτές τις πληροφορίες.

Μια άλλη σημαντική διαδικασία που προστίθεται στις υποχρεώσεις του AP υπό το νέο καθεστώς, είναι ο προσδιορισμός του **Τοπικού Μέγιστου Επιπέδου Ισχύος Μετάδοσης (Local Maximum Transmit Power Level)** για τους σταθμούς του συγκεκριμένου κελιού και για τη συγκεκριμένη συχνότητα. Αυτή η λειτουργία δίνει περισσότερη ευελιξία στη λειτουργία κάθε κελιού μιας και με αυτό τον τρόπο μπορεί να γίνει έλεγχος της συνολικής ισχύος μετάδοσης στο κελί. Το AP λαμβάνοντας υπόψη του διάφορους παράγοντες όπως την Ικανότητά στη Μέγιστη Ισχύ Μετάδοσης του κάθε σταθμού του κελιού και το επίπεδο παρεμβολής στην περιοχή του κελιού, καθορίζει ένα μέγιστο όριο για την ισχύ μετάδοσης των σταθμών στο κελί. Αυτό το όριο μπορεί να αλλάζει δυναμικά καθώς οι συνθήκες στη γειτονιά του κελιού αλλάζουν.

Το AP πρέπει να φροντίζει για τη διατήρηση της σταθερότητας του δικτύου

καθορίζοντας πόσο συχνά και πόσο σημαντικά πρέπει να αλλάζει το τοπικό μέγιστο επίπεδο της ισχύος μετάδοσης. Αυτό το επίπεδο πρέπει να μεταδίδεται προς όλες τις κατευθύνσεις από το AP προς τους σταθμούς του κελιού μέσω των πλαισίων Χαιρετισμού (Beacons) και των πλαισίων Απάντησης Διερεύνησης (Probe Response frame) με τρόπο παρόμοιο με αυτόν των ρυθμιστικών περιορισμών. Μέσω αυτής της λειτουργίας, πετυχαίνεται ένας κεντροποιημένος έλεγχος της μέγιστης ισχύος μετάδοσης των σταθμών ενός κελιού. Έτσι το AP μπορεί να ελέγξει την παρεμβολή που προξενεί το κελί του στα γειτονικά κελιά και να τη διατηρήσει σε χαμηλό επίπεδο. Ο αλγόριθμος μέσω του οποίου το AP καθορίζει αυτό το τοπικό μέγιστο δεν ορίζεται από το πρότυπο και μπορεί να υλοποιηθεί με διάφορους τρόπους. Ο στόχος πρέπει να είναι ο καθορισμός του μέγιστου αυτού σε ένα τέτοιο επίπεδο, ώστε να επιτρέπει την σωστή μετάδοση των πακέτων κάθε σταθμού από τη μια, και να κρατά το επίπεδο παρεμβολής στην περιοχή χαμηλό από την άλλη.

Κάθε σταθμός μπορεί, υπό το νέο πρότυπο, να επιλέξει δυναμικά την ισχύ μετάδοσης κάθε πλαισίου υπακούοντας τους περιορισμούς που επιβάλλονται από τους ρυθμιστικούς και τους τοπικούς περιορισμούς. Οι κανόνες που διέπουν την απόφαση αυτή είναι οι εξής:

- Ένα AP μπορεί να μεταδώσει με οποιαδήποτε ισχύ μικρότερη από το Ρυθμιστικό Επίπεδο Ισχύος Μετάδοσης.
- Ένας σταθμός που δεν ανήκει σε κανένα κελί (π.χ. είναι στη διαδικασία Σύνδεσης) μπορεί να μεταδίδει με οποιαδήποτε ισχύ μικρότερη από το Ρυθμιστικό Επίπεδο Ισχύος Μετάδοσης (γνωρίζει το επίπεδο αυτό μέσω της λήψης πλαισίων Χαιρετισμού (Beacons) ή πλαισίων Απάντησης Διερεύνησης (Probe Response frame) από οποιοδήποτε AP).
- Ένας σταθμός που ανήκει σε ένα κελί μπορεί να μεταδίδει με οποιαδήποτε ισχύ μικρότερη του Τοπικού Μέγιστου Επιπέδου Ισχύος Μετάδοσης που έχει καθορίσει το AP του κελιού του.

Ο αλγόριθμος με τον οποίο ένας σταθμός αποφασίζει για την ισχύ μετάδοσης κάθε πλαισίου δεν καθορίζεται από το πρότυπο, οπότε εξαρτάται από τον εκάστοτε κατασκευαστή. Για τον αποδοτικότερο καθορισμό και τη βελτιστοποίηση της τιμής αυτής ένας σταθμός μπορεί να χρησιμοποιήσει την ακόλουθη διαδικασία που ορίζεται στο νέο πρότυπο.

Στο νέο πρότυπο υπάρχει ένα ζευγάρι πλαισίων που ονομάζονται Αίτηση TPC (TPC Request) και Αναφορά TPC (TPC Report). Ένας σταθμός μπορεί να στείλει ένα πλαίσιο Αίτησης TPC σε ένα άλλο σταθμό, προκειμένου να ζητήσει πληροφορίες σχετικά με την ποιότητα του καναλιού μεταξύ των δύο σταθμών. Η απάντηση

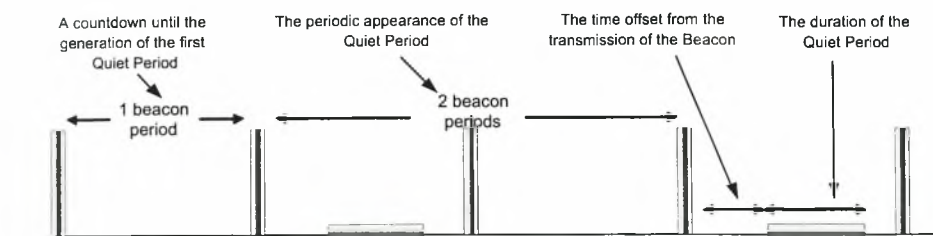
από το δεύτερο σταθμό θα είναι ένα πλαίσιο Αναφοράς TPC το οποίο θα περιέχει δυο πεδία: Την ισχύ που χρησιμοποιείται για τη μετάδοση του συγκεκριμένου πλαισίου και το κατ' εκτίμηση Περιθώριο Σύνδεσης (**Link Margin**). Με αυτό τον τρόπο, ο δεύτερος σταθμός ενημερώνει τον πρώτο για τις συνθήκες του καναλιού και στις δυο κατευθύνσεις. Ο πρώτος σταθμός, χρησιμοποιώντας το πρώτο από τα πεδία του πακέτου Αναφοράς TPC (την ισχύ μετάδοσης) μπορεί να υπολογίσει την απώλεια του σήματος λόγω της απόστασης (path loss) για το κανάλι με κατεύθυνση από το δεύτερο στον πρώτο σταθμό. Αυτό γίνεται με την αφαίρεση από την τιμή αυτή (ισχύς μετάδοσης) της ισχύος λήψης του πακέτου. Το αποτέλεσμα είναι η ισχύς που έχει χαθεί λόγω της απώλειας της απόστασης.

Από την άλλη πλευρά, το Περιθώριο Σύνδεσης που είναι το δεύτερο πεδίο του πλαισίου Αναφοράς TPC, ορίζεται ως η αναλογία της λαμβανόμενης ισχύος σήματος του πακέτου Αίτησης TPC, προς την ισχύ που απαιτείται για την αποτελεσματική επικοινωνία τη στιγμή και για το ρυθμό μετάδοσης με τον οποίο αυτό το πλαίσιο παραλήφθηκε. Αυτή η τιμή δείχνει πόσο υψηλή ήταν η ισχύ μετάδοσης του πλαισίου λήψης, συγκρινόμενη με την ανάγκη του δέκτη για αποτελεσματική επικοινωνία. Κατ' αυτό τον τρόπο ο σταθμός που ζητάει τη μέτρηση, ενημερώνεται για την κατάσταση του καναλιού στην κατεύθυνση στην οποία μεταδίδει την Αίτηση TPC. Χρησιμοποιώντας αυτές τις πληροφορίες, ο σταθμός μπορεί δυναμικά να βελτιστοποιήσει την ισχύ μετάδοσης για κάθε πλαίσιο που μεταδίδει.

1.6.3 Δυναμική Επιλογή Συχνότητας (Dynamic Frequency Allocation, DFA)

Όπως αναφέραμε νωρίτερα, η δεύτερη βασική διαδικασία που τυποποιείται από το 802.11h είναι η Δυναμική Επιλογή Συχνότητας. Ο πρώτος στόχος αυτής της διαδικασίας είναι η μείωση της παρεμβολής προς τους κύριους χρήστες (primary users - ραντάρ). Σύμφωνα με το ECC, ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο πρέπει να ανιχνεύσει και να αποφύγει τους κύριους χρήστες, δίνοντάς τους απόλυτη προτεραιότητα στη λειτουργία. Ο δεύτερος στόχος είναι η ομοιόμορφη κατανομή των ασύρματων συστημάτων στα διάφορα διαθέσιμα κανάλια συχνοτήτων. Για την υλοποίηση των στόχων αυτών το 802.11h εισάγει νέες διαδικασίες και νέα πλαίσια ελέγχου, μέσω των οποίων ένας σταθμός εκτελεί διαφόρων ειδών μετρήσεις στα διάφορα κανάλια και στέλνει τα αποτελέσματα στο AP. Το AP, λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα των μετρήσεων αυτών, αποφασίζει για τη αλλαγή ή όχι της συχνότητας λειτουργίας του κελιού. Αυτοί οι μηχανισμοί, καθώς και ο τρόπος με τον οποίο λειτουργούν, περιγράφονται στις ακόλουθες παραγράφους.

Στο νέο πλαίσιο υπάρχει μια διαδικασία που σχετίζεται με τις μετρήσεις των σταθμών. Σύμφωνα με αυτήν, το AP καθορίζει μια χρονική περίοδο, κατά τη διάρκεια της οποίας κανένα πλαίσιο δεν μεταδίδεται από τους σταθμούς του συ-



Σχήμα 1.23: Ο καθορισμός της Περιόδου Ησυχίας

γκεκριμένου κελιού. Αυτή η περίοδος καλείται Περίοδος Ησυχίας (Quiet Period). Η περίοδος ησυχίας είναι περιοδική και η δημιουργία της, η διάρκεια της και η συχνότητα εμφάνισής της καθορίζονται από το AP. Έτσι, το AP ενός κελιού μπορεί να δρομολογεί τις περιόδους ησυχίας, με τη μετάδοση ενός ειδικού στοιχείου (information element) στα πλαίσια Χαιρετισμού (Beacons) και στα πλαίσια Απάντησης Διερεύνησης (Probe Response frame). Μέσω του στοιχείου αυτού, καθορίζεται η στιγμή που θα αρχίσει η περίοδος ησυχίας, η διάρκεια της και η περιοδικότητά της. Η ύπαρξη μιας παραμέτρου που ονομάζεται χρονική μετατόπιση (time offset) επιτρέπει μετακίνηση της περιόδου στο διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών πλαισίων Χαιρετισμού. Ολόκληρη η διαδικασία απεικονίζεται στο σχήμα 1.23.

Όπως αναφέραμε, η ECC επιβάλλει πολύ αυστηρούς κανόνες για τη συνύπαρξη συστημάτων ασύρματων τοπικών δικτύων με τους κύριους χρήστες (ραντάρ). Το 802.11h υπακούοντας αυτούς τους κανόνες, καθορίζει τις ακριβείς διαδικασίες για την σωστή συμπεριφορά των σταθμών κάτω από αυτό το πλαίσιο. Κάθε σταθμός πρέπει να εξετάζει το κανάλι για την παρουσία κύριων χρηστών ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Αυτή η διαδικασία πρέπει να είναι περιοδική και μπορεί να πραγματοποιηθεί κατά τη διάρκεια των περιόδων ησυχίας ή κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας. Εάν ένας σταθμός αντιληφθεί την ύπαρξη ενός κύριου χρήστη, πρέπει να ενημερώσει άμεσα το AP για το γεγονός (στέλνοντας ένα νέο πακέτο ελέγχου) και έπειτα πρέπει να πάψει να χρησιμοποιεί το κανάλι, περιμένοντας να λάβει ένα πακέτο ελέγχου από το AP που θα ενημερώνει για τη μεταπήδηση του κελιού σε ένα νέο κανάλι, όπως θα δούμε στις επόμενες παραγράφους.

Υπό το νέο πλαίσιο, ένας σταθμός μπορεί να κάνει διάφορες μετρήσεις στο κανάλι, προκειμένου να συλλέξει πληροφορίες για την κατάσταση του ασύρματου μέσου στην περιοχή του. Ένας σταθμός μπορεί να κάνει μετρήσεις μετά από δική του απόφαση σε ένα ή περισσότερα κανάλια ή μπορεί να κληθεί από έναν άλλο σταθμό (συνήθως από το AP του κελιού). Οι μετρήσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν σε μια περίοδο ησυχίας ή κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας. Υπάρχουν δύο νέα πλαίσια ελέγχου που ονομάζονται πλαίσιο Αίτησης Μέτρησης

(Measurement Request) και πλαίσιο Αναφοράς Μέτρησης (Measurement Report) τα οποία σχετίζονται με τη διαδικασία των μετρήσεων. Όταν ένας σταθμός (συνήθως το AP) ζητά από έναν άλλο σταθμό μια μέτρηση, πρέπει να χρησιμοποιήσει ένα πλαίσιο αίτησης μέτρησης περιγράφοντας το χρόνο που πρέπει να αρχίσει η μέτρηση, τη συχνότητα, τη διάρκεια και το είδος της μέτρησης. Αυτό το πλαίσιο μπορεί να σταλεί προς ένα συγκεκριμένο σταθμό, προς περισσότερους από έναν ή προς όλους τους σταθμούς του κελιού. Ο σταθμός που λαμβάνει την αίτηση, αφού ολοκληρώσει τις μετρήσεις, στέλνει τα αποτελέσματα στον πρώτο σταθμό μέσω του πλαισίου αναφοράς μέτρησης. Ένας σταθμός που ανιχνεύει έναν κύριο χρήστη (ραντάρ) θα ειδοποιήσει αυτόματα το AP του κελιού του στέλνοντας ένα πλαίσιο αναφοράς μέτρησης.

Μετρήσεις

Υπάρχουν τριών ειδών μετρήσεις που ένας σταθμός μπορεί να κάνει σε ένα συγκεκριμένο κανάλι:

Βασική Μέτρηση (Basic Measurement)

Κατά τη διάρκεια της βασικής μέτρησης, ο σταθμός παρακολουθεί το μέσο, αναζητώντας τη μετάδοση πλαισίων που υποδεικνύουν την ύπαρξη άλλων ασύρματων συστημάτων στην ίδια συχνότητα. Κατά συνέπεια, η αναφορά για αυτή τη μέτρηση είναι μια περιγραφή της ύπαρξης των συστημάτων αυτών. Πιο συγκεκριμένα, η αναφορά αυτή μπορεί να περιέχει ένδειξη για την ύπαρξη ενός άλλου ασύρματου τοπικού δικτύου 802.11, ενός ασύρματου τοπικού δικτύου άλλης τεχνολογίας όπως το Hiperlan ή ενός κύριου χρήστη (ραντάρ). Εναλλακτικά, ο σταθμός μπορεί να ενημερώσει για την ύπαρξη μιας άγνωστης συσκευής, εάν ανιχνεύει στο κανάλι μεταδόσεις, αλλά δεν μπορεί να χαρακτηρίσει το σύστημα από το οποίο προέρχονται.

Μέτρηση Αποτίμησης της Καθαρότητας του Καναλιού (Clear Channel Assessment measurement, CCA)

Κατά τη διάρκεια αυτής της μέτρησης, ο σταθμός παρακολουθεί το μέσο, μετρώντας το χρονικό διάστημα που το κανάλι ήταν απασχολημένο κατά τη διάρκεια της περιόδου μέτρησης. Η αναφορά για αυτήν την μέτρηση περιέχει την αναλογία αυτή.

Μέτρηση Αναφοράς Ένδειξης Ισχύος Λαμβανόμενου Σήματος (Received Signal Strength Report Indication, measurement, RSSRI)

Κατά τη διάρκεια του τρίτου είδους μέτρησης, ο σταθμός παρακολουθεί το μέσο, μετρώντας τα χρονικά διαστήματα κατά τη διάρκεια των οποίων λαμβάνει σήμα με ισχύ μέσα σε προκαθορισμένα όρια. Αυτά τα όρια καθορίζονται στον πίνακα 1.4 και παράγουν 8 κατηγορίες ισχύος σημάτων. Η αναφορά για αυτήν

Κατηγορία RSSRI	Ισχύς που παρατηρείται στην κεραία (dBm)	Ανοχή (dBm)
0	Ισχύς < -87	+5
1	-87 < Ισχύς ≤ -82	±5
2	-82 < Ισχύς ≤ -77	±5
3	-77 < Ισχύς ≤ -72	±5
4	-72 < Ισχύς ≤ -67	±5
5	-67 < Ισχύς ≤ -62	±5
6	-62 < Ισχύς ≤ -57	±5
7	-57 < Ισχύς	-5

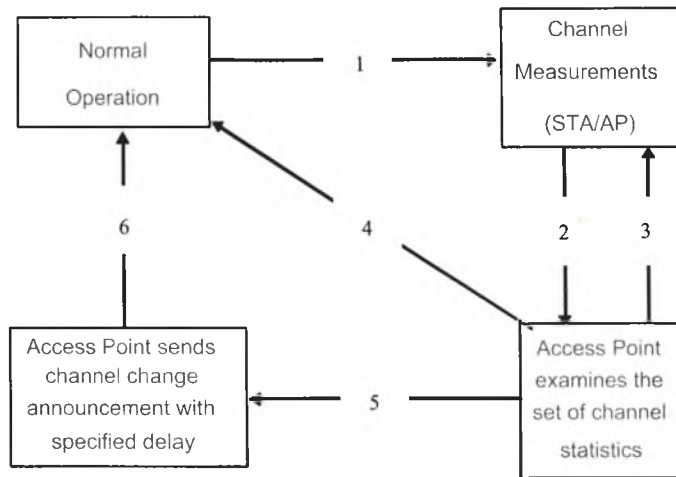
Πίνακας 1.4: Κατηγορίες RSSRI

την μέτρηση περιέχει τις πυκνότητες RSSRI για τις οκτώ κατηγορίες. Η πυκνότητα RSSRI για μια κατηγορία ορίζεται ως η κλασματική περίοδος κατά την οποία ο σταθμός λαμβάνει σήματα με επίπεδο ισχύος μεταξύ των αντίστοιχων ορίων για τη συγκεκριμένη κατηγορία, προς τη διάρκεια της περιόδου μέτρησης.

Επιλογή καναλιού

Κάτω από το πλαίσιο του 802.11h, ένα AP, εκτός των κλασικών λειτουργιών που πρέπει να εκτελεί ως συντονιστής της κυκλοφορίας του κελιού, έχει και μια επιπλέον υποχρέωση. Είναι υπεύθυνο για την μετακίνηση του κελιού σε ένα νέο κανάλι λειτουργίας, εάν κρίνει ότι το τρέχον κανάλι δεν είναι κατάλληλο για λειτουργία. Οι λόγοι για τους οποίους ένα AP θα πάρει μια τέτοια απόφαση μπορεί να είναι διάφοροι. Δύο παραδείγματα είναι η λήψη μιας αναφοράς από κάποιο σταθμό του κελιού η οποία βεβαιώνει την ύπαρξη ενός κύριου χρήστη, ή το γεγονός ότι το AP αντιλαμβάνεται ότι το κανάλι στο οποίο το κελί λειτουργεί είναι πολύ φορτωμένο σε σχέση με κάποιο άλλο διαθέσιμο. Για να είναι η όλη διαδικασία αποδοτική, πρέπει το AP να ζητά συχνά μετρήσεις από τους σταθμούς του κελιού, ώστε να είναι ενήμερο για την κατάσταση τόσο του καναλιού λειτουργίας όσο και άλλων υποψηφίων για μετακίνηση καναλιών. Η συχνότητα και το είδος των μετρήσεων, καθώς επίσης και ο τρόπος της επιλογής των υποψηφίων καναλιών δεν καθορίζονται από το πρότυπο.

Όταν το AP αποφασίζει για τη μετακίνηση του κελιού, πρέπει να ενημερώσει για την απόφαση τους σταθμούς του κελιού του. Έτσι μεταδίδει προς όλες τις κατευθύνσεις το γεγονός μέσω ενός νέου στοιχείου πληροφορίας (information element) που προστίθεται στα πλαίσια Χαιρετισμού (Beacons), υποδεικνύοντας το νέο κανάλι λειτουργίας καθώς επίσης και τη χρονική στιγμή της μετακίνησης. Η στιγμή αυτή καθορίζεται από έναν μετρητή αντίστροφης μέτρησης που μετράει αντίστροφα τις περιόδους πλαισίων Χαιρετισμού (beacon intervals) που πρέπει να περάσουν



Σχήμα 1.24: Το λειτουργικό διάγραμμα της δυναμικής επιλογής συχνότητας

για να γίνει η μετακίνηση. Αυτή η ενημέρωση συνεχίζεται σε κάθε πλαίσιο Χαιρετισμού, έως ότου ο μετρητής φτάσει στο μηδέν, και έτσι οι σταθμοί μεταπηδήσουν στο νέο κανάλι. Το λειτουργικό διάγραμμα για την απόφαση της δυναμικής επιλογής συχνότητας απεικονίζεται στο σχήμα 1.24.

Παροχή Ποιότητας Υπηρεσιών στα Ασύρματα Δίκτυα 802.11e

2.1 Απαίτηση Ποιότητας Υπηρεσιών στα Ασύρματα Δίκτυα 802.11

Καθώς το Διαδίκτυο γίνεται στις μέρες μας ολοένα και περισσότερο δημοφιλές, υπάρχει μια σαφής τάση για την αντικατάσταση της τελικής ενσύρματης σύνδεσης μεταξύ του δικτύου και του χρήστη με μια αντίστοιχη ασύρματη σύνδεση. Αυτή η τάση γίνεται σιγά, σιγά καθολική απαίτηση, δεδομένου ότι η ασύρματη πρόσβαση σε ένα δίκτυο συγκεντρώνει πολλά πλεονεκτήματα, με σημαντικότερο από αυτά, την δυνατότητα κινητικότητας του χρήστη. Μέχρι τώρα, αυτή η αντικατάσταση δεν ήταν εύκολη, μιας και από τη μια, η ασύρματη σύνδεση ήταν πάρα πολύ αργή σε σχέση με την αντίστοιχη ενσύρματη και από την άλλη, ο εξοπλισμός ήταν αρκετά ακριβός. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας, τα ασύρματα τοπικά δίκτυα αναβαθμίζουν τις ταχύτητές τους ενώ οι τιμές τους συνεχώς πέφτουν, δημιουργώντας έτσι κατάλληλες συνθήκες για χρήση ασύρματων συνδέσεων στα τοπικά δίκτυα.

Η εκρηκτική διάδοση των ασύρματων τοπικών δικτύων, καθώς επίσης και η βελτίωση των ρυθμών μετάδοσης, ενδεικτικά αναφέρουμε ότι το IEEE 802.11a παρέχει ρυθμούς μετάδοσης μέχρι και 54 Mbps, δημιουργούν μια αυξανόμενη ανάγκη για παροχή Ποιότητας Υπηρεσίας (QoS) σε τέτοια συστήματα. Οι παραδοσιακές υπηρεσίες Καλύτερης Προσπάθειας (Best Effort services) πρέπει να αντικατασταθούν με πιο πολύπλοκες υπηρεσίες, που παρέχουν εγγυήσεις σε μια ευρεία γκάμα χαρακτηριστικών ποιότητας υπηρεσίας. Τέτοια χαρακτηριστικά είναι το εύρος ζώνης, η καθυστέρηση, η διαφοροποίηση στους χρόνους παράδοσης (jitter) των πακέτων κ.α. Λόγο της ανάγκης για μετάδοση διαφόρων μορφών πληροφορίας όπως δεδομένα, φωνή, εικόνα και βίντεο, δημιουργείται η ανάγκη για διαφοροποίηση στην παροχή ποιότητας υπηρεσίας, μιας και διαφορετικές μορφές πληροφορίας έχουν διαφορετικές απαιτήσεις στις αναφερθείσες ιδιότητες. Έτσι λοιπόν, ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο πρέπει να παρέχει λειτουργίες υποστήριξης αυτών των ειδών πληροφορίας, με διαφορετικές απαιτήσεις και διαφορετικές προ-

τεραιότητες και να δίνει εγγυήσεις για την ποιότητα υπηρεσίας, επιλύοντας ζητήματα δικαιοσύνης που προκύπτουν μεταξύ των ασύρματων χρηστών. Η διευθέτηση των προβλημάτων αυτών δεν είναι τετριμμένη και αποτελεί μια σοβαρή ερευνητική πρόκληση.

Το IEEE 802.11 είναι το δημοφιλέστερο πρότυπο ασύρματων τοπικών δικτύων. Σκοπός του, όπως αναφέραμε, είναι να καθορίσει τη λειτουργία του Φυσικού Στρώματος (PHY) καθώς και του στρώματος Πολλαπλής Πρόσβασης (MAC) σε τέτοιου είδους δίκτυα. Στην προσπάθεια του να παρέχει ποιότητα υπηρεσιών, το 802.11 χρησιμοποιεί την λειτουργία PCF, κατά την οποία το AP αποφασίζει για το πότε ο κάθε σταθμός του κελιού θα έχει πρόσβαση στο ασύρματο μέσο. Είναι γνωστό ότι η παροχή ποιότητας υπηρεσιών μέσω της PCF είναι ελλιπής, λόγω του ότι το σχήμα είναι αρκετά στατικό και δεν μπορεί να παρέχει προκαθορισμένο QoS. Για το λόγο αυτό συντάχθηκε η ομάδα Εργασίας (Task Group) του 802.11 με το όνομα e (TGe). Η ομάδα αυτή μελετάει τρόπους για να ενισχύσει το MAC πρωτόκολλο του 802.11 προς την κατεύθυνση της υποστήριξης της παροχής ποιότητας υπηρεσιών. Η ομάδα TGe έχει προσθέσει διάφορα νέα χαρακτηριστικά γνωρίσματα στο MAC πρωτόκολλο του 802.11 προκειμένου να επιτραπεί η υποστήριξη υπηρεσιών με διαφορετικές απαιτήσεις, τα οποία περιγράφηκαν με λεπτομέρεια στο κεφάλαιο 1.

Η αρμόδια οντότητα για την παροχή ποιότητας υπηρεσιών στα ασύρματα δίκτυα είναι ο Χρονοδρομολογητής (Time Scheduler) [PPVM97], [FSS98], [SG00], [AP02], ο οποίος βρίσκεται στο AP ενός ασυρμάτου δικτύου με υποδομή. Η κύρια ευθύνη του χρονοδρομολογητή είναι η διαχείριση της πρόσβασης των χρηστών στο ασύρματο μέσο. Ένας άλλος στόχος, είναι να παροχή δίκαιης κατανομής των πόρων στους χρήστες. Σε αυτό το κεφάλαιο, αρχικά θα περιγράψουμε τα λειτουργικά χαρακτηριστικά που πρέπει να έχει ένας χρονοδρομολογητής που λειτουργεί σε ένα 802.11e ασύρματο δίκτυο και ο στόχος του είναι η παροχή ποιότητας υπηρεσιών στους κινητούς χρήστες ενός κελιού. Κατόπιν θα προτείνουμε έναν αλγόριθμο λειτουργίας ενός χρονοδρομολογητή που παρέχει εγγυήσεις ποιότητας υπηρεσίας και συμμορφώνεται με τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του 802.11e. Ο χρονοπρογραμματιστής λαμβάνει υπόψη του την κατάσταση του ασύρματου καναλιού στους σταθμούς. Κατ' αυτό τον τρόπο χρησιμοποιεί το κανάλι αποτελεσματικά. Ο αλγόριθμός μας λαμβάνει υπόψη του την προθεσμία μετάδοσης (deadline) του κάθε πακέτου και ο στόχος του είναι να διατηρήσει τα οφέλη σχεδιασμού που παρέχονται από τους ήδη υπάρχοντες στη βιβλιογραφία χρονοδρομολογητές για ασύρματα δίκτυα, ενώ παράλληλα να ακολουθεί τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του 802.11e. Αν και έχει γίνει πολλή δουλειά πρόσφατα σχετικά με τον σχεδιασμό χρονοδρομολογητών και την ενσωμάτωση σε αυτούς πληροφοριών σχετικά με την ποιότητα του

καναλιού, οι αλγόριθμοι που έχουν προταθεί στηρίζονται σε υποθέσεις, οι οποίες τους κάνουν μη υλοποιήσιμους σε ασύρματα δίκτυα που ακολουθούν το πρότυπο 802.11e. Ο αλγόριθμός μας είναι ο πρώτος που στηρίζεται αποκλειστικά στις διαθέσιμες πληροφορίες που παρέχονται από το 802.11e.

2.2 Το Πρωτόκολλο MAC του 802.11 και η Ποιότητα του Καναλιού

Όπως περιγράφουν πολλές μελέτες, τα χαρακτηριστικά λάθους στη μετάδοση του ασύρματου μέσου διαφέρουν σημαντικά από αυτό του ενσύρματου μέσου [BBKT96], [LBS99]. Οι απώλειες πακέτων στο ενσύρματο μέσο είναι πολύ σπάνιες και τυχαίες. Από την άλλη, τα λάθη στο ασύρματο μέσο είναι πολύ συχνότερα και συμβαίνουν κατά ριπές (bursty). Επίσης, ένα άλλο σημαντικό γνώρισμα του ασύρματου καναλιού που το διαφοροποιεί πολύ από το ενσύρματο, είναι το ότι στο ασύρματο μέσο, κάθε χρήστης βιώνει διαφορετική ποιότητα καναλιού, η οποία μάλιστα μεταβάλλεται με το χρόνο. Αυτός σημαίνει ότι κάθε χρήστης αντιλαμβάνεται διαφορετική παρεμβολή ανάλογα με τη θέση του, την απόστασή του από τον αποστολέα (στην περίπτωση μας το AP), το περιβάλλον του και την κινητικότητά του.

Είναι βασικό για ένα AP να ξέρει την ποιότητα καναλιού που βιώνει καθένας από τους σταθμούς του κελιού του, δεδομένου ότι αυτό θα επηρεάσει σημαντικά τις αποφάσεις που πρέπει να πάρει για να πετύχει αποδοτική και αξιόπιστη επικοινωνία με τους χρήστες. Μεταξύ των αποφάσεων αυτών, είναι η απόφαση του κατώτατου ορίου τεμαχισμού (Fragmentation Threshold) καθώς και η απόφαση του ρυθμού μετάδοσης κάθε πλαισίου. Και οι δύο αυτές αποφάσεις είναι δυναμικές και σχετίζονται άμεσα με την ποιότητα του καναλιού μεταξύ του αποστολέα και του παραλήπτη. Επιπλέον, η πληροφορία αυτή μπορεί να παίζει θεμελιώδη ρόλο στις αποφάσεις του χρονοδρομολογητή που λειτουργεί στο AP. Πιο συγκεκριμένα, εάν ο χρονοπρογραμματιστής έχει πληροφορία για την κατάσταση του καναλιού σε καθέναν από τους ασύρματους σταθμούς, θα εξυπηρετεί κάθε φορά τους σταθμούς εκείνους που έχουν "καλό" κανάλι, ακόμη κι αν μερικοί από τους σταθμούς που έχουν "κακό" κανάλι θα έπρεπε να δρομολογηθούν λόγω των απαιτήσεων τους σε ποιότητα υπηρεσίας. Λέγοντας "καλό" και "κακό" κανάλι εννοούμε το κανάλι που παρέχει αξιόπιστη και αναξιόπιστη επικοινωνία αντίστοιχα. Κατ' αυτό τον τρόπο το κανάλι χρησιμοποιείται αποτελεσματικά και η γενική ρυθμαπόδοση αυξάνεται.

Είναι γνωστό ότι το επίπεδο MAC του IEEE 802.11 δεν παρέχει κανένα μηχανισμό άντλησης πληροφοριών σχετικά με την ποιότητα του καναλιού. Δεν υπάρχει τρόπος ένας ασύρματος σταθμός (ή το AP) να πληροφορηθεί σχετικά με την κατάσταση του καναλιού στην περιοχή κάποιου άλλου σταθμού. Έτσι, το επίπεδο MAC του AP δεν έχει καμιά πληροφορία σχετικά με την κατάσταση του καναλιού σε κάθε έναν από τους σταθμούς του κελιού του. Ένας ασύρματος σταθμός μπορεί να συ-

γκεντρώσει μόνο με έμμεσο τρόπο τέτοιου είδους πληροφορία, μέσω του ποσοστού λαθών που βιώνει.

Όπως αναφέραμε στο κεφάλαιο 1, ένας από τους στόχους του προτύπου 802.11h είναι η παροχή ενός νέου πλαισίου λειτουργίας για την ανάπτυξη αλγορίθμων Ελέγχου της Ισχύος Μετάδοσης (Transmission Power Control, TPC). Μια από τις κύριες λειτουργίες του 802.11h είναι η επέκταση του MAC πρωτοκόλλου του 802.11, προκειμένου να υπάρχει η δυνατότητα ανταλλαγής πληροφοριών για την ποιότητα του καναλιού μεταξύ δύο σταθμών. Το σχήμα που προτείνεται είναι η ανταλλαγή δυο νέων πακέτων ελέγχου, του πακέτου Αίτησης TPC (TPC Request) και του πακέτου Αναφοράς TPC (TPC Report). Ο ενδιαφερόμενος σταθμός στέλνει σε κάποιον γείτονα το πακέτο αίτησης ζητώντας πληροφορίες για την κατάσταση του καναλιού στην περιοχή του γείτονα. Ο σταθμός που λαμβάνει το πακέτο αίτησης απαντά με ένα πακέτο αναφοράς στο οποίο περιλαμβάνονται πληροφορίες σχετικές με την ποιότητα του καναλιού στην περιοχή του. Η λεπτομερής περιγραφή του σχήματος αυτού γίνεται στην παράγραφο 1.6.

Αυτός ο μηχανισμός μπορεί να χρησιμοποιηθεί από το AP, προκειμένου να λαμβάνει περιοδικά πληροφορίες για την κατάσταση του καναλιού από τους σταθμούς με τους οποίους πρόκειται να επικοινωνήσει. Η συχνότητα με την οποία το AP θα ζητάει τις πληροφορίες αυτές από κάθε σταθμό, εξαρτάται από τον επιπλέον φόρτο που προστίθενται από την ανταλλαγή των δύο πακέτων ελέγχου και τη συχνότητα με την οποία το ασύρματο κανάλι αλλάζει κατάσταση. Δεδομένου ότι τα λάθη στο ασύρματο κανάλι συμβαίνουν κατά ριπές και η κατάσταση του καναλιού είναι συσχετιζόμενη με το χρόνο, οι αλλαγές στην κατάσταση είναι αργές. Επιπλέον, πρέπει να λάβουμε υπ' όψην μας ότι χρησιμοποιούμε την πληροφορία για την κατάσταση του καναλιού κατά το σχεδιασμό της χρονοδρομολόγησης, δηλαδή στην αρχή κάθε διαστήματος χρονοδρομολόγησης (scheduling interval). Ως εκ τούτου, μπορούμε να υποθέσουμε ότι το AP ζητά αυτές τις πληροφορίες στην αρχή του διαστήματος αυτού. Κατόπιν μπορεί να τις χρησιμοποιήσει στην απόφαση σχεδιασμού, όπως περιγράφουμε παρακάτω. Αξίζει να σημειωθεί ότι το AP μέσω του μηχανισμού αυτού και λόγω της περιορισμένης γνώσης των δυναμικών χαρακτηριστικών του ασύρματου καναλιού, κάνει μόνο προσεγγιστική εκτίμηση της ποιότητας του καναλιού.

2.3 Παρέχοντας Ποιότητα Υπηρεσιών στο 802.11e

Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν εμφανιστεί πολλές εργασίες που μελετούν την παροχή ποιότητας υπηρεσιών σε ενσύρματα δίκτυα [DKS90], [KKK90], [PG93], [SVC97]. Πιο πρόσφατα, προτάθηκαν μέθοδοι που μελετάνε το σχεδιασμό συστημάτων παροχής υπηρεσιών σε ασύρματο περιβάλλον. Η αναφορά [BBKT96]

προτείνει χρονοδρομολόγηση στο ασύρματο κανάλι, βασισμένη στην κατάσταση του καναλιού. Το AP παρακολουθεί την ποιότητα των συνδέσεων για τους διάφορους χρήστες με σκοπό να αποφύγει τη μετάδοση κατά τη διάρκεια εξασθένησης (fade) του σήματος. Στην [LBS99] μελετάται η δίκαιη χρονοδρομολόγηση για ροές δεδομένων (traffic flows) ευαίσθητων στην καθυστέρηση και στο ρυθμό μετάδοσης. Οι συγγραφείς θεωρούν λάθη καναλιού κατά ριπές και χωρητικότητα καναλιού εξαρτώμενη από τη θέση στο χώρο και προτείνουν μια παραλλαγή του μοντέλου fair fluid queue model για την εφαρμογή του στο ασύρματο περιβάλλον.

Η αναφορά [SG00] παρουσιάζει μια αρχιτεκτονική χρονοδρομολόγησης που στηρίζεται στη δίκαιη αναμονή, όπου το επίπεδο πολλαπλής πρόσβασης, το επίπεδο σύνδεσης και το επίπεδο δικτύου βελτιστοποιούνται για να πετύχουν την επιθυμητή ποιότητα υπηρεσίας. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός φυσικού επιπέδου πολλαπλών διαδρομών (multipath), πολλαπλών ρυθμών (multirate) βασισμένο στην τεχνική CDMA. Η εργασία [PPVM97] προτείνει έναν αλγόριθμο χρονοδρομολόγησης για ATM ασύρματα τοπικά δίκτυα. Ο αλγόριθμος στηρίζεται στον υπολογισμό της προθεσμίας μετάδοσης (deadline) του κάθε πακέτου και στην προσπάθεια μετάδοσης του πριν την εκπνοή της προθεσμίας αυτής. Τέλος, η εργασία [AP02] μελετά το πρόβλημα της χρονοδρομολόγησης αιτήσεων ποιότητας υπηρεσίας (QoS) όταν η χωρητικότητα του καναλιού μεταξύ του AP και των σταθμών ποικίλλει με το χρόνο λόγω εξασθένησης (fading). Μεταξύ των βασικών αποτελεσμάτων της είναι το ότι ένας απλός άπληστος (greedy) αλγόριθμος έχει απόδοση τουλάχιστον ίση με τον βέλτιστο αλγόριθμο που εκτελείται πριν τη διαδικασία (offline) και γνωρίζει όλες τις μελλοντικές καταστάσεις του καναλιού καθώς επίσης και τις μελλοντικές αιτήσεις.

Το πρόβλημα χρονοδρομολόγησης στη λειτουργία PCF του 802.11 είναι εύκολο, δεδομένου ότι ο χρονοδρομολογητής έχει την ευθύνη να καλεί προς μετάδοση (poll) τους σταθμούς τον ένα μετά τον άλλο. Αντίθετα, το πρόβλημα χρονοδρομολόγησης και παροχής ποιότητας υπηρεσίας στο 802.11e είναι αρκετά περίπλοκο. Υπάρχουν πολλά θέματα που πρέπει να αντιμετωπισθούν, καθώς επίσης και πολλές αποφάσεις που πρέπει να ληφθούν. Αυτά τα θέματα σχετίζονται με τη διατήρηση των χαρακτηριστικών κυκλοφορίας (traffic characteristics) που έχουν συμφωνηθεί μέσω της προσυμφωνημένης σύμβασης (Traffic Specification) για κάθε ρεύμα δεδομένων.

Ο χρονοδρομολογητής κυκλοφορίας στο 802.11e βρίσκεται στο HC (Hybrid Coordinator) ενός QBSS (Quality of Service Basic Service Set) και ο στόχος του είναι να προγραμματίζει την πρόσβαση στο κανάλι των διαφόρων ρευμάτων δεδομένων [KT02]. Αυτή η διαδικασία πρέπει να υλοποιηθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να παρέχει τις προδιαγραφές ποιότητας υπηρεσίας που έχουν συμφωνηθεί μέσω του ορισμού της κάθε ροής δεδομένων. Ένα άλλο κύριο μέλημα του χρονοδρομο-

λογητή, είναι να δεσμεύσει τον κατάλληλο χρόνο για τη μετάδοση των πλαισίων Χαιρετισμού (Beacons) καθώς επίσης και να καθορίσει τα χρονικά διαστήματα στα οποία θα λάβει χώρα η EDCF. Με άλλα λόγια, ο χρονοδρομολογητής καθορίζει πώς θα διαμοιραστεί το μέσο μεταξύ HCF και DCF καθώς επίσης και πώς η περίοδος HCF θα μοιραστεί στους διάφορους σταθμούς για τις uplink ή downlink μεταδόσεις τους. Ένας αποδοτικός χρονοδρομολογητής κυκλοφορίας πρέπει να διαμοιράσει το χρόνο με τέτοιο τρόπο, ώστε να διατηρήσει τη συμφωνημένη ποιότητα υπηρεσίας στα είδη εγκατεστημένα ρεύματα δεδομένων και συγχρόνως να πετύχει υψηλή χρησιμοποίηση του καναλιού.

