ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Η/Υ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΩΝ

Διπλωματική Εργασία

« Σχεδιασμός και μελέτη απόδοσης μηχανισμού για την ενοποιημένη μετάδοση πληροφορίας τηλεδιάσκεψης MPEG και δεδομένων, σε ασύρματα τοπικά δίκτυα IEEE 802.11 »

Μπρούστης Ιωάννης
Α.Μ.: 9830462
broustis@telecom.tuc.gr

Εξεταστική επιτροπή:
καθ. Πατεράκης Μιχάλης *(επιβλέπων)*
καθ. Διγαλάκης Βασίλης
καθ. Σιδηρόπουλος Νίκος

Χανιά, Ιούνιος 2003

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω, πάνω από όλα, τους γονείς μου και την οικογένειά μου για την καθημερινή τους συμπαράσταση και βοήθεια, τόσο κατά τη διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας όσο και καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Παράλληλα, αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή αυτής της εργασίας, κ. Μιχάλη Πατεράκη, όχι μόνο για τη δυνατότητα που μου προσέφερε να αποκτήσω πολύτιμες γνώσεις και τεχνογνωσία στο ερευνητικό του πεδίο, αλλά και για την αμέριστη βοήθειά του στην διπλωματική μου εργασία. Ευχαριστώ επίσης τον κ. Πολυχρόνη Κουτσάκη και τον κ. Νίκο Καλογερίνη, που με την βοήθειά τους συνέβαλλαν στο σχεδιασμό του συστήματος.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους και συνεργάτες μου – προπτυχιακούς και μεταπτυχιακούς φοιτητές – του Εργαστηρίου Πληροφορίας και Δικτύων, για τις συμβουλές τους και για την στήριξη που μου παρείχαν κατά τη διάρκεια αυτής της διπλωματικής εργασίας και κατά τη διάρκεια της παρουσίασης.

Με εκτίμηση

Στους Γονείς μου.

Ιωάννης Δ. Μπρούστης

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Ένας ταχέως αναπτυσσόμενος κλάδος των τηλεπικοινωνιών, την τελευταία δεκαετία, είναι τα ασύρματα δίκτυα (*Wireless Networks*), γιατί παρέχουν στους χρήστες τους τη δυνατότητα να μετακινούνται και παράλληλα να έχουν πρόσβαση στο διαδίκτυο και σε τοπικά δίκτυα. Εκτός αυτού, παρόλο που όλο και περισσότεροι σχεδιαστές νέων κτηρίων που κατασκευάζονται συμπεριλαμβάνουν στα σχέδια τους τη δικτύωση των κτηρίων αυτών με δομημένη καλωδίωση, ένοικοι παλαιότερων κτισμάτων δεν έχουν τη δυνατότητα αυτή, οπότε είναι πολύ πιο βολική και γρήγορη η εγκατάσταση ενός ασύρματου δικτύου επικοινωνίας, παρά η εκ των υστέρων καλωδίωση των κτηρίων. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν κτήρια χτισμένα εξολοκλήρου από τσιμέντο, και ιστορικά μνημεία. Εξάλλου σε πολλές περιπτώσεις απαιτείται η ύπαρξη ενός προσωρινού δικτύου, το οποίο θα καλύψει ανάγκες χρηστών για μερικές μόνο μέρες ή εβδομάδες, οπότε η μόνιμη καλωδίωση είναι περιττό έξοδο. Τέτοια παραδείγματα αποτελούν οι τηλεδιασκέψεις, σε ανοιχτούς κυρίως χώρους, η τηλεκπαίδευση και ασύρματες λύσεις για στρατιωτικές επιχειρήσεις. Στην εργασία αυτή παραθέτουμε πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, παρατηρήσεις και σενάρια κίνησης για ασύρματα δίκτυα, κυρίως για αυτά που βασίζονται στο πρωτόκολλο IEEE 802.11 και στις διάφορες εκδόσεις του. Ειδικότερα, το κεφάλαιο 1 παραθέτει μια σύντομη εισαγωγή στο θέμα με το οποίο ασχολείται η διπλωματική εργασία, δηλαδή την ενοποιημένη μετάδοση πληροφορίας από τηλεδιάσκεψη και δεδομένα υπολογιστών σε ασύρματα τοπικά δίκτυα 802.11, αναφέροντας τα βασικά σημεία στα οποία εστιάσθηκε η μελέτη της συμπεριφοράς ενός τέτοιου συστήματος. Στο κεφάλαιο 2 περιγράφουμε τις βασικές αρχές που διέπουν τα ασύρματα δίκτυα και τις εφαρμογές πολυμέσων πάνω από δίκτυα, κάνοντας παράλληλα και μια σύντομη ιστορική αναδρομή για να κατανοήσουμε σε τι στάδιο έχουν φτάσει σήμερα οι παραπάνω τεχνολογίες. Στη συνέχεια, στο 3^o κεφάλαιο, αναλύουμε εκτενώς τη λειτουργία του πρωτοκόλλου 802.11 και των εκδόσεών του, τόσο στο φυσικό επίπεδο (Physical Layer), όσο και στο επίπεδο ζεύξης δεδομένων (MAC – Media Access Control Layer). Η παραπάνω αυτή ανάλυση είναι αναγκαία, ώστε να μπορούμε να αναλύσουμε τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων διαφόρων σεναρίων κίνησης του δικτύου, τα οποία παρατίθενται στο 4^o κεφάλαιο. Τέλος, στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζουμε τα προβλήματα που αντιμετωπίζει το 802.11 βάσει των συμπερασμάτων που έχουμε εξάγει, και παραθέτουμε μερικές ιδέες για επεκτάσεις του πρωτοκόλλου που μπορούν να οδηγήσουν σε βελτίωση της απόδοσης του δικτύου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

Η ραγδαία εξέλιξη των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων και δικτύων, ιδίως τα τελευταία χρόνια, σε συνδυασμό με τη συνεχή εξάπλωση των εφαρμογών πολυμέσων (multimedia), καθιστά αναγκαία την έρευνα για επινόηση και σχεδιασμό αποδοτικών μηχανισμών μετάδοσης των τελευταίων μέσα από σύγχρονα δίκτυα. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι περιπτώσεις, κατά τις οποίες είναι επιθυμητή η μετάδοση πληροφορίας πάνω από ασύρματα δίκτυα, δεδομένου ότι είναι φανερή η ανάγκη για σταδιακή απαλλαγή από τα χιλιόμετρα καλωδίων που συνδέουν τους ηλεκτρονικούς υπολογιστές σε χώρους εργασίας κι εκπαίδευσης, σε συνδυασμό με την ευρεία διάδοση ασύρματων φορητών συσκευών, όπως PDAs, laptops, κτλ.

Μια από τις εφαρμογές πολυμέσων (multimedia applications) που χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο είναι η τηλεδιάσκεψη (Teleconference, ή Videoconference). Η εφαρμογή αυτή επιτρέπει σε μια ομάδα ατόμων να μπορούν να συνδιαλέγονται από μακριά, έχοντας ταυτόχρονη εικόνα και ήχο, ο ένας του άλλου. Κάθε χρήστης διαθέτει μια κάμερα και ένα (ενσωματωμένο ή όχι) μικρόφωνο, τα οποία έχει συνδέσει σε έναν υπολογιστή – κόμβο ενός δικτύου. Με τη βοήθεια του εξοπλισμού αυτού, μπορεί να στέλνει συνεχώς την εικόνα και τον ήχο του στους συνδιαλεγόμενους του και με τον τρόπο αυτό να καθίσταται δυνατή μια σύσκεψη ή συνεδρίαση, χωρίς να είναι αναγκαία η συνάθροιση όλων των συνδιαλεγόμενων σε κοινό χώρο. Παράλληλα με εικόνα και ήχο, οι συνδιαλεγόμενοι μπορούν να στέλνουν και δεδομένα μεταξύ τους, καθώς ο εξοπλισμός που διαθέτουν (συνήθως ένας φορητός υπολογιστής) τους δίνει αυτή τη δυνατότητα. Σε αυτή την διπλωματική εργασία σχεδιάζονται και μελετούνται ως προς την απόδοση τους διάφοροι τρόποι, με τους οποίους μπορεί να εγκαθιδρυθεί μια εφαρμογή τηλεδιάσκεψης πάνω από ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο (WLAN), που λειτουργεί με βάση το πρωτόκολλο IEEE 802.11b [1].

Το IEEE 802.11b WLAN είναι ένα από τα ευρέως διαδεδομένα πρωτόκολλα ασύρματων τοπικών δικτύων. Ο ρόλος του είναι να παρέχει ασύρματη διασύνδεση μεταξύ ασύρματων σταθμών, που απαιτούν γρήγορη επικοινωνία και οι οποίοι, είτε κινούνται τοπικά, είτε μένουν ακίνητοι σε σταθερό σημείο. Η διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στα παρακάτω σημεία του πρωτοκόλλου:

- Περιγράφει τους διαφορετικούς τρόπους υλοποίησης και τις διαφορετικές τεχνικές σηματοδοσίας του φυσικού επιπέδου,
- Καθορίζει λεπτομερώς τη λειτουργία των διαφόρων συναρτήσεων που υποστηρίζονται από το επίπεδο ζεύξης δεδομένων (MAC Layer), και
- Εξετάζει έναν αριθμό από διαφορετικά σενάρια για την υποστήριξη εφαρμογής τηλεδιάσκεψης και ταυτόχρονης μετάδοσης δεδομένων μεταξύ χρηστών που είναι συνδεδεμένοι στο ασύρματο τοπικό δίκτυο, μελετώντας την απόδοση του πρωτοκόλλου για καθένα από αυτά.

Για τις ανάγκες της ερευνητικής διαδικασίας απαιτήθηκε η υλοποίηση ενός προσομοιωτή του επιπέδου ζεύξης δεδομένων (MAC), του ασύρματου τοπικού δικτύου. Στον προσομοιωτή αυτό περιλαμβάνονται όλα τα βασικά χαρακτηριστικά λειτουργίας του επιπέδου αυτού, αλλά και ορισμένα δευτερεύοντα, ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή προσέγγιση της λειτουργίας του πρωτοκόλλου. Λόγω της υπερβολικά μεγάλης πολυπλοκότητας και των πολλών μεταβλητών που εμπλέκονται, δεν ήταν δυνατή η υλοποίηση ενός προσομοιωτή ο οποίος να αναπαράγει επακριβώς τη λειτουργία του MAC επιπέδου. Ωστόσο, ο προσομοιωτής που υλοποιήθηκε μπορεί να δώσει αρκετά ρεαλιστικά αποτελέσματα, από τα οποία εξάγονται σημαντικά συμπεράσματα. Οι παραδοχές, που έχουν γίνει, αναφέρονται λεπτομερώς στα επόμενα κεφάλαια.

Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι, όπως και σε αρκετές αντίστοιχες μελέτες στη βιβλιογραφία [3, 5, 6], θεωρήσαμε ιδανικό κανάλι μετάδοσης (χωρίς θόρυβο). Στην υλοποίηση και το τρέξιμο (runs), τα οποία έγιναν σε περιβάλλον UNIX *(Linux Mandrake 8.2)*, χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα προγραμματισμού C++ *(με compiler g++)*. Ο υπολογιστής που χρησιμοποιήθηκε ήταν ένας Intel Pentium 4, επεξεργαστικής ισχύος 1,7 GHz, με μνήμη των 256 Mbytes.