Ο μηχανισμός ελέγχου αποδοχής συνδέσεων (Admission Control) είναι μια βασική λειτουργία στα ασύρματα δίκτυα. Αυτός ο μηχανισμός είναι υπεύθυνος για την εγκατάσταση συγκεκριμένου αριθμού ρευμάτων δεδομένων, τόσων ώστε ο χρονοδρομολογητής να μπορεί να χειριστεί αποδοτικά τις ανάγκες τους σε εύρος ζώνης. Η λειτουργία του μηχανισμού αυτού δεν είναι τετριμμένο πρόβλημα και χρειάζεται πολλή συζήτηση λόγω της ιδιαίτερης φύσης του ασύρματου μέσου. Στη συνέχεια της περιγραφής μας, θα υποθέσουμε ότι υπάρχει ένας αποδοτικός μηχανισμός ελέγχου αποδοχής συνδέσεων, έτσι ώστε ο χρονοδρομολογητής να είναι σε θέση να χειριστεί την κυκλοφορία του QBSS.

Σε ένα ασύρματο δίκτυο, η χρονοδρομολόγηση της uplink κυκλοφορίας είναι δυσκολότερη από αυτή της downlink [LBS99]. Αυτό συμβαίνει επειδή ο χρονοδρομολογητής που βρίσκεται στο AP έχει περιορισμένη γνώση για την άφιξη των πακέτων στα uplink ρεύματα. Το πρόβλημα είναι πιο περίπλοκο στο 802.11e όπου η πληροφορία για την ποσότητα των δεδομένων που βρίσκεται σε αναμονή για μετάδοση, μετρείται σε αριθμό ψηφιολέξεων (bytes) αντί σε αριθμό πακέτων. Το γεγονός αυτό, σε συνάρτηση με το μεταβλητό μήκος των πακέτων που είναι χαρακτηριστικό γνώρισμα του 802.11 δημιουργεί την ανάγκη μετατροπής της έκφρασης της ποσότητας των αποθηκευμένων δεδομένων από ψηφιολέξεις σε πακέτα.

Ένα άλλο πρόβλημα που πρέπει να εξεταστεί από το χρονοδρομολογητή για τα uplink ρεύματα είναι ο χρόνος άφιξης κάθε πακέτου στο επίπεδο MAC των σταθμών. Ο χρόνος αυτός είναι άγνωστος στο AP, αλλά πρέπει να υπολογιστεί προκειμένου να δοθεί στο χρονοδρομολογητή η αρχή του χρονικού διαστήματος κατά το οποίο το πακέτο μπορεί να παραμείνει στη ουρά του σταθμού πριν τη λήξη της προθεσμίας του (deadline) και οπότε την απόρριψή του. Τέλος, για τη σωστή κατανομή του χρόνου ο χρονοδρομολογητής πρέπει να υπολογίσει για τα uplink ρεύματα το όριο κατακερματισμού τους (fragmentation threshold), το ρυθμό μετάδοσης κάθε πακέτου και άλλα ανάλογα χαρακτηριστικά. Για το λόγο αυτό, στο σχεδιασμό που θα κάνουμε θα δώσουμε ιδιαίτερη σημασία στη δρομολόγηση της uplink κίνησης.

Βασισμένοι στην προηγούμενη περιγραφή, θα μελετήσουμε τα κύρια ζητήματα που ο χρονοδρομολογητής πρέπει να λάβει υπόψη του για την αποδοτική λειτουργία του δικτύου. Καταρχήν, ο χρονοδρομολογητής πρέπει να καθορίσει το διάστημα χρονοδρομολόγησης (scheduling interval). Αυτό σημαίνει ότι ο σχεδιαστής πρέπει να αποφασίσει για τις χρονικές στιγμές κατά τις οποίες θα ενεργοποιείται ο χρονοδρομολογητής και θα καθορίζει το διαμοιρασμό του μέσου για το επικείμενο διάστημα προγραμματισμού. Το διάστημα αυτό μπορεί να είναι σταθερό ή μεταβλητό.

Ένα άλλο σημαντικό ζήτημα για το χρονοδρομολογητή, είναι η δέσμευση ενός χρονικού διαστήματος για τη μετάδοση κάθε πακέτου δεδομένων για κάθε TS (Traffic Stream). Πιο συγκεκριμένα, πρέπει να καθορίσει τη διάρκεια του TXOP (Transmission Opportunity) που θα διαθέσει σε κάθε σταθμό. Αυτή είναι μια περίπλοκη διαδικασία και ο χρονοδρομολογητής πρέπει να λειτουργήσει βασισμένος στις ακόλουθες αρχές:

- Πρέπει να αποφασίσει για τη χρονική στιγμή κατά την οποία θα παράγει το TXOP για κάθε πακέτο. Αυτή μπορεί να υπολογιστεί ως το τέλος του ενδιαμέσου χρόνου μεταξύ δυο γεννήσεων πακέτων για το συγκεκριμένο ρεύμα κυκλοφορίας ή ως η κρίσιμη στιγμή για τη σωστή μετάδοση του πλαισίου που είναι η στιγμή αμέσως πριν τη λήξη της προθεσμίας του πλαισίου. Η ιδέα είναι ότι η μετάδοση κάθε πλαισίου πρέπει να πραγματοποιηθεί πριν από τη λήξη του χρόνου αναμονής του πακέτου στην ουρά του σταθμού.
- Πρέπει να αποφασίσει το μήκος του κάθε TXOP. Αυτό δεν είναι εύκολο, δεδομένου ότι ο χρονοδρομολογητής πρέπει να λάβει υπόψη το μήκος των πακέτων δεδομένων, το ρυθμό μετάδοσης, το επιπλέον overhead, τον απαραίτητο χρόνο μεταξύ των πλαισίων (SIFS), τον κατακερματισμό και άλλες απαραίτητες λειτουργίες (π.χ. τον τρόπο μετάδοσης του Ack μετά από κάθε πακέτο δεδομένων). Η απόφαση γίνεται δυσκολότερη καθώς μερικά από τα προηγούμενα χαρακτηριστικά (μήκος πακέτων, ρυθμοί μετάδοσης, όριο κατακερματισμού κ.λπ.) δεν είναι γνωστά στο HC, οπότε πρέπει να γίνουν προσεγγίσεις.
- Πρέπει να παρέχει ένα μηχανισμό που θα παρακολουθεί το εύρος ζώνης που έχει καταναλώσει κάθε TS και να αποφασίζει μέσω αυτής της πληροφορίας ποια από τα TS έχουν κάνει "υπερβολική" χρήση του μέσου. Εάν το εύρος ζώνης που απαιτείται υπερβαίνει το διαθέσιμο εύρος ζώνης, ο χρονοδρομολογητής θα απορρίψει αιτήματα των σταθμών που έχουν κάνει "υπερβολική" χρήση του μέσου, δεδομένου ότι έχουν καταναλώσει περισσότερο εύρος ζώ-

νης από όσο δικαιούνται. Κατ' αυτό τον τρόπο ο χρονοδρομολογητής έχει δίκαιη συμπεριφορά έναντι όλων των σταθμών του κελιού του.

- Πρέπει να ελαχιστοποιήσει, κατά το δυνατό, τα επαναλαμβανόμενα πλαίσια QoS-Poll, που στέλνει στους σταθμούς, με σκοπό να τους ενημερώσει για τη δυνατότητα μετάδοσης (TXOP) που τους δίνεται.
- Πρέπει να λάβει υπόψη του τις αναμεταδόσεις και το overhead των στρωμάτων MAC και PHY. Για το λόγο αυτό πρέπει να δεσμεύει ένα επιπλέον ποσό χρόνου για κάθε TS, ανάλογο των αναγκών αυτών
- Πρέπει να λάβει υπόψη του την κατάσταση του καναλιού σε κάθε ασύρματο σταθμό.

Τα προηγούμενα θέματα παίζουν καθοριστικό ρόλο στην σωστή λειτουργία του χρονοδρομολογητή. Ο σχεδιασμός που δεν θα λάβει υπόψη του ένα από τα σημεία αυτά, μπορεί να οδηγήσει σε μη αποδοτική κατανομή του ασύρματου μέσου στους σταθμούς με συνέπεια την αδυναμία παροχής της προκαθορισμένης ποιότητας υπηρεσιών.

2.4 Ο Αλγόριθμος Χρονοδρομολόγησης

Στην προηγούμενη παράγραφο συνοψίσαμε τους κανόνες που πρέπει να ακολουθηθούν στο σχεδιασμό ενός χρονοδρομολογητή που παρέχει ποιότητα υπηρεσιών στους σταθμούς ενός ασύρματου 802.11e δικτύου. Δεδομένου ότι το 802.11e είναι ένα νέο πρότυπο, δεν υπάρχει μέχρι στιγμής καμία πρόταση στη βιβλιογραφία για χρονοδρομολογητή που συμμορφώνεται με το πρότυπο αυτό. Στην παράγραφο αυτή θα περιγράψουμε έναν αλγόριθμο χρονοδρομολόγησης [KT05] που ακολουθεί τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του προτύπου 802.11e. Ο αλγόριθμος αυτός είναι εμπνευσμένος από τον χρονοδρομολογητή που προτείνεται στην [PPVM97] για την ATM ασύρματη τεχνολογία και έχει σχεδιαστεί υπό την καθοδήγηση των προηγούμενων κανόνων, επιλύοντας τα προαναφερθέντα προβλήματα με αποδοτικό τρόπο.

Για κάθε ρεύμα δεδομένων ο χρονοδρομολογητής πρέπει να διατηρήσει δύο ουρές αναμονής:

Ουρά αιτημάτων: Ο χρονοδρομολογητής προσπαθεί να δρομολογήσει τη μετάδοση των uplink και των downlink συνδέσεων, βασιζόμενος στα χαρακτηριστικά και τις απαιτήσεις της ποιότητας υπηρεσίας, καθώς επίσης και στις τρέχουσες ανάγκες εύρους ζώνης των συνδέσεων. Τα χαρακτηριστικά κυκλοφορίας της κάθε σύνδεσης γίνονται γνωστά στο HC στη φάση καθορισμού της σύνδεσης (Traffic Specification).

Οι τρέχουσες ανάγκες κάθε TS εκφράζονται από το ποσό δεδομένων που περιμένει στις ουρές αναμονής των TS για μετάδοση.

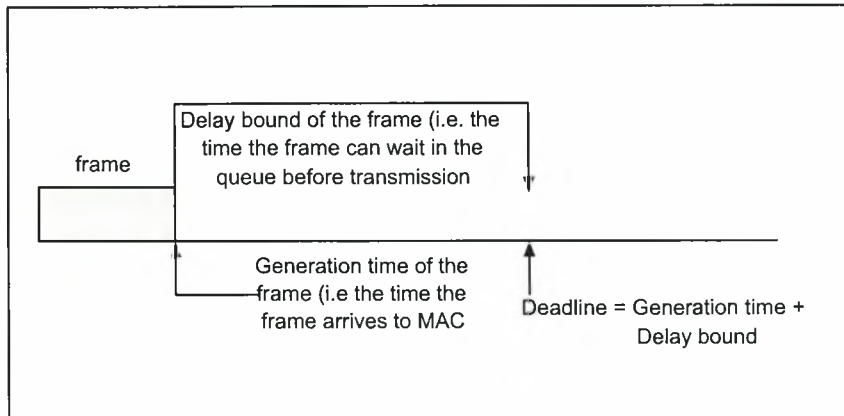
Για τις downlink συνδέσεις η πληροφορία αυτή είναι γνωστή στο HC σε πραγματικό χρόνο, μιας και η αντίστοιχη κυκλοφορία βρίσκεται σε αναμονή στις ουρές του HC πριν μεταδοθεί στους σταθμούς. Αντίθετα, το ποσό κυκλοφορίας που βρίσκεται στις ουρές των σταθμών δεν γίνεται γνωστό σε πραγματικό χρόνο στο HC. Η λήψη αυτής της πληροφορίας από το HC γίνεται έμμεσα, με τη μεταφορά της μέσω των πακέτων δεδομένων που οι σταθμοί στέλνουν στο HC. Καθένα από τα πακέτα αυτά περιέχει στην επικεφαλίδα του το ποσό των δεδομένων που αναμένει για μετάδοση στην ουρά της αντίστοιχης TS στο σταθμό. Με τη λήψη της πληροφορίας αυτής, το HC ενημερώνει κατάλληλα τις ουρές αιτημάτων που διατηρεί για τις uplink συνδέσεις.

Εικονική Ουρά: Ο χρονοδρομολογητής πρέπει να έχει έναν μηχανισμό που θα εξετάζει τη συμπεριφορά των ροών κυκλοφορίας και θα ελέγχει τα αιτήματα των συνδέσεων που υπερβαίνουν τις προκαθορισμένες απαιτήσεις τους. Αυτός είναι ο ρόλος της εικονικής ουράς. Ο χρονοδρομολογητής διαθέτει μια γεννήτρια εικονικής κυκλοφορίας η οποία παράγει δεδομένα με τα προκαθορισμένα χαρακτηριστικά για κάθε ρεύμα κυκλοφορίας. Αυτός σημαίνει ότι η γεννήτρια, για κάθε εγκατεστημένη σύνδεση (TS), θα παράγει ένα πακέτο μήκους ίσο με το μέσο μέγεθος πακέτου, με συχνότητα που είναι προκαθορισμένη, ακολουθώντας το μέσο ρυθμό μετάδοσης της συγκεκριμένης σύνδεσης. Τα πακέτα αυτά αποθηκεύονται στην εικονική ουρά της συγκεκριμένης σύνδεσης και αποτελούν το προκαθορισμένο ποσό κυκλοφορίας που πρέπει να δρομολογηθεί για αυτό το ρεύμα κυκλοφορίας. Κάθε φορά που δρομολογείται από το χρονοδρομολογητή ένα ποσό δεδομένων από την ουρά αιτημάτων, ένα ίσο ποσό δεδομένων αφαιρείται από την αντίστοιχη εικονική ουρά. Κατ' αυτό τον τρόπο, κάθε χρονική στιγμή, η κατάσταση της εικονικής ουράς δίνει μια ένδειξη του ποσοστού εύρους ζώνης που η αντίστοιχη σύνδεση έχει καταναλώσει σε σχέση με το προσυμφωνημένο.

2.4.1 Χρονοδρομολόγηση με Βάση την Προθεσμία (Deadline) του Πακέτου

Παρότι η πληροφορία για τον όγκο δεδομένων που βρίσκονται αποθηκευμένα στις ουρές αναμονής των σταθμών είναι εκφρασμένη σε αριθμό ψηφιολέξεων (bites), ο χρονοδρομολογητής που προτείνουμε έχει σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να διαχειρίζεται πακέτα. Αυτός σημαίνει ότι οι ουρές αναμονής και ο μηχανισμός δέσμευσης χρόνου για μετάδοση, χειρίζονται την κυκλοφορία κάθε σύνδεσης υπό τη μορφή πακέτων. Τίθεται λοιπόν το θέμα του μετασχηματισμού και ομαδοποίησης των δεδομένων (που είναι εκφρασμένα σε ψηφιολέξεις) σε πακέτα.

Όπως ξέρουμε, το HC ενημερώνεται για τον όγκο δεδομένων που περιμένουν



Σχήμα 2.1: Ο ορισμός της προθεσμίας για ένα πακέτο

στις ουρές αναμονής των σταθμών με έμμεσο τρόπο, σε μη πραγματικό χρόνο. Κάθε φορά που το HC ενημερώνεται για τον αριθμό ψηφιολέξεων που περιμένει για μετάδοση σε ένα σταθμό, για μια συγκεκριμένη σύνδεση, μετασχηματίζει το αίτημα αυτό σε αριθμό πακέτων, διαιρώντας το ποσό των δεδομένων με το μέσο μήκος πακέτου για αυτή τη σύνδεση και έπειτα ενημερώνει την αντίστοιχη ουρά αιτημάτων.

Προθεσμίες πακέτων: Ο χρονοδρομολογητής που προτείνουμε λειτουργεί λαμβάνοντας υπόψη τη λήξη της προθεσμίας κάθε πακέτου. Ο κύριος παράγοντας που καθορίζει τη χρονική στιγμή στην οποία θα γίνει η δέσμευση του χρόνου για τη μετάδοση ενός πακέτου, είναι ο χρόνος αναμονής του πακέτου στην ουρά του σταθμού. Όπως έχουμε πει, οι κύριοι στόχοι του χρονοδρομολογητή είναι η παροχή προσυμφωνημένων απαιτήσεων QoS στους σταθμούς, καθώς και η υψηλή χρησιμοποίηση του εύρους ζώνης. Για το λόγο αυτό, ο χρονοδρομολογητής προσπαθεί να δρομολογήσει κάθε πακέτο, ακριβώς πριν τη λήξη της προθεσμίας του. Ως προθεσμία ορίζουμε τη χρονική στιγμή που το πακέτο φθάνει στο επίπεδο MAC του σταθμού, συν την καθυστέρηση (delay) που επιτρέπεται να έχει το πακέτο αυτό, η οποία έχει ήδη καθοριστεί με τον καθορισμό των απαιτήσεων (Traffic Specification) της αντίστοιχης σύνδεσης. Όπως έχουμε αναφέρει, ως καθυστέρηση ορίζεται ο χρόνος που ένα πακέτο μπορεί να περιμένει στη ουρά αναμονής του MAC επιπέδου ενός σταθμού. Εάν το πακέτο μείνει στην ουρά περισσότερο από το χρόνο αυτό, είναι άχρηστο και πρέπει να απορριφθεί από το σταθμό. Έτσι, ως χρόνο λήξης της προθεσμίας ορίζουμε την τελευταία στιγμή κατά την οποία το πακέτο μπορεί να μεταδοθεί, πριν γίνει άχρηστο και απορριφθεί από το σταθμό (σχήμα 2.1).

Η τιμή της επιτρεπόμενης καθυστέρησης για κάθε σύνδεση είναι διαθέσιμη

στο HC μέσω της διαδικασίας καθορισμού των χαρακτηριστικών της στη φάση της εγκατάστασης της. Έτσι, για τον υπολογισμό της λήξης της προθεσμίας κάθε πακέτου, ο χρονοδρομολογητής πρέπει να ξέρει το χρόνο άφιξης του στο επίπεδο MAC. Λόγω της θέσης του χρονοδρομολογητή (στο HC), ο χρόνος άφιξης των πακέτων των ρευμάτων των downlink συνδέσεων είναι γνωστός μιας και αυτά φτάνουν και αποθηκεύονται στο επίπεδο MAC του HC. Έτσι ο χρονοδρομολογητής ορίζει ως προθεσμία σε αυτά τα πακέτα τον χρόνο άφιξης τους στο HC, συν την επιτρεπόμενη καθυστέρηση της σύνδεσης στην οποία ανήκουν.

Η διαδικασία αυτή είναι διαφορετική για τις uplink συνδέσεις. Μιας και τα πακέτα των uplink συνδέσεων αποθηκεύονται προς μετάδοση στο MAC των σταθμών, ο χρονοδρομολογητής πρέπει να παρέχει έναν μηχανισμό για να υπολογίσει το χρόνο άφιξης τους εκεί. Ο υπολογισμός αυτός γίνεται προσεγγιστικά, θεωρώντας πάντα τη χειρότερη περίπτωση. Όπως έχουμε πει, το HC ενημερώνεται για το ποσό των δεδομένων που αποθηκεύονται στις ουρές αναμονής κάθε σταθμού, μέσω της επικεφαλίδας των πακέτων που λαμβάνει από αυτόν. Στην περιγραφή που ακολουθεί θα χρησιμοποιήσουμε τους ακόλουθους συμβολισμούς:

f_i^M, f_{i+1}^M : Δύο διαδοχικά πακέτα δεδομένων μιας συγκεκριμένης σύνδεσης M που μέσω των επικεφαλίδων τους ενημερώνουν το HC για την κατάσταση της ουράς της συγκεκριμένης σύνδεσης στο σταθμό.

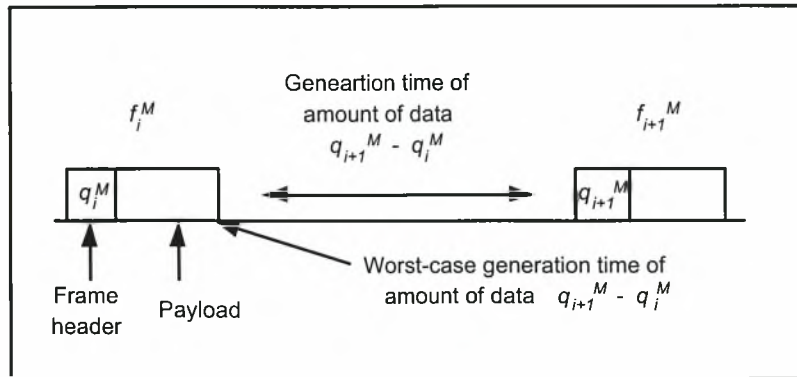
q_i^M : Το ποσό δεδομένων στην ουρά της σύνδεσης M που περιγράφεται από το πλαίσιο f_i^M .

Για την ποσότητα δεδομένων $q_{i+1}^M - q_i^M$, θεωρούμε ότι ο χρόνος παραγωγής της (ή άφιξης της στο MAC) είναι, στην χειρότερη περίπτωση, ίσος με το χρόνο παραγωγής του πρώτου πλαισίου f_i^M . Αυτό φαίνεται στο σχήμα 2.2. Το HC γνωρίζοντας το χρόνο άφιξης του πακέτου f_i^M και την καθυστέρηση της αντίστοιχης σύνδεσης μπορεί να προσεγγίσει τον χρόνο παραγωγής του ως εξής:

Χρόνος παραγωγής + καθυστέρηση + χρόνος μετάδοσης = χρόνος της άφιξης αυτού του πλαισίου στο HC

Στην προηγούμενη ισότητα ο χρόνος μετάδοσης μπορεί να θεωρηθεί αμελητέος.

Μετά από την προσέγγιση του χρόνου παραγωγής των δεδομένων, μετατρέπουμε τα δεδομένα αυτά σε πακέτα, μέσω του μηχανισμού που περιγράψαμε στην προηγούμενη παράγραφο και ορίζουμε για αυτά ως προθεσμία τον κατά προσέγγιση υπολογισμένο χρόνο παραγωγής τους, συν την επιτρεπόμενη καθυστέρηση της αντίστοιχης σύνδεσης.



Σχήμα 2.2: Ο κατά προσέγγιση υπολογισμός του χρόνου δημιουργίας των uplink πακέτων

2.4.2 Οι Προτεραιότητες στη Χρονοδρομολόγηση

Ένα κύριο θέμα που πρέπει να αντιμετωπίσει ο χρονοδρομολογητής, είναι η προτεραιότητα με την οποία θα εξυπηρετήσει τις διάφορες συνδέσεις. Υπάρχουν δύο κατηγορίες συνδέσεων: Περιοδικές και μη περιοδικές. Οι περιοδικές συνδέσεις έχουν υψηλότερη προτεραιότητα έναντι των μη περιοδικών. Αυτό συμβαίνει επειδή οι περιοδικές συνδέσεις έχουν αυστηρούς περιορισμούς στα χαρακτηριστικά κίνησης τους και στους χρόνους παράδοσης των πακέτων τους, αφού η παράδοση των πακέτων μετά από τον προκαθορισμένο χρόνο είναι άχρηστη. Έτσι σχεδιάζουμε το χρονοδρομολογητή με τέτοιο τρόπο ώστε να δεσμεύει χρόνο στο ασύρματο μέσο πρώτα για τις περιοδικές συνδέσεις και έπειτα για τις μη περιοδικές συνδέσεις.

Είναι προφανές ότι μπορούμε να έχουμε περισσότερες από μια συνδέσεις της ίδιας κατηγορίας (περιοδικές ή όχι). Σε αυτήν την περίπτωση ο χρονοδρομολογητής θα εξυπηρετήσει πρώτα την σύνδεση με την μεγαλύτερη εικονική ουρά, κανονικοποιημένη με τον προκαθορισμένο μέσο ρυθμό μετάδοσης της σύνδεσης. Αυτό σημαίνει ότι η σύνδεση με τη μεγαλύτερη κανονικοποιημένη εικονική ουρά έχει καταναλώσει λιγότερο εύρος ζώνης σε σχέση με αυτό που δικαιούται, και έχει έτσι υψηλότερη προτεραιότητα έναντι των άλλων. Όταν ένα πακέτο δρομολογείται προς μετάδοση, αφαιρείται από την εικονική ουρά της αντίστοιχης σύνδεσης.

2.4.3 Η Διαδικασία της Χρονοδρομολόγησης

Στις επόμενες παραγράφους θα περιγράψουμε τον αλγόριθμο που χρησιμοποιείται από το χρονοδρομολογητή που προτείνουμε, για τη δέσμευση του κατάλληλου χρονικού διαστήματος για την πρόσβαση κάθε σταθμού στο ασύρματο μέσο. Ο προτεινόμενος χρονοδρομολογητής δεσμεύει χρόνο για κάθε σύνδεση, αλλά όπως γνωρίζουμε το 802.51e λειτουργεί με τη φιλοσοφία της δέσμευσης χρόνου ανά σταθμό.

Για το λόγο αυτό ο χρονοδρομολογητής αποφασίζει για το διαμοιρασμό του μέσου ανά σύνδεση και έπειτα μετασχηματίζει αυτό το χρονοδιάγραμμα αντιστοιχώντας το χρόνο κάθε σύνδεσης σε χρόνο του αντίστοιχου σταθμού.

Για την υλοποίηση του χρονοδρομολογητή μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε οποιαδήποτε μέγεθος για το διάστημα χρονοδρομολόγησης (scheduling interval), σταθερό ή μεταβλητό. Στις επόμενες παραγράφους υιοθετούμε ένα σταθερό διάστημα προγραμματισμού. Είναι προφανές ότι για αυτό το διάστημα προγραμματισμού ο χρονοδρομολογητής πρέπει να διαθέσει χρόνο για τις μεταδόσεις των σταθμών στην περίοδο HCF και να αφήσει και ένα χρονικό διάστημα για την υλοποίηση της EDCF.

2.4.4 Ο Καθορισμός του Χρόνου που Χρειάζεται η Μετάδοση ενός Πακέτου

όπως έχουμε αναφέρει, βασικό μέλημα του χρονοδρομολογητή είναι να δεσμεύσει τον κατάλληλο χρόνο για τη μετάδοση κάθε πακέτου. Με τον όρο "κατάλληλο χρόνο", εννοούμε το χρόνο που απαιτείται για τη μετάδοση του πλαισίου σύμφωνα με τους κανόνες που καθορίζει το 802.61e. Εάν δεν λάβουμε υπόψη ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά του 802.11, μπορεί να οδηγηθούμε στην εκχώρηση χρόνου για τη δρομολόγηση ενός πακέτου με τέτοιο τρόπο, ώστε αυτός να μην είναι αρκετός για την επιτυχή και ολοκληρωμένη μετάδοση του.

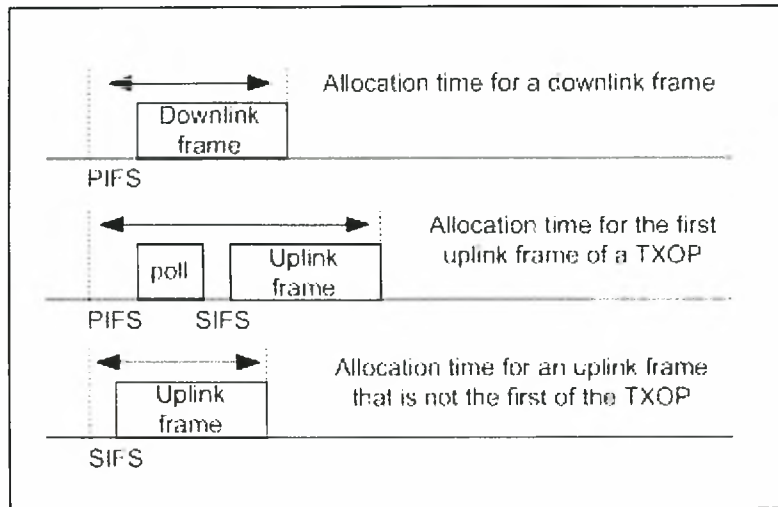
Ας συμβολίσουμε με $T(f_i^M)$ το χρόνο που απαιτείται για τη μετάδοση του ισοστού πλαισίου της σύνδεσης M στο ασύρματο μέσο. Τότε:

$$T(f_i^M) = \text{μήκος πακέτου} / \text{ρυθμό μετάδοσης}$$

Το μήκος των downlink πλαισίων είναι γνωστό. Για τα uplink πλαίσια ως μήκος πακέτου χρησιμοποιείται το μέσο μήκος πακέτου της αντίστοιχης σύνδεσης.

Προφανώς, ο ρυθμός μετάδοσης για τα downlink πλαίσια είναι επίσης γνωστός καθώς η απόφαση για τον καθορισμό του λαμβάνεται τοπικά στο MAC επίπεδο του HC. Για τα uplink πλαίσια, το HC μπορεί να χρησιμοποιήσει το ρυθμό μετάδοσης που ο σταθμός χρησιμοποίησε στην προηγούμενη μετάδοσή του. Μια άλλη εναλλακτική λύση είναι ο υπολογισμός του ρυθμού μετάδοσης που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί από κάποιο σταθμό, μέσω της εκτέλεσης από το HC του ίδιου αλγορίθμου [QC01], [QCSS02], με αυτόν που χρησιμοποιεί ο σταθμός για τον υπολογισμό της τιμής αυτής. Μέσω του αλγορίθμου αυτού το HC μαθαίνει για το ρυθμό μετάδοσης που ο σταθμός θα χρησιμοποιήσει λαμβάνοντας υπόψη την κατάσταση του καναλιού στο σταθμό, πληροφορία που λαμβάνεται από το HC μέσω ανταλλαγής πακέτων ελέγχου που το 802.81h καθορίζει.

Με τον ένα ή τον άλλο τρόπο, το HC γνωρίζει ή μπορεί να υπολογίσει το χρόνο μετάδοσης $T(f_i^M)$ για κάθε πλαίσιο. Δυστυχώς, αυτός ο χρόνος δεν είναι



Σχήμα 2.3: Χρόνος που χρειάζεται να δεσμευτεί για διαφόρων ειδών πακέτα

αρκετός για την ολοκληρωμένη μετάδοση ενός πακέτου. Υπάρχουν μερικές ειδικές λειτουργίες του 702.11e που έχουν επιπτώσεις στο χρόνο που πρέπει να δεσμευτεί για την επιτυχή, ολοκληρωμένη μετάδοση ενός πακέτου:

Είδος Πακέτου

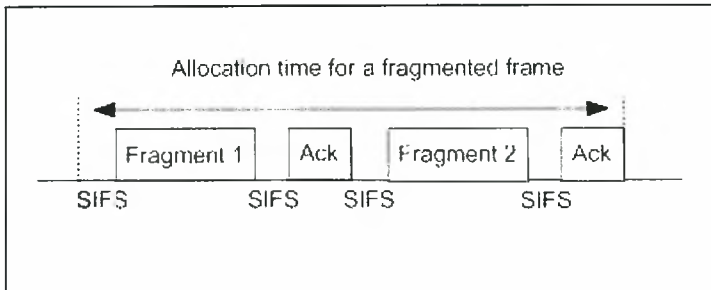
Κάθε πακέτο πρέπει να μεταδοθεί, ανάλογα με το είδος του, σύμφωνα με τον τρόπο που το HC καθορίζει. Έτσι, ο χρονοδρομολογητής πρέπει να δεσμεύσει περισσότερο από το χρόνο που χρειάζεται για την άμεση μετάδοση του πακέτου, ανάλογα με το είδος του πακέτου (σχήμα 2.3).

Διαδικασία Επιβεβαίωσης (Acknowledgement)

Ένα άλλο χαρακτηριστικό που πρέπει να ληφθεί υπόψη, είναι η χρήση του Ack πακέτου ως αναγνώριση μιας επιτυχούς μετάδοσης. Εάν αυτή η λειτουργία χρησιμοποιείται από μια συγκεκριμένη σύνδεση (πράγμα που δηλώνεται κατά τον καθορισμό των χαρακτηριστικών της σύνδεσης), ο χρονοδρομολογητής πρέπει να δεσμεύσει επιπλέον χρόνο για τη μετάδοση του Ack (συν ένα SIFS).

Διαδικασία Κατακερματισμού (Fragmentation)

Όπως γνωρίζουμε το 802.11 (οπότε και το 802.31e) διαθέτει την λειτουργία του κατακερματισμού. Ο χρονοδρομολογητής πρέπει να λάβει υπόψη του αυτό το χαρακτηριστικό και να δεσμεύσει τον ανάλογο χρόνο, εάν το πλαίσιο είναι κατακερματισμένο (σχήμα 2.4) ή όχι (σχήμα 2.3).



Σχήμα 2.4: Χρόνος που χρειάζεται να δεσμευτεί στην περίπτωση χρήσης κατακερματισμού

Το αν θα χρησιμοποιηθεί η λειτουργία αυτή, εξαρτάται από το κατώτατο όριο κατακερματισμού (Fragmentation Threshold) κάθε σταθμού, μια παράμετρος που δεν είναι γνωστή στο HC. Το HC μπορεί λοιπόν να κάνει μια προσέγγιση της τιμής αυτής χρησιμοποιώντας το κατώτατο όριο κατακερματισμού που ο σταθμός χρησιμοποίησε στην προηγούμενη μετάδοσή του. Μια άλλη εναλλακτική λύση είναι ο υπολογισμός του ορίου αυτού, εκτελώντας τον ίδιο αλγόριθμο που ο σταθμός εκτελεί για τον καθορισμό του. Αυτό μπορεί να γίνει με την προσέγγιση από το HC της ποιότητας του καναλιού στο σταθμό, μέσω της πληροφορίας πληροφορίας που λαμβάνει με την ανταλλαγή νέων πακέτων ελέγχου που το 802.11h καθορίζει.

2.4.5 Ο Αλγόριθμος Εκχώρησης Χρόνου

Μετά από αυτούς τους υπολογισμούς και τις προσεγγίσεις, ο χρονοδρομολογητής πρέπει να εκχωρήσει χρόνο στην κάθε σύμβαση. Ο αλγόριθμος εκχώρησης είναι ο εξής:

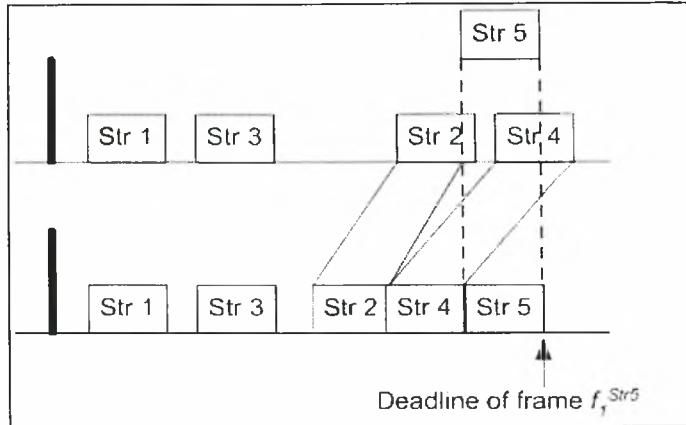
Βήμα 1: Εξέταση της κατάστασης του καναλιού σε κάθε σταθμό

Ο χρονοδρομολογητής αποκλείει όλες τις συνδέσεις που ανήκουν σε σταθμούς που έχουν "κακό" κανάλι. Ο χρονοδρομολογητής αφήνει ως έχουν τις ουρές αιτημάτων και τις εικονικές ουρές των συνδέσεων αυτών. Έτσι, διατηρούν την προτεραιότητά τους μόλις αλλάξει η κατάσταση του καναλιού τους από "κακό" σε "καλό".

Βήμα 2: Εκχώρηση χρόνου στις συνδέσεις

Μεταξύ των συνδέσεων που βιώνουν "καλό" κανάλι, ο χρονοδρομολογητής επιλέγει να εξυπηρετήσει μια, σύμφωνα με τους κανόνες που περιγράψαμε παραπάνω. Πρώτα εξυπηρετούνται οι περιοδικές συνδέσεις ακολουθούμενες από τις μη περιοδικές. Μεταξύ των συνδέσεων της ίδιας κατηγορίας επιλέγεται εκείνη με τη μεγαλύτερη κανονικοποιημένη εικονική ουρά.

Όταν επιλέγεται η προς εξυπηρέτηση ουρά, ο χρονοδρομολογητής καθορίζει το Κατάλληλο Διάστημα Μετάδοσης (Appropriate Transmission Time, ATT) του



Σχήμα 2.5: Η εκχώρηση στην περίπτωση 1

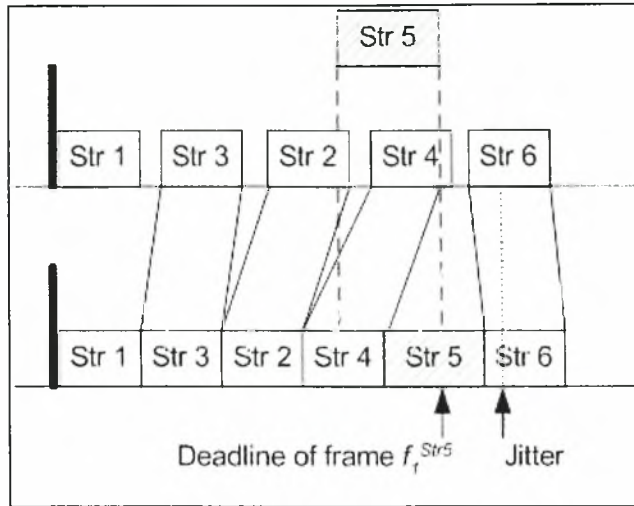
πρώτου πακέτου της ουράς αιτημάτων της σύνδεσης, με τον τρόπο που περιγράφεται στην προηγούμενη παράγραφο. Κατόπιν, προσπαθεί να δεσμεύσει χρόνο ίσο με αυτό το διάστημα όσο κοντά στην προθεσμία αυτού του πακέτου μπορεί. Εξετάζουμε δύο περιπτώσεις:

Περίπτωση 1: Υπάρχει αρκετός χρόνος στο διάστημα μεταξύ της έναρξης του χρονοδιαγράμματος και της προθεσμίας του συγκεκριμένου πακέτου για την δέσμευση του ΑΤΤ αυτού του πακέτου. Τότε, οι εκχωρήσεις αυτού του διαστήματος μετατοπίζονται προς τα αριστερά, αρχίζοντας από αυτές που βρίσκονται στην δεξιά πλευρά του διαστήματος, έως ότου δημιουργηθεί ελεύθερο διάστημα μήκους ίσου με το ΑΤΤ ακριβώς πριν την προθεσμία του πακέτου. Αυτή η διαδικασία φαίνεται στο σχήμα 2.5.

Περίπτωση 2: Δεν υπάρχει αρκετός χρόνος στο διάστημα μεταξύ της έναρξης του χρονοδιαγράμματος και της προθεσμίας του συγκεκριμένου πακέτου για την δέσμευση του ΑΤΤ αυτού του πακέτου.

Τότε η εκχώρηση θα γίνει στη δεξιά πλευρά της προθεσμίας, αν και μόνο αν εξασφαλίζεται ότι η καθυστέρηση που εισάγεται για το τρέχον πακέτο και για τα πακέτα που επηρεάζονται από την εκχώρηση αυτή είναι μικρότερη από το άθροισμα της προθεσμίας τους συν το jitter του αντίστοιχου ρεύματος.

Σε αυτήν την περίπτωση ο αλγόριθμος είναι ο ακόλουθος: Μετατόπισε προς τα αριστερά όλες τις εκχωρήσεις πριν από (και αυτή που βρίσκεται ακριβώς επάνω) στην προθεσμία του πακέτου που εκχωρείται. Εξετάστε εάν η εκχώρηση του ΑΤΤ του εν λόγω πακέτου στα διάστημα που αρχίζει ακριβώς μετά από την τελευταία μετατοπισμένη εκχώρηση παραβιάζει την προθεσμία επαυξημένη με το χρόνο jitter για αυτό το πακέτο.



Σχήμα 2.6: Η εκχώρηση στην περίπτωση 2

Εάν όχι, μετατόπισε κατάλληλα τις εκχωρήσεις που χρειάζεται προς τα δεξιά, εφόσον και αυτές δεν υπερβαίνουν την προθεσμία τους επαυξημένη με το jitter τους.

Εάν κάτι από τα προηγούμενα δεν ισχύει, σταμάτα τη διαδικασία.

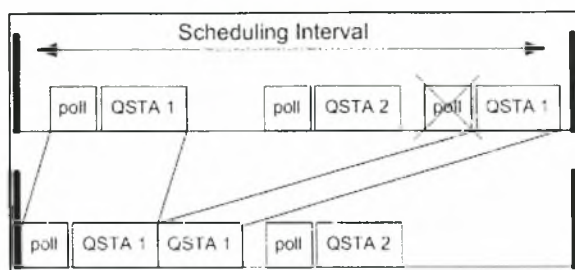
Ολόκληρος ο μηχανισμός φαίνεται στο σχήμα 2.6.

Βήμα 3: Ενοποίηση εκχωρήσεων του ίδιου σταθμού

Αρχίζοντας από τα αριστερά προς τα δεξιά, ο χρονοδρομολογητής εξετάζει όλο το διάστημα χρονοδρομολόγησης. Εάν βρει δύο εκχωρήσεις για συνδέσεις που ανήκουν στον ίδιο σταθμό (ίσως και στην ίδια σύνδεση) προσπαθεί να τις ενοποιήσει με τον ακόλουθο τρόπο. Εξετάζει εάν στη δεξιά πλευρά της αριστερής εκχώρησης υπάρχει αρκετός χώρος για να χωρέσει η δεξιά εκχώρηση. Αν ναι, ενοποιεί τις δυο εκχωρήσεις μετακινώντας την δεξιά αμέσως μετά την αριστερή. Με τον τρόπο αυτό παράγει ένα μεγαλύτερο TXOP για τον σταθμό. Αυτό θα γίνει μόνο εάν το μήκος του νέου TXOP δεν είναι μεγαλύτερο από το μέγιστο μήκος TXOP που καθορίζεται από τα 802.11e. Όταν η προηγούμενη διαδικασία πραγματοποιείται, η δεύτερη εκχώρηση μειώνεται κατά διάστημα ίσο με $T(\text{poll}) + SIFS$ δεδομένου ότι δεν υπάρχει πλέον ανάγκη για το 2ο poll πακέτο, λόγω του ότι το συνολικό TXOP εκχωρείται στο σταθμό από το πρώτο poll πακέτο. Έτσι μειώνεται το overhead ενός από τα δυο poll πακέτα, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η αποδοτικότητα του δικτύου. Η διαδικασία της ενοποίησης δυο εκχωρήσεων φαίνεται στο σχήμα 2.7.

Βήμα 4: Μετατόπιση όλων των TXOP προς τα αριστερά

Μετατόπισε όλα τα TXOP προς τα αριστερά, αφήνοντας το τέλος του διαστή-



Σχήμα 2.7: Ενοποίηση δυο εκχωρήσεων του ίδιου σταθμού

ματος χρονοδρομολόγησης για την περίοδο EDCF.

Η διαδικασία χρονοδρομολόγησης θα σταματήσει εάν τα πακέτα των ουρών αιτημάτων τελειώσουν ή εάν το υπολειπόμενο ελεύθερο χρονικό διάστημα γίνει ίσο με την ελάχιστη περίοδο EDCF όπως αυτή ορίζεται από το 402.11.

2.5 Μοντέλο και Αποτελέσματα Προσομοιώσεων

2.5.1 Μοντέλο Προσομοιώσεων

Για την μελέτη της απόδοσης του πρωτοκόλλου μας αναπτύξαμε έναν προσομοιωτή, η λειτουργία του οποίου οδηγείται από γεγονότα (even driven) και εκτελέσαμε προσομοιώσεις για διάφορα σενάρια. Κατά τις προσομοιώσεις μετράμε την απόδοση του προτεινόμενου χρονοδρομολογητή, μέσω της ποιότητας υπηρεσιών που προσφέρει σε περιβάλλοντα, όπου διάφοροι χρήστες διαθέτουν διάφορους τύπους συνδέσεων. Μετράμε την απώλεια των πακέτων, την καθυστέρηση και την κατανομή του εύρους ζώνης στις διάφορες συνδέσεις. Ως απώλεια πακέτων ορίζουμε τον αριθμό των πακέτων που πετιούνται από τις ουρές των σταθμών επειδή λήγει η προθεσμία τους. Η καθυστέρηση ορίζεται ως ο μέσος χρόνος που κάθε πακέτο παραμένει στο επίπεδο MAC από το χρόνο παραγωγής του μέχρι τη μετάδοσή του.

Δεδομένου ότι δεν υπάρχει κανένας άλλος προτεινόμενος αλγόριθμος χρονοδρομολόγησης για το 802.11e, συγκρίνουμε τον αλγόριθμό μας με έναν απλό χρονοδρομολογητή που κάνει στατική δρομολόγηση. Για το υπόλοιπο του κεφαλαίου θα αναφερόμαστε σε αυτόν τον χρονοδρομολογητή ως ο στατικός χρονοδρομολογητής. Ο στατικός χρονοδρομολογητής δίνει, σε κάθε διάστημα χρονοδρομολόγησης, ένα στατικό TXOP σε κάθε σταθμό, ανάλογο προς τις μέσες ανάγκες του σε ρυθμό μετάδοσης. Η χρονοδρομολόγηση που παράγεται από αυτές τις εκχωρήσεις, παραμένει σταθερή για ολόκληρο το χρόνο προσομοίωσης. Τα πακέτα των ουρών μεταδίδονται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης ακολουθώντας την FIFO διαδικασία.

Κατηγορία 1	Κατηγορία 2
Mean packet length: 1824 bytes Mean rate: 64 kbps Delay: 300ms	Mean packet length: 1024 bytes Mean rate: 128 kbps Delay: 100ms

Πίνακας 2.1: Τα χαρακτηριστικά της κίνησης των συνδέσεων που χρησιμοποιήθηκαν

Όπως θα δούμε, ο αλγόριθμός μας χειρίζεται αποτελεσματικότερα τις συνδέσεις σε σύγκριση με το στατικό χρονοδρομολογητή, λόγω του δυναμικού του χαρακτήρα και της δυνατότητάς του να προσαρμόζει το μέγεθος και τις στιγμές εμφάνισης των TXOP στις δυναμικές ανάγκες των σταθμών. Συγχρόνως, παρέχει με αποδοτικό τρόπο την απαραίτητη ποιότητα υπηρεσίας, εξυπηρετώντας όσο περισσότερες συνδέσεις μπορεί.

Στις προσομοιώσεις χρησιμοποιούμε περιοδικές καθώς και μη περιοδικές συνδέσεις. Οι αφίξεις των πακέτων στις περιοδικές συνδέσεις έχουν σταθερό ρυθμό. Στις μη περιοδικές συνδέσεις η άφιξη πακέτων ακολουθεί τη διαδικασία Poisson. Έχουμε χρησιμοποιήσει δύο κατηγορίες συνδέσεων. Τα χαρακτηριστικά κυκλοφορίας κάθε κατηγορίας απεικονίζονται στον πίνακα 2.1. Ο ρυθμός καναλιού που χρησιμοποιείται είναι 2Mbps. Κάθε προσομοίωση εκτελείται για 200 δευτερόλεπτα με μια περίοδο προθέρμανσης 50 δευτερολέπτων.

2.5.2 Μοντέλο Καναλιού

Υπάρχουν στη βιβλιογραφία πολλές μελέτες [FSS98], [BBKT96], [LBS99] που προτείνουν τη χρήση Μακροβιανών Μοντέλων Πεπερασμένων Καταστάσεων για να χαρακτηρίσουν τη συμπεριφορά του ασύρματου καναλιού. Στην [BBKT96] οι συγγραφείς προτείνουν τη χρήση ενός μακροβιανού μοντέλου δύο καταστάσεων (καλό - κακό) για να μοντελοποιήσουν το ασύρματο κανάλι. Στις προσομοιώσεις μας έχουμε υιοθετήσει ένα παρόμοιο πρότυπο. Σε οποιοδήποτε χρονική στιγμή, το κανάλι βρίσκεται σε μια από τις δυο δυνατές καταστάσεις, "καλό" ή "κακό". Υποθέτουμε ότι η πιθανότητα απώλειας πακέτων είναι πολύ μικρότερη στο "καλό" κανάλι σε σχέση με το "κακό" κανάλι. Γενικά, η μετάδοση ενός πακέτου είναι συνήθως επιτυχής, υπό τον όρο ότι το κανάλι θα παραμείνει σε "καλή" κατάσταση καθ'όλη τη διάρκεια της μετάδοσης του πακέτου. Χρησιμοποιώντας τις πληροφορίες που παρέχονται στο AP από τους σταθμούς για την κατάσταση του καναλιού, το AP αποφασίζει εάν η κατάσταση του καναλιού για καθένα σταθμό είναι "καλή" ή "κακή". Καθώς το AP λαμβάνει νέα πληροφορία για την κατάσταση του καναλιού του κάθε σταθμού στην αρχή του διαστήματος χρονοδρομολόγησης, υποθέτουμε ότι η κατάσταση παραμένει ίδια καθ'όλη τη διάρκεια της περιόδου αυτής.

Συμβολίζουμε με p_e την πιθανότητα ότι η κατάσταση του καναλιού στο επόμενο

διάστημα χρονοδρομολόγησης θα είναι "κακή", δεδομένου ότι είναι "καλή" στο τρέχον διάστημα και p_g την πιθανότητα ότι η κατάσταση του καναλιού στο επόμενο διάστημα θα είναι "καλή", δεδομένου ότι είναι "κακή" στο τρέχον διάστημα. Μετράμε την αποδοτικότητα του πρωτοκόλλου μας μεταβάλλοντας το p_e από 0 (κανάλι χωρίς κακή κατάσταση) σε 0.3.

Όπως έχουμε αναφέρει, οι απώλειες των πακέτων στο ασύρματο κανάλι συσχετίζονται, δηλαδή μια απώλεια πακέτου θα ακολουθείται από πολλές συνεχόμενες άλλες. Έτσι υπάρχει ένας συσχετισμός στο λάθος του καναλιού κατά τη διάρκεια του χρόνου.

Δεδομένου ότι η αλυσίδα Μαρκώβ που περιγράψαμε παραπάνω ξεκινάει από την "κακή" κατάσταση, θα ξοδευτεί σε αυτή χρόνος T που δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$E(T) = \frac{1}{p_g}$$

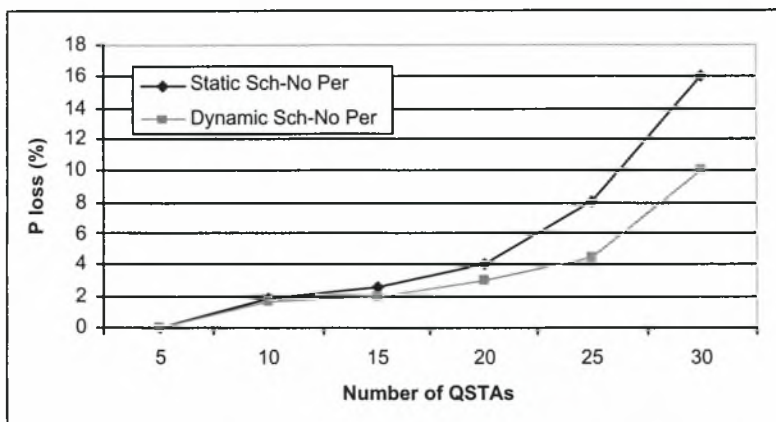
Για να παρουσιάσουμε αυτόν τον συσχετισμό στο λάθος του καναλιού στο χρόνο, κρατάμε σταθερό το p_g και ίσο σε 0.73. Με αυτή την τιμή, όταν ένας σταθμός βιώνει κακό κανάλι, θα παραμείνει σε αυτή την κατάσταση για ένα μέσο χρονικό διάστημα T ίσο με $3 * \text{διάστημα χρονοδρομολόγησης}$.

2.5.3 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων

Προσομοιώσεις με Τέλειο Κανάλι

Προκειμένου να δούμε την αποδοτικότητα του χρονοδρομολογητή μας όσον αφορά τον τρόπο που χειρίζεται τις απαιτήσεις σε ποιότητα υπηρεσιών των διαφορετικών συνδέσεων, κάναμε μερικές προσομοιώσεις με τέλειο κανάλι δηλ. με το κανάλι πάντα στην "καλή" κατάσταση. Κατ' αυτό τον τρόπο ο χρονοπρογραμματιστής δεν λαμβάνει υπόψη την κατάσταση του καναλιού σε κάθε σταθμό και επομένως, δεν αποκλείει καμιά σύνδεση από τη διαδικασία χρονοδρομολόγησης κατά τη διάρκεια του βήματος 1. Σε αυτές τις προσομοιώσεις χρησιμοποιήσαμε συνδέσεις της κατηγορίας 1.

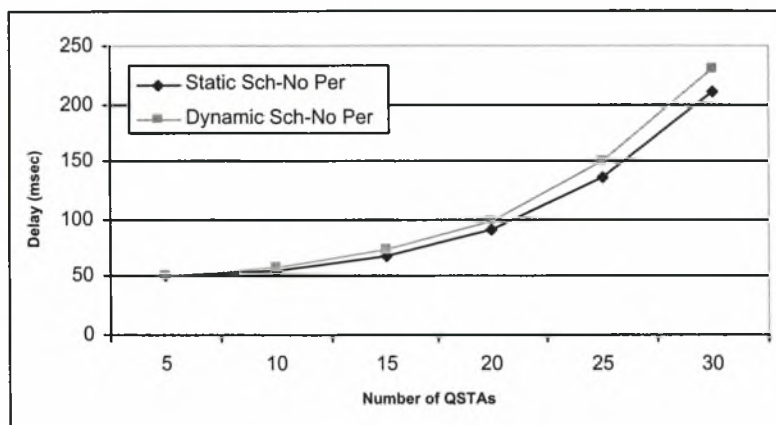
Για να συγκρίνουμε την αποδοτικότητα του προτεινόμενου αλγορίθμου με αυτήν του στατικού χρονοδρομολογητή που ορίσαμε στην προηγούμενη παράγραφο, εκτελούμε ένα πείραμα για κάθε χρονοδρομολογητή. Σε κάθε πείραμα μεταβάλλουμε τον αριθμό των σταθμών από 1 έως 30. Χρησιμοποιούμε μια μη περιοδική σύνδεση για κάθε σταθμό. Στο πρώτο πείραμα η δρομολόγηση γίνεται από το στατικό χρονοδρομολογητή, ενώ στο δεύτερο από τον προτεινόμενο χρονοδρομολογητή (τον οποίο καλούμε δυναμικό χρονοδρομολογητή). Μετράμε την απώλεια πακέτων καθώς επίσης και την καθυστέρηση των πακέτων.



Σχήμα 2.8: Ο ρυθμός απόρριψης πακέτων σε ένα σενάριο με 1 μη περιοδική σύνδεση για κάθε σταθμό, καθώς ο αριθμός των σταθμών αυξάνεται

Όπως μπορούμε να δούμε στο σχήμα 2.8 η απώλεια των πακέτων και στα δύο πειράματα αυξάνεται ανάλογα με το φόρτο κίνησης του δικτύου. Εντούτοις, σε συνθήκες υψηλής κίνησης, ο αλγόριθμός μας επιτυγχάνει χαμηλότερη απώλεια πακέτων. Το κέρδος αυτό αυξάνεται όσο αυξάνεται ο αριθμός των συνδέσεων συνδέσεων (περίπου 60% σε υψηλό φόρτο). Ο λόγος είναι ότι ο προτεινόμενος χρονοδρομολογητής εκμεταλλεύεται τη δυναμική φύση του και προβλέποντας τις προθεσμίες των πακέτων, κάνει αποδοτικότερη κατανομή, ικανοποιώντας ακριβώς τις ανάγκες κάθε σταθμού. Από την άλλη, ο στατικός χρονοδρομολογητής δεν μπορεί να χειριστεί με αποδοτικό τρόπο τα πακέτα των μη περιοδικών συνδέσεων καθώς η κίνηση αυξάνεται, επειδή δεν μπορεί να προβλέψει τους μη περιοδικούς χρόνους παραγωγής των πακέτων. Έτσι ενεργεί σαν να χειρίζεται περιοδικές συνδέσεις, οδηγώντας κάποια από τα πακέτα σε υπέρβαση της προθεσμίας τους και απόρριψή τους.

Αξίζει να αναφερθεί, ότι σε συνθήκες με σχετικά χαμηλό φορτίο (12 QSTAs) υπάρχει μια απώλεια πακέτων που δεν είναι αμελητέα και στα δύο πειράματα (ο χρονοδρομολογητής μας έχει χαμηλότερη τιμή σε σχέση με το στατικό). Θα εξηγήσουμε τη συμπεριφορά του αλγορίθμου μας σε αυτήν την περίπτωση: Ο προτεινόμενος χρονοδρομολογητής ενεργεί με αυτό τον τρόπο λόγω της προσέγγισης του χρόνου παραγωγής των πακέτων. Όπως έχουμε πει, στις μη περιοδικές συνδέσεις, υπάρχει μια εκθετική παραγωγή πακέτων. Για τις uplink συνδέσεις ο χρονοδρομολογητής δεν έχει άμεση πληροφορία για τον ακριβή χρόνο παραγωγής κάθε πακέτου, επομένως κάνει μια προσεγγιστική εκτίμηση όπως αυτή περιγράφηκε νωρίτερα. Κατά συνέπεια, όταν υπάρχει αρκετή κυκλοφορία, μερικά πακέτα απορ-

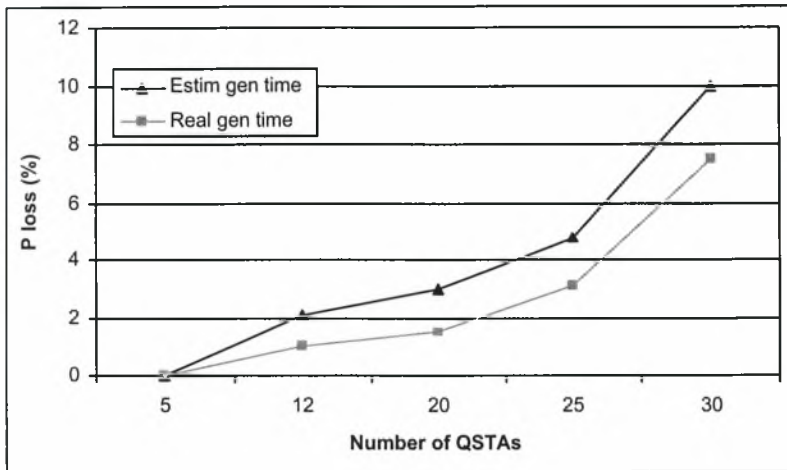


Σχήμα 2.9: Η καθυστέρηση σε ένα σενάριο με 1 μη περιοδική σύνδεση για κάθε σταθμό, καθώς ο αριθμός των σταθμών αυξάνεται

ρίπτονται, δεδομένου ότι η προσεγγιστική εκτίμηση αναγκάζει τον προσομοιωτή να δεσμεύσει χρόνο για καθένα από αυτά τα πακέτα πριν από την προθεσμία τους. Με τον τρόπο αυτό δεσμεύονται χρονικές περιόδους στις οποίες θα μπορούσαν να μεταδοθούν άλλα πακέτα, με πιο αυστηρές προθεσμίες. Τα πακέτα αυτά απορρίπτονται από τις ουρές τους, καθώς δεν μπορούν να μεταδοθούν πριν από τη λήξη της προθεσμίας τους.

Στο σχήμα 2.9 μπορούμε να δούμε την καθυστέρηση των πακέτων στο προηγούμενο σενάριο. Όπως παρατηρούμε, η καθυστέρηση αυξάνεται ανάλογα με την αύξηση της κυκλοφορίας και υπάρχει μια μικρή αύξηση στην καθυστέρηση του αλγορίθμου μας έναντι του στατικού. Αυτό είναι κάτι αναμενόμενο λόγω του ότι ο αλγόριθμός μας δεσμεύει χρόνο για κάθε πακέτο κοντά στην προθεσμία του. Αυτό σημαίνει ότι πρόθεση του αλγορίθμου μας είναι η μετάδοση κάθε πακέτου αμέσως πριν τη λήξη του, επικεντρώνοντας κατ' αυτό τον τρόπο τη λειτουργία του στην αποδοτική χρήση του μέσου. Έτσι, καθώς κάθε πακέτο μεταδίδεται κοντά στην προθεσμία του, βιώνει μεγαλύτερη καθυστέρηση έναντι της περίπτωσης όπου κάθε πακέτο μεταδίδεται με μια FIFO διαδικασία. Παρόλα αυτά, ο χρονοδρομολογητής μας, ακολουθώντας αυτή τη φιλοσοφία, είναι σε θέση να δρομολογήσει επιτυχώς περισσότερα πακέτα όπως φαίνεται στο σχήμα 2.8.

Μια εύλογη ερώτηση που προκύπτει εξετάζοντας το σχήμα 2.9 είναι η εξής: Γιατί υπάρχει αύξηση στην καθυστέρηση των πακέτων στην περίπτωση του χρονοδρομολογητή μας, καθώς η κυκλοφορία αυξάνεται, παρόλο που ο χρονοδρομολογητής δρομολογεί κάθε πακέτο κοντά στην προθεσμία του; (Κάποιος θα περίμενε να δει μια σταθερή καθυστέρηση, λόγο μικρότερη από την καθυστέρηση του επιπέ-

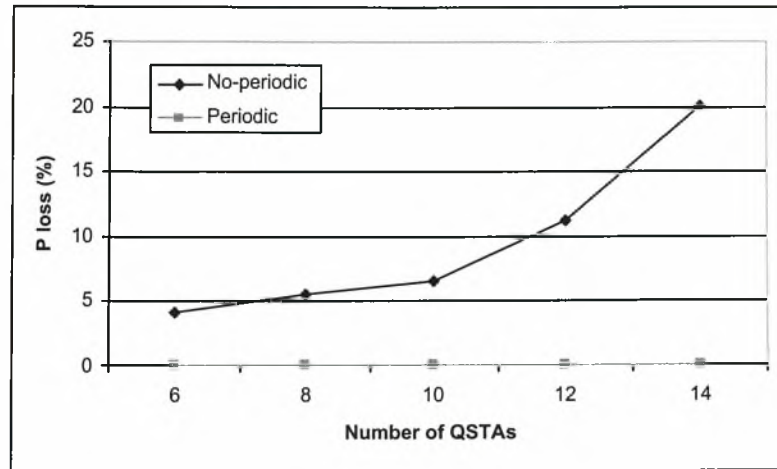


Σχήμα 2.10: Πως η προσεγγιστική εκτίμηση του χρόνου παραγωγής των πακέτων επηρεάζει το ρυθμός απώλειας πακέτων

δου MAC για κάθε σύνδεση). Το κλειδί στην απάντηση αυτής της ερώτησης, είναι το βήμα 4 του αλγορίθμου μας. Κατά τη διάρκεια αυτού του βήματος ο χρονοδρομολογητής "συσκευάζει" τις δεσμεύσεις χρόνου για κάθε σταθμό κοντά στην αρχή του διαστήματος χρονοδρομολόγησης, εφόσον υπάρχει ελεύθερος χρόνος. Το γεγονός αυτό αναγκάζει τα πακέτα να μεταδοθούν αρκετά πριν από την προθεσμία τους. Καθώς η κυκλοφορία αυξάνεται, όλο και περισσότερες δεσμεύσεις χρόνου θα πραγματοποιηθούν, με συνέπεια όλο και λιγότερες δεσμεύσεις να έχουν τη δυνατότητα να συσκευαστούν στα αριστερά. Έτσι η μετάδοση κάθε πακέτου οδηγείται κοντά στην αρχική εκχώρηση δηλαδή κοντά στη λήξη της προθεσμία του.

Το επόμενο σενάριο μετρά την επίδραση της προσεγγιστικής εκτίμησης του χρόνου παραγωγής των πακέτων για τις uplink συνδέσεις. Εκτελούμε δύο πειράματα. Σε κάθε πείραμα χρησιμοποιούμε μια μη περιοδική σύνδεση για κάθε σταθμό και μεταβάλλουμε τον αριθμό των σταθμών από 1 έως 30. Στο πρώτο πείραμα χρησιμοποιούμε την προσεγγιστική εκτίμηση του χρόνου παραγωγής των πακέτων, ενώ στο δεύτερο χρησιμοποιούμε τους πραγματικούς χρόνους παραγωγής. Πρέπει να αναφέρουμε ότι αυτή η πληροφορία δεν είναι διαθέσιμη στο χρονοδρομολογητή σε πραγματικό περιβάλλον. Δίνουμε αυτές τις πληροφορίες στο χρονοδρομολογητή στις προσομοιώσεις μας μόνο, ώστε να μελετήσουμε την επίδραση της εκτίμησης των χρόνων παραγωγής των πακέτων στη διαδικασία της δρομολόγησης. Τα αποτελέσματα των δύο πειραμάτων ως αναφορά την απώλεια πακέτων παρουσιάζονται στο σχήμα 2.10.

Όπως μπορούμε να δούμε στο σχήμα 2.10, η απώλεια πακέτων είναι υψηλό-



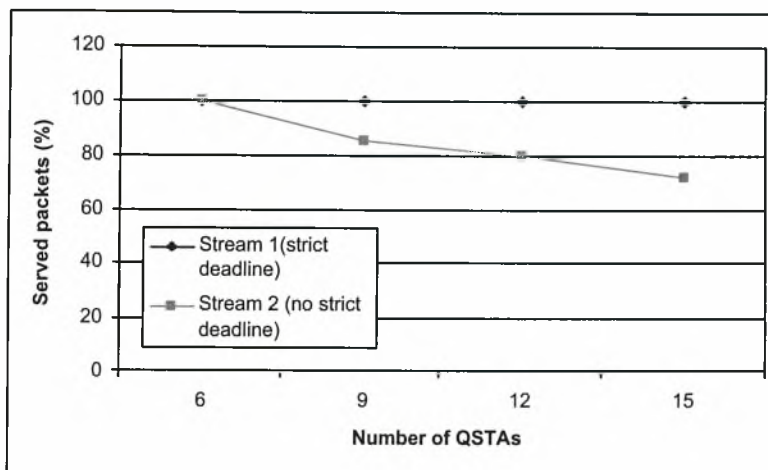
Σχήμα 2.11: Ο ρυθμός απόρριψης πακέτων σε ένα σενάριο με 2 συνδέσεις ανά σταθμό (μια περιοδική και μια μη περιοδική), καθώς ο αριθμός των σταθμών αυξάνεται

τερη στην περίπτωση της εκτίμησης των χρόνων παραγωγής. Αυτό είναι κάτι που αναμένεται καθώς ο χρονοδρομολογητής που ξέρει τους πραγματικούς χρόνους παραγωγής των πακέτων κάνει ακριβώς τη σωστή εκχώρηση για κάθε πακέτο. Από την άλλη, χρησιμοποιώντας την προσεγγιστική εκτίμηση, οι εκχωρήσεις γίνονται νωρίτερα από το ιδανικό, με συνέπεια την μεγαλύτερη απώλεια πακέτων καθώς το φορτίο αυξάνεται. Αυτό που αξίζει να τονίσουμε είναι ότι η αύξηση της απώλειας πακέτων δεν είναι πολύ υψηλή (περίπου 20% σε υψηλό φόρτο). Αυτό σημαίνει ότι η διαδικασία εκτίμησης συμπεριφέρεται καλά ως μέρος ολόκληρου του μηχανισμού και οδηγεί σε αποδοτικές εκχωρήσεις.

Στο τρίτο σενάριό μας μελετάμε τη συμπεριφορά του χρονοπρογραμματιστή όταν κάθε σταθμός διαθέτει δύο συνδέσεις, μια περιοδική και μια μη περιοδική. Μεταβάλλουμε τον αριθμό των σταθμών από 0 έως 14. Τα αποτελέσματα, ως αναφορά την απώλεια πακέτων, παρουσιάζονται στο σχήμα 2.11.

Όπως μπορούμε να δούμε στο σχήμα αυτό, οι περιοδικές συνδέσεις δεν χάνουν πακέτα. Από την άλλη, η απώλεια πακέτων των μη περιοδικών συνδέσεων έχει αυξηθεί σε σχέση με το προηγούμενο πείραμα. Αυτό συμβαίνει λόγω της ιδιότητας του χρονοδρομολογητή να δίνει προτεραιότητα στην εξυπηρέτηση των περιοδικών συνδέσεων έναντι των μη περιοδικών. Κατά συνέπεια, οι περιοδικές συνδέσεις "κλέβουν" χρόνο εκχώρησης από τις μη περιοδικές όταν έχουν πακέτα για μετάδοση.

Στο επόμενο πείραμά μας, μελετάμε την επίδραση της προθεσμίας των μη περιοδικών συνδέσεων στη συμπεριφορά του χρονοδρομολογητή. Χρησιμοποιούμε δύο μη περιοδικές συνδέσεις για κάθε σταθμό, μια με αυστηρή προθεσμία (300 ms) και



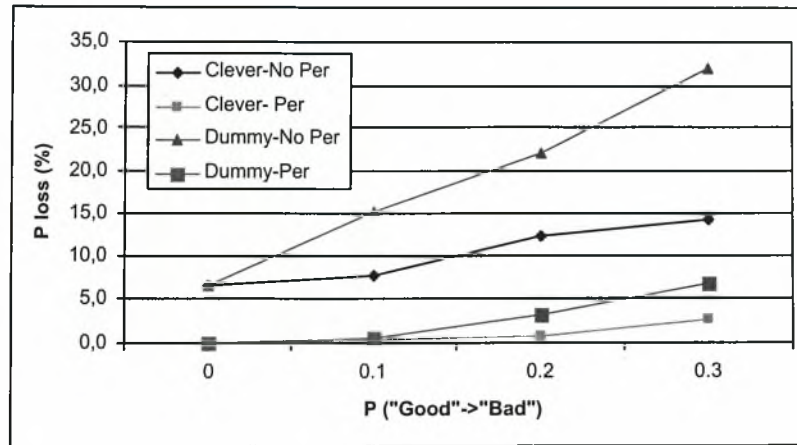
Σχήμα 2.12: Τα εξυπηρετούμενα πακέτα σε ένα σενάριο με 2 μη περιοδικές συνδέσεις ανά σταθμό, μιας με και μιας χωρίς προθεσμία, καθώς ο αριθμός των σταθμών αυξάνεται

μια χωρίς προθεσμία. Μεταβάλλουμε τον αριθμό των σταθμών από 1 έως 15. Στο σχήμα 2.12 μπορούμε να δούμε το ποσοστό των εξυπηρετούμενων πακέτων για τις δύο συνδέσεις.

Όπως παρατηρήσαμε στα αποτελέσματα αυτής της προσομοίωσης, η απώλεια πακέτων είναι 0 και στις δύο κατηγορίες κίνησης. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από τα αποτελέσματα του σχήματος 2.12. Σε αυτό το σχήμα μπορούμε να δούμε ότι όλα τα πακέτα της κατηγορίας με την αυστηρή προθεσμία εξυπηρετούνται, ακόμη και στην περίπτωση υψηλού φόρτου. Από την άλλη, το ποσοστό των εξυπηρετούμενων πακέτων για την κατηγορία χωρίς προθεσμία μειώνεται καθώς το φορτίο αυξάνεται. Αυτό συμβαίνει επειδή η κατηγορία με την αυστηρή προθεσμία χρησιμοποιεί το χρόνο εκχώρησης της κατηγορίας χωρίς προθεσμία κάθε φορά που ένα πακέτο με προθεσμία είναι έτοιμο να λήξει. Δεδομένου ότι τα πακέτα της κατηγορίας χωρίς προθεσμία δεν λήγουν ποτέ, ο χρονοδρομολογητής δίνει προτεραιότητα στην κατηγορία με την αυστηρή προθεσμία, αφήνοντας στις ουρές των σταθμών τα πακέτα της κατηγορίας χωρίς προθεσμία. Έτσι εξηγείται η μηδενική απώλεια πακέτων για την κατηγορία χωρίς προθεσμία, καθώς μερικά από τα πακέτα της αν και δεν εξυπηρετούνται ποτέ, δεν αποβάλλονται από τις ουρές μιας και η προθεσμία τους δεν λήγει ποτέ.

Προσομοιώσεις με μη Τέλειο Κανάλι

Στην επόμενη ομάδα προσομοιώσεων μελετάμε την αποδοτικότητα του πρωτοκόλλου μας όταν το κανάλι δεν είναι τέλειο, δηλαδή όταν οι σταθμοί βιώνουν και



Σχήμα 2.13: Ο ρυθμός απόρριψης πακέτων για τον έξυπνο και τον απλοϊκό χρονοδρομολογητή, καθώς η ποιότητα του καναλιού χειροτερεύει

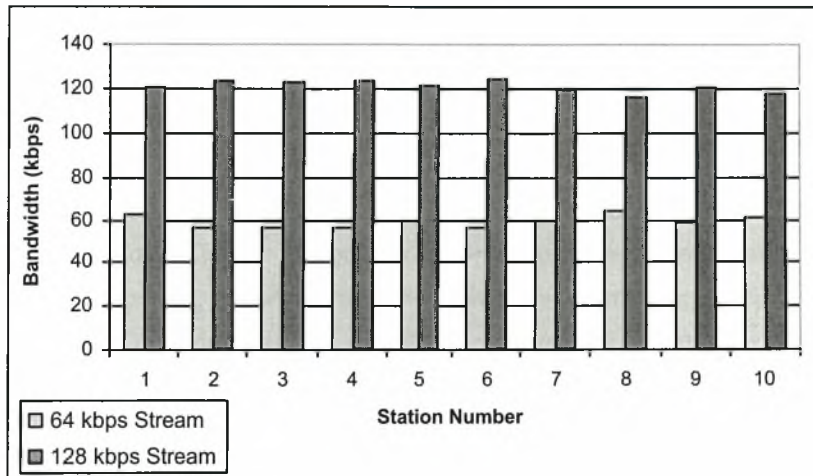
περιόδους κατά τις οποίες η κατάσταση του είναι "κακή". Κάτω από αυτές τις συνθήκες μεταβάλλουμε το p_e και συγκρίνουμε τη συμπεριφορά του χρονοδρομολογητή μας σε δύο περιπτώσεις:

Απλοϊκός χρονοδρομολογητής: Όταν ο χρονοπρογραμματιστής λειτουργεί χωρίς οποιαδήποτε πληροφορία για την κατάσταση του καναλιού σε κάθε σταθμό. Σε αυτήν την περίπτωση ο χρονοπρογραμματιστής δεν εκτελεί καμία ενέργεια στο βήμα 1 της διαδικασίας χρονοδρομολόγησης.

Έξυπνος χρονοδρομολογητής: Όταν ο χρονοδρομολογητής λειτουργεί λαμβάνοντας υπόψη του την κατάσταση του καναλιού σε κάθε σταθμό.

Στο πρώτο πείραμα μελετάμε τη συμπεριφορά του χρονοδρομολογητή στο ακόλουθο σενάριο: Χρησιμοποιούμε 2 συνδέσεις της κατηγορίας 1 σε κάθε σταθμό, μια περιοδική και μια μη περιοδική. Χρησιμοποιούμε 10 σταθμούς και αυξάνουμε το p_e . Τα αποτελέσματα αυτού του σεναρίου παρουσιάζονται στο σχήμα 2.13.

Στο σχήμα αυτό απεικονίζεται η επίδραση της πληροφορίας για την κατάσταση του καναλιού στην απόφαση σχεδιασμού της χρονοδρομολόγησης. Ο έξυπνος χρονοδρομολογητής εκμεταλλεύεται τη γνώση της κατάστασης του καναλιού και αποκλείει από τη διαδικασία μετάδοσης τους σταθμούς που βιώνουν "κακό" κανάλι, εξυπηρετώντας μόνο τους σταθμούς με "καλό" κανάλι. Από την άλλη, ο απλοϊκός χρονοδρομολογητής που δεν έχει γνώση για την κατάσταση του καναλιού δίνει TXOPs και σε σταθμούς που βιώνουν "κακό" κανάλι με αποτέλεσμα την απώλεια αυτών των χρονικών διαστημάτων μιας και οι εν λόγω σταθμοί δεν μπορούν να στείλουν πακέτα κατά τα διαστήματα αυτά. Αυτή η διαδικασία κάνει τον απλοϊκό χρονοδρομολογητή να χρησιμοποιήσει το κανάλι με μη αποδοτικό τρόπο. Για το



Σχήμα 2.14: Ο ρυθμός μετάδοσης που εκχωρείται σε κάθε σταθμό σε ένα σενάριο με δυο συνδέσεις ανά σταθμό, μιας της κατηγορίας 1 και μιας της κατηγορίας 2, για 10 σταθμούς και ποσοστό κακού καναλιού 10%

λόγο αυτό, όπως παρατηρούμε στο σχήμα, ο έξυπνος χρονοδρομολογητής με την παραγωγή μιας αποδοτικότερης χρονοδρομολόγησης επιτυγχάνει να μειώσει τις απώλειες πακέτων σε σύγκριση με τον απλοϊκό χρονοδρομολογητή.

Στο επόμενο πείραμά μας μελετάμε τη συμπεριφορά του χρονοδρομολογητή μετρώντας το εύρος ζώνης που παρέχει σε συνδέσεις με διαφορετικές απαιτήσεις σε ποιότητα υπηρεσιών. Χρησιμοποιούμε 2 μη περιοδικές συνδέσεις σε κάθε σταθμό, μια από την κατηγορία 1 και μια από την κατηγορία 2. Εκτελούμε την προσομοίωση γιατί 10 σταθμούς με $p_e = 0.1$. Ο χρονοδρομολογητής έχει τη δυνατότητα να λαμβάνει υπόψη του την κατάσταση του καναλιού στους σταθμούς. Η απώλεια πακέτων που προκύπτει από αυτήν την προσομοίωση είναι 7.4 % για τις συνδέσεις της κατηγορίας 1 και 6.4 % για τις συνδέσεις της κατηγορίας 2. Αυτή η απώλεια εμφανίζεται λόγω των εξής γεγονότων. Από τη μια η συνολική ρυθμαπόδοση του δικτύου είναι κοντά στην χωρητικότητα του καναλιού, ($10 \text{ STA} * (64+128) \text{ kbps} = 1.92 \text{ Mbps}$) και από την άλλη το κανάλι δεν είναι τέλειο ($p_e = 0.1$). Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ως αναφορά το εύρος ζώνης παρουσιάζονται στο σχήμα 2.14.

Όπως μπορούμε να δούμε στο σχήμα 2.14, ο χρονοδρομολογητής εκχωρεί στους σταθμούς εύρος ζώνης ανάλογο προς τις ανάγκες τους. Έτσι ο χρονοδρομολογητής επιτυγχάνει μια αποδοτική κατανομή του χρόνου, που εγγυάται τις απαιτήσεις εύρους ζώνης των συνδέσεων. Το συνολικό εύρος ζώνης των ρευμάτων είναι ελαφρώς χαμηλότερο από το επιθυμητό για κάθε σύνδεση, λόγω της απώλειας πακέτων που αυτές βιώνουν.

2.6 Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο μελετάμε τα λειτουργικά χαρακτηριστικά ενός χρονοδρομολογητή που λειτουργεί στο AP ενός 802.11e ασύρματου δικτύου και παρέχει ποιότητα υπηρεσιών σε χρήστες με διαφορετικές απαιτήσεις. Βασισμένοι σε αυτά τα χαρακτηριστικά, προτείνουμε έναν αλγόριθμο χρονοδρομολόγησης προσαρμοσμένο στη δομή του 802.11e. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος λειτουργεί με αποδοτικό τρόπο, δίνοντας στις συνδέσεις των σταθμών χρόνο μετάδοσης, ανάλογο προς τις ανάγκες τους. Ο αλγόριθμος που στηρίζει τις αποφάσεις του στην καθυστέρηση των πακέτων, προσπαθεί να εκχωρήσει το χρόνο μετάδοσης του κάθε πακέτου αμέσως πριν από τη λήξη της προθεσμίας του, δίνοντας με τον τρόπο αυτό χρόνο μετάδοσης στους διάφορους σταθμούς, ανάλογο των βραχυπρόθεσμων αναγκών τους. Παράλληλα, κρατά ένα αρχείο κατανάλωσης εύρους ζώνης για κάθε ρεύμα κυκλοφορίας, και δεν τους επιτρέπει τη χρήση του καναλιού εάν η μετάδοσή τους παραβιάζει τα προσυμφωνημένα χαρακτηριστικά κυκλοφορίας τους. Κατ' αυτό τον τρόπο εγγυάται την ικανοποίηση των απαιτήσεων σε εύρος ζώνης που κάθε σύνδεση έχει. Ο χρονοδρομολογητής λαμβάνει υπόψη του την κατάσταση του καναλιού στους σταθμούς και εξυπηρετεί κάθε φορά τους σταθμούς που διαθέτουν καλό κανάλι. Με τον τρόπο αυτό κάνει αποτελεσματική χρήση του μέσου, αποφεύγοντας την άσκοπη μετάδοση πακέτων. Ο αλγόριθμος χρονοδρομολόγησης που προτείνουμε είναι απλός στο σχεδιασμό και εύκολα υλοποιήσιμος σε πραγματικό περιβάλλον.

Κατευθυντικές Κεραίες σε Ad-hoc Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα

3.1 Ο Ρόλος των Κατευθυντικών Κεραιών στα Ad-hoc Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα

Τα ad-hoc ασύρματα τοπικά δίκτυα προσελκύουν ολοένα και περισσότερο ενδιαφέρον σε πολλές περιοχές εφαρμογών. Υπάρχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τη χρήση τέτοιων δικτύων σε εμπορικές εφαρμογές, στρατιωτικές εφαρμογές καθώς επίσης και σε εφαρμογές οι οποίες υλοποιούνται σε περιβάλλοντα όπου η παρουσία ενός δικτύου υποδομής είναι αδύνατη ή μη προσιτή. Η υπάρχουσα τεχνολογία έχει εξοπλίσει τα ad-hoc δίκτυα με ιστροπικές κεραίες (omnidirectional antennas). Έτσι, τα πρωτόκολλα ελέγχου πολλαπλής πρόσβασης (MAC) που σχεδιάστηκαν μέχρι τώρα, λαμβάνουν υπόψη τους την ιστροπική μετάδοση. Μεταξύ των πρωτοκόλλων αυτών, δείχνει σήμερα να υπερισχύει το MAC πρωτόκολλο του IEEE 802.11 [IEE99a], [OP99] που φαίνεται να λύνει αποτελεσματικά τα προβλήματα που εμφανίζονται σε αυτό το περιβάλλον.