Από τις προσομοιώσεις προέκυψε ένα πλήθος αποτελεσμάτων, τα οποία δείχνουν το κατά πόσο μπορεί να υποστηριχθεί ένα σενάριο τηλεδιάσκεψης με παράλληλη μετάδοση δεδομένων, κάνοντας χρήση του πρωτοκόλλου 802.11b, ή και άλλων νεότερων εκδόσεων του πρωτοκόλλου. Μερικά αποτελέσματα είναι ενθαρρυντικά, ενώ άλλα όχι, κι αυτό οφείλεται τόσο στο σενάριο τηλεδιάσκεψης που μελετάται κάθε φορά και στο οποίο προσδιορίζονται διάφορες παράμετροι λειτουργίας (όπως ο τρόπος επικοινωνίας μεταξύ των σταθμών, το πλήθος των κόμβων, το είδος και ο όγκος της κίνησης κ.ά.), όσο κυρίως στη φύση του ίδιου του πρωτοκόλλου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Ασύρματα Δίκτυα και Πολυμέσα

2.1 Γενικά για τα ασύρματα δίκτυα

Ένα ασύρματο δίκτυο παρέχει τη δυνατότητα στους διασυνδεδεμένους χρήστες του να επικοινωνούν μεταξύ τους, στέλνοντας δεδομένα σε μορφή πακέτων, χωρίς την ύπαρξη καλωδίων που να συνδέουν τις συσκευές τους:

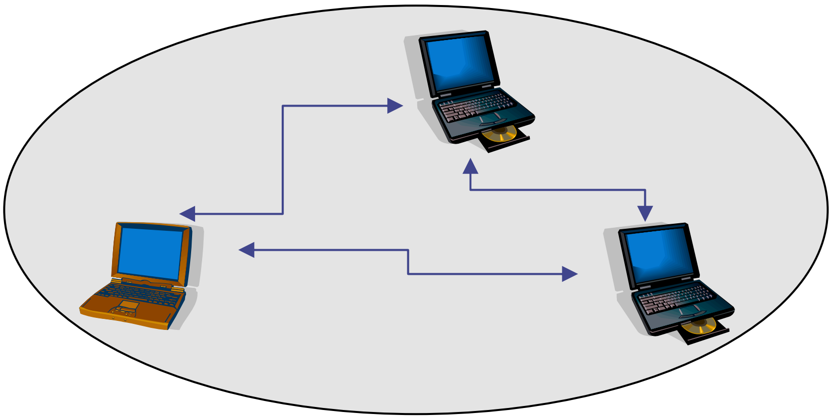
Ασύρματο κανάλι

Σχήμα 2.1.1

Μπορούμε να κατηγοριοποιήσουμε τα ασύρματα δίκτυα με βάση το εύρος της γεωγραφικής έκτασης που καλύπτουν. Τα πιο εκτεταμένα ασύρματα δίκτυα (WANs – Wide Area Networks) μπορούν να εκτείνονται σε μια ολόκληρη χώρα. Εκτός από τα μητροπολιτικά δίκτυα (MANs – Metropolitan Area Networks), τα πλέον ευρέως διαδεδομένα ασύρματα δίκτυα είναι τοπικά (WLANs – Wireless Local Area Networks). Τα WLANs επικεντρώνονται σε μια μικρή γεωγραφική περιοχή, όπως για παράδειγμα ένα κτίριο, ένα αεροδρόμιο ή ένα τμήμα ενός πανεπιστημιακού ιδρύματος. Όταν ένας κινητός χρήστης επιθυμεί να συνδεθεί στο Internet ή σε οποιοδήποτε άλλο δίκτυο, από ένα τέτοιο χώρο, τότε η πρόσβαση γίνεται σχεδόν πάντα μέσω ενός τέτοιου ασύρματου τοπικού δικτύου. Για αυτό το είδος πρόσβασης, ο host του χρήστη είναι ένας κόμβος του δικτύου, και το τοπικό δίκτυο παρέχει πρόσβαση στο Internet μέσω ενός δρομολογητή. Στην περίπτωση αυτή, το WLAN υποστηρίζει τη σύνδεση μεταξύ του ασύρματου χρήστη και του δρομολογητή. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται ένα πρωτόκολλο ζεύξης δεδομένων (data link layer protocol), μέρος του οποίου είναι ένα πρωτόκολλο πολλαπλής πρόσβασης (multiple media access).

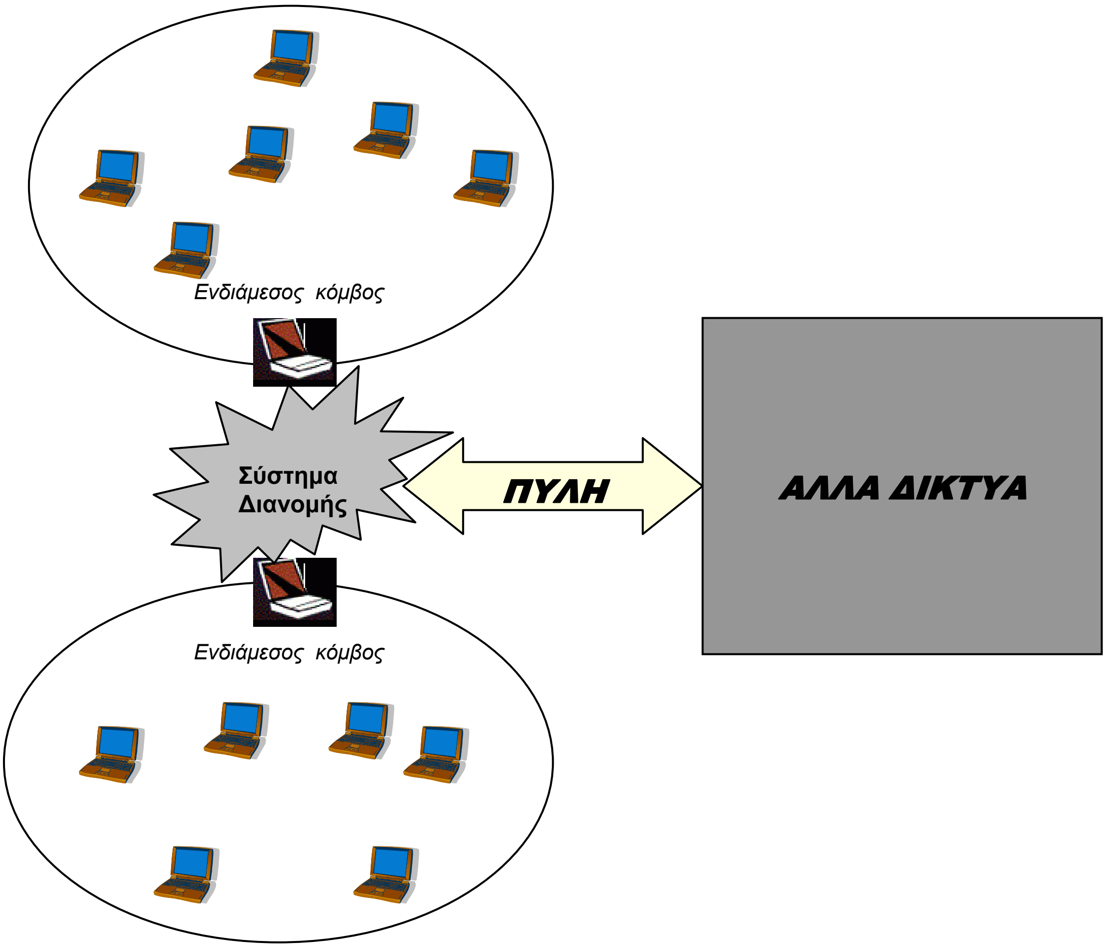
Οι χρήστες που είναι συνδεδεμένοι στο ασύρματο τοπικό δίκτυο στέλνουν πακέτα ο ένας στον άλλο, μέσω ενός κοινού ασύρματου καναλιού. Όταν ένας από τους κόμβους μεταδίδει ένα πακέτο, αυτό «βγαίνει στον αέρα», οπότε καθένας από τους υπόλοιπους κινητούς σταθμούς μπορεί να το παραλάβει. Ωστόσο, συνήθως όταν ένας χρήστης στέλνει ένα πακέτο, επιθυμεί την παραλαβή του μόνο από έναν άλλο χρήστη και όχι από πολλούς. Προκειμένου να παρέχεται η δυνατότητα αποστολής σε συγκεκριμένο παραλήπτη, οι κόμβοι του ασύρματου δικτύου πρέπει να είναι σε θέση να γνωρίζουν τις διευθύνσεις (addresses) των αποδεκτών των πακέτων που στέλνουν. Είναι συνεπώς απαραίτητη η αντιστοίχιση WLAN διευθύνσεων στους κόμβους, ενώ επίσης πρέπει τα πακέτα ενός πομπού να περιέχουν τη WLAN διεύθυνση του αποστολέα (destination address) στην επικεφαλίδα τους. Με τον τρόπο αυτό, ένας σταθμός μπορεί να καταλάβει αν ένα πακέτο που έλαβε προορίζεται γι' αυτόν, ή για κάποιον άλλο κόμβο του δικτύου. Έτσι, αν η διεύθυνση αποστολής ταιριάζει με αυτή του σταθμού, τότε ο κόμβος διαχωρίζει τα δεδομένα από την επικεφαλίδα και τα προωθεί από το επίπεδο ζεύξης προς στο επίπεδο δικτύου. Διαφορετικά, απλώς απορρίπτει το πακέτο.

Οι πιο διαδεδομένες τοπολογίες ασύρματων δικτύων είναι δύο: Η τοπολογία “Ad-Hoc” και η τοπολογία “Infrastructure” [3]. Όταν οι σταθμοί έχουν συνδεθεί σε ένα ad-hoc δίκτυο, τότε μπορούν να επικοινωνούν απευθείας μεταξύ τους, εφόσον έχουν αποκτήσει πρόσβαση στο κανάλι. Αυτό σημαίνει ότι, όταν ένας χρήστης επιθυμεί να στείλει δεδομένα σε κάποιον άλλο, τότε πρέπει να συναγωνιστεί προκειμένου να αποκτήσει αποκλειστική πρόσβαση στον ασύρματο δίαυλο. Κι αυτό, γιατί αν προσπαθήσουν να μεταδώσουν δύο ή περισσότεροι σταθμοί την ίδια χρονική στιγμή, τότε τα πακέτα τους συγκρούονται οπότε κανένα δεν καταλήγει σωστά στον προορισμό του. Μάλιστα, ο αλγόριθμος που ακολουθείται προκειμένου να αποφασιστεί για το ποιος τελικά θα μεταδώσει, μπορεί να διαφέρει από δίκτυο σε δίκτυο. Αφού λοιπόν ένας χρήστης κυριαρχήσει στο κανάλι, τότε έχει τη δυνατότητα να μεταδώσει πληροφορία προς κάποιον άλλο χρήστη συνδεδεμένο στο ίδιο ad-hoc δίκτυο. Η μετάδοση εκτελείται απευθείας, δηλαδή από την κεραία του πομπού στην κεραία του δέκτη. Πρέπει εδώ να τονιστεί ότι στη συγκεκριμένη τοπολογία συμμετέχουν σταθμοί οι οποίοι βρίσκονται σε αρκετά κοντινές αποστάσεις μεταξύ τους:



Σχήμα 2.1.2: *Ad-Hoc Network*

Η τοπολογία Infrastructure επεκτείνει την Ad-Hoc έξω από τα στενά όρια μιας «κυψέλης», με τη χρήση ενδιάμεσων ασύρματων κόμβων που αντιστοιχούν στα σημεία ενοποίησης, τα οποία είναι απαραίτητα για τη διασύνδεση διαφορετικών δικτύων:



Σχήμα 2.1.3: *Infrastructure Network*

Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται μια επικοινωνία μεταξύ χρηστών οι οποίοι μπορεί να έχουν συνδεθεί ακόμα και σε διαφορετικού είδους δίκτυα. Όταν ένας σταθμός θέλει να στείλει ένα πακέτο, τότε, αν αυτό προορίζεται για χρήστη που βρίσκεται στην ίδια κυψέλη, ο σταθμός μπορεί να στείλει το πακέτο κατευθείαν σε αυτόν. Αν ο αποδέκτης βρίσκεται εκτός κυψέλης, ή σε άλλο δίκτυο, τότε ο πομπός στέλνει το πακέτο του στον ενδιάμεσο κόμβο, ο οποίος αναλαμβάνει πλέον να το προωθήσει στον προορισμό του.