Η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια του σήματος στην ιστροπική μετάδοση εξαπλώνεται σε μια μεγάλη περιοχή γύρω από τον αποστολέα, ενώ μόνο μια μικρή ποσότητα από αυτή παραλαμβάνεται από τον προοριζόμενο δέκτη. Οι κατευθυντικές κεραίες (directional antennas) είναι μια τεχνολογία που λύνει αυτό το πρόβλημα. Χρησιμοποιώντας M στοιχεία (κεραιοσειρά, antenna array), αυτό το είδος κεραίων μεταδίδει με κατευθυντικό τρόπο. Αυτό σημαίνει ότι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα ενισχύονται σε ορισμένες κατευθύνσεις, ενώ ακυρώνεται σε άλλες, με συνέπεια ένα ενισχυμένο σήμα να κατευθύνεται προς συγκεκριμένες διευθύνσεις. Δεδομένου ότι έχουν αυτά τα κύρια χαρακτηριστικά, οι κατευθυντικές κεραίες αποτελούν ένα ελκυστικό συστατικό για όλες τις ασύρματες συσκευές. Έτσι λοιπόν, αυτού του είδους οι κεραίες μπορούν να έχουν πολλά οφέλη και στα ασύρματα τοπικά δίκτυα. Η κατευθυντική φύση της μετάδοσης οδηγεί στη χωρική επαναχρησιμοποίηση, στο

φαινόμενο δηλαδή κατά το οποίο μπορούν να υπάρξουν πολλαπλές μεταδόσεις στην ίδια γειτονιά χωρίς την σύγκρουση των μεταδιδόμενων πακέτων. Από την άλλη, η κατευθυντική μετάδοση αυξάνει την ενέργεια του σήματος προς την κατεύθυνση του δέκτη, με συνέπεια την αύξηση της περιοχής κάλυψης. Αυτά τα δύο οφέλη οδηγούν στην ευρεία αύξηση της απόδοσης των δικτύων που χρησιμοποιούν την τεχνολογία αυτή.

Δυστυχώς, οι κατευθυντικές μεταδόσεις προκαλούν μερικά σοβαρά προβλήματα όταν χρησιμοποιούνται στα τοπικά δίκτυα. Αυτά τα προβλήματα είναι η αύξηση των περιπτώσεων του κρυμμένου κόμβου (*hidden terminal problem*), του προβλήματος της κώφωσης (*deafness*) και του προβλήματος του προσδιορισμού της θέσης των γειτόνων. Τα πρώτα δύο προβλήματα μελετώνται εκτενώς στην [CYRV02], ενώ το τρίτο είναι ένα φυσικό πρόβλημα που προκύπτει από το γεγονός ότι για τη μετάδοση ενός πακέτου, ο αποστολέας πρέπει να ξέρει τη θέση του δέκτη, για να κατευθύνει την μετάδοση του στην κατάλληλη περιοχή. Τα παραδοσιακά πρωτόκολλα πολλαπλής πρόσβασης (MAC) [IEE99a], [Kar90] που έχουν σχεδιαστεί για τα ad-hoc δίκτυα με ιστροπικές κεραιές, δεν είναι κατάλληλα για την υποστήριξη της νέας τεχνολογίας. Για το λόγο αυτό, υπάρχει μια ισχυρή ανάγκη για το σχεδιασμό νέων πρωτοκόλλων που θα λειτουργήσουν έτσι ώστε να εκμεταλλεύονται με αποδοτικό τρόπο τα οφέλη που παρέχονται, ενώ ελαχιστοποιούν τα μειονεκτήματα που παρουσιάζονται.

3.2 Αλλαγές στο Πρωτόκολλο Πολλαπλής Πρόσβασης

3.2.1 Προηγούμενη Δουλειά

Η ιδέα της χρησιμοποίησης των κατευθυντικών κεραιών στις ραδιοεπικοινωνίες έχει εμπνεύσει πολλούς ερευνητές. Πρώτος ο Zander στην [Zan90], έχει προτείνει τη χρησιμοποίηση των κατευθυντικών κεραιών σε ένα multihop Aloha ασύρματο δίκτυο με θυρίδες (*slots*). Μερικές άλλες προσεγγίσεις πρωτοκόλλων για τη χρήση κατευθυντικών κεραιών έχουν εστιάσει στα ευρυζωνικά και κυψελωτά δίκτυα [CGL00], [HP96], [YH92].

Πιο πρόσφατα, εμφανίστηκαν ορισμένες εργασίες που μελετούν κατάλληλες τροποποιήσεις στο πρωτόκολλο MAC των 802.11 ασύρματων δικτύων, προκειμένου να προσαρμοστεί αυτό το είδος κεραιών σε 802.11 ad-hoc δίκτυα. Αυτές οι εργασίες χρησιμοποιούν συνδυασμό κατευθυντικών καθώς επίσης και μη κατευθυντικών μεταδόσεων για την χειραψία τεσσάρων πακέτων (*four way handshake*). Έτσι, οι Nasiripuri, Ye, You, και Hiromoto στην [NYH00], προτείνουν μια παραλλαγή του μηχανισμού RTS/CTS του IEEE 802.11 προσαρμοσμένη στη χρήση κατευθυντικών κεραιών. Το πρωτόκολλό τους στέλνει τα πακέτα RTS και CTS

ισοτροπικά, προκειμένου να δώσουν τη δυνατότητα σε αποστολέα και παραλήπτη να εντοπίσουν ο ένας τον άλλον. Έπειτα στέλνουν το πακέτο δεδομένων και το πακέτο επιβεβαίωσης (Ack) με κατευθυντικό τρόπο.

Οι Κο, Shankarkuman και Vaidya [KSV00] προτείνουν ένα άλλο MAC πρωτόκολλο που στέλνει ένα κατευθυντικό RTS που ακολουθείται από ένα μη κατευθυντικό CTS. Υποθέτουν ότι ο αποστολέας ξέρει τη θέση του δέκτη και έτσι μεταδίδει κατευθυντικά το RTS προς τη σωστή κατεύθυνση. Σε περίπτωση έλλειψης πληροφοριών για τη θέση του δέκτη, προτείνουν μια εναλλακτική λύση του σχήματος αυτού. Σε αυτήν την περίπτωση το RTS μεταδίδεται μη κατευθυντικά προκειμένου να καθοριστεί η θέση του δέκτη. Οι Takai, Martin, Ren και Bagrodia [TMRB02] προτείνουν το πρωτόκολλο που ονομάζουν Κατευθυντική Εικονική Ανίχνευση του Μέσου (Directional Virtual Carrier Sensing). Στο πρωτόκολλο αυτό χρησιμοποιούν κατευθυντικά RTS και CTS στη μετάδοση. Για τη σωστή λειτουργία του σχήματος αυτού υποθέτουν ότι ο αποστολέας γνωρίζει τη θέση του δέκτη. Στην αντίθετη περίπτωση, προτείνουν τη μη κατευθυντική μετάδοση του RTS. Προτείνουν επίσης ένα σύστημα διατήρησης πληροφοριών, όπου εκεί αποθηκεύουν πληροφορίες για τη θέση των γειτόνων τους. Το σύστημα αυτό ενημερώνεται κάθε φορά που ένας κόμβος λαμβάνει ένα πλαίσιο.

Οι Choudhury, Yang, Ramanathan και Vaidya [CYRV02] μελετούν τα προβλήματα που εμφανίζονται με την χρήση των κατευθυντικών κεραιών και παράλληλα προτείνουν ένα MAC πρωτόκολλο για μεταδόσεις πολλαπλών βημάτων (multihop). Το πρωτόκολλο αυτό χρησιμοποιεί ένα κατευθυντικό RTS πολλαπλών βημάτων το οποίο μεταδίδόμενο από ενδιαμέσους κόμβους πηγαίνει από τον αποστολέα στον παραλήπτη. Τέλος, στην [KJT03] οι Κοράκης, Jakllari και Τασιούλας προτείνουν ένα MAC πρωτόκολλο για την πλήρη εκμετάλλευση των κατευθυντικών κεραιών σε ασύρματα τοπικά δίκτυα. Το πρωτόκολλό τους χρησιμοποιώντας μόνο κατευθυντικές μεταδόσεις και ένα απλό σχήμα παρακολούθησης της κατεύθυνσης των γειτόνων επιτυγχάνει υψηλή απόδοση.

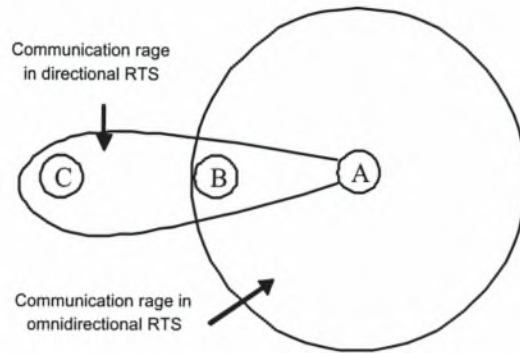
Υπάρχουν μερικές εργασίες που μελετούν τη χρήση των κατευθυντικών κεραιών σε ασύρματο LANs και δίνουν σημαντικές πληροφορίες για τη λειτουργία τους στο περιβάλλον αυτό. Ο Ramanathan στην [Ram01] μελετά μερικά πολύ ενδιαφέροντα ζητήματα για την απόδοση των ad-hoc δικτύων κατά τη χρήση κατευθυντικών κεραιών, καθώς και τους παράγοντες που την επηρεάζουν. Προσομοιώνει διάφορα σχήματα και δίνει πολύ χρήσιμα αποτελέσματα για την αποτελεσματικότητα του καθενός τους. Οι EIBatt, Anderson και Ryu στην [EAR03] ερευνούν την ισορροπία μεταξύ της χωρικής επαναχρησιμοποίησης και της σύγκρουσης πακέτων κατά τη χρήση κατευθυντικών κεραιών. Οι Yi, Pei και Kalyanaraman στην [YPK03] επεκτείνουν την εργασία των Gupta και Kumar για την απόδοση των ad-hoc δικτύων

και μελετούν τη αύξηση της χωρητικότητας σε τέτοια δίκτυα, λόγω της χρήσης των κατευθυντικών κεραιών. Οι Choudhury και Vaidia στη [CV04], μελετούν λεπτομερώς το πρόβλημα της κώφωσης που παρουσιάζεται κατά τη χρήση κατευθυντικών κεραιών στα ασύρματα τοπικά δίκτυα. Παράλληλα, προτείνουν ένα νέο πρωτόκολλο, το ToneDMAC για την εξάλειψη του προβλήματος της κώφωσης. Το νέο πρωτόκολλο βασίζεται σε έναν μηχανισμό μετάδοσης τόνου. Στην εργασία τους εξετάζουν σενάρια δικτύων ενός βήματος (single hop) καθώς επίσης και πολλών βημάτων (multihop). Τέλος, οι Choudhury και Vaidia στην [CV03] προτείνουν τη χρήση των κατευθυντικών κεραιών σε πρωτόκολλα δρομολόγησης (routing protocols) για ad-hoc δίκτυα.

3.2.2 Προβλήματα στη Χρήση Κατευθυντικών Κεραιών

Οι περισσότερες από τις μελέτες που μόλις αναφέραμε, έχουν μερικά κοινά χαρακτηριστικά που οδηγούν στην ανεπάρκεια των προτεινόμενων πρωτοκόλλων. Οι εργασίες [NYH00], [KSV00], [Ram01] χρησιμοποιούν τουλάχιστον μια μη κατευθυντική μετάδοση ενός από τα πακέτα ελέγχου, περιορίζοντας κατ' αυτό τον τρόπο την περιοχή κάλυψης. Εάν υπάρχει τουλάχιστον ένα μη κατευθυντικό πακέτο στη χειραψία μεταξύ του αποστολέα και του παραλήπτη, οι κατευθυντικές μεταδόσεις πρέπει να περιορίσουν την κάλυψη τους στην κάλυψη της ισοτροπικής μετάδοσης. Η μέγιστη απόσταση μεταξύ δύο σταθμών δηλαδή, καθορίζεται από τη μικρότερη απόσταση κάλυψης των μεταδόσεων των τεσσάρων πακέτων της χειραψίας. Υποθέστε ότι η μετάδοση RTS είναι ισοτροπική ενώ οι άλλες τρεις μεταδόσεις (CTS, δεδομένα, Ack) είναι κατευθυντικές. Τότε, οι κατευθυντικές μεταδόσεις πρέπει να μειώσουν την ενέργεια μετάδοσής τους, για να καλύψουν απλώς την περιοχή κάλυψης του RTS. Αυτό απεικονίζεται στο σχήμα 3.1 και αποτελεί ένα μειονέκτημα των αναφερθέντων MAC πρωτοκόλλων που χρησιμοποιούν τουλάχιστον μια ισοτροπική μετάδοση, δεδομένου ότι κατ' αυτό τον τρόπο δεν εκμεταλλεύονται ένα από τα κύρια οφέλη των κατευθυντικών κεραιών που είναι η αύξηση της περιοχής κάλυψης.

Όπως περιγράφεται στις [CG96], [LR99], [FG98], με M στοιχεία κεραιών και με την ίδια ενέργεια μετάδοσης, μια κεραιοσειρά παρέχει αυξημένο κέρδος κεραιάς (antenna gain), σε σύγκριση με την ισοτροπική μετάδοση. Αυτό το κέρδος διπλασιάζεται, εάν υπάρχει κατευθυντικότητα και στη μετάδοση και στην λήψη. Έτσι, μια κατευθυντική επικοινωνία μεταξύ δύο σταθμών που λειτουργούν με αυτό τον τρόπο (κατευθυντικότητα στη μετάδοση, στη λήψη ή και στις δυο), μπορεί να έχει μια σημαντική αύξηση στην απόσταση, έναντι της ισοδύναμης μη κατευθυντικής επικοινωνίας. Το όφελος αυτό δεν χρησιμοποιείται καθόλου από τα παραπάνω πρωτόκολλα.



Σχήμα 3.1: Η περιοχή κάλυψης ενός MAC πρωτοκόλλου που χρησιμοποιεί μη κατευθυντικό πακέτο RTS και κατευθυντικά πακέτα CTS, δεδομένων και Ack

Στις [CYRV02], [TMRB02] η χρήση μόνο των κατευθυντικών μεταδόσεων στη χειραψία τεσσάρων πακέτων, δεν ξεπερνάει τα κύρια προβλήματα: την αύξηση των περιπτώσεων κρυμμένου κόμβου, του προβλήματος της κώφωσης και του προβλήματος του προσδιορισμού της θέσης των γειτόνων. Οι λόγοι για τους οποίους τα πρώτα δύο προβλήματα προκύπτουν στα πρωτόκολλα αυτά μελετώνται αναλυτικά στην [CYRV02]. Το τρίτο πρόβλημα προκύπτει από το γεγονός ότι η αποστολή ενός κατευθυντικού RTS υποθέτει ότι οι πληροφορίες για τη θέση του δέκτη είναι γνωστές στο MAC του αποστολέα ή δίνονται από κάποιον άλλο μηχανισμό ή από το ανωτέρω στρώμα. Αυτή η υπόθεση απλοποιεί τόσο πολύ το σχεδιασμό, ώστε καθιστά τις λύσεις αυτές ανέφικτες για εφαρμογή σε ένα πραγματικό περιβάλλον χωρίς τη συμβολή ενός εξωτερικού μηχανισμού, ο σχεδιασμός του οποίου δεν είναι από μόνος του ένα εύκολο πρόβλημα.

Πιο συγκεκριμένα, η σημαντική πληροφορία για τη θέση ενός κόμβου δεν είναι η θέση αυτή καθ'αυτή, αλλά η κατεύθυνση στην οποία ο αποστολέας πρέπει να στρέψει την μετάδοσή του, προκειμένου να μεταδώσει σωστά στο γείτονά του. Έτσι η γνώση της θέσης ενός κόμβου (που η [KSV00] υποθέτει με τη βοήθεια πρόσθετου υλικού όπως το GPS) δεν είναι πάντα ο σωστός οδηγός για την απόφαση της κατεύθυνσης της μετάδοσης. Μπορεί να υπάρξει ένα φυσικό εμπόδιο μεταξύ του αποστολέα και του παραλήπτη και η επικοινωνία μεταξύ τους να γίνεται μέσω της ανάκλασης του ραδιοκύματος, με συνέπεια την λήψη του σήματος από μια κατεύθυνση διαφορετική από την κατεύθυνση του γείτονα.

Οι συγγραφείς των [CYRV02], [KSV00], [TMRB02] μελετούν την έννοια του D-NAV (Directional Network Allocation Vector), ενός κατευθυντικού διανύσματος δέσμευσης που προσαρμόζει στο κατευθυντικό περιβάλλον την έννοια του NAV που έχει ορισθεί στο IEEE 802.11. Αυτές οι μελέτες περιέχουν μια πολύ ενδιαφέρουσα ποιοτική περιγραφή του D-NAV, χωρίς όμως να δίνουν τις λειτουργικές

λεπτομέρειες που πρέπει να καθοριστούν για να κάνουν τη χρήση του αποδοτική.

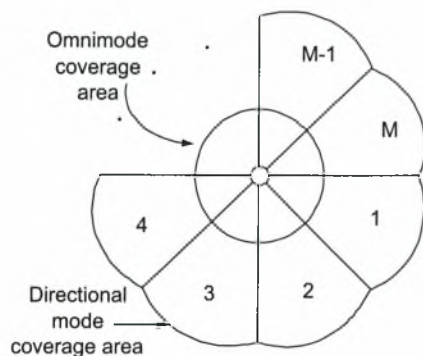
Στην [KJT03] προτείνεται ένα νέο πρωτόκολλο MAC, το οποίο χρησιμοποιώντας μόνο κατευθυντικές μεταδόσεις και ένα απλό σχήμα παρακολούθησης των κατευθύνσεων των γειτόνων, επιτυγχάνει υψηλή απόδοση, ελαχιστοποιεί το πρόβλημα του κρυμμένου κόμβου λόγω ασυμμετρίας και τέλος μειώνει το πρόβλημα της κώφωσης. Το καινοτόμο σχέδιο της παρακολούθησης των κατευθύνσεων των γειτόνων λύνει με αποδοτικό τρόπο το πρόβλημα της θέσης του γείτονα και παράλληλα καθιστά το προτεινόμενο πρωτόκολλο εφαρμόσιμο, σε ένα περιβάλλον χωρίς προγενέστερη γνώση της θέσης των κόμβων.

3.3 Το Μοντέλο Κατευθυντικών Κεραιών που Χρησιμοποιούμε

Μια κατευθυντική κεραιά μπορεί να μεταδώσει ένα σήμα σε οποιαδήποτε κατεύθυνση, χρησιμοποιώντας μια σειρά από κεραιές η οποία καλείται κεραιοσειρά. Οι μεμονωμένες ιστροπικές μεταδόσεις από αυτά τα στοιχεία αλληλεπιδρούν δημιουργικά ή καταστροφικά η μια στην άλλη, με συνέπεια την αύξηση της δύναμης του σήματος προς μια ή περισσότερες κατευθύνσεις και τον μηδενισμό της προς άλλες. Όσο περισσότερα είναι τα στοιχεία μιας κεραιοσειράς, τόσο μεγαλύτερη και η αύξηση του σήματος στην επιθυμητή κατεύθυνση. Υπάρχουν κατευθυντικές κεραιές με 1 (ιστροπικές) 2, 4, 8, 16 κ.λπ. στοιχεία. Ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης μπορεί να βρει μια αναλυτική μελέτη των κατευθυντικών κεραιών στις [LR99], [Rap96].

Καθώς ο αριθμός των στοιχείων σε μια κεραιοσειρά αυξάνεται, το πλάτος της δέσμης (beam) του ραδιοκύματος και η ισχύς του σήματος μπορούν να ελεγχθούν αποτελεσματικότερα. Ένα σημαντικό στοιχείο του πρωτοκόλλου μας είναι η κάλυψη ολόκληρης της περιοχής γύρω από τον αποστολέα με μια κυκλική διαδοχική μετάδοση. Στο υπόλοιπο του κεφαλαίου υποθέσουμε ότι μπορούμε να παρέχουμε αποτελεσματική ιστροπική μετάδοση με M διαδοχικές κατευθυντικές μεταδόσεις, όταν έχουμε μια κεραιοσειρά με M στοιχεία. Σε ορισμένες περιπτώσεις αυτός ο αριθμός μπορεί να πρέπει να είναι μεγαλύτερος, αλλά τα συμπεράσματά μας που βασίζονται στα αριθμητικά πειράματα που εκτελέσαμε δεν θα αλλάξουν.

Όπως μπορούμε να δούμε στο σχήμα 3.2, η περιοχή γύρω από τον κόμβο καλύπτεται από M δέσμες ραδιοκύματος. Υποθέτουμε ότι οι δέσμες δεν επικαλύπτονται. Αριθμούμε τις δέσμες από 1 έως M αρχίζοντας από τη δέσμη που βρίσκεται ακριβώς δεξιά της θέσης 3:00 του ρολογιού. Ο κόμβος μπορεί να μεταδώσει το σήμα του με οποιαδήποτε από τις M δέσμες, αυξάνοντας την περιοχή κάλυψης της μετάδοσης προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Σε κατάσταση αδράνειας (idle mode), ο κόμβος ακούει ιστροπικά. Κατά τη λήψη ενός σήματος ο κόμβος χρησιμοποιεί



Σχήμα 3.2: Ένας κόμβος με M δέσμες ραδιοκύματος

ποικιλία επιλογής (selection diversity), πράγμα που σημαίνει ότι χρησιμοποιεί το σήμα της κεραίας από την οποία λαμβάνει σήμα με τη μέγιστη δύναμη. Με αυτόν τον μηχανισμό ο δέκτης μπορεί να επεκτείνει την περιοχή επικοινωνίας, πράγμα που σημαίνει ότι το κανάλι επικοινωνίας μπορεί να επωφεληθεί περισσότερο από την κατευθυντικότητα και στον αποστολέα και στον παραλήπτη.

3.4 Το προτεινόμενο Πρωτόκολλο Πολλαπλής Πρόσβασης

Στην προηγούμενη παράγραφο περιγράψαμε τα πλεονεκτήματα, τα μειονεκτήματα και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά που παρουσιάζονται στα ad-hoc δίκτυα όταν χρησιμοποιείται κατευθυντική μετάδοση. Αυτή η περιγραφή μπορεί να αποτελέσει έναν οδηγό για τον καθορισμό των αρχών που πρέπει να διέπουν το σχεδιασμό ενός MAC πρωτοκόλλου που θα συντονίσει την επικοινωνία σε τέτοια περιβάλλοντα. Στις επόμενες γραμμές θα συνοψίσουμε τις αρχές αυτές:

- Ένα αποτελεσματικό πρωτόκολλο πρέπει να χρησιμοποιήσει μόνο κατευθυντικές μεταδόσεις, για να εκμεταλλευτεί πλήρως την αύξηση της περιοχής κάλυψης που πετυχαίνεται με τη χρήση των κατευθυντικών κεραίων.
- Πρέπει να υπάρχει ένας μηχανισμός που ενημερώνει τους γείτονες, ώστε αυτοί να αναβάλλουν τη μετάδοσή τους, εάν αυτή πρόκειται να βλάψει την εξελισσόμενη μετάδοση, μειώνοντας κατ' αυτό τον τρόπο το πρόβλημα του κρυμμένου κόμβου.
- Πρέπει να υπάρχει ένας μηχανισμός που μειώνει το πρόβλημα της κώφωσης.
- Το προτεινόμενο σχήμα πρέπει να παρέχει έναν αποδοτικό τρόπο προσδιορισμού της θέσης των γειτόνων και διατήρησης των πληροφοριών αυτών για τη χρήση τους στις κατευθυντικές μεταδόσεις. Αυτό το σχήμα πρέπει να είναι

απλό και να ανταλλάσσει πολύ μικρή πληροφορία μεταξύ των σταθμών, εάν αυτό είναι απαραίτητο.

Τα προτεινόμενα MAC πρωτόκολλα που χρησιμοποιούν τουλάχιστον μια μη κατευθυντική μετάδοση [KSV00], [NYH00], [TMRB02] δεν συμμορφώνονται με την πρώτη αρχή, ενώ συμμορφώνονται, από μια άποψη, με τη δεύτερη και την τρίτη αρχή. Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι η μη κατευθυντική μετάδοση του πακέτου ελέγχου διαχέει γύρω από τον αποστολέα πληροφορία σχετική με την επικείμενη μετάδοση. Όσον αφορά την τέταρτη αρχή, αν και οι [KSV00], [TMRB02] προτείνουν σχήματα για τη λύση του προβλήματος της θέσης των γειτόνων, δεν δίνουν λεπτομερή περιγραφή. Από την άλλη, ένα μέρος της [TMRB02] και το προτεινόμενο MAC πρωτόκολλο της [CYRV02] σέβονται την πρώτη αρχή, μιας και προτείνουν τη χρήση κατευθυντικής μετάδοσης για τα RTS-CTS αλλά δεν αντιμετωπίζουν τα προβλήματα του κρυμμένου κόμβου και της κώφωσης όπως αυτά περιγράφονται λεπτομερώς στην [CYRV02]. Επιπλέον, η [CYRV02] υποθέτει την παροχή πληροφοριών για τη θέση των γειτόνων από ένα ανώτερο στρώμα με συνέπεια την παραβίαση της τέταρτης αρχής.

Στις ακόλουθες παραγράφους θα περιγράψουμε το πρωτόκολλο που προτείνουμε [KJT05]. Το πρωτόκολλό μας έχει σχεδιαστεί κάτω από την καθοδήγηση των αρχών που μόλις αναφέραμε. Είναι απλό στην υλοποίηση, δεδομένου ότι είναι βασισμένο στο πνεύμα του IEEE 802.11 πρωτοκόλλου. Εντούτοις, χρησιμοποιεί μόνο κατευθυντικές μεταδόσεις, αυξάνοντας έτσι την περιοχή κάλυψης. Επιπλέον, ο αποστολέας ενημερώνει τους γείτονες για την επικείμενη μετάδοση έτσι ώστε να αναβάλλουν την μετάδοσή τους εάν αυτό πρόκειται να βλάψει την εξελισσόμενη μετάδοση. Τέλος, το πρωτόκολλο μας δεν υποθέτει εκ των προτέρων γνώση πληροφοριών για τη θέση των γειτόνων, ούτε εξαρτάται από πληροφορίες που λαμβάνει για τον λόγο αυτό από το ανώτερο στρώμα, όπως γίνεται στην [CYRV02]. Παρέχει ένα απλό σχήμα για την καταγραφή και τη διατήρηση της θέσης των γειτόνων, ανταλλάσσοντας μεταξύ των κόμβων ελάχιστη πληροφορία. Επιπλέον, το σχήμα αυτό βοηθά στη λειτουργία του μηχανισμού D-NAV που προτείνεται στην [KSV00], καθιστώντας τον απλούστερο στην εφαρμογή.

3.4.1 Κυκλικό κατευθυντικό RTS

Το πρωτόκολλό μας είναι βασισμένο σε ένα απλό και καινοτόμο σχήμα μετάδοσης του RTS. Σε αυτό το σχήμα, το RTS μεταδίδεται διαδοχικά με έναν κατευθυντικό, κυκλικό τρόπο, έως ότου καλύψει όλη την περιοχή γύρω από τον αποστολέα. Όπως έχουμε αναφέρει υποθέτουμε τη χρήση των κεραιών του σχήματος 3.2, οι οποίες καλύπτουν την περιοχή γύρω από τον αποστολέα με M δέσμες. Ο αποστολέας αρχί-

ζει την κατευθυντική αποστολή του RTS προς μια προκαθορισμένη κατεύθυνση, ως υποθέσουμε χρησιμοποιώντας τη δέσμη 1. Αμέσως μετά στρέφει την μετάδοση του προς τα δεξιά και στέλνει το ίδιο RTS με την επόμενη δέσμη (δέσμη 2). Συνεχίζει αυτήν την διαδικασία ξανά και ξανά έως ότου η μετάδοση του RTS καλύψει όλη την περιοχή γύρω από τον αποστολέα (έως ότου στέλνει το RTS με την δέσμη M).

Το RTS περιέχει το συνολικό χρόνο που η χειραψία των τεσσάρων πακέτων πρόκειται να διαρκέσει (όπως και στο 802.11). Δεδομένου ότι αυτή η πληροφορία διαδίδεται σε όλη την περιοχή γύρω από τον αποστολέα, οι γείτονες ενημερώνονται για την επικείμενη μετάδοση. Οι γείτονες, μετά από αυτή την ενημέρωση εκτελώντας έναν απλό αλγόριθμο που περιγράφεται αργότερα σε αυτή την παράγραφο, αποφασίζουν εάν θα αναβάλλουν τη μετάδοσή τους προς την κατεύθυνση του παραλήπτη ή του δέκτη, σε περίπτωση που αυτή βλάπτει την τρέχουσα μετάδοση. Κατ' αυτό τον τρόπο οι γείτονες γνωρίζουν την επικείμενη χειραψία, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του προβλήματος του κρυμμένου κόμβου.

Ο σταθμός που αποτελεί τον προορισμό του RTS περιμένει μέχρι να ολοκληρωθεί η κυκλική μετάδοση του RTS και κατόπιν στέλνει ένα κατευθυντικό CTS προς την κατεύθυνση του αποστολέα του RTS. Ο αποστολέας από την άλλη, όταν ολοκληρώσει την κυκλική μετάδοση του RTS, ακούει το μέσο ιστροπικά με σκοπό να λάβει αυτό το CTS. Αυτός σημαίνει ότι η αίσθηση του μέσου από τον αποστολέα του RTS σε αυτήν την φάση γίνεται με μη κατευθυντικό τρόπο, ακριβώς όπως στο 802.11. Εάν το CTS ληφθεί κατά τη διάρκεια μιας προκαθορισμένης περιόδου (περίοδος λήψης CTS) ο αποστολέας συνεχίζει τη χειραψία με τη μετάδοση του πακέτου δεδομένων και την λήψη του Ack, όπως και στο 802.11. Η βασική διαφορά είναι ότι τώρα οι μεταδόσεις των πακέτων δεδομένων και Ack είναι κατευθυντικές. Με τη χρήση μόνο κατευθυντικών μεταδόσεων για τα RTS, CTS, δεδομένα, Ack, εκμεταλλευόμαστε το όφελος της αύξησης της περιοχής κάλυψης, αντίθετα από την περίπτωση στην οποία έχουμε τουλάχιστον μια μη κατευθυντική μετάδοση, οπότε η περιοχή κάλυψης περιορίζεται σε αυτή της ιστροπικής μετάδοσης.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι ο αποστολέας και ο παραλήπτης δεν χρειάζονται οποιεσδήποτε πληροφορίες για τη σχετική ή την απόλυτη θέση ο ένας του άλλου. Το κυκλικό RTS φτάνει στον παραλήπτη όπου και αν βρίσκεται αυτός. Ο παραλήπτης με τη σειρά του χρησιμοποιώντας ποικιλία επιλογής (selection diversity), λαμβάνει το σήμα από τη σωστή δέσμη, αναγνωρίζοντας με αυτό τον τρόπο την κατεύθυνση του αποστολέα. Έπειτα, στέλνει το CTS με την ίδια δέσμη που έλαβε το RTS. Παρόλα αυτά, προτείνουμε ένα απλό σχήμα για τη αναγνώριση και τη διατήρηση της θέσης των γειτονικών κόμβων που βοηθά στην αποδοτικότερη λειτουργία του δικτύου.

Εγώ	Ο γείτονας	Η δέσμη μου	Η δέσμη του γείτονα
A	B	4	2

Πίνακας 3.1: Μια εγγραφή του Πίνακα Θέσεων του σταθμού A στο σχήμα 3.3

3.4.2 Καθορισμός της θέσης των γειτόνων

Το πιο δύσκολο από τα προβλήματα που αντιμετωπίζει ένας σταθμός κατά την κατευθυντική μετάδοση, ως αναφορά την έλλειψη πληροφορίας για τη θέση των γειτόνων, είναι η μετάδοση του RTS. Εάν ο παραλήπτης λάβει το RTS, χρησιμοποιώντας την ποικιλία επιλογής, θα αναγνωρίσει την κατεύθυνση από την οποία λαμβάνει το σήμα και έτσι θα μεταδώσει το CTS στη σωστή κατεύθυνση. Έπειτα, με την λήψη του CTS, ο αποστολέας αναγνωρίζει την κατεύθυνση του παραλήπτη και στέλνει το πακέτο δεδομένων προς τη σωστή κατεύθυνση. Το πρωτόκολλό μας εγγυάται τη μετάδοση του RTS στην κατεύθυνση του παραλήπτη λόγω του κυκλικού κατευθυντικού RTS. Έτσι, εάν η χειραψία ολοκληρωθεί, αποστολέας και παραλήπτης ξέρουν ο ένας τη θέση του άλλου. Πιο συγκεκριμένα, κάθε ένας τους ξέρει την δέσμη μέσω της οποίας πρέπει να μεταδώσει για να φτάσει τον άλλο. Το πρωτόκολλό μας εκμεταλλεύεται αυτές τις πληροφορίες μέσω ενός απλού σχήματος και λύνει έτσι το πρόβλημα του καθορισμού της θέσης των γειτόνων.

Σύμφωνα με το σχήμα αυτό, κάθε κόμβος διατηρεί έναν πίνακα, τον οποίο καλούμε **Πίνακα Θέσεων**, με μια εγγραφή για κάθε σταθμό που έχει ακούσει. Αρχικά ο Πίνακας Θέσεων είναι κενός και ενημερώνεται με κάθε λήψη. Λόγω της κινητικότητας των σταθμών, μια εγγραφή μπορεί να ενημερωθεί πολλές φορές. Σε κάθε εγγραφή ο κόμβος διατηρεί τις ακόλουθες πληροφορίες: **Εγώ** (ο ίδιος), **Ο γείτονας** (ο σταθμός από τον οποίο έχει ακούσει ένα πακέτο), **Η δέσμη μου** (η δέσμη από την οποία έλαβα το πακέτο), **Η δέσμη του γείτονα** (η δέσμη από την οποία ο σταθμός έστειλε το πακέτο). Κατ' αυτό τον τρόπο, κάθε σταθμός διατηρεί τα ζευγάρια των δεσμών που χρησιμοποιούνται για μια άμεση μετάδοση.

Η εγγραφή του πίνακα 3.1, σημαίνει ότι ο A μπορεί να στείλει ή να λάβει από τον B μέσω της δέσμης 4, ενώ ο B μπορεί να στείλει ή να λάβει από τον A μέσω της δέσμης 2. Αυτό φαίνεται στο σχήμα 3.3, όπου κάθε σταθμός χρησιμοποιεί τέσσερις δέσμες. Η πληροφορία "A, 4" είναι γνωστή στον A λόγω του μηχανισμού ποικιλίας επιλογής. Το πρόβλημα είναι ότι ο A δεν μπορεί να αναγνωρίσει τη δέσμη από την οποία ο B λαμβάνει το πακέτο του. Για αυτό τον λόγο, σε κάθε πακέτο, εκτός από τις άλλες πληροφορίες, ο αποστολέας στέλνει έναν αριθμό που δείχνει την δέσμη από την οποία στέλνεται το πακέτο. Κατ' αυτό τον τρόπο, κατά τη λήψη ενός πακέτου, ο δέκτης μπορεί να ενημερώσει όλη την πληροφορία της αντίστοιχης εγγραφής. Όπως έχουμε αναφέρει, αυτή η πληροφορία δεν είναι απαραίτητη

για την εκτέλεση της χειραψίας τεσσάρων πακέτων, λόγω του κυκλικού κατευθυντικού RTS. Εντούτοις, αυτές οι πληροφορίες είναι χρήσιμες στην απόφαση των γειτόνων για την αναβολή ή όχι της μετάδοσής τους, όπως εξηγούμε στην επόμενη παράγραφο.

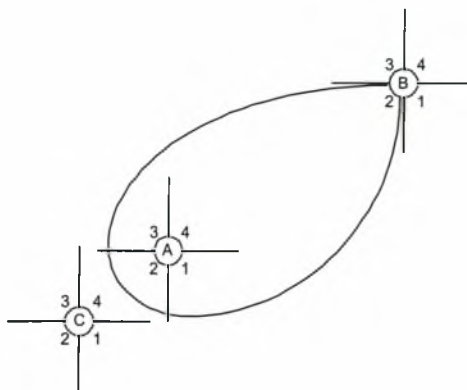
3.4.3 Η χρήση του D-NAV

Όπως έχουμε συζητήσει, ένα από τα κύρια προβλήματα των κατευθυντικών μεταδόσεων στα ad-hoc δίκτυα, είναι η αύξηση του προβλήματος του κρυμμένου κόμβου. Το πρωτόκολλό μας αντιμετωπίζει αυτό το πρόβλημα, ενημερώνοντας τους γείτονες για την επικείμενη μετάδοση. Οι γείτονες που λαμβάνουν το κυκλικό RTS (ή εναλλακτικά το CTS) πρέπει να αποφασίσουν εάν είναι απαραίτητο να αναβάλλουν τη μετάδοσή τους προς κάποια συγκεκριμένη θέση. Στις [TMRB02], [CYRV02] υπάρχει μια εκτενής συζήτηση για αυτό το πρόβλημα. Οι δύο μελέτες υιοθετούν το σχήμα D-NAV που προτείνεται στην [KSV00] ως μηχανισμός επίλυσης του προβλήματος αυτού. Το D-NAV είναι ένα Κατευθυντικό Διάνυσμα Δέσμευσης του Δικτύου (Directional Network Allocation Vector) το οποίο λειτουργεί με τη φιλοσοφία του NAV που προτείνεται στο IEEE 802.11. Η διαφορά του είναι ότι είναι προσαρμοσμένο στην κατευθυντική επικοινωνία.

Το D-NAV χρησιμοποιεί έναν πίνακα, μέσω του οποίου παρακολουθεί τις κατευθύνσεις και τις αντίστοιχες διάρκειες, κατά τις οποίες ο σταθμός πρέπει ή δεν πρέπει να αρχίσει μετάδοση [CYRV02]. Η συνεχής αναπροσαρμογή αυτού του πίνακα με τις σωστές πληροφορίες, με σκοπό να κρατηθούν οι γείτονες σιωπηλοί προς τη σωστή κατεύθυνση κατά τη διάρκεια μιας μετάδοσης, είναι σημαντική για την μείωση του προβλήματος του κρυμμένου κόμβου, καθώς επίσης και για τη χωρική επαναχρησιμοποίηση.

Η σωστή αναπροσαρμογή του πίνακα του D-NAV εξαρτάται από δυο ζητήματα που πρέπει να αντιμετωπισθούν. Το πρώτο είναι η σωστή πληροφόρηση των γειτόνων για την επικείμενη μετάδοση. Το δεύτερο είναι η σωστή γνώση των γειτόνων σχετικά με τη θέση του αποστολέα και του παραλήπτη ώστε να ληφθεί κατάλληλη απόφαση για τις κατευθύνσεις στις οποίες ο κάθε γείτονας πρέπει να αναβάλλει τη μετάδοσή του για να μην καταστραφεί η επικείμενη χειραψία.

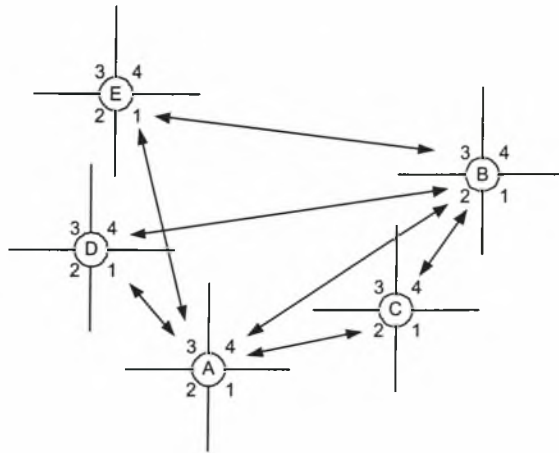
Οι εργασίες [TMRB02], [CYRV02] συζητούν ποιοτικά το θέμα, αλλά δεν προτείνουν έναν πρακτικό αλγόριθμο για τη σωστή αναπροσαρμογή του πίνακα του D-NAV. Οι συγγραφείς της [CYRV02], υποθέτοντας τη γνώση ενός κόμβου για τη θέση άλλων κόμβων, απλοποιούν πάρα πολύ το πρόβλημα, καθιστώντας το τετριμμένο. Επιπλέον, οι κατευθυντικές μεταδόσεις μειώνουν τη διάδοση των πληροφοριών που μεταδίδονται από την ανταλλαγή των RTS - CTS για την επικείμενη μετάδοση.



Σχήμα 3.3: Ένα σενάριο όπου φαίνεται το πρόβλημα του κρυμμένου κόμβου

Στην [TMRB02], οι συγγραφείς προτείνουν την ρύθμιση του D-NAV λαμβάνοντας υπόψη τη θέση των σταθμών από τους οποίους κάποιος λαμβάνει τα πακέτα RTS, CTS ή δεδομένων. Δηλαδή την αναβολή της μετάδοσης προς εκείνες τις δέσμες από τις οποίες ο σταθμός έλαβε ένα ή περισσότερα από τα προαναφερθέντα πακέτα. Με αυτόν τον τρόπο όμως, ένας από τους γείτονες δεν μπορεί μόνο με τη λήψη του RTS να συμπεράνει σωστά προς ποιες κατευθύνσεις πρέπει να αναβάλλει τη μετάδοσή του γιατί δεν γνωρίζει τίποτε για τη θέση ή την κατεύθυνση του παραλήπτη. Έτσι μπορεί να αναβάλλει την μετάδοσή του μόνο προς την κατεύθυνση του αποστολέα. Συνεπώς, για τη σωστή αναπροσαρμογή του D-NAV σε μια επικείμενη μετάδοση, ένας γείτονας πρέπει να ακούσει και το πακέτο RTS και το CTS. Διαφορετικά θα ενημερώσει τον πίνακα D-NAV του για τον ένα μόνο από τους δύο κόμβους και έτσι μπορεί να καταστρέψει τη μετάδοση. (Λάβετε υπόψη ότι για μια επιτυχή μετάδοση δεν πρέπει να υπάρξει καμία σύγκρουση ούτε στον αποστολέα ούτε στον παραλήπτη λόγω της ανταλλαγής των τεσσάρων πακέτων της χειραψίας).

Ένα άλλο πρόβλημα που συζητείται στην [CYRV02] είναι το *Πρόβλημα του κρυμμένου κόμβου λόγω ασυμμετρίας στο κέρδος* (Hidden terminal problem due to asymmetry in gain). Αυτό το πρόβλημα παρουσιάζεται στο σχήμα 3.3. Εδώ ο κόμβος A στέλνει RTS στον B ενώ ο Γ είναι γείτονας. Όταν οι A και Γ είναι αδρανείς, ακούνε το μέσο ιστροπικά. Όπως μπορούμε να δούμε, η δέσμη του B μόλις που μπορεί να φθάσει τον A, κάνοντας τον Γ κρυμμένο κόμβο για τον B. Σε αυτό το σενάριο ο Γ δεν μπορεί να ακούσει το RTS του A ούτε το CTS του B. Έτσι ο Γ δεν γνωρίζει για τη μετάδοση του πακέτου δεδομένων από τον A στον B. Όταν ο A αρχίζει να μεταδίδει το πακέτο δεδομένων κατευθυντικά στον B, ο B χρησιμοποιώντας ποικιλία επιλογής, λαμβάνει κατευθυντικά επίσης. Εάν τώρα



Σχήμα 3.4: Ένα σενάριο στο οποίο οι κόμβοι χρησιμοποιούν τους Πίνακες Θέσεων τους

ο Γ στείλει ένα πακέτο προς την κατεύθυνση του Β, ενώ αυτή η μετάδοση είναι σε εξέλιξη, ο Β μπορεί να ακούσει αυτήν την μετάδοση λόγω της κατευθυντικής λήψης του, καταλήγοντας σε σύγκυση των δυο σημάτων. Αυτή η σύγκυση οδηγεί στη σύγκρουση των πακέτων.

Το πρωτόκολλό μας λύνει αυτά τα προβλήματα μέσω ενός πολύ απλού μηχανισμού. Όπως έχουμε αναφέρει, κάθε σταθμός διατηρεί έναν Πίνακα Θέσεων. Σε αυτόν τον πίνακα, κρατιούνται τα ζευγάρια των δεσμών που αλληλεπιδρούν κατά την επικοινωνία μεταξύ του σταθμού και των γειτόνων του. Όταν ένας σταθμός μεταδίδει ένα RTS ή ένα CTS σε έναν άλλο σταθμό, η επικεφαλίδα του πακέτου περιέχει το αντίστοιχο ζευγάρι δεσμών. Κάθε γείτονας που λαμβάνει ένα πακέτο, εξετάζει τον Πίνακα Θέσεων του για να βρει τις δέσμες μέσω των οποίων μπορεί να "δει" τους δυο σταθμούς. Εάν μια από αυτές τις δέσμες συμπίπτει με την αντίστοιχη δέσμη του RTS ή του CTS, ο γείτονας αναβάλλει τη μετάδοσή του από αυτήν την δέσμη. Ο μηχανισμός αυτός φαίνεται στο παράδειγμα του σχήματος 3.4.

Σε αυτόν το σχήμα, ο σταθμός Α αρχίζει μια μετάδοση προς το σταθμό Β. Οι σταθμοί Β, Γ, Δ και Ε είναι γείτονες που ακούνε το κυκλικό RTS από τον Α. Το RTS όπως φαίνεται από το σχήμα περιέχει την ακόλουθη πληροφορία: Α, Β, 4, 2. Αυτό σημαίνει ότι ο Α πρόκειται να στείλει τα πακέτα RTS, δεδομένα και να λάβει τα CTS, Ack από την δέσμη 4, ενώ ο Β πρόκειται να στείλει τα CTS, Ack και να λάβει τα RTS, δεδομένα από την δέσμη 2. Από το σχήμα μπορούμε να συμπεράνουμε ότι τα αντίστοιχα τμήματα των Πινάκων Θέσεων στους τρεις κόμβους είναι όπως στον πίνακα 3.2.

Από τις πληροφορίες που περιλαμβάνονται στο RTS, οι τρεις γείτονες ξέρουν ότι ο Α θα λάβει από την δέσμη 4 ενώ ο Β θα λάβει από την δέσμη 2. Ως εκ τούτου,

Για τον κόμβο Γ

Εγώ	ο Γείτονας	Η δέσμη μου	Η δέσμη του Γείτονα
Γ	A	2	4
Γ	B	4	2

Για τον κόμβο Δ

Εγώ	ο Γείτονας	Η δέσμη μου	Η δέσμη του Γείτονα
Δ	A	1	3
Δ	B	4	2

Για τον κόμβο Ε

Εγώ	ο Γείτονας	Η δέσμη μου	Η δέσμη του Γείτονα
Ε	A	3	3
Ε	B	3	3

Πίνακας 3.2: Τμήματα των Πινάκων Θέσεων που διατηρούν οι κόμβοι Γ, Δ, Ε του σχήματος 3.4

κάθε γείτονας εξετάζει τον Πίνακα Θέσεων του (που φαίνεται στον πίνακα 3.2) για να δει εάν υπάρχει το ενδεχόμενο να καταστρέψει την λήψη στον Α ή στον Β. Εάν αυτό μπορεί να συμβεί, ο σταθμός αναβάλλει τη μετάδοσή του μέσω της αντίστοιχης δέσμης ενημερώνοντας τον D-NAV πίνακά του.

Ας δούμε τώρα πώς οι Γ, Δ, Ε θα συμπεριφερθούν στο προηγούμενο σενάριο. Ο Γ βλέπει ότι ο Α μπορεί να τον ακούσει από την δέσμη 4, ενώ ο Β μπορεί να τον ακούσει από την δέσμη 2. Έτσι, συνειδητοποιεί ότι μπορεί να παρεμποδίσει τη λήψη και του Α και του Β. Αυτή η πληροφορία οδηγεί τον Γ να αναβάλλει τη μετάδοσή του για την αντίστοιχη χρονική περίοδο μέσω των δεσμών που μπορούν να δημιουργήσουν αυτή την παρεμβολή, δηλαδή των δεσμών 2 και 4, ενημερώνοντας τον πίνακα D-NAV. Ο Δ βλέπει ότι ο Α μπορεί να τον ακούσει από την δέσμη 3, ενώ ο Β από την δέσμη 2. Με αυτόν τον τρόπο, συνειδητοποιεί ότι μπορεί να παρεμποδίσει μόνο την λήψη του Β και έτσι αναβάλλει τη μετάδοσή του μέσω της δέσμης 4 ενημερώνοντας τον πίνακα D-NAV του. Ομοίως, ο Ε συνειδητοποιεί ότι δεν μπορεί να βλάψει την επικείμενη μετάδοση και έτσι δεν αναβάλλει τη μετάδοσή του προς καμία δέσμη.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι τρεις κόμβοι ενεργούν με αυτό τον τρόπο ακούγοντας μόνο το RTS από τον Α. Στα πρωτόκολλα που έχουν προταθεί μέχρι τώρα, λόγω της έλλειψης των πρόσθετων πληροφοριών που έχουμε προσθέσει στο RTS, οι γείτονες που λαμβάνουν το RTS δεν μπορούν να αντιληφθούν την δέσμη από την οποία ο Β θα λάβει το πακέτο δεδομένων και έτσι θα ενημερώσουν τον πίνακα D-NAV τους μόνο με την πληροφορία για τη θέση του Α, μην προσπαθώντας με τον τρόπο αυτό

τη λήψη στον B. Πρέπει να ακούσουν και το CTS, για να αντιληφθούν τη θέση του B, οπότε να προστατεύσουν τη λήψη και σε αυτόν τον κόμβο.

Δείτε πώς το πρωτόκολλό μας διαχειρίζεται τη σύγκρουση του σχήματος 3.3. Ο κόμβος Γ θα ακούσει το κυκλικό κατευθυντικό RTS από τον Α, και έτσι θα ενημερωθεί για την επικείμενη μετάδοση. Διαβάζοντας τις επιπλέον πληροφορίες στο RTS, σχετικά με τις δέσμες που θα χρησιμοποιηθούν για αυτή την μετάδοση, ο Γ θα εξετάσει τον Πίνακα Θέσεων του και θα αναβάλλει τη μετάδοση προς την κατεύθυνση του Β (δηλ. τη δέση 4) με συνέπεια την αποφυγή της σύγκρουσης.

Το πρωτόκολλό μας υποστηρίζει με αποδοτικό τρόπο την κινητικότητα των σταθμών, δεδομένου ότι η συχνή ενημέρωση του Πίνακα Θέσεων (κάθε φορά που ένας κόμβος λαμβάνει ένα πακέτο) οδηγεί σε μια συνεχή παρακολούθηση της θέσης των γειτόνων.

3.4.4 Μερικές λεπτομέρειες του Πρωτοκόλλου

Υπάρχουν μερικές λεπτομέρειες σχετικές με την εφαρμογή του πρωτοκόλλου που προτείνουμε. Αυτές είναι οι απαραίτητες αλλαγές σε μερικά χρονικά διαστήματα που έχουν καθοριστεί από το 802.11, προκειμένου να υποστηριχθεί η κατευθυντικότητα. Στις επόμενες παραγράφους υποθέστε ότι ο Α είναι ο αποστολέας και ο Β ο παραλήπτης.

1. Το CTS μεταδίδεται μετά από το κυκλικό RTS

Στην περίπτωση του πρωτοκόλλου μας, το πλαίσιο CTS πρέπει να μεταδοθεί από τον Β, αμέσως μετά την ολοκλήρωση του κυκλικού RTS. Για αυτόν τον λόγο, ο Β περιμένει χρόνο T (αντί για χρόνο SIFS που περιμένει στο 802.11) μετά τη λήψη του RTS και έπειτα στέλνει το CTS. Ο χρόνος T υπολογίζεται ως εξής:

$$T = K * \text{χρόνος μετάδοσης RTS} + \text{SIFS}, \text{ όπου } K = M - \text{τον αριθμό δέσμης του A}$$

Κατά συνέπεια, εάν ο Β λάβει ένα RTS από το Α από την πρώτη δέση του (δέση 1) και $M=4$, θα περιμένει για χρόνο ίσο με $(4-1)*\text{χρόνος μετάδοσης του RTS} + \text{SIFS}$. Αυτός είναι ο χρόνος που απαιτείται για τρεις ακόμα κατευθυντικές μεταδόσεις του RTS μέχρι την ολοκλήρωση της κυκλικής μετάδοσης του RTS. Εάν ο Β λάβει ένα RTS από το Α μέσω της τελευταίας δέσμης του (δέση 4) τότε θα στείλει το CTS, SIFS χρόνο μετά από τη λήψη του RTS (μιας και τώρα το K είναι 0).

Κατά τη διάρκεια του χρόνου αναμονής T, ο Β παραμένει σε κατάσταση "Έτοιμος για μετάδοση" αγνοώντας την λήψη άλλων πακέτων.

2. Ένας αδρανής κόμβος ακούει το κανάλι για χρόνο περισσότερο από DIFS πριν από τη μετάδοση

Είναι προφανές ότι τώρα κάθε αδρανής κόμβος πρέπει να ακούσει το κανάλι περισσότερο από DIFS πριν τη μετάδοσή του, δεδομένου ότι τώρα το RTS είναι κυκλικό, οπότε η μετάδοσή του γύρω από έναν κόμβο παίρνει περισσότερο χρόνο σε σχέση με την ισοτροπική μετάδοση. Για αυτό τον λόγο στις προσομοιώσεις μας ορίζουμε ότι ένας αδρανής κόμβος θα ακούει το μέσο για χρόνο ίσο με M^* χρόνο μετάδοσης του RTS πριν από τη μετάδοσή του.

3. Το πεδίο "Διάρκεια" του πακέτου RTS μειώνεται κατά χρονικό διάστημα ίσο με το χρόνο μετάδοσης ενός κατευθυντικού RTS, κάθε φορά που μεταδίδεται ένα πλαίσιο RTS στον κύκλο

Όπως έχουμε αναφέρει, το RTS ενημερώνει τους γείτονες για την επικείμενη μετάδοση. Το IEEE 802.11 ορίζει ότι στην επικεφαλίδα κάθε πακέτου υπάρχει ένα πεδίο που ονομάζεται "Διάρκεια", το οποίο περιέχει το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την ολοκλήρωση ολόκληρης της χειραψίας. Αυτός σημαίνει ότι:

$$\text{Διάρκεια} = \text{χρόνος μετάδοσης του RTS} + \text{SIFS} + \text{χρόνος μετάδοσης του CTS} + \text{SIFS} + \text{χρόνος μετάδοσης των δεδομένων} + \text{SIFS} + \text{χρόνος μετάδοσης του Ack}$$

Τώρα ο χρόνος μετάδοσης του RTS εξαρτάται από την δέσμη μέσω της οποίας πρόκειται να σταλεί. Κατά συνέπεια, για την πρώτη δέσμη:

$$\text{Χρόνος μετάδοσης κυκλικού RTS} = (M-1) * \text{χρόνος μετάδοσης κατευθυντικού RTS}$$

Για τη δεύτερη δέσμη:

$$\text{Χρόνος μετάδοσης κυκλικού RTS} = (M-2) * \text{χρόνος μετάδοσης κατευθυντικού RTS}$$

Etc.

4. Το κυκλικό RTS σέβεται τις εξελισσόμενες μεταδόσεις

Εάν το D-NAV του A δεν επιτρέπει τη μετάδοση του RTS προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση, ο A δεν στέλνει το RTS προς αυτήν την κατεύθυνση, παραμένοντας σιωπηλός κατά τη διάρκεια της αντίστοιχης περιόδου. Κατ' αυτό τον τρόπο ο αποστολέας σέβεται κάθε εξελισσόμενη μετάδοση.

3.5 Μοντέλο και αποτελέσματα Προσομοιώσεων

3.5.1 Μοντέλο Προσομοιώσεων

Οι προσομοιώσεις μας έγιναν στο εργαλείο OPNET, στην έκδοση 10.0 [OPN]. Επιλέξαμε το συγκεκριμένο εργαλείο, επειδή προσφέρει πολύ καλή προσέγγιση στην προσομοίωση των κατευθυντικών κεραιών. Το εργαλείο σύνταξης κεραιάς (antenna editor) του OPNET υποστηρίζει τη δημιουργία τρισδιάστατων σχεδίων για το λοβό της κεραιάς. Η κύρια δέσμη μπορεί να στοχεύει σε οποιοδήποτε

σημείο στον τρισδιάστατο χώρο και η ενέργεια που λαμβάνεται από κάθε κόμβο υπολογίζεται αυτόματα από το OPNET μέσω διαδικασιών του πυρήνα.

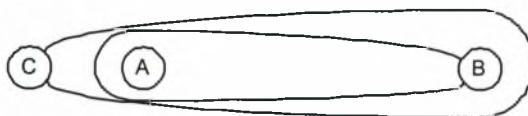
Στις προσομοιώσεις μας υποθέσαμε ότι το φυσικό κανάλι είναι απαλλαγμένο από λάθη και η καθυστέρηση διάδοσης είναι μηδέν. Ο προορισμός κάθε πακέτου επιλέγεται τυχαία από το σύνολο των γειτόνων ενός σταθμού. Το μήκος των πακέτων είναι σταθερό και ίσο με 1024 ψηφιολέξεις (bytes). Η άφιξη πακέτων σε κάθε σταθμό είναι μια διαδικασία Poisson με μέση τιμή λ . Για να μεταβάλλουμε το φορτίο του δικτύου, μεταβάλλουμε το λ . Με τον τρόπο αυτό μεταβάλλουμε το προσφερόμενο φορτίο στην ουρά κάθε σταθμού. Η τιμή του λ εξαρτάται από τον αριθμό των σταθμών που συμμετέχουν στο σενάριο και το συνολικό φορτίο που θέλουμε να επιτύχουμε. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των σταθμών, τόσο μικρότερο είναι το προσφερόμενο φορτίο που θέτουμε σε κάθε σταθμό, για να πετύχουμε μια συγκεκριμένη τιμή στο συνολικό φορτίο. Για να μειώσουμε το προσφερόμενο φορτίο κάθε σταθμού αυξάνουμε το λ . Από την άλλη, για να πετύχουμε μια υψηλότερη τιμή του συνολικού φορτίου, όταν ο αριθμός των σταθμών παραμένει σταθερός, αυξάνουμε το προσφερόμενο φορτίο σε καθέναν από αυτούς, μειώνοντας την τιμή του λ .

Η ποσότητα που καταγράφεται και μετριέται για την αξιολόγηση των πρωτοκόλλων που προσομοιώνουμε, είναι η συνολική ρυθμαπόδοση (throughput) που επιτυγχάνεται από το δίκτυο. Σαν ρυθμαπόδοση ορίζουμε το επί τοις εκατό ποσοστό του ρυθμού του καναλιού, το οποίο χρησιμοποιείται για μετάδοση πακέτων δεδομένων. Όταν η συνολική ρυθμαπόδοση υπερβαίνει το 100% σημαίνει ότι υπάρχουν περισσότερα από ένα ζευγάρια κόμβων που επικοινωνούν ταυτόχρονα για κάποιο χρονικό διάστημα της προσομοίωσης. Έτσι, ένα τέτοιο αποτέλεσμα είναι μια ένδειξη της μέσης επαναχρησιμοποίησης του καναλιού, λόγω της χρήσης των κατευθυντικών μεταδόσεων.

Κάθε προσομοίωση τρέχει για 200 δευτερόλεπτα με μια περίοδο προθέρμανσης 50 δευτερολέπτων. Στις προσομοιώσεις μας έχουμε χρησιμοποιήσει κόμβους εξοπλισμένους με κεραιοσειρές με 1, 4 και 8 στοιχεία. Στην αρχή κάθε προσομοίωσης ο Πίνακας Θέσεων κάθε σταθμού είναι κενός και ενημερώνεται βαθμιαία, καθώς η προσομοίωση προχωράει.

3.5.2 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων

Στις προσομοιώσεις μας μελετούμε τα οφέλη που το πρωτόκολλό μας προσφέρει, συγκρίνοντας το με άλλα MAC πρωτόκολλα που χρησιμοποιούν κατευθυντικές και μη μεταδόσεις. Ειδικότερα, το συγκρίναμε με το 802.11 (το οποίο χρησιμοποιεί ιστροπικές μεταδόσεις) καθώς επίσης και με το πρωτόκολλο D-MAC [CYRV02] που χρησιμοποιεί κατευθυντικές μεταδόσεις για το RTS και το CTS. Προσπαθήσαμε να



Σχήμα 3.5: Οι μεταδόσεις του σεναρίου του σχήματος 3.3

εξασφαλίσουμε ότι τα σεσάρια που έχουμε επιλέξει εγγυώνται ίσους όρους μεταξύ των εξεταζόμενων πρωτοκόλλων. Κατά συνέπεια, προσομοιώσαμε το πρωτόκολλό μας και το D-MAC σε συγκεκριμένα σεσάρια με δεδομένες τοπολογίες, δεδομένου ότι το D-MAC υποθέτει τη γνώση της θέσης των γειτόνων από οποιοδήποτε κόμβο. Δεν έχει κανένα νόημα να συγκρίνουμε αυτά τα δύο πρωτόκολλα σε σεσάρια όπου δεν υπάρχει γνώση των κόμβων για τη θέση των γειτόνων τους, δεδομένου ότι το D-MAC δεν θα λειτουργούσε σωστά σε ένα τέτοιο περιβάλλον. Γνωρίζοντας ότι το προτεινόμενο πρωτόκολλο είναι η μόνη ολοκληρωμένη λύση που χρησιμοποιεί κατευθυντικές μεταδόσεις και μπορεί να λειτουργήσει χωρίς καμία υπόθεση για τη θέση των γειτόνων, το συγκρίνουμε σε τυχαία σεσάρια (όπου οι κόμβοι δεν έχουν καμία γνώση για τη θέση των γειτόνων τους) μόνο με το 802.11.

Στατικά Σεσάρια

Το πρώτο σεσάριο που μελετάμε είναι το σεσάριο του σχήματος 3.3. Επιλέξαμε αυτό το απλό σεσάριο για να συγκρίνουμε την αποτελεσματικότητα του πρωτοκόλλου μας σε σχέση με αυτήν του D-MAC [KSV00], το οποίο χρησιμοποιεί κατευθυντικά RTS-CTS. Όπως μπορούμε να δούμε στο σχήμα 3.5, ο A μεταδίδει στον B ενώ ο Γ μεταδίδει στον A. Η περιοχή κάλυψης του CTS του B δεν περιλαμβάνει τον Γ. Από την άλλη, καθώς ο B λαμβάνει κατευθυντικά από την κατεύθυνση του A, μπορεί να ακούσει τις ταυτόχρονες μεταδόσεις του A και του Γ οι οποίες λόγω του γεγονότος αυτού οδηγούν σε σύγκρουση. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 3.3.

Όπως περιγράψαμε στην προηγούμενη παράγραφο, το D-MAC παρουσιάζει μείωση στη ρυθμαπόδοσή του, η οποία οφείλεται στο πρόβλημα του κρυμμένου κόμβου λόγω ασυμμετρίας στο κέρδος. Το πρωτόκολλό μας ξεπερνά αυτό το πρόβλημα, λόγω του ότι ο A ενημερώνει τον Γ για την εξελισσόμενη μετάδοση, μέσω του κυκλικού RTS του. Με τον τρόπο αυτό ο B παύει να είναι κρυμμένος κόμβος για τον Γ. Όπως μπορούμε να δούμε και στον πίνακα, το πρωτόκολλό μας πετυχαίνει έτσι ρυθμαπόδοση διπλάσια από αυτή του D-MAC.

Κάτι άλλο που παρατηρούμε στον πίνακα 3.3 είναι ότι το D-MAC έχει πρόβλημα δικαιοσύνης. Ο κόμβος Γ έχει σχεδόν τη μισή από τη ρυθμαπόδοση του κόμβου A. Αντίθετα, στο πρωτόκολλό μας, η συνολική ρυθμαπόδοση μοιράζεται εξίσου μεταξύ των δύο κόμβων (περίπου 40% για τον καθένα). Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι στο

Ρυθμαπόδοση (%) σε υψηλό φόρτο	D-MAC	Το πρωτόκολλό μας
Κόμβος A	33,34	40,21
Κόμβος C	15,57	39,89
Συνολικά	48,91	80,1

Πίνακας 3.3: Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του σεναρίου 3.3 που εξετάζει το πρόβλημα του κρυμμένου κόμβου λόγω ασυμμετρίας στο κέρδος



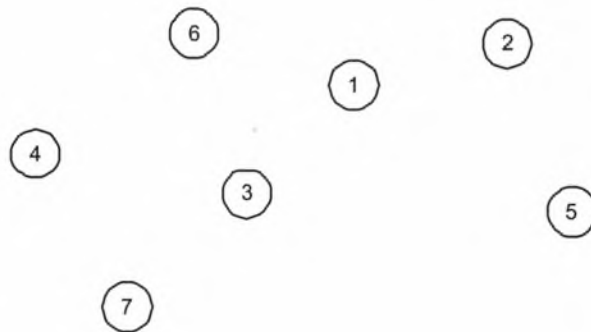
Σχήμα 3.6: Ένα σενάριο γραμμικής τοπολογίας

D-MAC, ο κόμβος Γ δεν μπορεί να γνωρίσει για την επικοινωνία μεταξύ του Α και του Β (δεδομένου ότι το RTS από τον Α είναι κατευθυντικό προς τον Β και το CTS από το Β δεν μπορεί να φθάσει στον Γ). Έτσι ο Γ, υποθέτοντας ότι το μέσο είναι ελεύθερο, στέλνει επανειλημμένα RTS. Δεδομένου ότι δεν λαμβάνει απόκριση από τον Α (ο Α επικοινωνεί με τον Β) εκτελεί τον αλγόριθμο υποχώρησης (back-off) επανειλημμένα καταλήγοντας με αυτόν τον τρόπο σε μεγάλες περιόδους υποχώρησης (back-off). Αντίθετα, το πρωτόκολλό μας παρέχει στον Γ πληροφορία για τη συνεχιζόμενη επικοινωνία (μέσω του κυκλικού RTS), με συνέπεια την αποφυγή των μεγάλων περιόδων υποχώρησης (back-off).

Το δεύτερο πείραμά μας εξετάζει την επιβάρυνση που προστίθεται στην απόδοση του πρωτοκόλλου μας λόγω της κυκλικής μετάδοσης του RTS. Στο προτεινόμενο πρωτόκολλο η μετάδοση του RTS διαρκεί περισσότερο απ' ό,τι στο D-MAC ή στο 802.11, λόγω του γεγονότος ότι τώρα το RTS μεταδίδεται M φορές. Με την προσομοίωση του σεναρίου του σχήματος 3.6, μετράμε την μείωση της ρυθμαπόδοσης του πρωτοκόλλου μας σε σχέση με το πρωτόκολλο κατευθυντικής μετάδοσης των RTS-CTS, σε μια περίπτωση όπου το πρωτόκολλό μας δεν ωφελείται καθόλου από τον κυκλικό μηχανισμό μετάδοσης. Σε αυτό το σενάριο, δεδομένου ότι όλοι οι κόμβοι είναι σε γραμμική τοπολογία, η μετάδοση του κυκλικού RTS δεν είναι απαραίτητη, δεδομένου ότι τώρα όλοι οι κόμβοι μπορούν να ακούσουν το κατευθυντικό RTS-CTS και έτσι να ενημερωθούν για τις εξελισσόμενες μεταδόσεις. Για να δούμε καθαρότερα την επίδραση του κυκλικού RTS, ενισχύσαμε τα κατευθυντικά RTS και CTS με τη δυνατότητα της πληροφόρησης των γειτόνων και για τους δύο σταθμούς που συμμετέχουν στην επικοινωνία, ακριβώς όπως στο πρωτόκολλό μας. Ο πίνακας 3.4 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Όπως μπορούμε να δούμε, το προτεινόμενο πρωτόκολλο έχει μειωμένη ρυθμαπόδοση της τάξης του 3,5% στην περίπτωση όπου $M = 4$ και 7% στην περίπτωση $M = 8$. Αυτή η μείωση

	Ενισχυμένο D-MAC	Το Πρωτόκολλό μας	
		M=4	M=8
Ρυθμαπόδοση (%) σε υψηλό φόρτο	169,11	163,54	157,4
Μείωση (%) (σε σύγκριση με το ενισχυμένο D-MAC		3,29	6,92

Πίνακας 3.4: Αποτελέσματα προσομοίωσης του σεναρίου του σχήματος 3.6 τα οποία δείχνουν τις επιπτώσεις του κυκλικού RTS



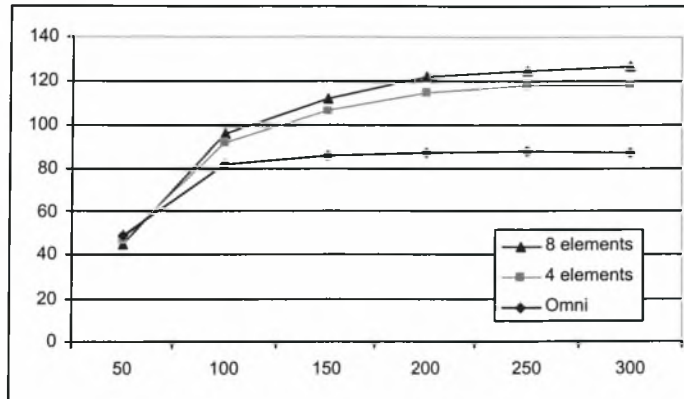
Σχήμα 3.7: Ένα τυχαίο σενάριο με 7 κόμβους

στην απόδοση του πρωτοκόλλου μας οφείλονται στις επαναλαμβανόμενες μεταδόσεις του RTS. Τονίζουμε ότι η μείωση είναι αρκετά χαμηλή σε σύγκριση με τα οφέλη που προκύπτουν από τη χρήση του.

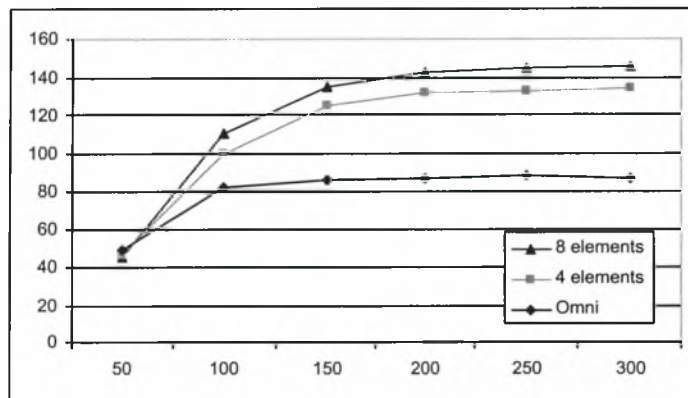
Στο επόμενο πείραμά μας, μελετάμε την περίπτωση ενός σεναρίου με 7 κόμβους, τυχαία κατανεμημένων σε μια διδιάστατη περιοχή. Εξετάζουμε την απόδοση του πρωτοκόλλου μας σε σύγκριση με το 802.11, καθώς το προσφερόμενο φορτίο αυξάνεται. Μπορούμε να δούμε την τοπολογία του σεναρίου αυτού στο σχήμα 3.7.

Στο σχήμα 3.7, υποθέτουμε ότι κάθε κόμβος μπορεί να ακούσει όλους τους άλλους. Η περιοχή κάλυψης των τριών μοντέλων μετάδοσης (κεραίες με 1, 4, 8 στοιχεία) θεωρείται ότι είναι ίση. Με αυτό τον τρόπο θα μετρήσουμε την επίδραση της κυκλικής κατευθυντικής μετάδοσης του RTS, κρατώντας όλες τις άλλες παραμέτρους σταθερές. Ας λάβουμε υπόψη ότι στα αποτελέσματα που παρουσιάζονται πρέπει να προσθέσουμε την επιπλέον αύξηση στη ρυθμαπόδοση λόγω της αύξησης στην περιοχή κάλυψης.

Η συνολική ρυθμαπόδοση του δικτύου, σε σχέση με το συνολικό προσφερόμενο φορτίο παρουσιάζεται στο σχήμα 3.8. Όπως μπορούμε να δούμε, το προτεινόμενο πρωτόκολλο αυξάνει ιδιαίτερα τη ρυθμαπόδοση, καθώς ο αριθμός των στοιχείων των κεραίων αυξάνεται. Κάτω από συνθήκες υψηλού φόρτου, η ρυθμαπόδοση του πρωτοκόλλου μας έχει κέρδος 34% στην περίπτωση 4 στοιχείων και 42% στην



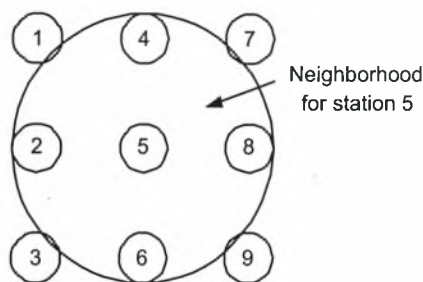
Σχήμα 3.8: Ρυθμαπόδοση του προτεινόμενου πρωτοκόλλου με κεραίες 1, 4 και 8 στοιχείων για το τυχαίο σενάριο του σχήματος 3.7



Σχήμα 3.9: Ρυθμαπόδοση του προτεινόμενου πρωτοκόλλου με κεραίες 1, 4 και 8 στοιχείων για τυχαίο σενάριο με 15 κόμβους

περίπτωση 8 στοιχείων, έναντι του 802.11. Σε χαμηλό φόρτο, το πρωτόκολλό μας φαίνεται να έχει ελαφρώς χαμηλότερη ρυθμαπόδοση σε σχέση με το 802.11. Αυτό συμβαίνει λόγω του γεγονότος ότι υπό τέτοιες συνθήκες, οι κατευθυντικές μεταδόσεις δεν μπορούν να επωφεληθούν από τη χωρική επαναχρησιμοποίηση, δεδομένου ότι το φορτίο είναι πολύ χαμηλό. Από την άλλη, η κυκλική μετάδοση του RTS προσθέτει επιβάρυνση στη ρυθμαπόδοση σε σχέση με την ,μη κατευθυντική μετάδοση του 802.11. Καθώς το φορτίο αυξάνεται, αυτή η επιβάρυνση γίνεται γρήγορα αμελητέα, λόγω της αύξησης της ρυθμαπόδοσης που οφείλεται στη χωρική επαναχρησιμοποίηση.

Το επόμενο πείραμά μας είναι μια επέκταση του προηγούμενου σεναρίου σε ένα πιο αυθαίρετο περιβάλλον με περισσότερους σταθμούς. Έχουμε χρησιμοποιήσει



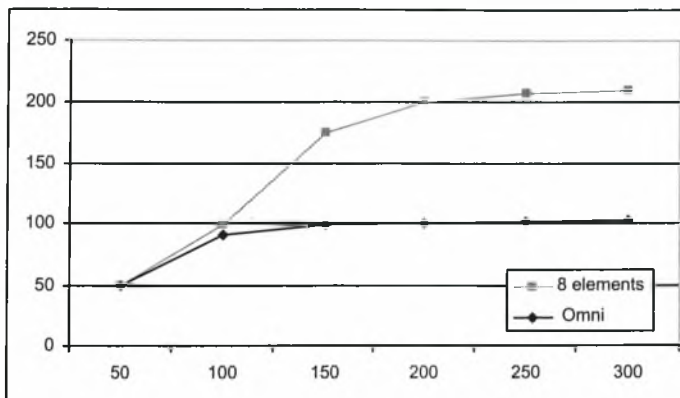
Σχήμα 3.10: Το σενάριο πλέγματος

μια τοπολογία με 15 σταθμούς τυχαία κατανεμημένους σε μια διδιάστατη περιοχή. Κάνουμε πάλι τις ίδιες υποθέσεις, δηλαδή ότι κάθε κόμβος μπορεί να ακούσει τους άλλους και ότι η περιοχή κάλυψης των τριών μοντέλων μετάδοσης (κεραίες με 1, 4, 8 στοιχεία) θεωρείται ίση. Τρέξαμε το πείραμα για δέκα διαφορετικές αυθαίρετες τοπολογίες των 15 σταθμών. Στο σχήμα 3.9 δίνουμε το μέσο όρο των αποτελεσμάτων.

Όπως μπορούμε να δούμε στο σχήμα 3.9, η εικόνα είναι ανάλογη με αυτό του προηγούμενου σεναρίου. Αυτό που αξίζει να σημειωθεί είναι ότι η γενική ρυθμαπόδοση του 802.11 συγκλίνει πάλι σχεδόν στην ίδια τιμή. Αυτό είναι κάτι που αναμένουμε, δεδομένου ότι δεν υπάρχει χωρική επαναχρησιμοποίηση στα σενάρια του 802.11 λόγω του ότι κάθε σταθμός μπορεί να ακούσει τους άλλους. Από την άλλη, η ρυθμαπόδοση του πρωτοκόλλου μας αυξάνεται σε σχέση με το σενάριο των 7 σταθμών. Αυτό συμβαίνει επειδή σε αυτό το σενάριο υπάρχουν περισσότεροι σταθμοί, οπότε είναι υψηλότερη η πιθανότητα ταυτόχρονων μεταδόσεων μεταξύ ζευγαριών σταθμών, γεγονός που οδηγεί στην αύξηση της χωρικής επαναχρησιμοποίησης.

Το τελευταίο πείραμά μας προσομοιώνει το σενάριο του σχήματος 3.10. Υπάρχουν 9 κόμβοι σε μια τοπολογία πλέγματος. Μπορούμε να αντιληφθούμε τους γείτονες του κάθε κόμβου από τον κύκλο γύρω από το σταθμό 5 που απεικονίζει την περιοχή κάλυψης των 8 δεσμών του συγκεκριμένου σταθμού.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων παρουσιάζονται στο σχήμα 3.11. Το πρωτόκολλό μας λειτουργεί καλύτερα από το 802.11 καθώς το προσφερόμενο φορτίο αυξάνεται. Σε συνθήκες υψηλού φόρτου, η ρυθμαπόδοση που επιτυγχάνεται από το προτεινόμενο σχήμα είναι διπλάσια από αυτή του 802.11. Αυτό συμβαίνει λόγω του γεγονότος ότι η χωρική επαναχρησιμοποίηση είναι ολοένα και μεγαλύτερη καθώς το φορτίο αυξάνεται. Στην περίπτωση του 802.11, το πρόβλημα του κρυμμένου κόμβου και το πρόβλημα του εκτεθειμένου κόμβου (λόγω του οποίου υπάρχουν αναβολές μεταδόσεων στους κόμβους, παρόλο που αυτές δεν καταστρέφουν κά-



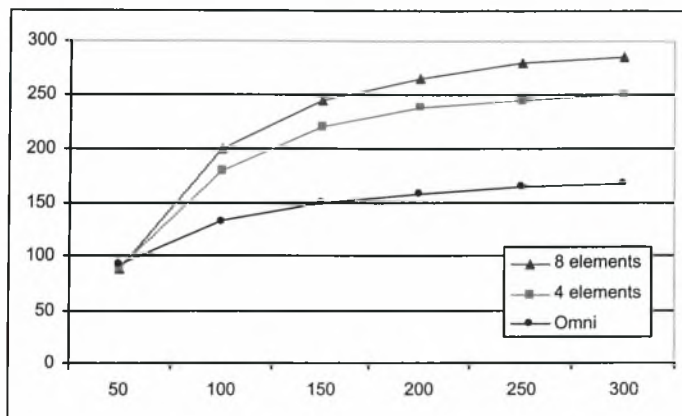
Σχήμα 3.11: Η ρυθμαπόδοση του προτεινόμενου πρωτοκόλλου για το σενάριο του σχήματος 3.10

ποια εξελισσόμενη μετάδοση) δεν επιτρέπει χωρική επαναχρησιμοποίηση υψηλού επιπέδου.

Τυχαία Σενάρια με Κινητικότητα

Η κινητικότητα των κόμβων ενός ασύρματου τοπικού δικτύου είναι ένα συνηθισμένο γεγονός. Στα τυπικά σενάρια ενός τέτοιου περιβάλλοντος οι κόμβοι του δικτύου μετακινούνται. Κατά συνέπεια, είναι σημαντικό να εξεταστεί η συμπεριφορά του πρωτοκόλλου μας σε τέτοιου είδους σενάρια. Η αποδοτική και άμεση ενημέρωση του Πίνακα Θέσεων, καθώς επίσης και η ακριβής μετάδοση των πακέτων προς τη σωστή κατεύθυνση, είναι πολύ σημαντικά ζητήματα για τη σωστή συμπεριφορά του πρωτοκόλλου. Για να μελετήσουμε την αποδοτικότητα του πρωτοκόλλου σε περιβάλλον με κινούμενους κόμβους θεωρούμε σενάρια στα οποία οι κόμβοι έχουν τυχαίες θέσεις. Μετράμε τη ρυθμαπόδοση σε κάθε σενάριο για την περίπτωση στην οποία οι κόμβοι είναι στατικοί καθώς και για την περίπτωση όπου οι κόμβοι είναι κινούμενοι. Εξετάζουμε την περίπτωση των κινητών κόμβων σε συνθήκες χαμηλής καθώς και υψηλής κινητικότητας. Ως χαμηλή κινητικότητα θεωρούμε την κίνηση των κόμβων με ταχύτητα 2 μέτρων/δευτερόλεπτο ενώ ως υψηλή κινητικότητα θεωρούμε την κίνηση των κόμβων με 10 μέτρα/δευτερόλεπτο.

Εξετάζουμε ένα τυχαίο σενάριο με 60 κόμβους. Υποθέτουμε ότι οι κόμβοι βρίσκονται σε έναν διδιάστατο χώρο $1250 \times 1250 \text{ m}^2$. Η μη κατευθυντική περιοχή κάλυψης ενός κόμβου είναι 250 μέτρα. Πρώτα μελετάμε την περίπτωση των στατικών κόμβων. Εκτελούμε το πείραμα για δέκα διαφορετικές τυχαίες τοπολογίες και παίρνουμε το μέσο όρο των αποτελεσμάτων. Η μέση ρυθμαπόδοση φαίνεται στο σχήμα 3.12.