Για οποιαδήποτε από τις δύο παραπάνω διαφορετικές τοπολογίες, είναι απαραίτητη η ύπαρξη κάποιου πρωτοκόλλου στο επίπεδο ζεύξης δεδομένων, το οποίο να προσδιορίζει το πότε μπορεί να μεταδώσει ο κάθε σταθμός. Διαφορετικά, όταν παραπάνω από ένας ασύρματοι σταθμοί θέλουν να αποκτήσουν ταυτόχρονη πρόσβαση στο δίκτυο, έχουμε συνεχώς συγκρούσεις πακέτων, οπότε τελικά κανείς δε θα μπορεί να μεταδώσει επιτυχώς.

2.2 Γενικά για τα πολυμέσα και το video

2.2.1 Δικτυακές εφαρμογές πολυμέσων (Multimedia Applications)

Εδώ και μερικά χρόνια παρατηρείται μια εκρηκτική άνθηση δικτυακών εφαρμογών που σαν στόχο έχουν την αποστολή και λήψη video και ήχου, κυρίως στο Internet. Στις εφαρμογές αυτές περιλαμβάνονται η IP τηλεφωνία, η μετάδοση προεγγεγραμμένου ή πραγματικού χρόνου video, η τηλεδιάσκεψη, η Internet ραδιοφωνία, η τηλεκπαίδευση, τα δικτυακά παιχνίδια και πολλές άλλες.

Προκειμένου να έχουμε μια πλήρη εικόνα για το είδος των εφαρμογών πολυμέσων που μπορούν να τρέχουν πάνω από ασύρματα δίκτυα υπολογιστών, μπορούμε να διαχωρίσουμε τις εφαρμογές αυτές σε τρεις κλάσεις: Ροή αποθηκευμένου video και ήχου, ροή video και ήχου σε πραγματικό χρόνο, και αλληλεπιδραστική (*interactive*) ροή video και ήχου σε πραγματικό χρόνο. Ακολουθεί μια σύντομη ανάλυση κάθε κλάσης [4]:

- Όταν αναφερόμαστε σε προεγγεγραμμένα πολυμέσα εννοούμε ένα συγκεκριμένο μέγεθος video, ήχου ή γραφικών, ή και όλων αυτών, τα οποία έχουν ήδη παραχθεί κι αποθηκευτεί σε κάποιον συνδεδεμένο στο δίκτυο εξυπηρετητή. Όταν ένας χρήστης ζητά τέτοιου είδους πολυμέσα, τότε, αφού εγκαθιδρυθεί η σύνδεση με το μηχάνημα όπου έχουν αποθηκευτεί, μπορεί να παραλαμβάνει τμήματα του υλικού. Επιπλέον, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να δίνει εντολές όπως Play, Pause, Rewind ή Fast-Forward. Εκτός των άλλων, η αναπαραγωγή των πολυμέσων μπορεί να ξεκινήσει λίγο μετά την παραλαβή κάποιων αρχικών bytes του αρχείου, κι έτσι, όσο ο χρήστης συνεχίζει την αναπαραγωγή, παραλαμβάνει παράλληλα μεταγενέστερα bytes του ίδιου αρχείου (τεχνική *Streaming*).

- Η ροή ήχου και video σε πραγματικό χρόνο επιτρέπει στους χρήστες να λαμβάνουν π.χ. μια ζωντανή ραδιοφωνική ή τηλεοπτική εκπομπή, σε απευθείας μετάδοση, από οποιοδήποτε σημείο του κόσμου. Λόγω του πραγματικού χρόνου παραγωγής – μετάδοσης των πολυμέσων, ο χρήστης δε μπορεί τώρα να δίνει εντολές, όπως Fast-Forward, ωστόσο η μερική αποθήκευση στο μηχάνημά του, του δίνει τη δυνατότητα για Rewind, ή Pause.

- Η αλληλεπιδραστική ροή video και ήχου σε πραγματικό χρόνο επιτρέπει στους χρήστες να επικοινωνούν μεταξύ τους (σε πραγματικό χρόνο). Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι η Internet τηλεφωνία και η τηλεδιάσκεψη (*videoconference*).

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό γνώρισμα των πολυμέσων είναι η συμπίεση που μπορούν να υποστούν. Χωρίς συμπίεση τα πολυμέσα σπαταλούν ένα πολύ μεγάλο ποσοστό αποθηκευτικού χώρου κι εύρους ζώνης του δικτύου επικοινωνίας (bandwidth). Αφαιρώντας πλεονασμούς στο ψηφιοποιημένο (digitized) video και audio που πρέπει να αποθηκευτεί και να μεταδοθεί, μπορούμε πλέον να μειώνουμε αισθητά την ανάγκη για αποθηκευτικό χώρο και εύρος ζώνης δικτύου. Υπάρχουν αρκετοί αλγόριθμοι συμπίεσης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι η συμπίεση αναγκαστικά δρα αρνητικά στην ποιότητα. Έτσι, μετά τη συμπίεση η ποιότητα του video ή του ήχου είναι μειωμένη. Ένας καλός αλγόριθμος συμπίεσης πρέπει να οδηγεί σε όσο το δυνατόν λιγότερες απώλειες στην ποιότητα αναπαραγωγής, ενώ παράλληλα επιτυγχάνει σημαντική εξοικονόμηση αποθηκευτικού χώρου μετά τη συμπίεση. Ένας από τους σύγχρονους τέτοιους αλγορίθμους είναι ο MPEG-4 [25] .

Ο αλγόριθμος MPEG-4 κατορθώνει να εξοικονομεί αρκετό αποθηκευτικό χώρο, χωρίς να μειώνει αισθητά την ποιότητα αναπαραγωγής. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι συμπίεση σε πρότυπο video DVD (*Digital Versatile Disc*), το οποίο είναι κωδικοποιημένο σύμφωνα με τον αλγόριθμο MPEG-2 [27] και το οποίο αποτελεί το πρότυπο με την αισθητά καλύτερη ποιότητα video και ήχου στις μέρες μας. Μια ταινία DVD διάρκειας 2 ωρών καταλαμβάνει αποθηκευτικό χώρο περί τα 7,5 - 8 Gigabytes. Αν χρησιμοποιηθεί ο αλγόριθμος MPEG-4, τότε η ίδια ταινία καταλαμβάνει χώρο περίπου 2,5 Gigabytes, δηλαδή εξοικονομεί τα 2/3 του αποθηκευτικού χώρου. Η μείωση στην ποιότητα έγκειται στο γεγονός ότι έχει μειωθεί ο αριθμός των pixels του παραθύρου (αν και ο αριθμός των video frames (*frames per second*) έχει διατηρηθεί σταθερός στα 25) και στο ότι ο ήχος έχει τώρα συμπιεστεί σε mp3 (*MPEG-1 Layer 3*). Κατά συνέπεια, η νέα συμπιεσμένη έκδοση του video μπορεί να μεταδοθεί σε αρκετά μικρότερο χρόνο, ενώ πολλές φορές (εφόσον διαθέτουμε ένα γρήγορο κανάλι) επιτρέπεται η on-line μετάδοσή του, χωρίς ο χρήστης να αναγκάζεται να παραλάβει πρώτα μέρος του αρχείου ή και ολόκληρο το αρχείο video.

2.2.2 Μετάδοση πολυμέσων

Η ιδιαιτερότητα των εφαρμογών πολυμέσων, σε σχέση με τις πιο καθιερωμένες εφαρμογές που είναι ευρέως διαδεδομένες στο διαδίκτυο (FTP, e-mail κτλ.), έγκειται στο ότι είναι ευαίσθητες σε χρονικές καθυστερήσεις, αν και ανεκτικές σε μικρές απώλειες πακέτων. Ως άμεση συνέπεια, ασύρματα δίκτυα που έχουν κατασκευαστεί για μεταφορά δεδομένων και τα οποία παρέχουν αξιοπιστία και ασφάλεια, ενδέχεται να μην είναι κατάλληλα για μετάδοση πολυμέσων, λόγω των σημαντικών καθυστερήσεων που εισάγονται στις μεταδόσεις. Η ευαισθησία σε χρονικές καθυστερήσεις είναι αυτή που καθιστά προβληματική την μετάδοση εφαρμογών πολυμέσων σε ορισμένα ασύρματα μέσα, καθώς, όταν η καθυστέρηση που υφίστανται τα πακέτα στο σύστημα υπερβεί κάποια χιλιοστά του δευτερολέπτου, τα πακέτα αυτά θεωρούνται παλιά και για το λόγο αυτό *απορρίπτονται* από το σύστημα και δεν επαναμεταδίδονται, δεδομένου ότι η αναπαραγωγή της εφαρμογής στο δέκτη δεν μπορεί να περιμένει περισσότερο αυτά τα πακέτα.

Ο λόγος για τον οποίο έχουμε ευαισθησία σε χρονικές καθυστερήσεις οφείλεται αποκλειστικά στον ανθρώπινο παράγοντα. Το video, όπως ξέρουμε, είναι μια ακολουθία εικόνων – video frames, οι οποίες τυπικά απεικονίζονται με ένα σταθερό ρυθμό, από 24 μέχρι 30 εικόνες ανά δευτερόλεπτο. Το ανθρώπινο μάτι δε μπορεί να αντιληφθεί την εναλλαγή στις εικόνες αυτές, εφόσον δύο διαδοχικές εναλλαγές συμβαίνουν σε χρονικό διάστημα μικρότερο από 1/25 του δευτερολέπτου, δηλαδή 40 msec. Η αδυναμία αυτή του ματιού δίνει στον ανθρώπινο εγκέφαλο την ψευδαίσθηση της συνεχούς ροής. Αν κάποιο frame αργήσει να μεταδοθεί τόσο, ώστε η καθυστέρηση να υπερβεί τα 40 msec, τότε το ανθρώπινο μάτι αντιλαμβάνεται την εναλλαγή. Αν αυτό συμβαίνει συχνά, τότε καθίσταται ενοχλητικό, καθώς παρατηρούνται τμήματα του video, όπου «λείπει» ένα μικρό μέρος από αυτό που θα έπρεπε να έχει προβληθεί (*glitch - discontinuity*). Το τμήμα που λείπει είναι αυτό που έχει απορριφθεί από την εφαρμογή ως παλιό, και μπορεί να αποτελείται από ένα ή και περισσότερα video frames. Όσο περισσότερα video frames απορρίπτονται, τόσο το φαινόμενο αυτό γίνεται εντονότερο.

Από την άλλη μεριά, οι εφαρμογές πολυμέσων είναι ανεκτικές σε απώλειες πακέτων, κι ανάλογα με το πόσο αυστηρές είναι οι απαιτήσεις σχετικά με το μέγιστο ποσοστό πακέτων πληροφορίας που μπορούν να χαθούν, καθορίζεται η απαιτούμενη βαθμίδα ποιότητας υπηρεσίας (QoS - *Quality of Service*) για τις μεταδόσεις. Αν οι απώλειες αυτές δεν συμβαίνουν συχνά, τα «κενά» που δημιουργούνται μπορούν πολλές φορές να καλυφθούν (ολικά ή μερικά) με διάφορες τεχνικές [4].

2.3 Ιστορική αναδρομή – Τι συμβαίνει σήμερα

2.3.1 Η ιστορία των ασύρματων δικτύων δεδομένων

Αν και κάποιες προσπάθειες είχαν ξεκινήσει από πολύ παλιότερα, οι οποίες κατέληξαν σε πολύ αργά ασύρματα δίκτυα με λίγες δυνατότητες και αρκετές ασυμβατότητες, τα ασύρματα δίκτυα μεταφοράς δεδομένων άρχισαν να εμφανίζονται σε μεγάλη έκταση, μέσα στην τελευταία δεκαετία και κυρίως μετά το 1997. Η σημαντική εξάπλωση τους οφείλεται κυρίως στο γεγονός της ταυτόχρονης ανάπτυξης των δικτύων κινητής τηλεφωνίας, οπότε ξεκίνησε μια παράλληλη έρευνα για το σχεδιασμό και την υλοποίηση αποδοτικών πρωτοκόλλων μετάδοσης δεδομένων, τα οποία μέχρι τότε ουσιαστικά διακινούνταν αποκλειστικά μέσα από τα ήδη διαδεδομένα ενσύρματα δίκτυα.

Εκτός από τη ραγδαία ανάπτυξη της κινητής τηλεφωνίας, αποφασιστικό ρόλο διαδραμάτισε επίσης και η παράλληλη εξάπλωση του διαδικτύου με εκρηκτικούς ρυθμούς τα τελευταία χρόνια. Έτσι, έγινε επιτακτική η ανάγκη πρόσβασης στο Internet, από σημεία όπου η ύπαρξη καλωδίωσης είναι ανέφικτη, όπως για παράδειγμα μέσα σε οχήματα, σε ανοιχτούς και δημόσιους χώρους (αεροδρόμια, νοσοκομεία, πάρκα), κτλ. Ως αποτέλεσμα της προαναφερθείσας εκρηκτικής προσπάθειας, σχεδιάστηκαν πρωτόκολλα που παρέχουν – άλλα λιγότερο κι άλλα περισσότερο – ταχύτητα, αξιοπιστία κι ασφάλεια στις μεταδόσεις δεδομένων πάνω από ασύρματα τοπικά δίκτυα.

Από τα πρωτόκολλα που είναι σήμερα διαθέσιμα, αυτό που τελικά έχει κυριαρχήσει είναι το IEEE 802.11 και οι διάφορες εκδόσεις του [1, 2, 7, 8]. Το συγκεκριμένο πρωτόκολλο πρωτοεμφανίστηκε το 1997, κι από τότε άρχισαν έντονες και σημαντικές ερευνητικές προσπάθειες για νέες βελτιωμένες εκδόσεις του, οι οποίες υπόσχονται μεγαλύτερες ταχύτητες μετάδοσης και περισσότερη ασφάλεια στις μεταδόσεις.

Ωστόσο, όσο περνάει ο καιρός, οι ανάγκες των χρηστών για ακόμα μεγαλύτερες ταχύτητες κι αξιοπιστία αυξάνονται. Πλέον, εκτός από μικρά αρχεία, οι χρήστες επιθυμούν να έχουν ανά πάσα στιγμή τη δυνατότητα να διακινούν νέου είδους (για τον κόσμο των ασύρματων δικτύων) δεδομένα, όπως video υψηλής ποιότητας, φωνή και γραφικά υψηλής ανάλυσης ακόμη και σε πραγματικό χρόνο, τα οποία, όχι μόνο χαρακτηρίζονται από αρκετά μεγάλο όγκο δεδομένων, αλλά είναι και ιδιαίτερα ευαίσθητα σε χρονικές καθυστερήσεις κι απώλειες πακέτων. Ένα νέο πρωτόκολλο που βρίσκεται σήμερα υπό έρευνα είναι το 802.15 [22], το οποίο, εκτός από υψηλές ταχύτητες μετάδοσης κι αξιοπιστία, θα είναι συμβατό με διάφορες άλλες τεχνικές που υποστηρίζουν τη μετάδοση δεδομένων, όπως το GPRS (*General Packet Radio Service*) [20], IR (*Infrared*) [17, 18, 20] και Bluetooth [15, 20, 21]. Τέλος, δεν πρέπει να ξεχνάμε τα θετικά αποτελέσματα από τις έρευνες που έχουν γίνει για νέα πρότυπα ασύρματων δικτύων κινητών χρηστών ευρείας γεωγραφικής κάλυψης, όπως το UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*), το οποίο θα αντικαταστήσει σταδιακά το GSM από τα μέσα του 2006 και για το οποίο ήδη μελετάται η συνεργασία του με το TCP/IP, και το HIPERLAN (*High Performance Radio Local Area Network*) [16]. Το τελευταίο αποτελεί μια άλλη προσπάθεια για ασύρματα τοπικά δίκτυα υψηλών επιδόσεων, που ξεκίνησε στην Ευρώπη. Ωστόσο, το IEEE 802.11 έχει υπερισχύσει παγκοσμίως.

2.3.2 Η ιστορία των δικτυακών πολυμεσικών εφαρμογών

Τα πρότυπα κωδικοποίησης video που εμφανίστηκαν αρχικά χαρακτηρίζονταν από πολύ χαμηλή ποιότητα, καθώς το προσφερόμενο εύρος ζώνης (*bandwidth*) ήταν αρκετά μικρό, όπως και η ζήτηση για τέτοιου είδους δεδομένα. Όσο περνούσαν τα χρόνια, τα δίκτυα υπολογιστών αναβαθμίζονταν κι επεκτείνονταν συνεχώς, οπότε νέες εφαρμογές πολυμέσων άρχισαν να εμφανίζονται δειλά στα δικτυακά δρώμενα, ιδίως από την περίοδο, που η εξάπλωση του Internet είχε ήδη αρχίσει να γίνεται αισθητή.

Από τα τέλη της δεκαετίας του 1980 είχε ξεκινήσει η συζήτηση για μετάδοση φωνής μέσω του διαδικτύου και είχε αρχίσει η έρευνα για Internet τηλεφωνία. Από τότε μάλιστα αρκετοί ερευνητές είχαν κατασκευάσει τα πρώτα σχετικά πρότυπα, πολύ πριν γίνει διάσημο το διαδίκτυο. Ωστόσο, κανένα από τα πρότυπα αυτά δεν επικράτησε τελικά.

Τρεις κλάσεις εφαρμογών φωνής άρχισαν να χρησιμοποιούνται αρκετά στα τέλη του 1990. Η πρώτη αποτελείται από εφαρμογές «υπολογιστή προς τηλέφωνο» (PC-To-Phone) [4]. Τέτοιες εφαρμογές επιτρέπουν σε ένα χρήστη του διαδικτύου που διαθέτει μικρόφωνο να τηλεφωνήσει μέσω του Internet. Οι εφαρμογές αυτές έγιναν γρήγορα διάσημες, καθώς το κόστος ενός τηλεφωνήματος, μέσω του διαδικτύου, προς οιονδήποτε προορισμό είναι πολύ μικρότερο από αυτό μέσω του τηλεφωνικού δικτύου. Η δεύτερη κλάση αποτελείται από εφαρμογές που επιτρέπουν την συνομιλία μεταξύ πολλών χρηστών (*voice chat*) [4]. Ωστόσο, μόνο ένας χρήστης μπορεί να μιλά σε μια χρονική στιγμή. Τέλος, η τρίτη κλάση απαρτίζεται από εφαρμογές ασύγχρονης ομιλίας, όπως είναι το φωνητικό ταχυδρομείο (*voice e-mail*) [4].

Στην προώθηση των εφαρμογών αυτών συνέτεινε καθοριστικά η εταιρία Real Networks, η οποία ήταν η πρώτη που έφερε ήχο (*audio*) στο Internet. Τα αρχικά προϊόντα της περιελάμβαναν έναν κωδικοποιητή audio, έναν audio server και έναν audio player. Η εταιρία παρότρυνε τους χρήστες να επιλέγουν και να παίζουν audio κατ' απαίτηση (*on demand*). Πολύ γρήγορα η εφαρμογή αυτή έγινε διάσημη, ενώ από το 1997 η εταιρία επέκτεινε το προϊόν αυτό ώστε να περιλαμβάνει και video, εκτός από audio. Το 1997 η εταιρία Microsoft άρχισε να διαφημίζει τα δικά της ανάλογα προϊόντα, οπότε ξεκίνησε ένας «πόλεμος» μεταξύ των δύο εταιριών για το ποιος θα επικρατήσει στην αγορά.

Συμπερασματικά, όπως ήταν αναμενόμενο, η διαθεσιμότητα ολοένα και περισσότερου εύρους ζώνης ώθησε την ανάπτυξη απαιτητικών δικτυακών εφαρμογών πολυμέσων, οι οποίες είναι πιο εξελιγμένες, καθώς απαιτούν περισσότερους πόρους του δικτύου, μεγαλύτερη επεξεργαστική ισχύ, ενώ παρέχουν χρήσιμες υπηρεσίες στους χρήστες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η υπηρεσία τηλεδιάσκεψης, με την οποία θα ασχοληθούμε στο 4ο κεφάλαιο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Το πρωτόκολλο IEEE 802.11 και οι εκδόσεις του

Η ασύρματη επικοινωνία μεταξύ υπολογιστών είναι μια ταχέως ανερχόμενη τεχνολογία, ιδίως την τελευταία δεκαετία, καθώς παρέχει τη δυνατότητα σε χρήστες να ανταλλάσσουν δεδομένα, χωρίς να είναι να είναι αναγκασμένοι να περιορίζονται στα στενά όρια ενός γραφείου ή του σπιτιού τους, όπου υπάρχει μια πρίζα δικτύου που τους συνδέει με ένα πιθανό τοπικό δίκτυο (LAN), η με το Internet μέσω της τηλεφωνικής τους γραμμής. Ασύρματα πρωτόκολλα αναπτύσσονται συνεχώς και παρέχουν μεγαλύτερο εύρος ζώνης σε χρήστες, σε μια μικρή γεωγραφική περιοχή. Στην ιδανική περίπτωση, οι χρήστες ενός ασύρματου δικτύου επιθυμούν να απολαμβάνουν την ίδια ποιότητα παρεχόμενων υπηρεσιών (*QoS – Quality of Service*) και το δίκτυο τους να έχει τις ίδιες ικανότητες με τα αντίστοιχα ενσύρματα δίκτυα. Προκειμένου βέβαια να γίνει αυτό εφικτό, απαιτούνται εντατικές έρευνες από πλευράς της κοινότητας των επιστημόνων της δικτυακής τεχνολογίας, για την ανάπτυξη πρωτοκόλλων που να ξεπερνούν περιορισμούς και να λύνουν σοβαρά προβλήματα, τα οποία δε συναντώνται σε ενσύρματα συστήματα.