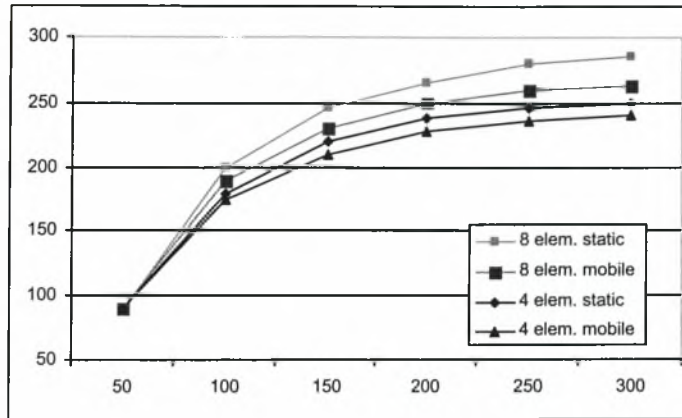


Σχήμα 3.12: Ρυθμαπόδοση στο σενάριο 60 στατικών κόμβων

Όπως μπορούμε να δούμε από αυτό το σχήμα, το πρωτόκολλό μας λειτουργεί πολύ καλύτερα από τα 802.11 στο σενάριο με στατικούς κόμβους σε τυχαίες θέσεις. Όμοια με τα τυχαία σενάρια 7 και 15 κόμβων της προηγούμενης παραγράφου, η ρυθμαπόδοση του πρωτοκόλλου μας αυξάνεται, καθώς το φορτίο των κόμβων αυξάνεται. Η ρυθμαπόδοση αυξάνεται επίσης, καθώς ο αριθμός στοιχείων στην κεραία κάθε κόμβου αυξάνεται. Αξίζει να παρατηρήσουμε ότι σε αυτό το σενάριο όπου οι κόμβοι είναι διεσπαρμένοι σε μια περιοχή αρκετά μεγάλη σε σύγκριση με την περιοχή κάλυψης ενός κόμβου, οπότε υπάρχει χωρική επαναχρησιμοποίηση, ακόμη και στην περίπτωση της μη κατευθυντικής μετάδοσης. Κατά συνέπεια, η ρυθμαπόδοση ακόμη και σε αυτή την περίπτωση κάτω από συνθήκες υψηλού φόρτου ξεπερνά το 100%.

Εκτελούμε πάλι το ίδιο σενάριο με 60 κόμβους, αλλά αυτή τη φορά οι κόμβοι είναι κινητοί. Η κινητικότητα των κόμβων είναι χαμηλή. Εξετάζουμε την επίδραση της κινητικότητας στην απόδοση του πρωτοκόλλου. Η ρυθμαπόδοση σε σύγκριση με το στατικό σενάριο απεικονίζεται στο σχήμα 3.13.

Σε αυτό το σχήμα μπορούμε να δούμε ότι το πρωτόκολλό μας συμπεριφέρεται με αποδοτικό τρόπο στην περίπτωση των κινητών χρηστών. Υπάρχει μια μικρή μείωση στη ρυθμαπόδοση σε σχέση με την περίπτωση των στατικών χρηστών. Αυτό οφείλεται στα δυο ακόλουθα γεγονότα: Όταν οι κόμβοι είναι κινητοί, υπάρχει πιθανότητα ένας από τους κόμβους που συμμετέχει σε μια επικοινωνία (είτε ως αποστολέας είτε ως παραλήπτης) να μετακινηθεί έξω από την κατευθυντική περιοχή κάλυψης του άλλου και κατά συνέπεια, το πακέτο της εξελισσόμενης μετάδοσης να χαθεί. Από την άλλη, υπάρχει πιθανότητα, κάποια από τις εγγραφές του πίνακα θέσεων ενός συγκεκριμένου κόμβου, προς στιγμήν να μην είναι ενημερωμένη σωστά. Κατά



Σχήμα 3.13: Ρυθμαπόδοση στο σενάριο 60 κινητών κόμβων

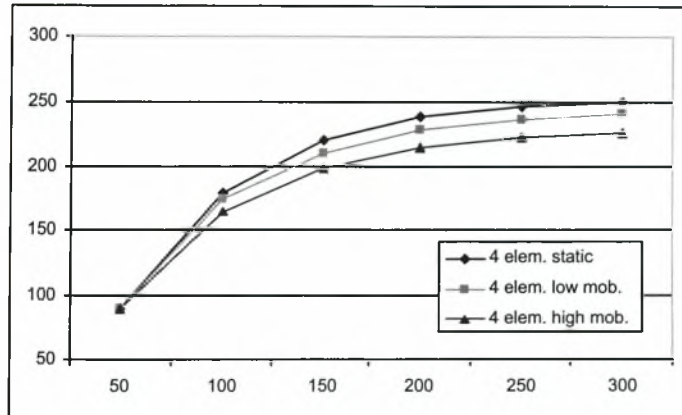
Αρ. Στοιχείων	Μείωση Απόδοσης (%)
4	4,08
8	7,14

Πίνακας 3.5: Η μείωση της ρυθμαπόδοσης στο σενάριο των 60 κινητών κόμβων

συνέπεια, ο κόμβος μπορεί να ενεργοποιήσει ή να απενεργοποιήσει το D-NAV του προς το συγκεκριμένο κόμβο με λανθασμένο τρόπο, καταστρέφοντας έτσι την τρέχουσα επικοινωνία. Πολύ σύντομα ο κόμβος, λαμβάνοντας νέα πακέτα από το συγκεκριμένο γείτονα, θα ενημερώσει τη λανθασμένη εγγραφή και θα ξεπεράσει το πρόβλημα. Τα δύο γεγονότα που μόλις αναφέραμε, οδηγούν στην μείωση της ρυθμαπόδοσης. Εντούτοις, η μείωση αυτή είναι πολύ μικρή γεγονός που δηλώνει την αποδοτικότητα του πρωτοκόλλου μας σε σενάρια με κινητικότητα.

Στον πίνακα 3.5 απεικονίζεται το ποσοστό (%) της μείωσης της ρυθμαπόδοσης στις περιπτώσεις κεραιών με 4 και 8 στοιχεία. Όπως μπορούμε να δούμε, η μείωση ρυθμαπόδοσης είναι μικρότερη στην περίπτωση των 4 στοιχείων σε σχέση με αυτή των 8 στοιχείων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός που στην περίπτωση των 8 στοιχείων, ένας κόμβος μεταδίδει χρησιμοποιώντας μικρότερη δέσμη και έτσι αυξάνει την πιθανότητα να χάσει από την περιοχή κάλυψής του τον παραλήπτη λόγω κινητικότητας των δυο κόμβων. Ομοίως, υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα να συμβούν φαινόμενα παροδικής λανθασμένης ενημέρωσης του πίνακα θέσεων.

Στο τελευταίο πείραμά μας εξετάζουμε την συμπεριφορά του πρωτοκόλλου μας σε διαφορετικά επίπεδα κινητικότητας. Εκτελούμε πάλι το προηγούμενο τυχαίο σενάριο 60 κόμβων. Τώρα η κεραία κάθε κόμβου έχει 4 στοιχεία. Τρέχουμε την προσομοίωση για δύο περιπτώσεις: Στην πρώτη περίπτωση οι κόμβοι έχουν



Σχήμα 3.14: Ο αντίκτυπος της κινητικότητας στο προτεινόμενο πρωτόκολλο

χαμηλή κινητικότητα ενώ στη δεύτερη έχουν υψηλή κινητικότητα. Η ρυθμαπόδοση απεικονίζεται στο σχήμα 3.14.

Όπως βλέπουμε στο σχήμα, η υποβάθμιση στη ρυθμαπόδοση αυξάνεται καθώς αυξάνεται η κινητικότητα των κόμβων. Αυτό οφείλεται στα ίδια γεγονότα που περιγράφουμε στο προηγούμενο σενάριο κινητικότητας. Παρόλα αυτά, τα μικρά επίπεδα μείωσης της ρυθμαπόδοσης και σε αυτήν την περίπτωση, καταδεικνύουν την προσαρμοστικότητα του πρωτοκόλλου μας σε διάφορα επίπεδα κινητικότητας.

3.6 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράψαμε ένα MAC πρωτόκολλο κατάλληλο για ασύρματα ad-hoc δίκτυα που διαθέτουν κατευθυντικές κεραιές. Το πρωτόκολλό μας περιέχει ένα νέο σχήμα για τη μετάδοση του RTS στην περιοχή γύρω από τον αποστολέα το οποίο χρησιμοποιεί μόνο κατευθυντικές μεταδόσεις, αυξάνοντας έτσι την περιοχή κάλυψης. Πιο συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος είναι βασισμένος σε ένα κυκλικό, κατευθυντικό RTS που σαρώνει την περιοχή γύρω από τον αποστολέα, ενημερώνοντας τους γείτονες για την επικείμενη μετάδοση. Χρησιμοποιώντας έναν απλό αλλά αποτελεσματικό σχήμα, οι γείτονες αποφασίζουν για την αναβολή της μετάδοσής τους, σε περίπτωση που αυτή καταστραφεί την εξελισσόμενη μετάδοση. Με τον τρόπο αυτό, επιτυγχάνεται ισχυρή μείωση στο πρόβλημα του κρυμμένου κόμβου. Το πρωτόκολλο δεν υποθέτει οποιαδήποτε γνώση για τη θέση των γειτόνων. Λόγω της δυναμικής φύσης του, το προτεινόμενο σχήμα λειτουργεί αποτελεσματικά σε περιβάλλοντα με στατικούς καθώς επίσης και κινητούς χρήστες. Τα αναφερόμενα χαρακτηριστικά οδηγούν σε ένα αποδοτικό, ολοκληρωμένο MAC πρωτόκολλο που μπορεί να υλοποιηθεί εύκολα σε πραγματικό περιβάλλον.

Κατευθυντικές Κεραίες σε Ασύρματα LAN με Υποδομή

4.1 Ο Ρόλος των Κατευθυντικών Κεραίων στα Ασύρματα LAN με Υποδομή

Τα τελευταία χρόνια, παρατηρείται ολοένα και περισσότερο, η εμφάνιση ασυρμάτων δικτύων βασισμένων στην τεχνολογία IEEE 802.11 σε δημόσιους χώρους (αεροδρόμια, εστιατόρια, κλπ). Τα δίκτυα αυτά που σκοπό έχουν την παροχή πρόσβασης στο Διαδίκτυο (Internet) στο ευρύ κοινό, αποτελούνται από ένα ή περισσότερα κελιά (cell) τα οποία επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω μιας ενσύρματης υποδομής. Κάθε κελί αποτελείται από ένα Σημείο Πρόσβασης (AP) και μερικούς ασύρματους σταθμούς (STA). Το AP είναι υπεύθυνο για το συντονισμό της χρήσης του ασύρματου μέσου από τους χρήστες, καθώς επίσης και για τη σύνδεση του κελιού με τον έξω κόσμο (Διαδίκτυο).

Ένα IEEE 802.11 δίκτυο χρησιμοποιεί την Λειτουργία Κεντρικοποιημένου Συντονισμού (Point Coordination Function, PCF) που είναι ένας κεντρικοποιημένος μηχανισμός ελέγχου της πρόσβασης στο μέσο, βασισμένος στην εκχώρηση από το AP του δικαιώματος μετάδοσης σε κάθε σταθμό. Σύμφωνα με αυτό το μηχανισμό, το AP στέλνει ένα Πλαίσιο Χαιρετισμού (Beacon) προς όλες τις κατευθύνσεις, φιμώνοντας όλους τους σταθμούς του κελιού, προκειμένου να αποφευχθούν οι συγκρούσεις. Κατόπιν, καλεί τους σταθμούς, τον έναν μετά από άλλο, να μεταδώσουν από ένα πακέτο, διασφαλίζοντας με αυτό τον τρόπο τη μοναδικότητα της μετάδοσης στο κελί του και επομένως την αποφυγή συγκρούσεων. Είναι προφανές ότι αυτός ο μηχανισμός, λόγω της φύσης της μετάδοσης προς όλες τις κατευθύνσεις, μειώνει ουσιαστικά τη δυνατότητα της χωρικής επαναχρησιμοποίησης στην περιοχή του κελιού και περιορίζει έτσι τη μεγιστοποίηση της ρυθμαπόδοσης.

Όπως αναφέραμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, οι κατευθυντικές κεραίες είναι μια τεχνολογία, με τη βοήθεια της οποίας, ένας ασύρματος σταθμός χρησιμοποιώντας μια σειρά κεραίων (κεραιοσειρά, antenna array), μπορεί να μειώσει τις παρεμβολές που δημιουργεί ένα σήμα, κατευθύνοντας τη μετάδοση ή τη λήψη προς

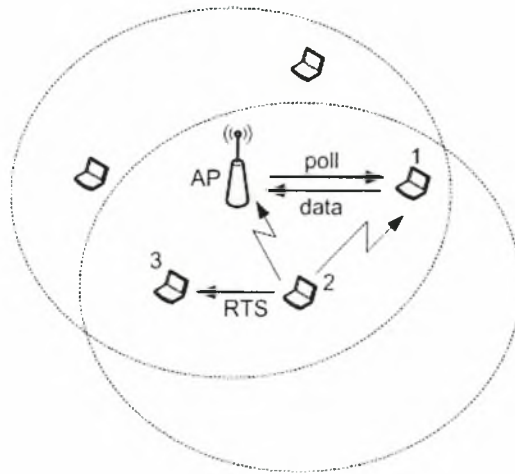
συγκεκριμένες κατευθύνσεις [CG96], [FG98], [LR99]. Η χρήση των κατευθυντικών κεραιών σε ασύρματα τοπικά δίκτυα είναι μια ελκυστική ιδέα, δεδομένου ότι μπορούν να υπάρξουν πολλά οφέλη σε ένα τέτοιο περιβάλλον [Rap96]. Η κατευθυντική φύση της μετάδοσης οδηγεί στη χωρική επαναχρησιμοποίηση η οποία επιτρέπει την ύπαρξη πολλαπλών μεταδόσεων στην ίδια γειτονιά χωρίς την δημιουργία συγκρούσεων. Παράλληλα, η κατευθυντική μετάδοση αυξάνει την ενέργεια του σήματος προς την κατεύθυνση του δέκτη, με συνέπεια την αύξηση της περιοχής κάλυψης. Από την άλλη, η χρήση των κατευθυντικών κεραιών μπορεί να προκαλέσει μερικά ανεπιθύμητα αποτελέσματα. Όταν ένας σταθμός λαμβάνει με κατευθυντικό τρόπο, δεν μπορεί να ανιχνεύσει το μέσο με αποδοτικό τρόπο. Έτσι μπορεί να μην γνωρίζει την κατευθυντική μετάδοση ενός άλλου σταθμού προς αυτόν. Τέτοια φαινόμενα μπορούν να οδηγήσουν στην αύξηση του προβλήματος του κρυμμένου κόμβου και του προβλήματος της κώφωσης [CYRV02], [WDK98].

Η παραπάνω περιγραφή δείχνει καθαρά ότι η χρήση των κατευθυντικών κεραιών στη λειτουργία PCF του IEEE 802.11 αποτελεί ιδιαίτερη σχεδιαστική πρόκληση. Πρέπει να σχεδιαστεί ένα νέο MAC πρωτόκολλο που επεκτείνει την λειτουργία της PCF προκειμένου να προσαρμοστεί αποτελεσματικά η χρήση κατευθυντικών κεραιών τόσο στο AP όσο και στους ασύρματος σταθμούς. Το νέο πρωτόκολλο πρέπει να εκμεταλλεύεται τα οφέλη των κατευθυντικών κεραιών επιτρέποντας τη χωρική επαναχρησιμοποίηση, μέσω ταυτόχρονων μεταδόσεων στην περιοχή ενός κελιού, κατά τη διάρκεια λειτουργίας της PCF. Η χρήση κατευθυντικών κεραιών με αποδοτικό τρόπο εξασφαλίζει, εκτός της αύξησης της συνολικής ρυθμιστικής, την παράλληλη αύξηση της περιοχής κάλυψης του κελιού.

4.2 Προκλήσεις στη Χρήση Κατευθυντικών Κεραιών στα WLAN με Υποδομή

Η λειτουργία PCF του 802.11 έχει αναπτυχθεί με την προϋπόθεση ότι οι σταθμοί του κελιού χρησιμοποιούν ιστροπικές μεταδόσεις. Για το λόγο αυτό οι σταθμοί του κελιού πρέπει να παραμείνουν σιωπηλοί κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της PCF για να μην καταστραφεί η εκάστοτε επικοινωνία μεταξύ του AP και ενός σταθμού. Εάν, λόγω χάρη, ένας σταθμός προσπαθήσει να μεταδώσει πακέτο σε έναν άλλο σταθμό του κελιού κατά τη διάρκεια της PCF, οι δυο ταυτόχρονες μεταδόσεις θα συγκρουστούν. Αυτή η περίπτωση απεικονίζεται στο σχήμα 4.1.

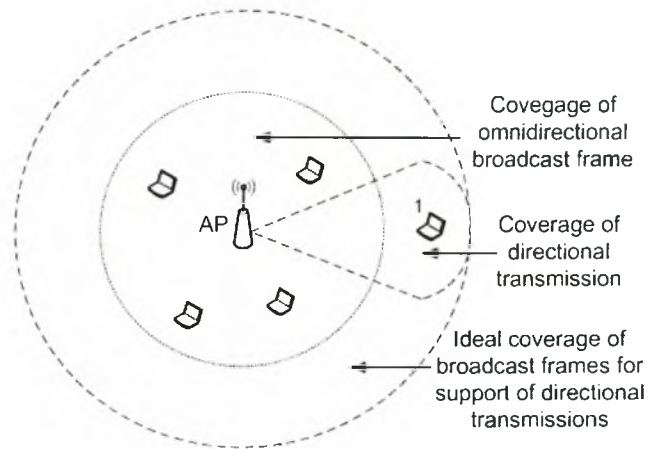
Όπως μπορούμε να δούμε στο σχήμα αυτό, κατά τη διάρκεια της επικοινωνίας μεταξύ του STA 1 και του AP, ο STA 2 προσπαθεί να μεταδώσει ένα RTS στο STA 3. Λόγω της φύσης των ιστροπικών κεραιών που χρησιμοποιούνται από τους σταθμούς, η μετάδοση του RTS καταστρέφει την τρέχουσα επικοινωνία, λόγω του ότι το AP και ο STA 1 βρίσκονται στην περιοχή κάλυψης του STA 2.



Σχήμα 4.1: Σύγκρουση κατά τη διάρκεια της PCF

Με την προσθήκη κατευθυντικών κεραιών στα ασύρματα τοπικά δίκτυα με υποδομή, μπορούμε να αποφύγουμε την αυστηρή συνθήκη που διέπει την επικοινωνία στο κελί, η οποία φιμώνει όλους τους σταθμούς κατά τη διάρκεια της PCF. Υπό τις νέες συνθήκες, οι σταθμοί μπορούν να καλούνται από το AP κατευθυντικά, επιτρέποντας κατ' αυτό τον τρόπο ταυτόχρονες μεταδόσεις σε μια γειτονιά. Η ιδέα είναι απλή, αλλά η προσαρμογή αυτού του είδους κεραιών σε τέτοια δίκτυα δεν είναι ένα τετριμμένο θέμα. Ένα αποδοτικό πρωτόκολλο πρέπει να λύσει διάφορα βασικά προβλήματα, προκειμένου να προσαρμοστεί η χρήση κατευθυντικών κεραιών στην λειτουργία PCF.

Ένα κύριο πρόβλημα στο νέο περιβάλλον είναι η μετάδοση πλαισίων προς όλες τις κατευθύνσεις (broadcast), μέσω κατευθυντικών κεραιών. Τα ειδικά αυτά πλαίσια ελέγχου όπως το πλαίσιο Χαιρετισμού (Beacon), το πλαίσιο που αναγγέλλει το τέλος της PCF (CFP-End) κ.α. είναι πολύ σημαντικά για τη σωστή λειτουργία του κελιού. Περιέχουν πληροφορίες, σχετικά με τη συμπεριφορά των σταθμών ως οντότητα του κελιού (πληροφορίες συγχρονισμού, πληροφορίες σχετικές με την PCF, πληροφορίες της κατάστασης Εξοικονόμησης Ενέργειας - Power Saving Mode, κ.λπ.). Κατά συνέπεια, η αποδοτική λειτουργία ενός κελιού σχετίζεται άμεσα με την σωστή λήψη αυτών των ειδικών πακέτων από όλους τους σταθμούς. Σε μερικές από τις εργασίες που έχουν γίνει στο χώρο, οι ερευνητές προτείνουν τη χρήση μη κατευθυντικών μεταδόσεων για τα broadcast πλαίσια και τη χρήση κατευθυντικών μεταδόσεων μόνο για την άμεση επικοινωνία μεταξύ των σταθμών [NYH00], [KSV00], [Ram01]. Δυστυχώς, εάν αυτό το σχήμα χρησιμοποιηθεί στην περίπτωση μας, θα περιορίσει την περιοχή κάλυψης του AP στον τομέα κάλυψης της ιστροπικής μετάδοσης. Κατά συνέπεια, αν και το AP θα έχει τη δυνατότητα



Σχήμα 4.2: Περιορισμός στην περιοχή κάλυψης ενός κελιού στην περίπτωση χρήσης μη κατευθυντικών μεταδόσεων για τα broadcast πακέτα

να μεταδώσει κατευθυντικά, φθάνοντας και σε πιο απομακρυσμένους σταθμούς, δεν θα μπορεί να χρησιμοποιήσει αυτό το πλεονέκτημα, δεδομένου ότι οι απομακρυσμένοι σταθμοί δεν θα είναι σε θέση να λάβουν τα broadcast πλαίσια και έτσι δεν θα γνωρίζουν την κατάσταση του κελιού (συγχρονισμό, λειτουργικά χαρακτηριστικά κλπ.) Ο περιορισμός στην περιοχή κάλυψης του κελιού σε περίπτωση χρήσης μη κατευθυντικών μεταδόσεων για τα broadcast πλαίσια απεικονίζεται στο σχήμα 4.2

Ένα άλλο σημαντικό πρόβλημα που προκύπτει από την χρήση κατευθυντικών κεραιών για την επικοινωνία των σταθμών ενός κελιού (AP με STA ή STA με STA), είναι ο προσδιορισμός της κατεύθυνσης προς την οποία ένας σταθμός πρέπει να μεταδώσει κατευθυντικά για να φθάσει τον άλλο. Αυτό το πρόβλημα γίνεται πιο σημαντικό, λόγω του γεγονότος ότι σε τέτοια περιβάλλοντα οι σταθμοί είναι κινητοί και έτσι η θέση τους μπορεί να αλλάξει.

Τέλος, ένα ακόμη σημαντικό ζήτημα στο περιβάλλον ασυρμάτων τοπικών δικτύων με υποδομή, είναι ο απόλυτος σεβασμός της εξελισσόμενης ακολουθίας επικοινωνίας μεταξύ του AP και των σταθμών του κελιού. Όταν σε ένα τέτοιο δίκτυο χρησιμοποιούνται κατευθυντικές κεραιές, οι σταθμοί πρέπει να γνωρίζουν για την εξελισσόμενη επικοινωνία, καθώς και για τις κατευθύνσεις προς τις οποίες το AP και ο κάθε σταθμός στρέφουν τις δέσμες τους για να επικοινωνήσουν. Ένας σταθμός που αναμένει ανενεργός τη σειρά του για να μεταδώσει πακέτο προς το AP, μπορεί να αρχίσει μια άμεση κατευθυντική επικοινωνία με έναν άλλο γειτονικό σταθμό, μόνο εάν αυτή δεν καταστρέφει την τρέχουσα επικοινωνία μεταξύ του AP και του εκάστοτε σταθμού.

Μια σημαντική λεπτομέρεια στο σημείο αυτό, είναι ότι ο σταθμός που αρχίζει μια κατευθυντική επικοινωνία με κάποιον γείτονά του, πρέπει να επανέλθει στην κατάσταση αδράνειας εγκαίρως, πριν το AP επιχειρήσει να το καλέσει (polling), στέλνοντας του ένα poll πακέτο. Εάν ο σταθμός αυτός δεν ολοκληρώσει την άμεση επικοινωνία με το γείτονά του εγκαίρως, θα αποτύχει να λάβει το poll πακέτο και έτσι θα χάσει την ευκαιρία να συμμετάσχει σε αυτό τον κύκλο της PCF. Έτσι θα παραβιάσει το βασικό στόχο της PCF που είναι η εγγύηση αξιόπιστης επικοινωνίας μεταξύ του AP και των σταθμών του κελιού σε κάθε κύκλο. Οι επιπλέον μεταδόσεις στο κελί μπορούν να πραγματοποιηθούν, αλλά χωρίς παραβίαση αυτής της αρχής. Το πρωτόκολλο λοιπόν, πρέπει να παρέχει έναν τρόπο ενημέρωσης των σταθμών του κελιού για τις αναμενόμενες μεταδόσεις, ώστε να φροντίζουν να ολοκληρώνουν εγκαίρως την απευθείας επικοινωνία με τους γείτονες και έτσι να είναι σε θέση να συμμετέχουν στην ώρα τους στη διαδικασία PCF.

4.3 Το προτεινόμενο Πρωτόκολλο Πολλαπλής Πρόσβασης D-PCF

Το προτεινόμενο πρωτόκολλο ονομάζεται Κατευθυντικό-PCF (Directional-PCF, D-PCF) [KT04]. Το D-PCF προσαρμόζει τη χρήση των κατευθυντικών κεραιών στη λειτουργία PCF του 802.11. Προκειμένου να εκμεταλλευτεί πλήρως τα πλεονεκτήματα των κεραιών αυτών, χρησιμοποιεί μόνο κατευθυντικές μεταδόσεις για όλα τα πλαίσια (broadcast και μη). Το μοντέλο των κατευθυντικών κεραιών που χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο είναι αυτό που περιγράφηκε στην παράγραφο 3.3. Παρακάτω θα δούμε πώς το D-MAC επιλύει τα προβλήματα που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο καθώς και το συνολικό μηχανισμό λειτουργίας του. Ορισμένες από τις λειτουργίες του πρωτοκόλλου είναι στο ίδιο πνεύμα με το αντίστοιχο MAC πρωτόκολλο που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3, το οποίο λύνει τα αντίστοιχα προβλήματα σε ένα ad-hoc ασύρματο τοπικό δίκτυο.

4.3.1 Μετάδοση Broadcast Πακέτων με Κατευθυντικές Κεραίες

Το D-PCF διευθετεί την μετάδοση των broadcast πακέτων, προσομοιώνοντας την ιστροπική μετάδοση με πολλές διαδοχικές κατευθυντικές μεταδόσεις. Κάθε πλαίσιο μεταδίδεται διαδοχικά, με κατευθυντικό τρόπο, γύρω από το AP, έως ότου καλυφθεί όλη η περιοχή γύρω του. Με τον τρόπο αυτό καταφέρνει να διαχέει την πληροφορία γύρω από το AP, επεκτείνοντας παράλληλα την περιοχική κάλυψη του κελιού.

4.3.2 Ο Μηχανισμός Polling με Χρήση Κατευθυντικών Κεραιών

Ο μηχανισμός polling του προτεινόμενου πρωτοκόλλου είναι ανάλογος προς αυτόν της PCF, εκτός από ορισμένες τροποποιήσεις που έχουν γίνει, προκειμένου να

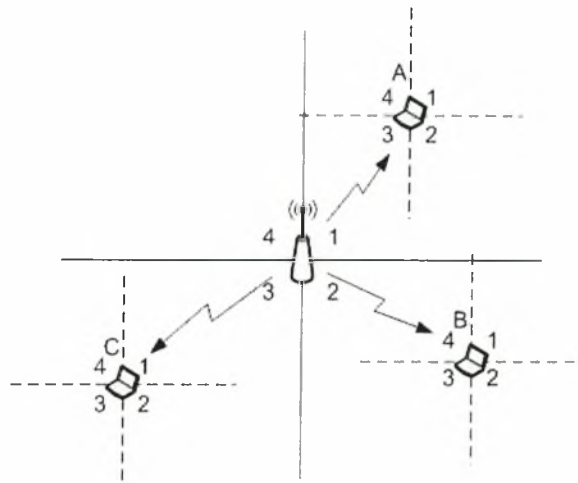
Σταθμός	Δέσμη του AP	Δέσμη του Σταθμού
A	1	3
B	2	4
C	3	1

Πίνακας 4.1: Ο Πίνακας Θέσεων του AP για το σενάριο του σχήματος 4.3

υποστηριχθούν οι κατευθυντικές μεταδόσεις στο νέο περιβάλλον. Ένα κύριο πρόβλημα στη χρήση κατευθυντικών μεταδόσεων στο μηχανισμό rolling των σταθμών, είναι το γεγονός ότι το AP πρέπει να ξέρει την κατεύθυνση προς την οποία πρέπει να στρέψει την δέσμη του προκειμένου να "πετύχει" κάθε σταθμό. Οι περισσότερες από τις μέχρι τώρα εργασίες, σε ανάλογες καταστάσεις (μετάδοσης κατευθυντικών πακέτων), υποθέτουν την εκ των προτέρων γνώση αυτών των κατευθύνσεων ή την ανίχνευση της θέσης των σταθμών χρησιμοποιώντας GPS [CYRV02], [KSV00].

Προτείνουμε ένα απλό σχήμα, μέσω του οποίου, το AP μαθαίνει την κατεύθυνση μετάδοσης για κάθε σταθμό, διατηρεί αυτές τις πληροφορίες σε έναν πίνακα και τις ενημερώνει σε κάθε αλλαγή. Αυτό το σχήμα είναι βασισμένο στην ακόλουθη ιδιότητα των κατευθυντικών κεραιών. Όταν ένας σταθμός (υποθέστε ο σταθμός A) βρίσκεται σε κατάσταση ηρεμίας, "ακούει" το μέσο ιστροπικά. Όταν λαμβάνει μια κατευθυντική μετάδοση (υποθέστε από το σταθμό B), χρησιμοποιεί την ποικιλία επιλογής (selection diversity) για να λάβει το πλαίσιο μέσω της σωστής δέσμης. Κατόπιν, εάν ο σταθμός A θέλει να στείλει ένα πλαίσιο κατευθυντικά στο σταθμό B, θα χρησιμοποιήσει την ίδια δέσμη από την οποία έλαβε το προηγούμενο πλαίσιο από τον B. Χρησιμοποιώντας αυτό το σχήμα, το AP διατηρεί έναν πίνακα τον οποίο καλούμε Πίνακα Θέσεων (ανάλογο με τον Πίνακα Θέσεων του προηγούμενου κεφαλαίου) με μια εγγραφή για κάθε σταθμό του κελιού. Σε αυτήν την εγγραφή διατηρεί πληροφορίες για την δέσμη μέσω της οποίας "βλέπει" το συγκεκριμένο σταθμό, καθώς επίσης και την δέσμη μέσω της οποίας "τον βλέπει" ο άλλος σταθμός. Η δεύτερη πληροφορία είναι γνωστή στο AP, λόγω του ότι κάθε πλαίσιο που μεταδίδεται σύμφωνα με το νέο πρωτόκολλο, περιέχει στην επικεφαλίδα του την δέσμη μέσω της οποίας μεταδίδεται. Κάθε φορά που το AP λαμβάνει ένα κατευθυντικό πλαίσιο από κάποιο σταθμό, ενημερώνει την αντίστοιχη εγγραφή. Στο σχήμα 4.3 δίνουμε ένα τυπικό σενάριο ενός ασύρματου LAN με ένα AP και 3 σταθμούς. Ο πίνακας θέσεων του AP για αυτό το σενάριο απεικονίζεται στον πίνακα 4.1.

Για να αντιληφθούμε την διαδικασία ενημέρωσης του πίνακα αυτού ας δούμε ξανά την διαδικασία Σύνδεσης (Association) ενός σταθμού με ένα AP, υπό το νέο σχήμα των κατευθυντικών μεταδόσεων. Σύμφωνα με το νέο πρωτόκολλο, κάθε πλαίσιο περιέχει στην επικεφαλίδα του τη δέσμη από την οποία μεταδόθηκε. Όταν

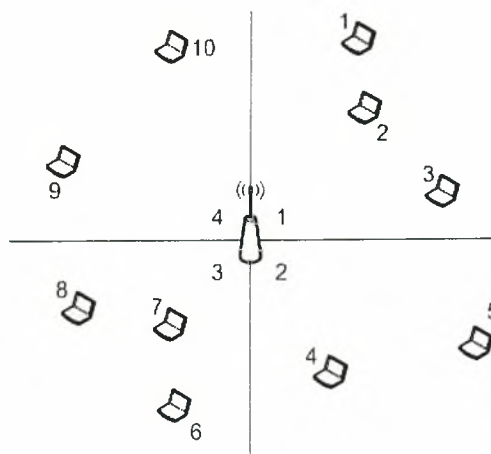


Σχήμα 4.3: Ένα ασύρματο δίκτυο με ένα AP και τρεις σταθμούς

ένας σταθμός θέλει να συνδεθεί με ένα AP, στέλνει μια Αίτηση Σύνδεσης (Association Request) σε αυτό. Ο σταθμός αναγνωρίζει την κατεύθυνση του AP χρησιμοποιώντας τη διαδικασία της ποικιλίας επιλογής που αναφέραμε, δεδομένου ότι έχει είδη λάβει κατευθυντικά πλαίσια Χαιρετισμού (Beacons) από το AP (Scanning Procedure). Γνωρίζοντας την δέσμη που πρέπει να χρησιμοποιήσει για να φθάσει το AP, στέλνει κατευθυντικά την Αίτηση Σύνδεσης προς αυτό. Η λήψη του πλαισίου αυτού από το AP οδηγεί στην πρόσθεση μιας νέας εγγραφής στον Πίνακα Θέσεων του. Η εγγραφή αυτή αναφέρεται στο νέο σταθμό καθώς και στις κατάλληλες δέσμες για την μεταξύ τους επικοινωνία. Η παρακολούθηση από το AP των κατευθύνσεων των σταθμών χρησιμοποιώντας τον πίνακα θέσης, γίνεται μέσω ενός απλού αλγορίθμου που ενημερώνει δυναμικά τον πίνακα με κάθε λήψη πακέτου από το AP. Με τον τρόπο αυτό υποστηρίζεται αποδοτικά και η κινητικότητα των σταθμών στο δίκτυο, μια ιδιότητα που είναι χαρακτηριστική στα ασύρματα δίκτυα.

Χρησιμοποιώντας το προηγούμενο σχήμα, το AP ξέρει ποια δέσμη πρέπει να χρησιμοποιήσει για να φθάσει κάθε σταθμό. Έτσι, ταξινομεί τους σταθμούς του κελιού σε ομάδες, ανάλογα με την δέσμη με την οποία φθάνει σε αυτούς. Στο σχήμα 4.4 έχουμε ένα κελί με ένα AP και 10 σταθμούς. Κάθε σταθμός μπορεί να επικοινωνήσει με το AP μέσω μιας συγκεκριμένης δέσμης. Υποθέτουμε ότι το AP χρησιμοποιεί 4 δέσμες. Ταξινομεί λοιπόν τους 10 σταθμούς σε 4 ομάδες, μια για κάθε δέσμη, ανάλογα με την δέσμη μέσω της οποίας φτάνει κάθε σταθμό, όπως φαίνεται στον πίνακα 4.2. Τον πίνακα αυτό τον ονομάζουμε Πίνακα Ομαδοποίησης (Grouping Table).

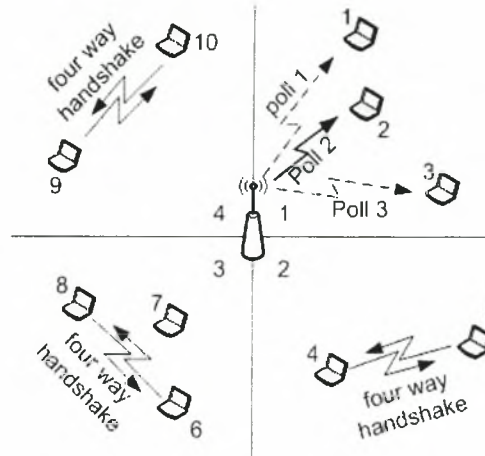
Μετά από αυτήν την ομαδοποίηση, το AP καλεί (poll) τους σταθμούς, αρχί-



Σχήμα 4.4: Ένα ασύρματο δίκτυο με ένα AP και δέκα σταθμούς

Ομάδα	Σταθμοί
1	1,2,3
2	4,5
3	6,7,8
4	9,10

Πίνακας 4.2: Πίνακας Ομαδοποίησης του AP για το σενάριο του σχήματος 4.4



Σχήμα 4.5: Δημιουργία DCF περιοχών κατά τη διάρκεια της PCF μετάδοσης

ζοντας από αυτούς που ανήκουν στην ομάδα 1. Στέλνει διαδοχικά κατευθυντικά poll πακέτα στους σταθμούς της ομάδας, χρησιμοποιώντας την ίδια δέσμη (δέσμη 1). Μετά από το κάλεσμα των σταθμών 1,2,3 που ανήκουν στην ομάδα 1, το AP συνεχίζει το poll των σταθμών της ομάδας 2 (δηλ. των 4,5), στέλνοντας τώρα τα κατευθυντικά poll μέσω της δέσμης 2. Η διαδικασία συνεχίζεται με τον ίδιο τρόπο, μέχρι το AP να καλέσει και τον τελευταίο σταθμό της τελευταίας ομάδας (σταθμός 10 της ομάδας 4).

Με αυτό τον τρόπο, η δραστηριότητα του κελιού εστιάζεται σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση για μια σχετικά μεγάλη χρονική περίοδο (π.χ. για τη χρονική περίοδο που απαιτείται για την ψήφιση των σταθμών 1,2,3), δίνοντας έτσι στους σταθμούς που βρίσκονται σε περιοχές που δεν επηρεάζουν την τρέχουσα επικοινωνία (π.χ. στην αντίθετη κατεύθυνση), την ευκαιρία να επικοινωνήσουν άμεσα ο ένας με τον άλλο. Με τον τρόπο αυτό δημιουργούνται περιοχές DCF μετάδοσης μέσα στο κελί, κατά τη διάρκεια λειτουργίας της PCF. Το φαινόμενο αυτό απεικονίζεται στο σχήμα 4.5. Σε αυτό το σχήμα, ενώ το AP στέλνει poll διαδοχικά στους σταθμούς 1,2,3, με την δέσμη 1, άλλοι σταθμοί του κελιού (ζεύγη 4-5, 6-8, 9-10) που δεν επηρεάζουν την τρέχουσα επικοινωνία, επικοινωνούν μεταξύ τους άμεσα, δημιουργώντας DCF περιοχές κατά τη διάρκεια της PCF.

4.3.3 Η Συμπεριφορά των Σταθμών

Η ερώτηση που προκύπτει από την προηγούμενη περιγραφή είναι η εξής : Πώς οι σταθμοί του κελιού γνωρίζουν την κατεύθυνση μετάδοσης και την διάρκεια του κάθε poll, ώστε να αποφασίζουν αν μπορούν να μεταδώσουν απ'ευθείας πακέτα σε γείτονες τους, χωρίς να βλάψουν τη διαδικασία της PCF; Η πληροφορία αυτή

Σειρά μετάδοσης	Σταθμός	Δέσμη του AP	Δέσμη του σταθμού	Διάρκεια
1	1	1	3	d_1
2	2	1	3	d_2
3	3	1	3	d_3
4	4	2	4	d_4
5	5	2	4	d_5
6	6	3	1	d_6
7	7	3	1	d_7
8	8	3	1	d_8
9	9	4	2	d_9
10	10	4	2	d_{10}

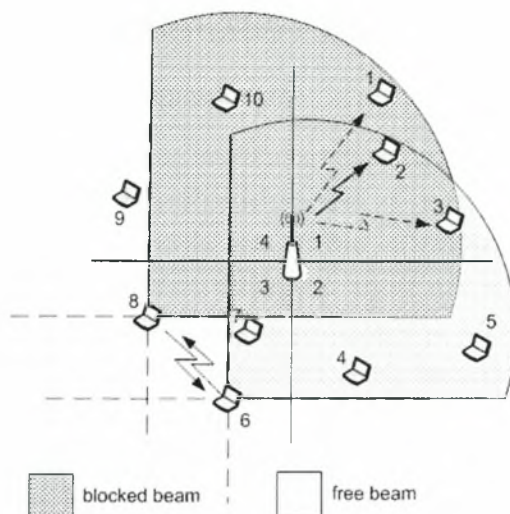
Πίνακας 4.3: Ο Πίνακας Polling του AP για το σενάριο του σχήματος 4.4

παρέχεται στους σταθμούς με την ακόλουθη διαδικασία: Το AP μεταδίδει μέσω των πλαισίων Χαιρετισμού (Beacons) (τα οποία μεταδίδονται αμέσως πριν την αρχή του PCF) ένα πίνακα που ονομάζουμε Πίνακα Polling (Polling Table), ο οποίος περιέχει πληροφορίες για την σειρά με την οποία θα γίνουν poll οι σταθμοί, καθώς και την κατεύθυνση και τη διάρκεια κάθε ανταλλαγής πλαισίων poll + data. Ο πίνακας Polling για το σενάριο 4.4 απεικονίζεται στον πίνακα 4.3.

Η στήλη "Διάρκεια" υπολογίζεται προσεγγιστικά από το AP. Η διάρκεια της μετάδοσης κάθε σταθμού εξαρτάται ισχυρά από την ταχύτητα μετάδοσης και το μήκος πακέτου που θα χρησιμοποιήσει ο σταθμός. Οι δυο αυτοί παράγοντες επηρεάζονται σημαντικά από την κατάσταση του ασύρματου μέσου. Δεδομένου του ότι η κατάσταση αυτή αλλάζει σχετικά αργά συγκρινόμενη με τη διάρκεια της PCF περιόδου, υπάρχει σημαντική πιθανότητα ένας σταθμός να στείλει το νέο πακέτο του χρησιμοποιώντας τις ίδιες παραμέτρους με την αμέσως προηγούμενη μετάδοση. Λαμβάνοντας υπόψη του το γεγονός αυτό, το AP υπολογίζει τη διάρκεια της μετάδοσης κάθε σταθμού σε αυτόν τον PCF κύκλο, βασισμένο στις διάρκειες των μεταδόσεων του προηγούμενου κύκλου.