3.1 Τα προβλήματα των ασύρματων συστημάτων

3.1.1 Παρεμβολές κι αξιοπιστία

Οι παρεμβολές (*Interference*) είναι ένα σοβαρό πρόβλημα που δημιουργείται από ταυτόχρονες μεταδόσεις από δύο ή περισσότερους σταθμούς, που μοιράζονται την ίδια μπάντα συχνοτήτων. Οι ταυτόχρονες αυτές μεταδόσεις οδηγούν σε συγκρούσεις πακέτων (*Packet Collisions*). Εν γένει, οι συγκρούσεις είναι συνέπεια του γεγονότος, ότι κάποιοι ανεξάρτητοι σταθμοί του δικτύου περιμένουν μέχρις ότου το κανάλι καταστεί ελεύθερο, οπότε ξεκινούν τη μετάδοση των πακέτων τους εκείνη τη χρονική στιγμή. Ωστόσο, συγκρούσεις μπορεί να συμβαίνουν συχνά, λόγω και του προβλήματος του κρυμμένου σταθμού (*Hidden node problem*). Εμφανίζεται συχνά το φαινόμενο, να υπάρχει ενεργός σταθμός στην ίδια γεωγραφική περιοχή, ο οποίος να μη μπορεί να γίνει αντιληπτός, από κάποιους από τους άλλους κόμβους, οπότε να μη μπορεί να συγχρονιστεί με αυτούς. Στην περίπτωση αυτή, ένας κόμβος λανθασμένα παρατηρεί ότι το κανάλι είναι ελεύθερο και ξεκινά μετάδοση, χωρίς να έχει αντιληφθεί ότι κάποιος άλλος σταθμός μεταδίδει ήδη την ίδια στιγμή, σταθμός ο οποίος δεν έχει γίνει ακόμη αντιληπτός («κρυμμένος») από τον κόμβο που μεταδίδει, θεωρώντας ότι το κανάλι είναι διαθέσιμο. Τα φαινόμενα αυτά συμβαίνουν είτε λόγω πολυοδικής σκέδασης (Multipath Fading), η οποία χαρακτηρίζεται από τυχαίες διακυμάνσεις πλάτους και φάσης στον δέκτη, είτε λόγω φυσικών εμποδίων, είτε λόγω χρήσης ίδιων συχνοτήτων από κόμβους γειτονικών γεωγραφικών περιοχών.

Η αξιοπιστία (*Reliability*) του ασύρματου καναλιού μπορεί να μετρηθεί από το μέσο ρυθμό λανθασμένων bit (*Average Bit Error Rate - BER*). Για παράδειγμα, BER = 10^{-2} σε πακέτα φωνής είναι συνήθως αποδεκτό, ενώ BER = $2*10^{-2}$ είναι μάλλον απορριπτέο [23]. Διάφορες τεχνικές έχουν επινοηθεί, οι οποίες μειώνουν αισθητά το BER. Οι πιο γνωστές από αυτές είναι οι: ARQ (Automatic Repeat Request) [4], και FEC (Forward Error Correction) [4].

3.1.2 *Ασφάλεια*

Όπως έχουμε αναφέρει παραπάνω, όταν ένας συνδεδεμένος στο ασύρματο δίκτυο κόμβος στέλνει ένα πακέτο, τότε αυτό παραλαμβάνεται κι εξετάζεται από όλους τους άλλους ασύρματους κόμβους που βρίσκονται στην ίδια γεωγραφική περιοχή, είτε αυτοί ανήκουν στο ίδιο δίκτυο, είτε όχι. Όπως είναι φανερό, είναι πολύ δύσκολο να προστατευθεί η πληροφορία που περιέχεται στα πακέτα που στέλνονται, σε αντίθεση με τα ενσύρματα δίκτυα, όπου το μέσο μετάδοσης μπορεί εύκολα να προστατευθεί και η πρόσβαση στο δίκτυο να είναι ελεγχόμενη. Η κρυπτογράφηση της ασύρματης μεταδιδόμενης κίνησης είναι συνεπώς αναγκαία σε ορισμένες περιπτώσεις, δρα ωστόσο αρνητικά στην απόδοση του συστήματος, κι αυξάνει το κόστος.

3.1.3 *Throughput*

Τα ασύρματα τοπικά δίκτυα (*WLANs*) υπόκεινται σε φυσικούς περιορισμούς, ενώ χαρακτηρίζονται από το σχετικά μικρό προσφερόμενο εύρος ζώνης. Εξάλλου, για να υποστηρίζουν πολλαπλές ταυτόχρονες μεταδόσεις, αναγκάζονται να εισάγουν τεχνικές διευρυμένου φάσματος.

Προς το παρόν, το ασύρματο δίκτυο που έχει επικρατήσει στην αγορά είναι το πρωτόκολλο 802.11 της IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*). Ένα άλλο λιγότερο διαδεδομένο σύστημα είναι το HIPERLAN [16] του ινστιτούτου ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*), στο οποίο έχουν παραχωρηθεί οι μπάντες 5,15 – 5,30 GHz και 17,1 – 17,2 GHz για μεταδόσεις. Για το HIPERLAN έχουν δοκιμαστεί ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων πάνω από 23,529 Mbps, ενώ υποστηρίζονται υπηρεσίες με χρονική ευαισθησία, τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας (*Power Saving*) και multihop δρομολόγηση.

Η πρώτη έκδοση του 802.11 υποστήριζε ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων μέχρι και 2 Mbps, ασύγχρονη μετάδοση δεδομένων (π.χ. εφαρμογές Email, FTP, κλπ.), ενώ παρείχε και προαιρετική υποστήριξη για κατανεμημένες υπηρεσίες με χρονικούς περιορισμούς (*time - bounded*), όπως π.χ. μετάδοση πακεταρισμένης φωνής (*packet voice*) και video. Νεώτερες εκδόσεις του πρωτοκόλλου, τις οποίες θα συζητήσουμε αργότερα, επιτυγχάνουν πολύ υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης.

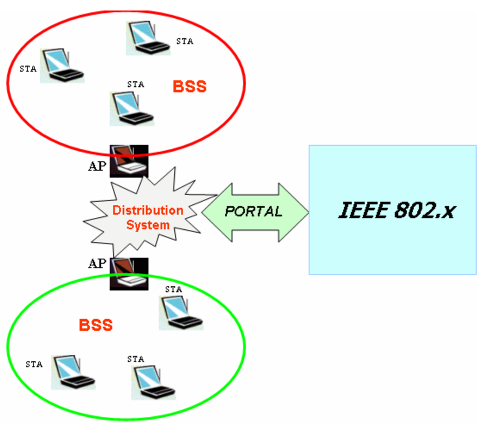
3.2 Περιγραφή του πρωτοκόλλου IEEE 802.11

3.2.1 <u>Αρχιτεκτονική κι εξοπλισμός</u>

Προκειμένου να μπορεί ένας κόμβος να συνδεθεί σε ένα ασύρματο δίκτυο 802.11 είναι απαραίτητο να διαθέτει μια κατάλληλη κάρτα, όπως αυτές των εικόνων. Ανάλογα με την έκδοση του πρωτοκόλλου - δικτύου που έχει αγοραστεί, κυκλοφορούν και οι αντίστοιχες κάρτες δικτύου. Ωστόσο, επειδή οι περισσότερες από τις νέες εκδόσεις είναι συμβατές με τις προηγούμενες, παλιότερες κάρτες μπορούν να λειτουργήσουν και με τις νέες εκδόσεις (χωρίς φυσικά οι αντίστοιχοι χρήστες να απολαμβάνουν τις μεγαλύτερες ταχύτητες των νέων εκδόσεων), καθώς επίσης κάρτες νέων εκδόσεων συνεργάζονται και με παλιότερες εκδόσεις του πρωτοκόλλου.

Το θεμελιώδες μπλοκ του 802.11 είναι το BSS (*Basic Service Set*). Είναι μια ομάδα σταθμών που λειτουργούν με βάση κάποια από τις δύο συναρτήσεις συντονισμού: DCF (*Distributed Coordination Function*), ή PCF (*Point Coordination Function*), που αναλύονται παρακάτω. Ένα BSS είναι αυτό του σχήματος *2.1.2 στη σελίδα 10*. Η γεωγραφική περιοχή, που καλύπτεται από ένα BSS, ονομάζεται BSA (*Basic Service Area*), και είναι αντίστοιχη της «κυψέλης» που χρησιμοποιείται για τα συστήματα κινητής τηλεφωνίας. Έτσι, σταθμοί που ανήκουν στο ίδιο BSS μπορούν να επικοινωνούν απευθείας μεταξύ τους.

Σε αντίθεση με τα Ad-Hoc δίκτυα, τα δίκτυα υποδομής (*Infrastructure networks*) έχουν σχεδιαστεί ώστε να παρέχουν συγκεκριμένες υπηρεσίες και μεγαλύτερη εμβέλεια. Βασικό στοιχείο της υποδομής είναι το «σημείο πρόσβασης» (*AP - Access Point*), το οποίο αναλογεί στο BTS (*Base Tranceiver Station*) των σταθμών βάσης κινητής τηλεφωνίας. Κάνοντας χρήση του AP κατορθώνουμε να συνδεθούμε με κόμβους έξω από το BSS. Κατά συνέπεια, τα Access points αποτελούν τα σημεία ένωσης του BSS με τον εξωτερικό δικτυακό κόσμο, έτσι ώστε τελικά να έχουμε ένα ESS (*Extended Service Set*). Ένα ESS λοιπόν απαρτίζεται από πολλά BSSs, τα οποία ενώνονται μέσω ενός συστήματος διανομής (*DS - Distribution system*). Ένα παράδειγμα δικτύου υποδομής είναι αυτό του σχήματος *2.1.3 στη σελίδα 10*. Το DS μπορεί να θεωρηθεί ως ένα δίκτυο κορμού (*backbone*), υπεύθυνο για τις μεταδόσεις στο επίπεδο ζεύξης. Εφόσον δεν τίθενται συγκεκριμένοι περιορισμοί για την υλοποίηση του, το DS μπορεί να είναι ένα ενσύρματο IEEE 802.3 Ethernet LAN, 802.4 Token Bus, 802.5 Token Ring, FDDI (*Fiber Distributed Data Interface*), MAN ή ακόμη και κάποιο άλλο 802.11 ασύρματο δίκτυο.



Ένα ESS μπορεί να παρέχει στους ασύρματους χρήστες πρόσβαση σε ενσύρματα δίκτυα, όπως το Internet, μέσω μιας πύλης (*Portal*), η οποία καθορίζει το σημείο ένωσης στο DS, όπου το 802.11 μπορεί να συνδεθεί με εξωτερικό δίκτυο. Έτσι η πύλη μπορεί να παίξει το ρόλο γέφυρας (*bridge*), καθώς έχει τη δυνατότητα μετάφρασης των διαφορετικού είδους πακέτων που ανταλλάσσονται μεταξύ των διαφορετικών δικτύων.

3.2.2 Φυσικό επίπεδο

Το φυσικό είναι το κατώτερο επίπεδο του δικτύου 802.11, το οποίο αναλαμβάνει την μετατροπή των bits των πακέτων σε ηλεκτρικά ή οπτικά σήματα και στη συνέχεια την αποστολή στον δέκτη μέσω του ασύρματου διαύλου. Αντίστοιχα, στον παραλήπτη τα σήματα μετατρέπονται πάλι σε bits.

Στο 802.11 καθορίζονται τρεις διαφορετικές υλοποιήσεις για το φυσικό επίπεδο: FHSS (*Frequency Hopping Spread Spectrum*), DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*) και IR (*Infrared*).

Η υλοποίηση με FHSS χρησιμοποιεί την μπάντα ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) των 2.4 GHz (2.4000 με 2.4835 GHz). Σε αυτή την περίπτωση, έχουμε 79 κανάλια στο hopping set, με το πρώτο στα 2,402 GHz και τα υπόλοιπα να απέχουν 1 MHz μεταξύ τους, απόσταση καθορισμένη από την FCC (*Federal Communications Committee*). Για την πρώτη έκδοση του πρωτοκόλλου, ο διαχωρισμός αυτός του καναλιού αντιστοιχεί σε στιγμιαίο εύρος ζώνης 1 Mbps. Έχοντας 79 κανάλια, έχουμε τρεις διαφορετικές ομάδες των 26 hopping sequences, κάτι το οποίο επιτρέπει την ύπαρξη πολλαπλών BSS σε μια γεωγραφική περιοχή. Ως αποτέλεσμα, μπορούμε να μειώσουμε την κίνηση σε ένα BSS, καθώς επίσης να μειώσουμε αρκετά την πιθανότητα συγκρούσεων πακέτων, και κατά συνέπεια να αυξήσουμε το throughput. Ο ελάχιστος ρυθμός hopping έχει καθοριστεί στα 2,5 hops/sec. Η FHSS χρησιμοποιεί κωδικοποίηση GFSK (*Gaussian Frequency Shift Keying*) στο 1Mbps.

Η υλοποίηση με DSSS χρησιμοποιεί επίσης την ISM μπάντα, όπου σε αυτή την περίπτωση όμως χρησιμοποιείται κωδικοποίηση BPSK (*Binary Phase Shift Keying*) στο 1Mbps και QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*) στα 2 Mbps. Η μπάντα των 2,4 GHz διαιρείται σε 14 κανάλια των 22 MHz. Τα γειτονικά κανάλια αλληλοεπικαλύπτονται μερικώς, με εξαίρεση 3 από τα 14 κανάλια, τα οποία είναι εντελώς μη αλληλοεπικαλυπτόμενα. Έτσι, τα δεδομένα στέλνονται μέσω ενός από αυτά τα κανάλια των 22 MHz, χωρίς να κάνουν hopping σε άλλα κανάλια. Προκειμένου να μετριασθεί ο θόρυβος σε ένα κανάλι, εισάγεται η τεχνική "*Chipping*":

κάθε bit δεδομένων μετατρέπεται σε σειρά από πολλαπλά bit patterns, που ονομάζονται "*chips*". Η επαναληψημότητα του κάθε chip, σε συνδυασμό με τη διεύρυνση του σήματος κατά μήκος των 22 MHz δίνει δυνατότητες ελέγχου λαθών, αφού ακόμη κι αν ένα μέρος καταστραφεί, υπάρχει η δυνατότητα ανάκτησης του σήματος. Η μέθοδος αυτή εξοικονομεί αρκετό εύρος ζώνης, καθώς ελαχιστοποιούνται οι περιπτώσεις όπου απαιτείται επαναμετάδοση πακέτων που έχουν προσβληθεί από θόρυβο.

Από τα παραπάνω προκύπτει το εύλογο ερώτημα για το ποια από τις δύο υλοποιήσεις πρέπει να χρησιμοποιηθεί. Παρότι το FHSS διευκολύνει την όλη σχεδίαση, περιορίζεται σε ταχύτητες μέχρι 2 Mbps. Ο περιορισμός αυτός οφείλεται στους κανονισμούς της FCC η οποία επιτρέπει μέγιστο εύρος ζώνης για κάθε «υποκανάλι» (*subchannel*) στο 1MHz. Ως αποτέλεσμα, στα συστήματα με FHSS είμαστε αναγκασμένοι να χρησιμοποιούμε την μπάντα των 2,4GHz κάνοντας hop πολύ συχνά, πράγμα που έχει σαν αποτέλεσμα να αυξάνεται το hopping overhead. Για να αυξήσουμε, λοιπόν, την ταχύτητα σε 5,5 και 11 Mbps (επιτυγχάνονται σε νεότερες εκδόσεις του πρωτοκόλλου), πρέπει να χρησιμοποιήσουμε την υλοποίηση με DSSS.

Με DSSS μπορούμε να πετύχουμε μεγαλύτερες ταχύτητες, ενώ παράλληλα οι κόμβοι του δικτύου μπορούν να βρίσκονται σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Ωστόσο, δε μπορούμε να έχουμε μεγάλη πυκνότητα χρηστών, και το κόστος κατασκευής και αγοράς είναι σχετικά υψηλό. Η υλοποίηση με FHSS είναι πιο εύκολη στην κατασκευή, κυρίως σε περιπτώσεις αποφυγής παρεμβολών στενής ζώνης και αποφυγής μη εγκεκριμένης πρόσβασης στο δίκτυο. Σε αυτή την περίπτωση όμως, οι σταθμοί πρέπει να βρίσκονται σχετικά κοντά ο ένας στον άλλο, ενώ υπάρχει άνω όριο στη μέγιστη επιτυγχανόμενη ταχύτητα μετάδοσης, το οποίο είναι χαμηλότερο από ό,τι στην DSSS.

Η πρώτη έκδοση του πρωτοκόλλου καθορίζει το chipping στα 11 bits (*Barker Sequence*). Κάθε ακολουθία αναπαριστά ένα απλό bit (0 ή 1) και μετατρέπεται σε ένα σύμβολο, το οποίο στη συνέχεια αποστέλλεται στον αντίστοιχο παραλήπτη. Η ταχύτητα μετάδοσης των συμβόλων αυτών είναι 1 MSps (*million symbols per second*).

Στην έκδοση 802.11b, αντί να δημιουργούνται δύο ακολουθίες barker των 11 bits, χρησιμοποιείται η μέθοδος CCK (*Complementary Code Keying*). Βάσει την μεθόδου αυτής, έχουμε ένα set από 64 κωδικοποιημένες λέξεις των 8 bits. Ως σύνολο, οι λέξεις αυτές έχουν μοναδικές μαθηματικές ιδιότητες, οι οποίες δίνουν στο δέκτη τη δυνατότητα να ξεχωρίζει τις λέξεις, ακόμη και σε περιβάλλον θορύβου και διασυμβολικής παρεμβολής. Στα 5,5 Mbps η CCK κωδικοποιεί 4 bits ανά φέρον (*bits per carrier*), ενώ στα 11 Mbps κωδικοποιεί 8 bits ανά φέρον. Ο παρακάτω πίνακας δείχνει τις διαφορές:

Data Rate	Code Length	Modulation	Symbol Rate	bits/symbol
1 Mbps	11 (Barker)	BPSK	1 MSps	1
2 Mbps	11 (Barker)	QPSK	1 MSps	2
5,5 Mbps	8 (CCK)	QPSK	1,375 MSps	3
11 Mbps	8 (CCK)	QPSK	1,375 MSps	4

Τέλος πρέπει να αναφέρουμε ότι το φυσικό επίπεδο μπορεί να υλοποιηθεί και με τεχνικές IR (*Infrared*).

3.2.3 Επίπεδο Ζεύξης Δεδομένων

3.2.3.1 Γενικά

Το επίπεδο ζεύξης δεδομένων είναι υπεύθυνο για το λογικό έλεγχο και τον καθορισμό κανόνων πρόσβασης στο ασύρματο μέσο. Χωρίζεται σε δύο υποεπίπεδα: LLC (*Logical Link Control*) και MAC (*Medium Access Control*). Το LLC, με διευθυνσιοδότηση στα 48 bits, έχει υλοποιηθεί με τον ίδιο τρόπο που εμφανίζεται και στα άλλα 802.x πρότυπα. Ως αποτέλεσμα, καθίσταται πολύ εύκολη η διασύνδεση (*bridging*) με άλλα ενσύρματα τοπικά δίκτυα. Ωστόσο, το υποεπίπεδο MAC είναι μοναδικό.

Στο υποεπίπεδο MAC έχουν ανατεθεί η απόκτηση πρόσβασης στο κανάλι, η διευθυνσιοδότηση πακέτων (*PDU - Protocol Data Unit*), ο έλεγχος λαθών (*error checking*), η τμηματοποίηση και ανακατασκευή πακέτων (*packet fragmentation & reassembly*) και ο καθορισμός του format των πακέτων. Το MAC είναι παρόμοιο με αυτό του 802.3, στο ότι είναι σχεδιασμένο για υποστήριξη πολλαπλών χρηστών σε ένα διαμοιραζόμενο μέσο. Οι χρήστες εξετάζουν το μέσο πριν το προσπελάσουν.

Ωστόσο, ενώ το 802.3 χρησιμοποιεί CSMA-CD (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection*), αυτό δεν είναι εφικτό στο 802.11, λόγω του προβλήματος «κοντά - μακριά» (*near – far problem*): Για την ανίχνευση μιας σύγκρουσης, ένας σταθμός πρέπει να είναι ικανός να στέλνει και να ακούει την ίδια χρονική στιγμή. Ωστόσο, σε ασύρματα συστήματα, κατά τη μετάδοση αφαιρείται η ικανότητα ενός σταθμού να ακούσει μια σύγκρουση εκείνη τη στιγμή.

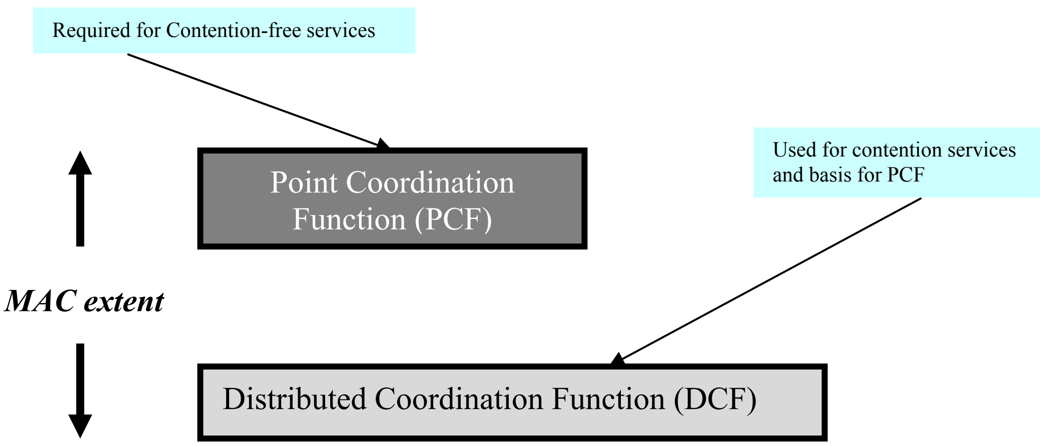
Το 802.11 χρησιμοποιεί την τεχνική CSMA-CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*). Σύμφωνα με αυτήν, όταν ένας σταθμός θέλει να μεταδώσει, «αισθάνεται το φέρον», κι αν δεν ανιχνεύσει κίνηση, τότε περιμένει για ένα επιπρόσθετο τυχαίο χρονικό διάστημα κι έπειτα μεταδίδει, εφόσον το μέσο παραμένει ακόμη ελεύθερο. Αν το πακέτο ληφθεί σωστά, τότε ο δέκτης στέλνει μια επιβεβαίωση (*ACK - Acknowledgement*), και η όλη διαδικασία επικοινωνίας μεταξύ των δύο σταθμών ολοκληρώνεται προσωρινά, τουλάχιστον μέχρι κάποιος από τους δύο να έχει δεδομένα τα οποία θέλει να στείλει στον άλλο. Αν ο πομπός, που έστειλε το πακέτο, δε λάβει την επιβεβαίωση για κάποιο λόγο, τότε υποθέτει ότι το πακέτο χάθηκε, οπότε, αφού παρέλθει ένα τυχαίο χρονικό διάστημα, το στέλνει ξανά.