Χρησιμοποιώντας αυτές τις πληροφορίες, κάθε σταθμός υπολογίζει την περίοδο κατά τη διάρκεια της οποίας μπορεί να παράγει DCF μεταδόσεις. Ας δούμε τη συμπεριφορά του σταθμού 6 στο σενάριο του σχήματος 4.4. Δεδομένου ότι ο σταθμός 6 μαθαίνει ότι θα δεχθεί poll βος στη σειρά, μπορεί για το χρόνο μέχρις ότου έρθει η ώρα να μετέχει στην PCF, να λειτουργήσει σε DCF κατάσταση και να μεταδώσει κατευθυντικά, απ'ευθείας σε γείτονες. Ο σταθμός πρέπει να επανέλθει σε κατάσταση αδράνειας πριν την πρόσκληση του για μετάδοση από το AP. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να επανέλθει σε κατάσταση αδράνειας μετά από την ακόλουθη χρονική περίοδο από την αρχή της PCF:

$$\text{Ελεύθερη Περίοδος} = d_1 + d_2 + d_3 + d_4 + d_5$$



Σχήμα 4.6: Η λειτουργία του D-NAV για τους σταθμούς 6 και 8

Κατά τη διάρκεια της "Ελεύθερης Περιόδου" αλλά και μετά τη συμμετοχή του στην PCF ο σταθμός 6 μπορεί να παράγει DCF επικοινωνία με άλλους γείτονες. Η μόνη δέσμευση του είναι, να μη βλάπτει την εξελισσόμενη επικοινωνία του AP με τον εκάστοτε σταθμό. Η απόφαση του σταθμού για το εάν μια συγκεκριμένη άμεση DCF επικοινωνία βλάπτει την εξελισσόμενη PCF λαμβάνεται μέσω ενός απλού σχήματος. Σύμφωνα με το σχήμα αυτό, κάθε σταθμός διατηρεί έναν Πίνακα Θέσεων, παρόμοιο με τον πίνακα θέσεων του AP που απεικονίζεται στον πίνακα 4.1. Ο σταθμός χρησιμοποιώντας τον Πίνακα Polling που έχει λάβει από το AP, ξέρει την ακολουθία, την κατεύθυνση και τη διάρκεια της διαδικασίας polling του κάθε σταθμού. Γνωρίζοντας αυτές τις πληροφορίες, ο σταθμός μπορεί να ενεργοποιήσει και να απενεργοποιήσει τις δέσμες του κατά τη διάρκεια του εκάστοτε polling, χρησιμοποιώντας το σχήμα D-NAV. Κατόπιν, μπορεί να ξεκινήσει μια άμεση επικοινωνία με έναν άλλο σταθμό αν και εφόσον η κατάλληλη δέσμη του είναι ενεργοποιημένη από το D-NAV. Στο σχήμα 4.6 μπορούμε να δούμε τη διαδικασία ενεργοποίησης του D-NAV για τους σταθμούς 6 και 8.

Από την προηγούμενη συζήτηση καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι το προτεινόμενο πρωτόκολλο παρέχει δύο σημαντικές βελτιώσεις στη λειτουργία της PCF. Αφ' ενός, όλες οι μεταδόσεις είναι τώρα κατευθυντικές (ακόμη και τα broadcast πλαίσια μεταδίδονται με τη χρήση κατευθυντικών μεταδόσεων), οπότε υπάρχει μια σημαντική αύξηση στην περιοχή κάλυψης του κελιού. Αφ' ετέρου, η ύπαρξη DCF περιοχών στην περιοχή κάλυψης του κελιού κατά τη διάρκεια λειτουργίας της PCF, οδηγεί στην αποδοτική χωρική επαναχρησιμοποίηση. Αυτά τα δύο οφέλη οδηγούν σε σημαντική αύξηση της ρυθμαπόδοσης του δικτύου.

4.4 Μοντέλο και Αποτελέσματα Προσομοιώσεων

4.4.1 Μοντέλο Προσομοιώσεων

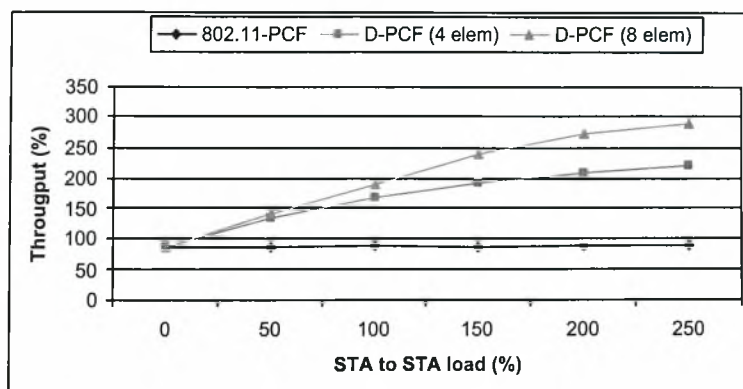
Στις προσομοιώσεις μας υποθέτουμε ομοιόμορφη κατανομή των σταθμών στην περιοχή του κελιού. Εξετάζουμε σενάρια με στατικούς καθώς επίσης κινητούς χρήστες. Για την επικοινωνία από σταθμό σε σταθμό, κατά τη διάρκεια του PCF, ο προορισμός κάθε πακέτου επιλέγεται τυχαία από το σύνολο των γειτόνων του αποστολέα. Το μήκος πακέτων είναι μεταβλητό με μέση τιμή ίση με 1024 ψηφιολέξεις (bytes). Κάθε σταθμός διαθέτει δύο ουρές αναμονής, μια για τις PCF μεταδόσεις και μιας για τις απ'ευθείας μεταδόσεις από σταθμό σε σταθμό. Υποθέτουμε ότι η ουρά αναμονής για την PCF είναι πάντα γεμάτη, δηλ. έχει πάντα πακέτο προς μετάδοση. Η άφιξη πακέτων στην ουρά αναμονής για την απ'ευθείας μετάδοση, είναι μια διαδικασία Poisson με μέση τιμή λ . Για να μεταβάλλουμε το φορτίο του δικτύου μεταβάλλουμε το λ . Με τον τρόπο αυτό μεταβάλλουμε το προσφερόμενο φορτίο στην αντίστοιχη ουρά αναμονής του κάθε σταθμού. Το φυσικό κανάλι είναι απαλλαγμένο από λάθη και η καθυστέρηση διάδοσης είναι μηδέν.

Για κάθε σενάριο τρέχουμε 20 προσομοιώσεις και παίρνουμε τη μέση τιμή. Η παράμετρος μέσω της οποίας μετράμε την απόδοση είναι η ρυθμαπόδοση του δικτύου, καθώς μεταβάλλουμε το συνολικό φόρτο στις ουρές αναμονής των απ'ευθείας μεταδόσεων. Σαν ρυθμαπόδοση καθορίζουμε το ποσοστό του ρυθμού του καναλιού που χρησιμοποιείται για τη μετάδοση πακέτων δεδομένων. Συνολική ρυθμαπόδοση που υπερβαίνει το 100%, σημαίνει ότι υπάρχουν περισσότερα από ένα ζευγάρια κόμβων που επικοινωνούν ταυτόχρονα για κάποιο χρόνο. Το αποτέλεσμα αυτό είναι η ένδειξη της επαναχρησιμοποίησης του καναλιού λόγω της χρήσης κατευθυντικών κεραιών.

4.4.2 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων

Στις προσομοιώσεις μας μελετάμε τα οφέλη του προτεινόμενου πρωτοκόλλου, συγκρίνοντας το με το κλασικό πρωτόκολλο IEEE 802.11. Προσπαθήσαμε να εξασφαλίσουμε το γεγονός ότι τα σενάρια που έχουμε επιλέξει εγγυώνται ίδιες συνθήκες λειτουργίας μεταξύ των δυο πρωτοκόλλων. Για το λόγο αυτό υποθέτουμε ότι η περιοχή κάλυψης των μη κατευθυντικών μεταδόσεων είναι η ίδια με αυτή των κατευθυντικών μεταδόσεων. Κατ' αυτό τον τρόπο θα μετρήσουμε την αποδοτικότητα του αλγορίθμου μας, κρατώντας άλλες παραμέτρους αύξησης της ρυθμαπόδοσης σταθερές. Πρέπει να ληφθεί υπ'όψην ότι στα αποτελέσματα που παρουσιάζονται πρέπει να προσθέσουμε και την επιπλέον αύξηση της ρυθμαπόδοσης λόγω της αύξησης της περιοχής κάλυψης που έχουμε από τη χρήση κατευθυντικών μεταδόσεων.

Αρχικά εξετάζουμε ένα σενάριο με ένα AP και 10 σταθμούς. Οι σταθμοί είναι

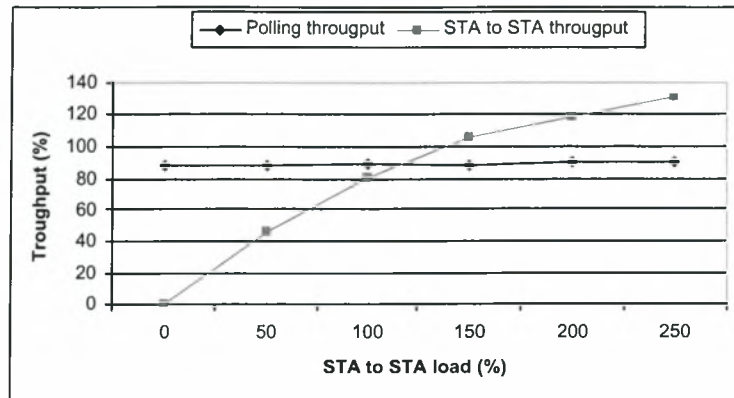


Σχήμα 4.7: Σύγκριση του D-PCF με το 802.11 σε ένα σενάριο με 10 σταθμούς

τυχαία κατανομημένοι στο κελί με τέτοιον τρόπο, ώστε κάθε σταθμός να μπορεί να ακούσει οποιονδήποτε άλλο. Χρησιμοποιούμε κατευθυντικές κεραίες με 4 και 8 στοιχεία. Η μεταβολή της συνολικής ρυθμαπόδοσης του δικτύου, καθώς το συνολικό προσφερόμενο φορτίο των απ'ευθείας μεταδόσεων μεταβάλλεται, παρουσιάζεται στο σχήμα 4.7.

Όπως παρατηρούμε στο σχήμα αυτό, το προτεινόμενο πρωτόκολλο αυξάνει τη συνολική ρυθμαπόδοση του κελιού και στην περίπτωση των 4 και σε αυτή των 8 στοιχείων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι όταν χρησιμοποιείται το προτεινόμενο πρωτόκολλο, οι σταθμοί που δεν είναι απασχολημένοι και περιμένουν τη σειρά τους να συμμετάσχουν στην PCF, δημιουργούν απ'ευθείας κατευθυντική επικοινωνία με γείτονες σταθμούς, εάν αυτή δεν βλάπτει την εξελισσόμενη διαδικασία polling. Καθώς το προσφερόμενο φορτίο αυξάνεται, το κέρδος ρυθμαπόδοσης λόγω αυτής της επιπλέον επικοινωνίας αυξάνεται (μέχρι ένα συγκεκριμένο επίπεδο), αυξάνοντας με αυτό τον τρόπο τη συνολική ρυθμαπόδοση του δικτύου. Το γεγονός ότι η ρυθμαπόδοση στην περίπτωση του D-PCF υπερβαίνει το 100% δείχνει σαφώς την ύπαρξη ταυτόχρονων μεταδόσεων στο κελί (και έτσι την ύπαρξη χωρικής επαναχρησιμοποίησης).

Σχετικά με τη συμπεριφορά του πρωτοκόλλου καθώς ο αριθμός των στοιχείων στις κεραίες αυξάνεται, βλέπουμε ότι το D-PCF έχει καλύτερη απόδοση στην περίπτωση που οι κεραίες έχουν 8 στοιχεία. Αυτό οφείλεται στα ακόλουθα γεγονότα. Στην περίπτωση αυτή η λειτουργία του D-NAV είναι πιο λεπτομερής ως αναφορά τις περιοχές κάλυψης, δίνοντας έτσι περισσότερη ελευθερία στους σταθμούς να δημιουργήσουν DCF μεταδόσεις κατά τη διάρκεια της PCF. Επιπλέον, όταν το AP διαθέτει 8 στοιχεία, έχει τη δυνατότητα να στρέψει την ακτίνα του με μεγαλύτερη ακρίβεια προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση, δίνοντας έτσι σε περισσότερους



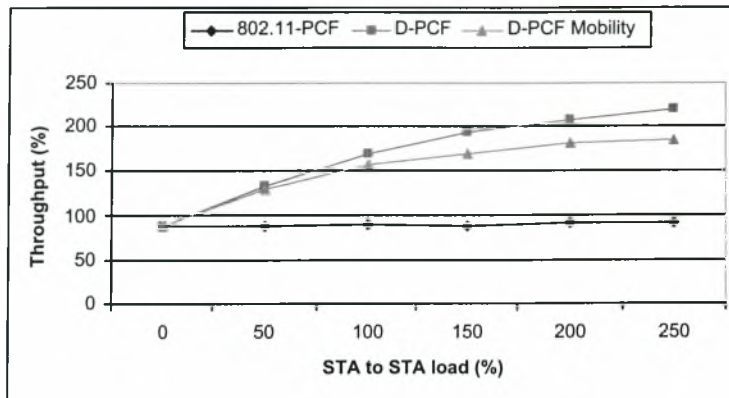
Σχήμα 4.8: Ανάλυση της ρυθμαπόδοσης σε ρυθμαπόδοση λόγω polling και σε ρυθμαπόδοση λόγω απ'ευθείας κατευθυντικών μεταδόσεων

σταθμούς την ευκαιρία να δημιουργήσουν απ'ευθείας επικοινωνία με γείτονες.

Στο σχήμα 4.8 βλέπουμε μια πιο λεπτομερή ανάλυση της ρυθμαπόδοσης του D-PCF για το προηγούμενο σενάριο στην περίπτωση κεραιών με 4 στοιχεία. Στο σχήμα αυτό παρουσιάζουμε το διαχωρισμό της συνολικής ρυθμαπόδοσης σε ρυθμαπόδοση που επιτυγχάνεται από την διαδικασία polling και σε ρυθμαπόδοση που επιτυγχάνεται λόγω των απ'ευθείας κατευθυντικών μεταδόσεων. Όπως μπορούμε να δούμε, η παραγωγή DCF περιοχών μέσα στο κελί κατά τη διάρκεια του PCF σέβεται απολύτως τη διαδικασία polling αφού δεν μειώνεται καθόλου η αντίστοιχη ρυθμαπόδοση (αυτό φαίνεται συγκρίνοντας τη ρυθμαπόδοση αυτή με τη ρυθμαπόδοση της PCF του 802.11 του σχήματος 4.7). Το νέο πρωτόκολλο έχει μόνο θετικές επιπτώσεις στην λειτουργία του δικτύου, προσθέτοντας στη ρυθμαπόδοση λόγω polling επιπλέον ρυθμαπόδοση λόγω των απ'ευθείας κατευθυντικών μεταδόσεων.

Στο επόμενο πείραμά μας εξετάζουμε την επίδραση της κινητικότητας στο προτεινόμενο πρωτόκολλο. Τρέχουμε ένα σενάριο με 10 σταθμούς που είναι τυχαία κατανομημένοι στο κελί. Υποθέτουμε κεραιές με 4 στοιχεία. Τώρα οι σταθμοί είναι κινητοί και υποθέτουμε ότι έχουν χαμηλή κινητικότητα. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνονται στο σχήμα 4.9.

Όπως μπορούμε να δούμε σε αυτό το σχήμα, το προτεινόμενο πρωτόκολλο λειτουργεί καλά και υπό συνθήκες κινητικότητας. Υπάρχει μια μικρή μείωση στην ρυθμαπόδοση, λόγω του γεγονότος ότι τώρα οι σταθμοί είναι κινητοί, οπότε ο πίνακας θέσεών τους (των σταθμών καθώς και του AP) δεν είναι πάντα ενημερωμένος με τις πιο πρόσφατες πληροφορίες για όλους τους γείτονες. Κατά συνέπεια, σε μερικές περιπτώσεις υπάρχουν κατευθυντικές μεταδόσεις προς λάθος κατευθύνσεις. Καθώς οι πίνακες θέσεων ενημερώνονται σχετικά άμεσα μέσω της λήψης νέων



Σχήμα 4.9: Η επίδραση της κινητικότητας στο D-PCF

πακέτων, η δυσλειτουργία αυτή ξεπερνιέται γρήγορα και το πρωτόκολλο επανέρχεται στην κανονική λειτουργία του.

4.5 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό προτείνουμε ένα MAC πρωτόκολλο για την αποδοτική χρήση των κατευθυντικών κεραιών σε ασύρματα τοπικά δίκτυα με υποδομή. Το νέο πρωτόκολλο είναι απλό στην εφαρμογή και δεν προϋποθέτει οποιαδήποτε γνώση της θέσης των σταθμών του κελιού. Υπό τους νέους κανόνες παύει να ισχύει η αυστηρή φίμωση όλων των σταθμών του κελιού κατά τη διάρκεια της διαδικασίας PCF. Εναλλακτικά, επιτρέπονται επιλεκτικά άμεσες κατευθυντικές επικοινωνίες μεταξύ γειτόνων, εάν αυτές δεν βλάπτουν την τρέχουσα διαδικασία rolling του AP. Στο μέλλον θα μελετήσουμε τη χρήση αυτού του πρωτοκόλλου σε ένα περιβάλλον με περισσότερα από ένα κελιά όπου οι περιοχές κάλυψης γειτονικών κελιών μπορεί να επικαλύπτονται μερικώς. Θα μελετήσουμε τους παράγοντες που έχουν επιπτώσεις στην επικάλυψη οπότε και στις συγκρούσεις μεταξύ των γειτονικών κελιών, όπως ο αριθμός των ακτίνων κάθε κεραίας και η ισχύς μετάδοσης. Επιπλέον θα προτείνουμε έναν αλγόριθμο για τη συνεργασία γειτονικών κελιών προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι συγκρούσεις μεταξύ τους.

Σύνδεση ενός Σταθμού σε ένα 802.11h Δίκτυο

5.1 Η Ανάγκη Αλλαγών στην Διαδικασία Σύνδεσης του Κλασικού 802.11

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια ραγδαία επέκταση των ασυρμάτων δικτύων IEEE 802.11 σε επιχειρήσεις, δημόσιους χώρους και σπίτια. Όπως περιγράφουμε στο κεφάλαιο 1, στα δίκτυα αυτά, κάθε χρήστης ανιχνεύει το ασύρματο κανάλι για να αναγνωρίσει κοντινά AP και να προχωρήσει στη διαδικασία Σύνδεσης (Association procedure). Το AP το οποίο επιλέγεται να συμμετάσχει στη διαδικασία αυτή, είναι εκείνο από το οποίο ο σταθμός λαμβάνει σήμα με το μεγαλύτερο Δείκτη Ισχύος του Λαμβανόμενου Σήματος (Received Signal Strength Indicator, RSSI). Με τον τρόπο αυτό, αναμένεται ότι ένας χρήστης συνδέεται με το πιο κοντινό/ισχυρό AP. Πρόσφατες μελέτες έχουν δείξει ότι αυτή η απλή προσέγγιση στην διαδικασία Σύνδεσης οδηγεί σε μη αποδοτική σύνδεση των σταθμών με τα διαθέσιμα AP [MSA03, BB04, BHL04]. Το σημαντικότερο μειονέκτημα της προσέγγισης αυτής, είναι ότι το RSSI δεν δίνει καμία πληροφορία για την κατάσταση του καναλιού τόσο στο uplink, όσο και στο downlink. Στην πραγματικότητα, στα υπάρχοντα 802.11 δίκτυα, η ισχύς μετάδοσης του AP είναι άγνωστη στους σταθμούς. Κατά συνέπεια, ένα μακρινό AP με υψηλή ισχύ μετάδοσης μπορεί να έχει υψηλότερο RSSI από ένα AP που είναι πιο κοντά αλλά έχει χαμηλότερη ισχύ μετάδοσης.

Με την χρήση της διαδικασίας PCF στα ασύρματα δίκτυα 802.11, η ποιότητα υπηρεσιών (QoS) έγινε σημαντικότερη. Η ποιότητα υπηρεσιών που απολαμβάνουν οι σταθμοί εξαρτάται όχι μόνο από την ισχύ των σημάτων, αλλά περισσότερο από τον ρυθμό λήψης στο uplink και downlink κανάλι. Οι ρυθμοί στο uplink και downlink εξαρτώνται από τα επίπεδα παρεμβολής (interference) που παρατηρούνται στις περιοχές του AP και των χρηστών, καθώς επίσης και από τα επίπεδα ισχύος της μετάδοσής τους. Τέλος, παρεμβολή κατά τη διάρκεια της PCF εμφανίζεται λόγω της τρέχουσας μετάδοσης σε γειτονικά κελιά, καθώς επίσης και από εξωτερικές ραδιοσυσκευές (όπως τα ραντάρ, οι συσκευές HyperLan κ.λπ.). Η απόφαση σύνδεσης

ενός σταθμού με κάποιο AP που λαμβάνει υπόψη όλους αυτούς τους παράγοντες, μπορεί σαφώς να παρέχει καλύτερες υπηρεσίες στους χρήστες.

Το πρόσφατα εγκεκριμένο πρωτόκολλο IEEE 802.11h [IEE03b] το οποίο περιγράφουμε στο κεφάλαιο 1, παρέχει νέα χαρακτηριστικά γνωρίσματα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να βελτιώσουν αποτελεσματικά την σύνδεση των χρηστών στα ασύρματα τοπικά δίκτυα, καθώς και την αλλαγή της σύνδεσής τους (hand-off) από κελί σε κελί. Το 802.11h έχει σκοπό να επιβάλλει στα δίκτυα 802.11 τις απαιτήσεις της Επιτροπής Ηλεκτρονικών Επικοινωνιών (Electronic Communications Committee, ECC) στη ζώνη των 5 GHz. Οι δύο σημαντικοί νέοι μηχανισμοί που καθορίζονται από το πρότυπο είναι ο Έλεγχος της Ισχύος Μετάδοσης (Transmission Power Control, TPC) και η Δυναμική Επιλογή Συχνότητας (Dynamic Frequency Allocation, DFS). Η TPC χρησιμοποιείται, εκτός των άλλων, για να δώσει τη δυνατότητα στο AP να περιορίσει το μέγιστο επίπεδο μετάδοσης των σταθμών, ενώ η DFS χρησιμοποιείται για να ανιχνεύσει και να αποτρέψει την παρεμβολή σε ή από άλλους σταθμούς που λειτουργούν στην ίδια συχνότητα. Αυτοί οι μηχανισμοί παρέχουν επίσης νέες διαδικασίες στους σταθμούς και τα AP ώστε να ενημερώνονται ο ένας από τον άλλο για την τρέχουσα ποιότητα του καναλιού. Οι νέες πληροφορίες που είναι τώρα διαθέσιμες στους σταθμούς και τα AP περιλαμβάνουν πληροφορίες σχετικά με την υποβάθμιση της ποιότητας του καναλιού (link degradation), το κατ' εκτίμηση περιθώριο σύνδεσης (link margin), το μέγιστο επιτρεπόμενο επίπεδο μετάδοσης (maximum allowable transmission level) για τους σταθμούς, και τις λαμβανόμενες ενδείξεις μέτρησης της ισχύος των σημάτων (RSSI).

Σε αυτό το κεφάλαιο, θα περιγράψουμε ένα νέο αλγόριθμο για τη σύνδεση (Association) ή την επανασύνδεση (Handoff) σταθμών στα γειτονικά AP. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος είναι εύκολος στην υλοποίηση και χρησιμοποιεί τους νέους μηχανισμούς που περιλαμβάνονται στο 802.11h. Η μέθοδος σύνδεσης/επανασύνδεσης επιλέγει το AP που μπορεί να παρέχει το μέγιστο (κατ' εκτίμηση) συνδιαζόμενο ρυθμό μετάδοσης στο uplink και downlink κανάλι. Σύμφωνα με το προτεινόμενο σχήμα, η απόφαση σύνδεσης λαμβάνει υπόψη της την ποιότητα του καναλιού στο uplink και στο downlink, επιλέγοντας κατ' αυτό τον τρόπο αποτελεσματικά το κατάλληλο AP και μεγιστοποιώντας τη ρυθμαπόδοση του δικτύου.

5.2 Ο Προτεινόμενος Αλγόριθμος

Το πρότυπο 802.11 παρέχει ένα πλαίσιο για την σύνδεση (association) των σταθμών με τα AP [MSA03]. Η διαδικασία αυτή αποτελείται από τρεις φάσεις: **(1) Φάση Ανίχνευσης (Scanning Phase):** Αρχικά, όταν ανοίγει ο σταθμός, ακούει κάθε κανάλι για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο και συλλέγει τα πλαίσια Χαιρετισμού (Beacons) ή τα πλαίσια απάντησης διερεύνησης (Probe Response) από

τα διαθέσιμα AP. **(2) Φάση Απόφασης:** Μετά τη συλλογή αυτών των πλαισίων, ο σταθμός αποφασίζει για το AP με το οποίο θα αρχίσει τη διαδικασία Σύνδεσης (Association). **(3) Φάση Σύνδεσης:** Ο σταθμός ανταλλάσσει πακέτα ελέγχου με το επιλεγμένο AP, προκειμένου να γίνει μέλος του κελιού του. Η σύνδεση λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια της DCF λειτουργίας του κελιού.

Η κατάσταση του καναλιού μπορεί να ποικίλει με το χρόνο, λόγω των αλλαγών των συνθηκών του περιβάλλοντος (παρεμβολές) ή την κίνηση των σταθμών. Συνεπώς, οι σταθμοί μπορούν περιοδικά να εξετάζουν το μέσο (μέσω της διαδικασίας παθητικής ανίχνευσης, *passive scanning*) προκειμένου να διαπιστώσουν εάν υπάρχει ένα "καλύτερο" AP για σύνδεση. Εάν ένα τέτοιο AP υπάρχει, ο σταθμός ξεκινάει μια διαδικασία **Επανασύνδεσης (Reassociation)/ (Handoff)** για να αλλάξει το AP με το οποίο επικοινωνεί και να γίνει πλέον μέλος του κελιού του νέου AP. Όπως στη διαδικασία της Σύνδεσης, έτσι και σε αυτή της Επανασύνδεσης, το 802.11 δεν προσδιορίζει τα κριτήρια για την επιλογή του κατάλληλου AP. Το πρότυπο 802.11h προσφέρει, μέσω των νέων διαδικασιών της TPC, τη δυνατότητα βελτίωσης των μηχανισμών αυτών. Οι ερωτήσεις που πρέπει να απαντηθούν σχετικά με το θέμα είναι οι εξής: (α) Ποιές πληροφορίες μπορεί το AP να παρέχει στους σταθμούς μέσω του προτύπου 802.11h για να επιτρέψει σε αυτούς να λάβουν αποφάσεις για πιο αποδοτικές συνδέσεις; (β) πώς ένας σταθμός καθορίζει το καλύτερο AP, εκμεταλλευόμενος τις πληροφορίες που λαμβάνει από τα διαθέσιμα AP;

Στις τρέχουσες εφαρμογές που χρησιμοποιούν 802.11, κατά τη διάρκεια της φάσης ανίχνευσης, καμία πληροφορία δεν είναι διαθέσιμη στους σταθμούς όσον αφορά την ποιότητα του καναλιού, τη στατιστική των παρεμβολών, ή την ισχύ μετάδοσης του AP. Οι αποφάσεις σύνδεσης του κάθε σταθμού, λαμβάνονται απλώς με βάση τη λαμβανόμενη ισχύ των πλαισίων Χαιρετισμού (Beacons) ή των πλαισίων απάντησης διερεύνησης (Probe Response) που στέλνονται από τα AP. Έτσι λοιπόν, ο κάθε σταθμός επιλέγει να συνδεθεί με το AP με το υψηλότερο RSSRI. Με αυτό τον τρόπο, θεωρεί ότι επέλεξε το AP με το καλύτερο κανάλι. Κατά συνέπεια, αναμένει να επιτύχει υψηλή ρυθμαπόδοση κατά την επικοινωνία του με το δίκτυο. Αυτό το συμπέρασμα του σταθμού για την ορθότητα της επιλογής του δεν είναι πάντα σωστό. Αυτό συμβαίνει επειδή, το RSSRI που ο σταθμός λαμβάνει δεν εξαρτάται μόνο από την απόσταση του AP αλλά και από την ισχύ μετάδοσης του AP. Δεδομένου ότι το 802.11 δεν δίνει καμία πληροφορία για την ισχύ μετάδοσης αυτών των πλαισίων, η στήριξη της απόφασης, απλώς και μόνο, στο λαμβανόμενο RSSRI οδηγεί συχνά σε μη αποδοτική σύνδεση.

Πρόσφατα, οι συγγραφείς της [SXMG04] πρότειναν έναν αλγόριθμο σύνδεσης για ένα CDMA ασύρματο δίκτυο με κυκλοφορία στις downlink συνδέσεις. Το προ-

τεινόμενο σχήμα βασίζεται στον αριθμό των χρηστών του κάθε κελιού. Σύμφωνα με αυτήν τη μέθοδο, κάθε AP μεταδίδει μέσω broadcast πακέτων τον αριθμό χρηστών του κελιού του. Με βάση αυτές τις πληροφορίες, καθώς επίσης και την ισχύ των σημάτων στο downlink κανάλι, ο σταθμός επιλέγει το κελί που θα έχει την υψηλότερη αναμενόμενη ρυθμαπόδοση μετά τη νέα ένωση. Αν προσπαθήσουμε να χρησιμοποιήσουμε έναν ανάλογο αλγόριθμο στην περίπτωση του 802.11 θα οδηγηθούμε στην λήψη αποφάσεων θεωρώντας μόνο την downlink κυκλοφορία. Λόγω όμως της φύσης της κίνησης στην PCF αυτή η προσέγγιση είναι πιθανό να οδηγήσει πάλι σε μη αποδοτικές συνδέσεις. Όπως περιγράψαμε στο κεφάλαιο 1, στην PCF η κυκλοφορία είναι συνήθως συμμετρική στο uplink και στο downlink κανάλι. Κάθε downlink πακέτο ακολουθείται από ένα uplink πακέτο, το οποίο αποτελεί και επιβεβαίωση της λήψης. Κατά συνέπεια, προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η συνολική ρυθμαπόδοση σε ένα τέτοιο σχήμα, πρέπει να λάβουμε υπόψη και τις δυο διευθύνσεις στο κανάλι. Ορίζουμε λοιπόν ως ρυθμαπόδοση μεταξύ ενός σταθμού και ενός AP τον αμφίδρομο ρυθμό μετάδοσης που μπορεί να υποστηριχθεί από το MAC επίπεδο.

Με βάση την προηγούμενη περιγραφή, προτείνουμε μια νέα διαδικασία σύνδεσης που μεγιστοποιεί την αμφίδρομη ρυθμαπόδοση μεταξύ του σταθμού και του AP [KEK⁺05]. Το σχήμα μας καταλήγει στην επιλογή του AP που μεγιστοποιεί τους ρυθμούς μετάδοσης και στις δυο κατευθύνσεις, λαμβάνοντας υπόψη την ποιότητα του uplink και downlink καναλιού. Σύμφωνα με το σχήμα αυτό, κάθε σταθμός υπολογίζει προσεγγιστικά το λόγο σήματος προς παρεμβολή (Signal to Interference Ratio, SINR) για το uplink και το downlink κανάλι για κάθε υποψήφιο AP.

Η διαδικασία προσέγγισης είναι η εξής:

Για το downlink κανάλι:

Ο σταθμός γνωρίζει τη λαμβανόμενη ισχύ των σημάτων των broadcast πακέτων που έλαβε. Λειτουργώντας στα πλαίσια του 802.11h, εκτελεί μια μέτρηση εξάγοντας μια "Έκθεση Μέτρησης της Ισχύος του Λαμβανόμενου Σήματος" (Received Signal Strength Report Indication, RSSRI)", έναν πίνακα δηλαδή με την πυκνότητα του RSSRI όπως αυτός περιγράφηκε στην παράγραφο 1.6.

Χρησιμοποιώντας αυτόν τον πίνακα, ο σταθμός υπολογίζει τη μέση παρεμβολή (interference) στη γειτονιά του. Ολοκληρώνει την εκτίμηση του SINR χρησιμοποιώντας τον ακόλουθο τύπο:

$$SINR_{n,k}^d = \frac{S_{n,k}^r}{I_{est}^k}, \quad (5.1)$$

όπου:

- $SINR_{n,k}^d$ είναι ο υπολογισμένος κατά προσέγγιση SINR για το downlink κανάλι μεταξύ του AP n και του σταθμού k ,
- $S_{n,k}^r$ είναι η ισχύς σήματος για τον παραλήπτη (STA k) για το downlink κανάλι (πλαίσιο Χαιρετισμού από το AP n),
- I_{est}^k είναι η μέση κατά προσέγγιση παρεμβολή (interferenfe) στη γειτονιά του σταθμού k .

Για το uplink κανάλι:

Για το uplink κανάλι, ο σταθμός κάνει παρόμοιες εκτιμήσεις. Λόγω του γεγονότος ότι τώρα ο σταθμός δεν έχει όλες τις πληροφορίες που χρειάζεται, υπάρχουν μερικές μικρές αλλά σημαντικές τροποποιήσεις στη διαδικασία. Παρόμοια με την προηγούμενη περίπτωση, ο σταθμός χρειάζεται την ισχύ του λαμβανόμενου σήματος στο AP καθώς επίσης και τον πίνακα με την πυκνότητα RSSRI στη γειτονιά του AP, προκειμένου να υπολογιστεί το SINR στο uplink κανάλι. Ο σταθμός υπολογίζει αυτές τις ποσότητες με τον ακόλουθο τρόπο: Η λαμβανόμενη ισχύς σήματος ενός uplink πακέτου στο AP υπολογίζεται ως η ισχύς μετάδοσης του πακέτου από το συγκεκριμένο σταθμό, πολλαπλασιασμένη με τον παράγοντα υποβάθμισης της ποιότητας του καναλιού (link degradation factor) που εξαρτάται από το μέσο. Ο παράγοντας υποβάθμισης της ποιότητας του καναλιού μπορεί να υπολογιστεί ως εξής: Όπως έχουμε αναφέρει, σύμφωνα με το 802.11h, κάθε AP μεταδίδει μέσω των πλαισίων Χαιρετισμού του το μέγιστο **Τοπικό Μέγιστο Επίπεδο Ισχύος Μετάδοσης**, (Local Maximum Transmit Power Level). Αυτό είναι το μέγιστο όριο για την ισχύ μετάδοσης κάθε σταθμού στο συγκεκριμένο κελί. Κατά συνέπεια, ο σταθμός χρησιμοποιεί αυτήν την ισχύ για να υπολογίσει το SINR στο uplink (θεωρώντας ότι θα μεταδώσει χρησιμοποιώντας τη μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύ στο συγκεκριμένο κελί). Από την άλλη, το AP περιλαμβάνει τώρα στα πλαίσια Χαιρετισμού του, την ισχύ του σήματος που χρησιμοποιείται για τη μετάδοση του πλαισίου Χαιρετισμού. Έτσι ο σταθμός, με τη γνώση της ισχύος μετάδοσης και της ισχύος λήψης του συγκεκριμένου πακέτου, μπορεί να υπολογίσει τον παράγοντα υποβάθμισης της ποιότητας του καναλιού λόγω της απώλειας διάδοσης.

Τέλος, ο σταθμός χρειάζεται τον πίνακα πυκνότητας RSSRI που μετριέται από το AP, προκειμένου να υπολογιστεί η μέση παρεμβολή στο uplink. Αυτή η πληροφορία είναι διαθέσιμη στο AP και μπορεί να μεταδοθεί με broadcast τρόπο εύκολα στο ενδιαφερόμενο σταθμό. Μια εναλλακτική λύση για τη μετάδοση αυτών των πληροφοριών είναι η προσθήκη ενός νέου Στοιχείου Πληροφοριών (Information Element) στο πλαίσιο Χαιρετισμού το οποίο θα περιέχει τις πληροφορίες αυτές. Σημειώστε ότι το μήκος του συγκεκριμένου πίνακα είναι μόνο μερικές ψηφιολέξεις,

έτσι δεν αυξάνει σημαντικά το μήκος του πλαισίου Χαιρετισμού. Μια άλλη εναλλακτική λύση είναι η λήψη των πληροφοριών αυτών μέσω της αίτησης για μέτρηση του RSSRI (όπως καθορίζεται από το 802.11h) από τον σταθμό προς τα AP, κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ανίχνευσης.

Επομένως, ο σταθμός μπορεί να προχωρήσει στην εκτίμηση του SINR uplink ως εξής:

$$SINR_{n,k}^u = \frac{(C * S_{k,n}^t)}{I_{est}^n} \quad (5.2)$$

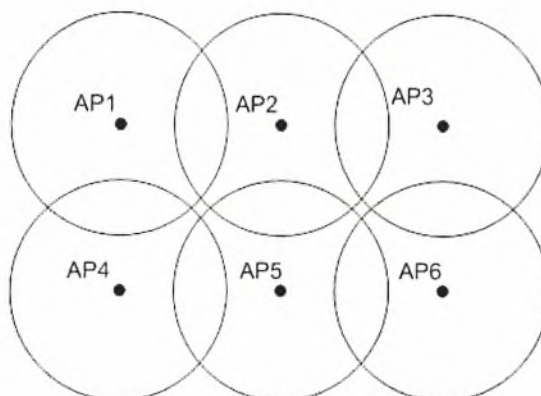
όπου:

- $SINR_{n,k}^u$ είναι το υπολογισμένο κατά προσέγγιση SINR για το uplink μεταξύ του AP n και του σταθμού k .
- C είναι η απώλεια του σήματος λόγω της διάδοσης.
- $S_{k,n}^t$ είναι η υπολογισμένη κατά προσέγγιση ισχύς μετάδοσης από το σταθμό k στο AP n .
- I_{est}^n είναι η μέση κατά προσέγγιση παρεμβολή στη γειτονιά του AP n .

Δεδομένου του SINR στο uplink και downlink κανάλι, ο σταθμός μπορεί να υπολογίσει την Πιθανότητα Λάθους Πακέτου (Packet Error Probability, PER) με τη χρήση των μεθόδων που περιγράφονται στην [QCSS02]. Συμβολίζουμε με p_u και p_d την πιθανότητα λάθους πακέτου στο uplink στο downlink κανάλι αντίστοιχα. Θεωρούμε ότι το κανάλι δεν είναι τέλειο. Έτσι, κάθε μεταδιδόμενο πακέτο λαμβάνεται επιτυχώς με πιθανότητα p_u και p_d αντίστοιχα. Υπολογίζουμε το μέσο όρο των PCF πλαισίων (super-frame) που απαιτούνται για μια επιτυχή μετάδοση πακέτων ως εξής.

$$\begin{aligned} E(\# frames) &= \sum_{k=1}^{\infty} k(1 - p_u p_d)^{k-1} p_u p_d \\ &= \frac{p_u p_d}{1 - p_u p_d} = \frac{1}{\frac{1}{p_u p_d} - 1} \end{aligned} \quad (5.3)$$

Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί ο αριθμός των πλαισίων που απαιτούνται για μια επιτυχή μετάδοση πρέπει να ελαχιστοποιήσουμε το γινόμενο $p_u p_d$. Κατά συνέπεια, ο σταθμός επιλέγει το AP που παρέχει το ελάχιστο $p_u p_d$.



Σχήμα 5.1: Το σύστημα πολλών κελιών των προσομοιώσεων μας

5.3 Μοντέλο και Αποτελέσματα Προσομοιώσεων

5.3.1 Μοντέλο Προσομοιώσεων

Για τις προσομοιώσεις, χρησιμοποιήσαμε το εργαλείο OPNET [OPN]. Το εργαλείο προσομοίωσης ασύρματου περιβάλλοντος στο OPNET προσεγγίζει με λεπτομερή τρόπο τη μετάδοση και την λήψη ενός πακέτου σε πραγματικές συνθήκες. Με μια ακολουθία εκτέλεσης 13ων λειτουργιών, ακολουθεί με πολύ ρεαλιστικό τρόπο τη συμπεριφορά του φυσικού στρώματος. Έτσι, κατά τη διάρκεια των μεταδόσεων, παίρνει υπόψη του την ισχύ μετάδοσης των πακέτων, την απώλεια διάδοσης, το Ρυθμό Λάθους Ψηφίου (Bit Error Rate, BER), την παρεμβολή και το θόρυβο που ο κάθε σταθμός βιώνει. Οι παράγοντες αυτοί είναι πολύ σημαντικοί στην προσομοίωση του πρωτοκόλλου μας προκειμένου να υπάρξουν ρεαλιστικά αποτελέσματα. Χρησιμοποιούμε ένα δίκτυο πολλών κελιών το οποίο απεικονίζεται στο σχήμα 5.1.

Στις προσομοιώσεις μας, η Περίοδος Χωρίς Ανταγωνισμό (Contention Free Period) στην οποία λαμβάνει χώρα η PCF είναι 85% του υπερ-πλασιού (super-frame) ενώ η περίοδος Ανταγωνισμού (Contention Period) στην οποία λαμβάνει χώρα η DCF είναι το υπόλοιπο 15%. Η ισχύς μετάδοσης κάθε AP είναι ίση με 200mW. Οι θέσεις των AP είναι τέτοιες ώστε να υπάρχει 25% επικάλυψη μεταξύ δύο γειτονικών κελιών. Η ισχύς μετάδοσης κάθε σταθμού είναι σταθερή και ίση με την ισχύ μετάδοσης των AP. Για τις μεταδόσεις των πακέτων από οποιοδήποτε σταθμό (ή το AP) χρησιμοποιούμε τον φυσικό τρόπο 1 (Physical Mode 1) του IEEE 802.11a του φυσικού στρώματος OFDM. Αυτό σημαίνει ότι η χρησιμοποιημένη διαμόρφωση είναι BPSK που επιτρέπει ρυθμό μετάδοσης 6 Mbps. Υποθέτουμε ότι μια επιτυχής αμφίδρομη επικοινωνία επιτυγχάνεται όταν μια επιτυχής μετάδοση από το AP στο σταθμό, ακολουθείται από μια επιτυχή μετάδοση στην αντίθετη κατεύθυνση. Έτσι θεωρούμε ότι οι μεταδόσεις είναι επιτυχείς ανά ζεύγη (αμφίδρομη ρυθμαπόδοση).

Μετράμε τη ρυθμαπόδοση του δικτύου βασισμένοι στο ποσό των δεδομένων που μεταδίδονται από αυτή την επιτυχή αμφίδρομη ανταλλαγή πακέτων. Συγκρίνουμε τον αλγόριθμό μας με τη διαδικασία Σύνδεσης η οποία βασίζεται στην ισχύ του σήματος των πλαισίων Χαιρετισμού. Στα σχήματα που ακολουθούν, ονομάζουμε αυτή τη διαδικασία "802.11", δεδομένου ότι αυτή είναι η τρέχουσα προσέγγιση που το 802.11 χρησιμοποιεί.

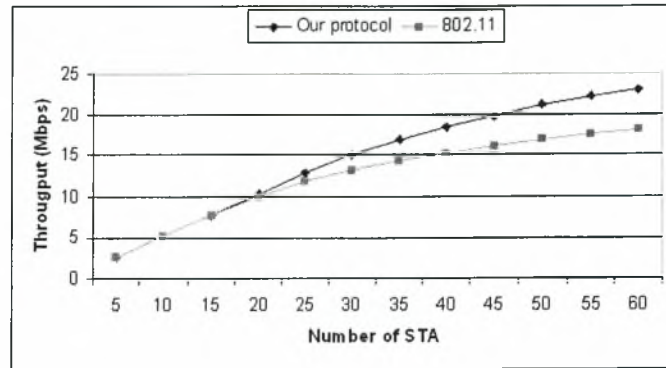
Υποθέτουμε ομοιόμορφη κατανομή των σταθμών στην περιοχή του δικτύου. Προκειμένου να δημιουργήσουμε ένα δυναμικό περιβάλλον, ως αναφορά τα επίπεδα παρεμβολής γύρω από κάθε σταθμό, καθορίζουμε δύο καταστάσεις για κάθε σταθμό: Την κατάσταση "ενεργός" και την κατάσταση "ανενεργός". Όταν ο σταθμός είναι "ενεργός" μεταδίδει πακέτα με ρυθμό 1024 kbps. Όταν ο σταθμός είναι "ανενεργός" παραμένει σιωπηλός, μη μεταδίδοντας τίποτα. Κάθε σταθμός εναλλάσσει την κατάστασή του μεταξύ "ενεργού" και "ανενεργού". Δεν υπάρχει συγχρονισμός μεταξύ των σταθμών, ως αναφορά το πότε αυτοί εναλλάσσουν την κατάστασή τους. Έτσι η παρεμβολή σε κάθε κελί αλλάζει δυναμικά με το χρόνο. Οι περίοδοι που η κάθε μια από τις δυο καταστάσεις είναι ενεργή είναι ίσες και σχετικά μεγάλες.

Όταν ένας σταθμός είναι "ανενεργός" συμπεριφέρεται σαν να είναι κλειστός. Όταν αρχίζει η περίοδος "ενεργός", συμπεριφέρεται σαν να άνοιξε μόλις. Κατά συνέπεια, εκτελεί τη διαδικασία Σύνδεσης όπως αυτή καθορίζεται στην προηγούμενη παράγραφο. Αφότου ο σταθμός έχει συνδεθεί με ένα AP, εκτελεί τη διαδικασία Επανασύνδεσης περιοδικά. Το διάστημα μεταξύ δυο διαδοχικών διαδικασιών Επανασύνδεσης είναι αρκετά μικρό σε σχέση με το διάστημα που ένας σταθμός είναι "ενεργός", έτσι ώστε ο σταθμός να εκτελεί τη διαδικασία Επανασύνδεσης τέσσερις φορές κατά τη διάρκεια της κατάστασης "ενεργός". Καταλήξαμε στο μήκος αυτών των διαστημάτων με τη δοκιμή διαφόρων τιμών στις προσομοιώσεις μας και παρατηρώντας ότι αυτές οι τιμές οδηγούν το σύστημα σε μια σταθερή συμπεριφορά.

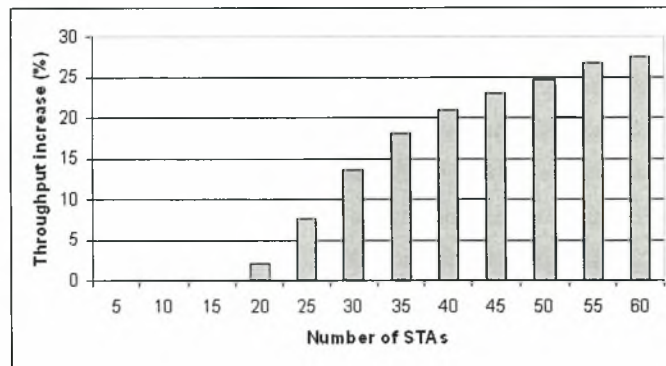
5.3.2 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων

Στο πρώτο πείραμα μελετάμε τη συμπεριφορά του πρωτοκόλλου μας καθώς ο αριθμός των σταθμών στην περιοχή αυξάνεται. Εκτελούμε 12 φορές την προσομοίωση και σε κάθε μια από αυτές αυξάνουμε τον αριθμό των σταθμών από 5 έως 60. Η σύγκριση της ρυθμαπόδοσης του πρωτοκόλλου μας με τον αλγόριθμο του 802.11 παρουσιάζεται στο σχήμα 5.2. Η επί τοις εκατό αύξηση της ρυθμαπόδοσης του πρωτοκόλλου μας έναντι αυτού που χρησιμοποιείται στο 802.11 παρουσιάζεται στο σχήμα 5.3.

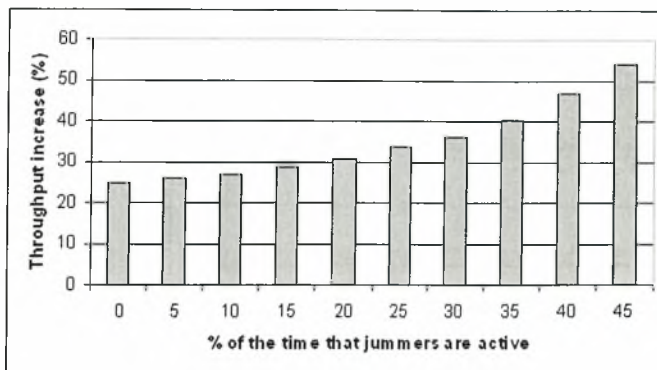
Όπως μπορούμε να δούμε, το πρωτόκολλό μας συμπεριφέρεται αποτελεσματικότερα, αυξάνοντας τη συνολική ρυθμαπόδοση του δικτύου καθώς ο αριθμός των



Σχήμα 5.2: Η σύγκριση της ρυθμαπόδοσης καθώς ο αριθμός των σταθμών αυξάνεται



Σχήμα 5.3: Η επί τοις εκατό αύξηση της ρυθμαπόδοσης καθώς ο αριθμός των σταθμών αυξάνεται

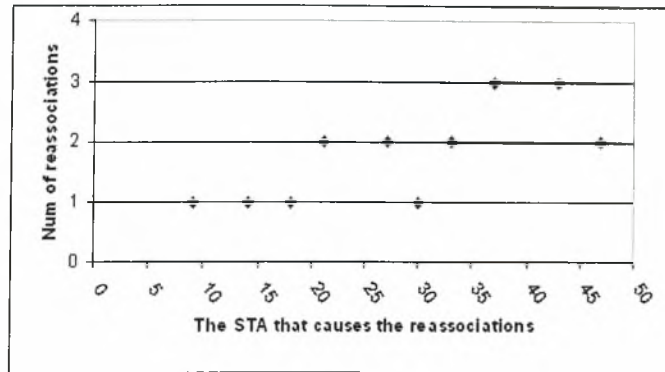


Σχήμα 5.4: Η αύξηση της ρυθμαπόδοσης κατά την παρουσία παρεμβολέων

σταθμών αυξάνεται. Σε κατάσταση υψηλού φόρτου το πρωτόκολλό μας επιτυγχάνει αύξηση 27% περίπου, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 5.3. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το πρωτόκολλό μας, λαμβάνοντας υπόψη του το SINR για το uplink και το downlink κανάλι, αντιδρά με αποτελεσματικό τρόπο στην αλλαγή της παρεμβολής μεταξύ των κελιών αλλάζοντας δυναμικά τις συνδέσεις των σταθμών που βρίσκονται στις περιοχές επικάλυψης των κελιών. Αντίθετα, το μοντέλο που χρησιμοποιεί το 802.11, μη λαμβάνοντας υπόψη του την κατάσταση του καναλιού, κάνει μια στατική κατανομή των σταθμών στα διάφορα κελιά αδυνατώντας έτσι να ακολουθήσει τη δυναμικά μεταβαλλόμενη παρεμβολή στο περιβάλλον.

Προκειμένου να μελετηθεί η συμπεριφορά του πρωτοκόλλου μας υπό συνθήκες εξωτερικής παρέμβασης, κάνουμε μερικά πειράματα προσθέτοντας στην περιοχή του δικτύου μερικούς παρεμβολείς (jammers). Οι παρεμβολείς είναι συστήματα που όταν είναι ενεργά, μεταδίδουν συνεχώς άχρηστα πακέτα που προκαλούν παρεμβολή. Τα άχρηστα πακέτα δεν μπορούν να ληφθούν σωστά από κάποιο σταθμό και προκαλούν σύγκρουση σε οποιονδήποτε άλλο μεταδιδόμενο πακέτο στην περιοχή τους. Στο επόμενο πείραμα, προσθέτουμε τρεις παρεμβολείς στο δίκτυο. Οι παρεμβολείς βρίσκονται κοντά στα AP 1, 2 και 3. Όταν ένας παρεμβολέας είναι ενεργός, καταστρέφει την λήψη του γειτονικού AP. Κάθε παρεμβολέας εναλλάσσει την κατάστασή του μεταξύ "ενεργός" και "ανενεργός". Εκτελούμε προσομοιώσεις αλλάζοντας το ποσοστό της ενεργού περιόδου για καθέναν από τους παρεμβολείς. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, ως αναφορά την αύξηση της ρυθμαπόδοσης του προτεινόμενου πρωτοκόλλου, έναντι της τρέχουσας προσέγγισης απεικονίζονται στο σχήμα 5.4.

Όπως μπορούμε να δούμε στο σχήμα 5.4, το πρωτόκολλό μας είναι πιο ανθεκτικό στην παρουσία της εξωτερικής παρέμβασης. Κάτω από τη νέα διαδικασία σύνδεσης, οι σταθμοί αντιλαμβάνονται την παρουσία παρεμβολέων, και έτσι, εάν



Σχήμα 5.5: Ο αριθμός των επανασυνδέσεων που η παρουσία ενός νέου σταθμού προκαλεί

έχουν εναλλακτική λύση, δηλαδή εάν η θέση τους είναι τέτοια που να τους επιτρέπει να συνδεθούν με κελί που δεν έχει παρεμβολείς, επιλέγουν το κελί αυτό κατά τη σύνδεση ή την επανασύνδεσή τους. Αντίθετα, η τρέχουσα προσέγγιση του 802.11, δεν μπορεί να ανιχνεύσει την παρουσία jammers και να αντιδράσει αποτελεσματικά. Κατά συνέπεια, οι σταθμοί παραμένουν συνδεδεμένοι με τα "προβληματικά" AP, προσπαθώντας αναποτελεσματικά να επικοινωνήσουν με ένα AP που βιώνει συνεχείς συγκρούσεις λόγω της υψηλής εξωτερικής παρέμβασης γύρω του. Όσο περισσότερος είναι ο χρόνος που οι παρεμβολείς είναι ενεργοί, τόσο υψηλότερη είναι η αύξηση της ρυθμαπόδοσης της προσέγγισής μας. Σε περιβάλλον υψηλής εξωτερικής παρέμβασης, το πρωτόκολλό μας μπορεί να επιτύχει μια αύξηση περίπου 54% έναντι της τρέχουσας προσέγγισης.

Στο τελευταίο πείραμά μας, μελετάμε τη σταθερότητα της προτεινόμενης διαδικασίας σύνδεσης. Εξετάζουμε το ίδιο περιβάλλον των έξι κελιών αλλά τώρα προσθέτουμε σταθμούς σε τυχαίες θέσεις σε τακτά χρονικά διαστήματα. Ο αριθμός των σταθμών στο δίκτυο αρχίζει από 1 και αυξάνεται μέχρι τους 50 σταθμούς. Κάθε σταθμός, όταν ενεργοποιείται, συνδέεται με ένα AP και έπειτα μεταδίδει συνεχώς με ρυθμό 512 kbps. Ανά τακτά χρονικά διαστήματα, εκτελεί μια επανασύνδεση προκειμένου να εξεταστεί τις συνθήκες του δικτύου για αποδοτικότερη σύνδεση. Σε ένα τέτοιο περιβάλλον, η παρεμβολή στο δίκτυο αλλάζει, κάθε φορά που ενεργοποιείται ένας νέος σταθμός. Σε αυτό το πείραμα μετράμε τον αριθμό των επανασυνδέσεων που η παρουσία ενός νέου σταθμού μπορεί να προκαλέσει.

Στο σχήμα 5.5, μπορούμε να δούμε ότι όταν ενεργοποιείται ένας νέος σταθμός, ενδεχομένως να εμφανιστούν κάποιες επιπλέον επανασυνδέσεις στο δίκτυο. Αυτό συμβαίνει επειδή ο νέος σταθμός αλλάζει το περιβάλλον παρέμβασης στη γειτονιά του. Μερικές από αυτές τις αλλαγές έχουν επιπτώσεις στην απόφαση των γύρω σταθμών, οδηγώντας τους στο να επανασυνδεθούν με ένα ικανότερο AP. Καθώς ο

αριθμός των σταθμών αυξάνεται, βλέπουμε ότι δύο ή τρεις επανασυνδέσεις μπορεί να εμφανιστούν μετά από μια συγκεκριμένη σύνδεση που αλλάζει τη δυναμική του συστήματος. Το σημαντικό είναι ότι μόλις προσαρμοστεί το σύστημα στις νέες συνθήκες, παραμένει σταθερό έως ότου μια νέα είσοδος προκαλέσει σημαντική αλλαγή στο περιβάλλον παρεμβολών και αναγκάζει έτσι κάποιον ή κάποιους άλλους σταθμούς σε νέα επανασύνδεση.

5.4 Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο προτείνουμε έναν αλγόριθμο για τον έλεγχο της σύνδεσης των σταθμών σε ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο που ακολουθεί την προτυποποίηση του IEEE 802.11h. Το σχήμα μας, επιτρέπει στους σταθμούς να συνδεθούν με το καλύτερο AP με βάση την ποιότητα του καναλιού στο uplink και στο downlink κανάλι. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων της προτεινόμενης προσέγγισης δείχνουν ότι ο αλγόριθμός μας επιτυγχάνει αύξηση στη ρυθμαπόδοση κατά περισσότερο από 55% όταν συγκρίνεται με προηγούμενες μεθόδους σύνδεσης του IEEE 802.11, σε περιβάλλον με υψηλή παρεμβολή.

Συμπεράσματα

Στην διατριβή αυτή παρουσιάζονται νέοι μηχανισμοί για την βελτίωση της απόδοσης του MAC επιπέδου των ασυρμάτων τοπικών δικτύων. Οι μηχανισμοί αυτοί εκμεταλλεύονται την εξέλιξη της σημερινής τεχνολογίας στα ασύρματα δίκτυα και επιλύουν σημαντικά προβλήματα που σχετίζονται με την παροχή ποιότητας υπηρεσιών. Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα, οι προτεινόμενοι αλγόριθμοι βελτιώνουν σημαντικά τη συμπεριφορά των ασύρματων δικτύων, προσφέροντας στους χρήστες μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης και καλύτερη ποιότητα υπηρεσίας.

Πιο συγκεκριμένα, στο κεφάλαιο 2 περιγράφεται ένας αλγόριθμος χρονοδρομολόγησης για την παροχή ποιότητας υπηρεσιών στους χρήστες ενός ασύρματου δικτύου με υποδομή. Ο χρονοδρομολογητής που προτείνεται, φροντίζει για τον διαμοιρασμό του καναλιού στους διάφορους χρήστες, λαμβάνοντας υπόψη του τις βραχυπρόθεσμες και μακροπρόθεσμες ανάγκες τους. Επίσης, εξετάζοντας την ποιότητα του καναλιού, φροντίζει την αποφυγή εκχώρησης χρόνου σε σταθμούς που βιώνουν συνθήκες κακού καναλιού. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται η σπατάλη πόρων σε ανεπιτυχείς μεταδόσεις. Προσομοιώσεις του αλγορίθμου δείχνουν ότι ο χρονοδρομολογητής λειτουργεί με αποτελεσματικό τρόπο, παρέχοντας ποιότητα υπηρεσίας στους χρήστες του δικτύου από τη μια, και μεγιστοποιώντας τη χρήση του καναλιού από την άλλη.

Στο κεφάλαιο 3, περιγράφεται ένα ολοκληρωμένος μηχανισμός λειτουργίας του MAC επιπέδου για την αποτελεσματική χρήση των κατευθυντικών κεραιών σε ad-hoc ασύρματα δίκτυα. Οι κατευθυντικές κεραιές είναι μια τεχνολογία που διαθέτει πολλά πλεονεκτήματα, αφού επιτρέπει την επέκταση της περιοχής κάλυψης μεταξύ δυο σταθμών, καθώς επίσης και την χωρική επαναχρησιμοποίηση. Από την άλλη, αν δεν χρησιμοποιηθούν σωστά, οι κεραιές αυτές μπορούν να δημιουργήσουν πολλά προβλήματα όπως η αύξηση του προβλήματος του κρυμμένου κόμβου και του προβλήματος της κώφωσης. Όπως φαίνεται από τις προσομοιώσεις, το προτεινόμενο πρωτόκολλο, χρησιμοποιώντας μόνο κατευθυντικές μεταδόσεις καταφέρνει να εκμεταλλευτεί τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν οι κατευθυντικές κεραιές, ελαχι-

στοποιώντας τα διάφορα προβλήματα και αυξάνοντας έτσι σημαντικά την απόδοση του δικτύου.

Επεκτείνοντας το πρωτόκολλο που μόλις αναφέρθηκε, σχεδιάσαμε ένα MAC πρωτόκολλο για τη χρήση κατευθυντικών κεραιών σε ασύρματα τοπικά δίκτυα με υποδομή, το οποίο παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 4. Το σχήμα αυτό υποστηρίζει τη χρήση κατευθυντικών μεταδόσεων κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του κεντροποιημένου συντονισμού (PCF). Παράλληλα, επιτρέπει την κατευθυντική επικοινωνία μεταξύ σταθμών του κελιού, ταυτόχρονα με τη διαδικασία PCF, υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Οι συνθήκες αυτές εξασφαλίζουν ότι η PCF δεν παρεμποδίζεται από τις απ'ευθείας κατευθυντικές μεταδόσεις. Οι προσομοιώσεις του πρωτοκόλλου δείχνουν ότι η χρήση του αυξάνει την απόδοση του δικτύου, αφού τώρα υπάρχει κατά τη διάρκεια της PCF χωρική επαναχρησιμοποίηση.

Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται ένας αλγόριθμος για τη Σύνδεση των σταθμών με τα σημεία πρόσβασης σε ένα περιβάλλον πολλών επικαλυπτόμενων κελιών. Ο αλγόριθμος, λαμβάνοντας υπόψη την κατάσταση του καναλιού στο uplink και στο downlink, συνδέει τον κάθε σταθμό με το σημείο πρόσβασης που του προσφέρει τη μέγιστη ρυθμαπόδοση. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αποδεικνύουν ότι πράγματι ο προτεινόμενος αλγόριθμος λειτουργεί αποδοτικά, αφού προσαρμόζει δυναμικά τις συνδέσεις των σταθμών με την κατάσταση του καναλιού, αυξάνοντας με αυτό τον τρόπο την ρυθμαπόδοση του δικτύου.

Οι τομείς στους οποίους αναπτύχθηκαν οι μηχανισμοί που μόλις αναφέραμε είναι αναπτυσσόμενοι και παρουσιάζουν ιδιαίτερο ερευνητικό ενδιαφέρον. Η παρούσα δουλειά μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εφαλτήριο για την αλλαγή και επέκταση της λειτουργίας του MAC επιπέδου, προς κατευθύνσεις που ξεφεύγουν από τον κλασικό σχεδιασμό πρωτοκόλλων.

Έτσι, ως αναφορά την μελλοντική δουλειά, ιδιαίτερο ερευνητικό ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη των MAC πρωτοκόλλων που αναπτύχθηκαν για την υποστήριξη των κατευθυντικών κεραιών, λαμβάνοντας υπόψη ένα πιο λεπτομερές μοντέλο για τη μετάδοση των κεραιών αυτών. Το μοντέλο που χρησιμοποιείται μέχρι τώρα είναι σχετικά απλουστευμένο, μιας και περιέχει ένα πολύ συμμετρικό σχήμα μετάδοσης. Το σχήμα αυτό δεν ανταποκρίνεται απόλυτα στον τρόπο μετάδοσης σε πραγματικές συνθήκες. Ένα πιο ρεαλιστικό μοντέλο, μπορεί να δώσει σημαντική πληροφορία για τη συμπεριφορά των MAC πρωτοκόλλων, όταν χρησιμοποιούνται κατευθυντικές κεραιές και να οδηγήσει σε πιο αποδοτικές σχεδιαστικές λεπτομέρειες. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον επίσης θα είχε η προτυποποίηση ενός τέτοιου MAC πρωτοκόλλου και η δοκιμή της λειτουργίας του σε πραγματικές συνθήκες.

Στον τομέα της Σύνδεσης των σταθμών με τα γειτονικά σημεία πρόσβασης,

ενδιαφέρον παρουσιάζει ο σχεδιασμός ενός μηχανισμού ελέγχου της ισχύος μετάδοσης των σταθμών ενός κελιού από το σημείο πρόσβασης. Το σημείο πρόσβασης, θέτοντας ένα δυναμικό άνω όριο στην ισχύ μετάδοσης των σταθμών του, θα μπορεί να ελέγχει την παρεμβολή του κελιού στα γειτονικά κελιά του ασύρματου δικτύου. Παράλληλα, ο αλγόριθμος Σύνδεσης που αναφέραμε στο κεφάλαιο 5 θα αποκτήσει μια νέα δυναμική, μιας και τώρα η απόφαση της Σύνδεσης θα εξαρτάται, εκτός των άλλων, και από το άνω όριο που έχει θέσει το κάθε γειτονικό σημείο πρόσβασης. Ο μηχανισμός ελέγχου της ισχύος, σε συνδυασμό με το μηχανισμό Σύνδεσης, θα δημιουργήσουν μια νέα δυναμική σε περιβάλλοντα με πολλά επικαλυπτόμενα κελιά. Κάτω από το νέο περιβάλλον, το μέγεθος του κάθε κελιού θα καθορίζεται δυναμικά, με σκοπό την κάλυψη της συνολικής περιοχής, την ελαχιστοποίηση της παρεμβολής και την μεγιστοποίηση της ρυθμαπόδοσης.

Τέλος, ένα πολύ ενδιαφέρον θέμα που προκύπτει από το τελευταίο κομμάτι της διατριβής, είναι η μελέτη και ανάπτυξη αλγορίθμων για την δυναμική επιλογή της συχνότητας λειτουργίας ενός κελιού. Όταν το σημείο πρόσβασης του κελιού καταλήγει στο συμπέρασμα ότι παρά τους μηχανισμούς ελέγχου ισχύος που διαθέτει, δεν μπορεί να λειτουργήσει αποδοτικά στη συχνότητά του, λόγω εξωτερικών παρεμβολών, θα πρέπει να δρομολογεί και να ελέγχει την αλλαγή της συχνότητας λειτουργίας του κελιού. Ο τρόπος εκμετάλλευσης των πληροφοριών που έχει, σχετικά με τις συνθήκες του καναλιού στις διάφορες συχνότητες, η μέθοδος επιλογής της νέας συχνότητας, καθώς και άλλες σχεδιαστικές λεπτομέρειες, αποτελούν ανοιχτά θέματα στην περιοχή και χρίζουν ιδιαίτερου ενδιαφέροντος.

Βιβλιογραφία

- [802] IEEE 802.11. <http://grouper.ieee.org/groups/802/11>.
- [AP02] M. Agarwal and A. Puri. Base station scheduling of requests with fixed deadlines. In *IEEE Infocom*, 2002.
- [BB04] Y. Bejerano and R. Bhatia. MiFi: A framework for fairness and QoS assurance in current IEEE 802.11 networks with multiple access points. In *IEEE Infocom*, 2004.
- [BBKT96] P. Bhagwat, P. Bhattacharya, A. Krishna, and S. Tripathi. Enhancing throughput over wireless LANs using channel state dependent packet scheduling. In *IEEE Infocom*, 1996.
- [BHL04] Y. Bejerano, S. Han, and L. Li. Fairness and load balancing in wireless LANs using association control. In *MobiCom*, 2004.
- [CG96] M. Cooper and M. Goldberg. Intelligent antennas: Spatial division multiple access. *Annual Review of Communications*, pages 999--1002, 1996.
- [CGL00] A. Chandra, V. Gummalla, and J. Limb. Wireless medium access control protocols. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 3(2), 2000.
- [CV03] R. Choubhury and N. Vaidya. Impact of directional antennas on ad hoc routing. In *PWC*, 2003.
- [CV04] R. Choubhury and N. Vaidya. Deafness: A MAC problem in ad hoc networks when using directional antennas. In *ICNP*, 2004.
- [CYRV02] R.R. Choudhury, X. Yang, R. Ramanathan, and N. H. Vaidya. Using directional antennas for medium access control in ad hoc networks. In *ACM MobiCom*, 2002.
- [DKS90] A. Demers, S. Keshav, and S. Shenker. Analysis and simulation of a fair queuing algorithm. *Internet Res. and Exper.*, 1, 1990.

- [EAR03] T. ElBatt, T. Anterson, and B. Ryu. Performance evaluation of multiple access protocols for ad hoc networks using directional antennas. In *WCNC*, 2003.
- [FG98] G.J. Foschini and M.J. Gans. On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas. *Wireless Personal Communication*, 1998.
- [FGLA95] C. L. Fullmer and J.J. Garcia-Luna-Aceves. Floor acquisition multiple access (FAMA) for packet-radio networks. In *ACM SIGCOMM*, 1995.
- [FGLA97] C. L. Fullmer and J. J. Garcia-Luna-Aceves. Solutions to hidden terminal problems in wireless networks. *ACM SIGCOMM*, 1997.
- [FSS98] C. Fragouli, V. Sivaraman, and M. B. Srivastava. Controlled multimedia wireless link sharing via enhanced class-based queueing with channel-state-dependent packet scheduling. In *IEEE Infocom*, 1998.
- [HP96] M. Horneffer and D. Plassmann. Directional antennas in mobile broadband systems. In *IEEE Infocom*, 1996.
- [IEE99a] IEEE 802.11 Std. *IEEE 802.11, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*, 1999.
- [IEE99b] IEEE 802.11b Std. *IEEE 802.11, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, Higher-Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band*, 1999.
- [IEE00] IEEE 802.11a Std. *IEEE 802.11, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, High-Speed Physical Layer in the 5 GHz Band*, 2000.
- [IEE02] IEEE 802.11e/D3.0. *IEEE 802.11 WG, Draft Supplement to Standard for Telecommunications and Information Exchange Between Systems - Part 11: Medium Access Control (MAC) Enhancements for Quality of Service (QoS)*, May 2002.
- [IEE03a] IEEE 802.11g Std. *IEEE 802.11, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, Further Higher Data Rate Extension in the 2.4 GHz Band*, 2003.
- [IEE03b] IEEE 802.11h Std. *IEEE 802.11, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, Amendment 5:*

Spectrum and Transmit Power Management Extensions in the 5 GHz Band in Europe, 2003.

- [Kar90] P. Karn. MACA - a new channel access method for packet radio. In *9th ARRL Computer Networking Conference*, 1990.
- [KEK⁺05] T. Korakis, O. Ercetin, S. Krishnamurthy, L. Tassiulas, and S. Tripathi. Power and association control of mobile stations in IEEE 802.11h compliant wireless lans. In *RAWNET*, 2005.
- [KJT03] T. Korakis, G. Jakllari, and L. Tassiulas. A MAC protocol for full Exploitation of Directional Antennas in Ad-hoc Wireless Networks. In *ACM MobiHoc*, 2003.
- [KJT05] T. Korakis, G. Jakllari, and L. Tassiulas. CDR-MAC: A Protocol for full Exploitation of Directional Antennas in Ad-hoc Wireless Networks. *Submitted to IEEE Transactions on Networking*, 2005.
- [KKK90] C.R. Kalmanek, H. Kanakia, and S. Keshav. Rate controlled servers for very high-speed networks. In *IEEE Globecom*, 1990.
- [KSV00] Y.B. Ko, V. Shankarkumar, and N.H. Vaidya. Medium access control protocols using directional antennas in ad hoc networks. In *IEEE Infocom*, 2000.
- [KT02] T. Korakis and L. Tassiulas. An approach towards QoS provisioning in wireless LAN complying to the 802.11e framework. In *12th IEEE LANMAN*, 2002.
- [KT04] T. Korakis and L. Tassiulas. D-PCF: A MAC protocol for exploitation of directional antennas in 802.11 infrastructure wireless networks. In *Allerton Conference*, 2004.
- [KT05] T. Korakis and L. Tassiulas. Providing quality of service guarantees in wireless LANs compliant with 802.11e. *Computer Networks*, 47, 2005.
- [LBS99] S. Lu, V. Bharghavan, and R. Srikant. Fair scheduling in wireless packet networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 7(4), 1999.
- [LR99] C. Liberti and T.S. Rappaport. *Smart Antennas for Wireless Communications: IS-95 and Third Generation CDMA Applications*, chapter 1. Prentice Hall, 1999.

- [MCM⁺02] S. Mangold, S. Choi, P. May, O. Klein, G. Hiertz, and L. Stibor. IEEE 802.11e wireless LAN for quality of service. In *European Wireless 2002*, 2002.
- [MSA03] A. Mishra, M. Shin, and W. Arbaugh. An empirical analysis of the IEEE 802.11 MAC layer handoff process. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 33, 2003.
- [NYH00] A. Nasipuri, S. Ye J. You, and R.E. Hiromoto. A MAC protocol for mobile ad-hoc networks using directional antennas. In *WCNC*, 2000.
- [OP99] Bob O'Hara and Al Petrick. *802.11 Handbook, A Designer's Companion*, chapter Medium Access Control. Standards Information Network, IEEE Press, 1999.
- [OPN] OPNET. <http://www.opnet.com/>, Radio/Wireless Models.
- [PG93] A.K. Parekh and R.G. Gallager. A generalized processor sharing approach to flow control in integrated services networks: The single node case. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 1(3):344--357, 1993.
- [PPVM97] N. Passas, S. Paskalis, D. Vali, and L. Merakos. Quality-of-service oriented medium access control for wireless ATM networks. *IEEE Communications Magazine*, 35(11), 1997.
- [QC01] D. Qiao and S. Choi. Goodput enhancement of IEEE 802.11a wireless LAN via link adaptation. In *IEEE ICC*, 2001.
- [QCSS02] D. Qiao, S. Choi, A. Soomro, and K. Shin. Energy-efficient PCF operation of IEEE 802.11a wireless LAN. In *IEEE Infocom*, 2002.
- [Ram01] R. Ramanathan. On the performance of ad hoc networks with beam-forming antennas. In *ACM MobiHoc*, 2001.
- [Rap96] T. S. Rappaport. *Wireless Communications, Principles and Practice*, chapter 1. Prentice Hall, 1996.
- [SG00] A. Stamoulis and G. Giannakis. Packet fair queuing scheduling based on multirate multipath-transparent CDMA for wireless networks. In *IEEE Infocom*, 2000.
- [SR99] S. Singh and C.S. Raghavendra. PAMAS - power aware multi-access protocol with signaling for ad hoc networks. In *ACM SIGCOMM*, 1999.

- [SVC97] S. Suri, G. Varghese, and G. Chandranmenon. Leap forward virtual clock: A new fair queuing scheme with guaranteed delays and throughput fairness. In *IEEE Infocom*, 1997.
- [SXMG04] A. Sang, X. Wang, M. Madhian, and R. Gitlin. Coordinated load balancing, handoff/cell-site selection and scheduling in multi-cell packet data systems. In *MobiCom*, 2004.
- [TG97] F. Talucci and M. Gerla. MACA-BI (MACA by invitation): A wireless mac protocol for high speed ad-hoc networking. In *IEEE ICUPC*, 1997.
- [TK75] F. A. Tobagi and L. Kleinrock. Packet switching in radio channels: Part ii - The hidden terminal problem in carrier sense multiple-access modes and the busy-tone solution. *IEEE/ACM Transactions on Communications*, 23(12):1417-1433, 1975.
- [TMRB02] M. Takai, J. Martin, A. Ren, and R. Bagrodia. Directional virtual carrier sensing for directional antennas in mobile ad hoc networks. In *ACM MobiHoc*, 2002.
- [WDK98] W.M. Moh, D. Yao, and K. Makki. Wireless LAN: Study of hidden terminal effect and multimedia support. In *Computer Communications and Networks*, 1998.
- [YH92] T. Yum and K. Hung. Design algorithms for multihop packet radio networks with multiple directional antennas. *IEEE Transactions on Communications*, 40(11), 1992.
- [YPK03] S. Yi, Y. Pei, and S. Kalyanaraman. On the capacity improvement of ad hoc wireless networks using directional antennas. In *MobiHoc*, 2003.
- [Zan90] J. Zander. Slotted ALOHA multihop packet radio networks with directional antennas. *Electronics Letters*, 26(25), 1990.
- [ZJH02] J. Deng Z. J. Haas. Dual busy tone multiple access (dbtma) –a multiple access control scheme for ad hoc networks. *IEEE/ACM Transactions on Communications*, 50(6), 2002.

Ορολογία

Access Point, AP	Σημείο Πρόσβασης, 3, 15
Acknowledgment, Ack	Επιβεβαίωση, 20
ad-hoc wireless networks	αδόμητα ασύρματα δίκτυα, 3
antenna array	κεραιοσειρά, 73
antenna gain	κέρδος κεραίας, 76
Arbitration Inter Frame Space Association	Ενδιάμεσο Διάστημα Διαιτησίας, 32
Association Procedure	Σύνδεση, 2
Association Request frame	Διαδικασία Σύνδεσης, 17
Association Response frame	πλαίσιο Αιτήματος Σύνδεσης, 18
Authentication	πλαίσιο Απάντησης Σύνδεσης, 18
	Πιστοποίηση, 19
Back-off algorithm	αλγόριθμος Υποχώρησης, 19, 22
Base Station, BS	Σταθμός Βάσης, 3
Basic Service Set, BSS	Σύνολο Βασικής Υπηρεσίας, 15
Beacon frame	πλαίσιο Χαιρετισμού, 17, 24
beam	δέσμη, 78
bridge	γέφυρα, 7
Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance, CSMA/CA	Πολλαπλή Πρόσβαση με Ανίχνευση Φέροντος και Αποφυγή Σύγκρουσης, 19
cell	κελί, 23
Clear Channel Assessment measurement, CCA	Μέτρησης Αποτίμησης της Καθαρότητας του Καναλιού, 43
Clear to Send, CLS	Καθαρό Μέσο για Μετάδοση, 20
collision detection	ανίχνευση σύγκρουσης, 20
contention	ανταγωνισμός, 9
Contention Free Period, CFP	Περίοδος Χωρίς Ανταγωνισμό, 24
Contention Period, CP	Περίοδος Ανταγωνισμού, 24

Contention Window, CW	Παράθυρο Ανταγωνισμού, 22
Data Link Layer, DLC	Επίπεδο Σύνδεσης, 8
Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS	Άμεση Ακολουθία Διευρυμένου Φάσματος, 14
directional antennas	κατευθυντικές κεραιές, 2, 73
Disassociation	Αποσύνδεση, 18
Distributed Coordination Function, DCF	Λειτουργία Κατανεμημένου Συντονισμού, 19
Distributed Inter Frame Space, DIFS	Κατανεμημένο Ενδιάμεσο Διάστημα, 19
Dynamic Frequency Allocation	Δυναμική Επιλογή Συχνότητας, 41
Enhanced Distributed Channel Access, EDCA	Ενισχυμένη Κατανεμημένη Πρόσβαση Καναλιού, 31
exposed terminal problem	το πρόβλημα του εκτεθειμένου κόμβου, 10
Extended Service Set, ESS	Εκτεταμένο Σύνολο Υπηρεσιών, 16
Four Way Handshake	Χειραψία Τεσσάρων Πακέτων, 21
Fragmentation	Κατακερματισμός, 22
Frequency Hopping, FH	Άλμα Συχνότητας, 14
hidden terminal problem	το πρόβλημα του κρυμμένου κόμβου, 9
Hybrid Coordination Function, HCF	Λειτουργία Υβριδικού Συντονισμού, 31
Hybrid Coordinator, HC	Υβριδικός Συντονιστής, 34
Independent BSS	Ανεξάρτητο Σύνολο Βασικής Υπηρεσίας, 16
Infrared Light, IR	Υπέρουθρη Ακτινοβολία, 14
infrastructure wireless networks	ασύρματα δίκτυα με υποδομή, 3
interference	παρεμβολή, 6
jitter	απόκλιση στους χρόνους παράδοσης των πακέτων, 28
link degradation	υποβάθμιση της ποιότητας του καναλιού, 115
Link Margin	Περιθώριο Σύνδεσης, 41
Logical Link Control Layer, LLC	Επίπεδο Ελέγχου Λογικής Σύνδεσης, 8

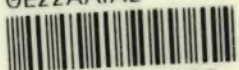
mobility	κινητικότητα, 6, 25
multipath transmission	μετάδοση πολλαπλών διαδρομών, 6
Multiple Access Control Layer, MAC	Επίπεδο Ελέγχου Πολλαπλής Πρόσβασης, 1
Network Allocation Vector, NAV	Διάγραμμα Δέσμευσης του Δικτύου, 21
omnidirectional antennas	ισοτροπικές κεραιές, 73
path loss	απώλεια του σήματος λόγω απόστασης, 41
Physical Layer, PHY	Φυσικό Επίπεδο, 8
Point Coordination Function PCF	Λειτουργία Κεντροκοποιημένου Συντονισμού, 23
Point Coordinator, PC	Κεντροκοποιημένος Συντονιστής, 34
Point Inter Frame Space, PIFS	Κεντροκοποιημένο Ενδιάμεσο Διάστημα, 23
polling	κάλεσμα προς μετάδοση, 29
Portal, PT	Πύλη, 15
Power Saving	Εξοικονόμηση Ενέργειας, 25
Probe frame	πλαίσιο Διερεύνησης, 17
Probe Response frame	πλαίσιο Απάντησης Διερεύνησης, 18
Quality of Service, QoS	Ποιότητα Υπηρεσίας, 2
Reassociation	Επανασύνδεση, 18
Received Signal Strength Report Indication, measurement, RSSRI	Μέτρηση Αναφοράς Ένδειξης Ισχύος Λαμβανόμενου Σήματος, 43
Request to Send, RTS	Αίτηση για Μετάδοση, 12, 20
selection diversity	ποικιλία επιλογής, 79
Signal to Interference Ratio, SINR	Λόγος Σήματος προς Παρεμβολή, 117
slot	θυρίδα, 8
Small Inter Frame, SIFS	Μικρό Ενδιάμεσο Διάστημα, 22
Station, ST	Σταθμός, 15
threshold	κατώφλι, 21
throughput	ρυθμαπόδοση, 9, 12
Traffic Categories, TC	Κατηγορίες Κίνησης, 30
Traffic Specification, TSPEC	Καθορισμός Κίνησης, 31



Traffic Streams, TS	Ροές Κίνησης, 30
Transmission Power Control, TPC	Έλεγχος Ισχύος Μετάδοσης, 37
Transmit Opportunity, TXOP	Ευκαιρία Μετάδοσης, 32
Virtual Carrier Sense	Εικονική Ανίχνευση Καναλιού, 20
Wireless Local Area Networks, WLANs	Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα, 3



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000085906