Ο τρόπος πρόσβασης στο μέσο μπορεί να εναλλάσσεται μεταξύ δύο καταστάσεων: «ανταγωνισμού» και «μη ανταγωνισμού». Στην περίοδο μη ανταγωνισμού (*CFP – Contention Free Period*), η χρήση του ασύρματου μέσου καθορίζεται αποκλειστικά από το AP (Access Point), έτσι ώστε αυτό να καθορίζει ποιος θα μεταδώσει, οπότε οι σταθμοί να μη συναγωνίζονται για να αποκτήσουν την κυριαρχία του καναλιού. Αντίθετα, στην περίοδο ανταγωνισμού (*CP – Contention Period*) ακολουθείται η διαδικασία CSMA-CA, που περιγράφηκε παραπάνω.

Στο 802.11 υποστηρίζονται και μεταδίδονται τρία διαφορετικά είδη πακέτων: Δεδομένων (*Data frames*), Ελέγχου (*Control frames*) και Διαχείρισης (*Management frames*). Τα frames δεδομένων είναι αυτά που περιέχουν τα δεδομένα που ένας σταθμός στέλνει σε κάποιον παραλήπτη και που αποστέλλονται κατά τις περιόδους CP και CFP. Τα frames ελέγχου χρησιμοποιούνται για ανταλλαγή σημάτων επικοινωνίας κατά την πρόσβαση ενός κόμβου στο δίκτυο (handshaking) και για θετικές επιβεβαιώσεις κατά την CP, όπως και για τον τερματισμό της CFP. Τέλος, τα frames διαχείρισης χρησιμοποιούνται για συγχρονισμό, για εγκαθίδρυση κι απεγκαθίδρυση της επικοινωνίας των κόμβων με το AP και για την πιστοποίηση των σταθμών.

3.2.3.2 Distributed Coordination Function (DCF)

Η DCF είναι η θεμελιώδης μέθοδος πρόσβασης που υποστηρίζει ασύγχρονη μεταφορά δεδομένων, και η οποία βασίζεται στο πρωτόκολλο CSMA-CA. Όλοι οι σταθμοί πρέπει να υποστηρίζουν DCF, η οποία μπορεί να υπάρχει μεμονωμένα στο σύστημα, ή να συνυπάρχει με την PCF σε ένα Infrastructure δίκτυο. Η DCF «κάθεται» ακριβώς πάνω από το φυσικό επίπεδο, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2.3.2.1 που ακολουθεί. Όταν το δίκτυο λειτουργεί κάτω από την DCF, κάθε σταθμός που έχει ένα τουλάχιστον πακέτο στην ουρά του προς μετάδοση, πρέπει να συναγωνιστεί με τους άλλους σταθμούς για να αποκτήσει πρόσβαση στο κανάλι, να μεταδώσει ένα πακέτο του κι έπειτα να συναγωνιστεί ξανά, προκειμένου να μεταδώσει ένα άλλο πακέτο που βρίσκεται στην ουρά του.



Σχήμα 3.2.3.2.1: Αρχιτεκτονική του υποεπιπέδου MAC

Όπως αναφέραμε, όταν ένας σταθμός λειτουργεί σε DCF, πρέπει πρώτα να ελέγξει τη διαθεσιμότητα του μέσου, πριν προσπαθήσει να μεταδώσει. Ο έλεγχος αυτός λαμβάνει χώρα, τόσο στον αιθέρα (*Physical Carrier Sensing*), όσο και στο υποεπίπεδο MAC (*Virtual Carrier Sensing*). Η πρώτη λειτουργία ανιχνεύει την παρουσία άλλων IEEE 802.11 WLAN χρηστών, με το να αναλύει όλα να ανιχνευόμενα πακέτα. Επίσης, ανιχνεύει κίνηση στο κανάλι, μέσω της μέτρησης της ισχύος του σήματος από άλλες πηγές που μεταδίδουν εκείνη τη στιγμή. Εξάλλου, μια πηγή εκτελεί Virtual Carrier Sensing στέλνοντας πληροφορία (διάρκειας μιας MPDU), που μπορεί να είναι RTS, CTS ή frames δεδομένων. Αναφέρουμε, ότι RTS (*Request* *to Send*) είναι το frame που στέλνει ένας χρήστης ειδοποιώντας ότι επιθυμεί να στείλει πακέτο, και CTS (*Clear to Send*) είναι η απάντηση που λαμβάνει ο χρήστης, και η οποία του δίνει το «πράσινο φως», ώστε να ξεκινήσει μια μετάδοση πακέτου. MPDU (*MAC Protocol Data Unit*) είναι η μονάδα δεδομένων που περνά από το υποεπίπεδο MAC στο φυσικό επίπεδο και περιέχει επικεφαλίδα (*header information),* τα δεδομένα που αποστέλλονται (*payload)* και 32 bits *CRC* για τον έλεγχο λαθών.

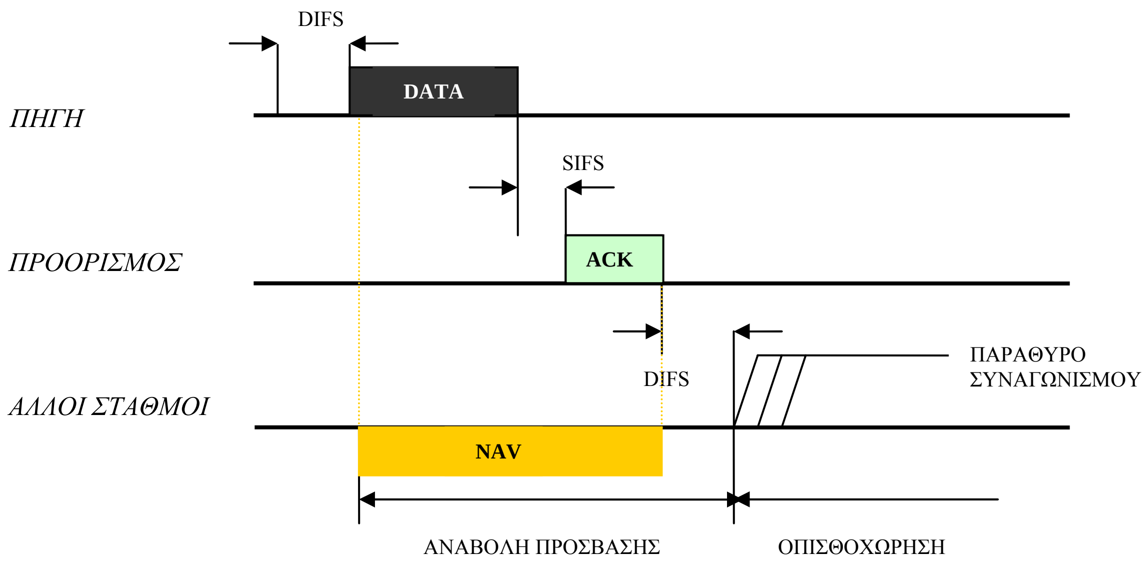
Πριν προχωρήσουμε σε εκτενέστερη ανάλυση της λειτουργίας της DCF, είναι απαραίτητο να αναφέρουμε κάποιους ορισμούς μεγεθών και μεταβλητών που χρησιμοποιούνται, ώστε να κατανοήσουμε καλύτερα τον τρόπο πρόσβασης των κόμβων στο κανάλι:

- <u>NAV (Network Allocation Vector)</u>: *Διατηρείται στους τερματικούς κόμβους, και δείχνει το χρόνο που πρέπει να περάσει, μέχρι η παρούσα μετάδοση να ολοκληρωθεί, και το κανάλι να ελεγχθεί ξανά, για το εάν είναι διαθέσιμο. Το κανάλι θεωρείται κατειλημμένο (busy), όταν το physical η virtual carrier sensing δείξουν ότι είναι κατειλημμένο.*
- <u>Duration Field</u>: *Πεδίο των πακέτων δεδομένων ή διαχείρισης, που δείχνει το χρόνο (σε μsec) που απαιτείται προκειμένου να ολοκληρωθεί η μετάδοση του παρόντος frame. Με τη βοήθεια του duration field, οι κόμβοι μπορούν να ρυθμίζουν το NAV.*
- <u>IFS (Interframe Space)</u>: *Μέσω των διαστημάτων αυτών ελέγχεται η προτεραιότητα πρόσβασης στο ασύρματο μέσο. Στο 802.11 περιλαμβάνονται τρία είδη IFS:* ***Short IFS*** *(SIFS),* ***PCF-IFS*** *(PIFS),* ***και DCF-IFS*** *(DIFS). Ισχύει: SIFS < PIFS < DIFS. Ο συσχετισμός των τιμών των μεγεθών αυτών γίνεται βάσει μαθηματικών σχέσεων. Οι σταθμοί που πρέπει να περιμένουν μόνο για SIFS έχουν προτεραιότητα έναντι αυτών που περιμένουν για PIFS και DIFS.*
- <u>SIFS</u>: *Χρησιμοποιείται για να διαχωρίζει τις μεταδόσεις μιας απλής επικοινωνίας (π.χ. πακέτο - ACK), και είναι το ελάχιστο μεσοδιάστημα μεταξύ frames. Εφόσον υπάρχει σταθμός που θέλει να μεταδώσει, δίνεται σε αυτόν προτεραιότητα. Ο χρόνος που διαρκεί το SIFS είναι ρυθμισμένος, έτσι ώστε ο πομπός να μπορεί να μετατραπεί σε δέκτη και να αποκωδικοποιήσει το πακέτο που λαμβάνει.*
- <u>PIFS</u>: *Χρησιμοποιείται από το AP για την πρόσβαση στο μέσο πριν από όλους τους άλλους σταθμούς, κατά το CFP.*
- <u>DIFS</u>: *Είναι το χρονικό διάστημα που περιμένει ένας κόμβος, προτού ξεκινήσει τη μετάδοση, κι αφού έχει θεωρήσει ότι το κανάλι είναι διαθέσιμο. Μετά το τέλος του*

DIFS, αν το μέσο είναι ελεύθερο, μεταδίδει. Το χρονικό διάστημα αυτό αποτελεί μια δικλείδα ασφαλείας, προκειμένου να αποφευχθούν συγκρούσεις.

- EIFS (Extended Interframe Space): *Χρησιμοποιείται από ένα σταθμό, ο οποίος έλαβε ένα πακέτο και δε μπορεί να το κατανοήσει. Το EIFS χρειάζεται ώστε να αποφευχθεί πιθανή σύγκρουση με μελλοντικό πακέτο που ανήκει στην ίδια επικοινωνία.*

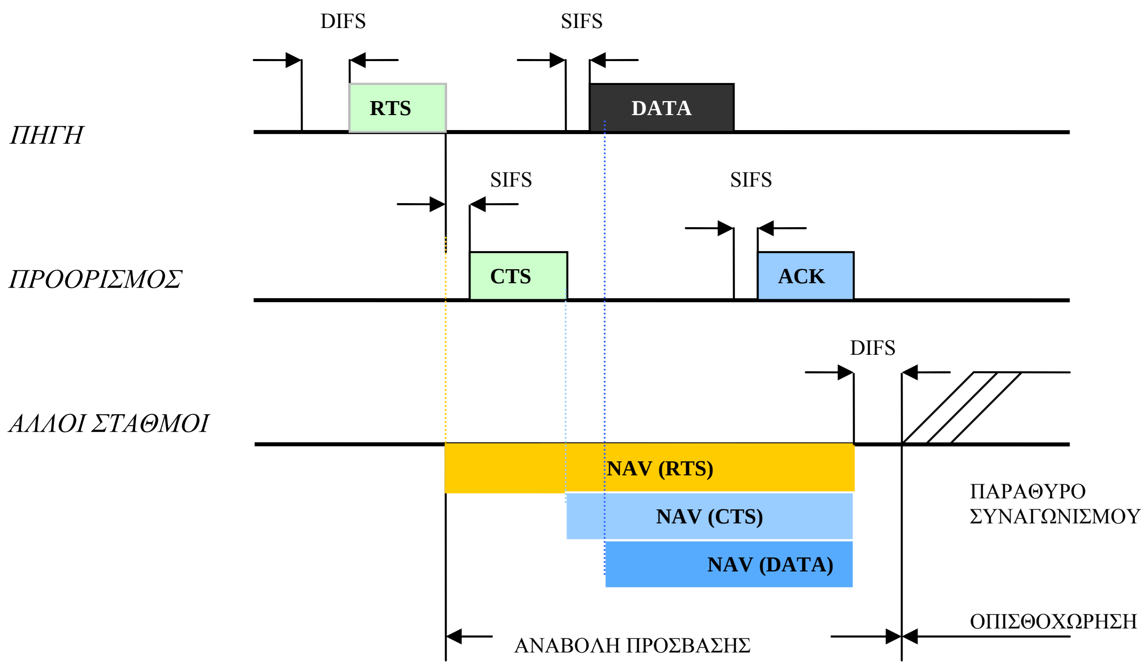
Όταν ένας σταθμός αντιληφθεί ότι το κανάλι είναι ελεύθερο, περιμένει για χρόνο DIFS, κι έπειτα εξετάζει το κανάλι ξανά. Αν αυτό είναι ακόμη ελεύθερο, τότε ο σταθμός μεταδίδει ένα MPDU. Ο δέκτης του πακέτου ελέγχει την ορθότητα του πακέτου και, εφόσον το έχει λάβει σωστά, περιμένει για χρόνο SIFS κι έπειτα μεταδίδει μια θετική επιβεβαίωση πίσω στον αποστολέα. Όταν μεταδίδεται το πακέτο δεδομένων, το “duration field” του πακέτου, το οποίο παραλαμβάνεται κι εξετάζεται από όλους τους σταθμούς του BSS, χρησιμοποιείται για να ενημερώσει τους σταθμούς, για το χρονικό διάστημα που καταλαμβάνει η παρούσα μετάδοση. Όλοι οι υπόλοιποι σταθμοί λοιπόν ρυθμίζουν το NAV, το οποίο βασίζεται στην τιμή του duration field. Το σχήμα που ακολουθεί, παρέχει το χρονοδιάγραμμα μιας επιτυχούς μετάδοσης πακέτου δεδομένων.



Σχήμα 3.2.3.2.2: Μετάδοση χωρίς RTS/CTS

Ένας σταθμός σε ένα BSS δε μπορεί να ακούσει τις μεταδόσεις του, οπότε σε μια σύγκρουση στέλνει ολόκληρο το MPDU. Αν αυτό είναι μεγάλο, τότε σπαταλάται εύρος ζώνης. Εναλλακτικά μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μηχανισμό που χρησιμοποιεί τα σήματα ελέγχου RTS (*Request To Send*) και CTS (*Clear To Send*), ώστε να δεσμεύσουμε εύρος ζώνης πριν τη μετάδοση. Έτσι, στέλνοντας κατάλληλα RTS και CTS, ειδοποιούμε όλους τους σταθμούς για τη μετάδοση, αποφεύγοντας έτσι τις συγκρούσεις. Όλοι οι σταθμοί (του BSS) που διαβάζουν ένα μήνυμα RTS, διαβάζουν το “duration” και ρυθμίζουν το NAV. Ο δέκτης απαντά με CTS, αφού περιμένει χρόνο SIFS. Όλοι οι σταθμοί επεξεργάζονται το CTS, ελέγχουν το “duration” και ξαναρυθμίζουν το NAV, ενώ, εφόσον ο αποστολέας λάβει την CTS, βεβαιώνεται ότι το μέσο είναι ελεύθερο ώστε να μεταδώσει ένα πακέτο του, από την ουρά.

Εφόσον οι σταθμοί μπορούν να ενημερώνουν το NAV, μέσω της επεξεργασίας των RTS/CTS, μπορούν και να αναγνωρίζουν όλους τους σταθμούς που βρίσκονται στο BSS. Με τον τρόπο αυτόν μπορεί να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα του κρυμμένου σταθμού. Το παρακάτω σχήμα (*3.2.3.2.3*) περιγράφει τη διαδικασία μετάδοσης ενός πακέτου, με χρήση RTS/CTS. Το δίκτυο μπορεί να ρυθμιστεί έτσι ώστε οι σταθμοί να μην χρησιμοποιούν ποτέ σήματα RTS/CTS, ή να τα χρησιμοποιούν πάντοτε, ή κατά περίπτωση. Κάνοντας χρήση των σημάτων αυτών μπορούμε να εξοικονομήσουμε σημαντικό εύρος ζώνης. Ωστόσο, αν το φορτίο του δικτύου δεν είναι υψηλό, τότε οι μεταδόσεις RTS/CTS προσθέτουν σημαντικό overhead, με συνέπεια τα πακέτα να αντιμετωπίζουν μεγαλύτερες καθυστερήσεις.



Σχήμα 3.2.3.2.3: Μετάδοση με χρήση RTS/CTS

Απομένει να διευθετηθεί ο τρόπος με τον οποίο θα αποφύγουμε τις συγκρούσεις, όταν το κανάλι καταστεί διαθέσιμο για μεταδόσεις. Πράγματι, λόγω συγχρονισμού, όταν μετά από μια μετάδοση το κανάλι ελευθερωθεί, τότε όλοι οι σταθμοί που θα το αντιληφθούν, θα περιμένουν χρόνο DIFS και μετά θα προσπαθήσουν να μεταδώσουν. Συνεπώς, αν δύο ή περισσότεροι σταθμοί έχουν πακέτο προς μετάδοση, τότε απλώς θα συμβεί σύγκρουση. Το πρόβλημα επιλύεται με χρήση κατάλληλου χρονομετρητή (Backoff timer) και ο τρόπος επίλυσης περιγράφεται πιο κάτω.

Πρέπει εδώ να ειπωθεί, ότι στο 802.11 ο χρόνος διαιρείται σε περιόδους που αντιστοιχούν σε χρονοθυρίδες (*slots*). Βέβαια, σε αντίθεση με το πρωτόκολλο Aloha με σχισμές (slotted Aloha), όπου το slot time αντιστοιχεί στο χρόνο μετάδοσης ενός πακέτου, στο 802.11 το slot time είναι πολύ μικρότερο από το χρόνο μετάδοσης μιας MPDU, και χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των IFS διαστημάτων και του χρόνου backoff για τους σταθμούς κατά το CP. Το slot time καθορίζεται έτσι ώστε ένας σταθμός να είναι πάντα σε θέση να προσδιορίζει εάν ένας άλλος σταθμός έχει πρόσβαση στο μέσο, στη διάρκεια του προηγούμενου slot.

Ο χρόνος Backoff timer, λοιπόν, είναι μια ακέραια μεταβλητή που αντιστοιχεί σε αριθμό χρονοθυρίδων. Αν ένας σταθμός, που έχει πακέτο προς μετάδοση, αρχικά αντιληφθεί ότι το μέσο είναι απασχολημένο, περιμένει για χρόνο DIFS, κι έπειτα αρχικοποιεί ένα χρονομετρητή (*backoff timer*). Αρχικά ο σταθμός επιλέγει την τιμή του backoff timer ομοιόμορφα στο διάστημα από 0 έως 7 χρονοθυρίδες. Αφού το μέσο καταστεί διαθέσιμο (μετά το DIFS), οι σταθμοί του BSS μειώνουν το χρονομετρητή τους (*backoff timer*), μέχρι το μέσο να καταληφθεί από κάποιο σταθμό, οπότε παγώνουν τον χρονομετρητή. Ο χρονομετρητής επίσης παγώνει όταν μηδενιστεί. Όταν τελικά ο backoff timer μηδενιστεί, τότε ο σταθμός μεταδίδει το πακέτο. Αν δυο σταθμοί μηδενίζουν ταυτόχρονα το χρονομετρητή, τότε συμβαίνει σύγκρουση, και οι σταθμοί ρυθμίζουν ανεξάρτητα το χρονομετρητή σε νέα τιμή, που επιλέγεται ομοιόμορφα στο διάστημα από 0 έως 15 χρονοθυρίδες. Σε επόμενες συγκρούσεις του ίδιου πακέτου, ο χρονομετρητής επιλέγεται ομοιόμορφα από διπλάσιο, κάθε φορά, εύρος ακέραιων τιμών. Αν το ίδιο πακέτο συγκρουστεί έξι συνεχόμενες φορές, τότε απορρίπτεται. Για τις διαδοχικές συγκρούσεις του ίδιου πακέτου, ο χρονομετρητής λαμβάνει νέα τιμή, από ένα εύρος τιμών, που δίδονται από τον παρακάτω πίνακα:

Αριθμός συγκρούσεων πακέτου	***Εύρος τιμών χρονομετρητή***
0	0-7
1	0-15
2	0-31
3	0-63
4	0-127
5	0-255
6	0-255

Πίνακας 3.2.3.2.4

Το 802.11 χρησιμοποιεί έναν εκθετικό αλγόριθμό οπισθοχώρησης (*Exponential Backoff Algorithm*), ο οποίος εκτελείται στις ακόλουθες περιπτώσεις:

- Όταν ο σταθμός ελέγξει το μέσο πριν τη μετάδοση του 1ου πακέτου, και καταλάβει ότι το μέσο είναι απασχολημένο,
- Μετά από κάθε επαναμετάδοση πακέτου,
- Μετά από κάθε επιτυχημένη μετάδοση.

Η μοναδική περίπτωση, όπου ο παραπάνω μηχανισμός δε χρησιμοποιείται, είναι όταν ο σταθμός αποφασίζει να μεταδώσει ένα νέο πακέτο, αφού έχει παρατηρήσει ότι το μέσο είναι ελεύθερο για χρόνο μεγαλύτερο από DIFS.

Οι σταθμοί, λοιπόν, που έχουν πακέτα προς μετάδοση, αρχικοποιούν ένα χρονομετρητή. Μετά από χρόνο DIFS, κι εφόσον το κανάλι είναι διαθέσιμο, οι σταθμοί μειώνουν σταδιακά τους χρονομετρητές τους. Αν κάποιος χρονομετρητής δεν έχει μηδενιστεί και συνάμα το μέσο καταληφθεί από άλλο σταθμό, τότε ο συγκεκριμένος χρονομετρητής παγώνει. Μετά την ολοκλήρωση της μετάδοσης, συνεχίζει να μετρά προς τα κάτω, από την τιμή που είχε παγώσει. Όταν ο χρονομετρητής τελικά μηδενιστεί, τότε ο αντίστοιχος σταθμός ειδοποιεί τους άλλους και μεταδίδει το πακέτο του. Οι άλλοι σταθμοί παγώνουν πάλι προσωρινά τους χρονομετρητές τους, κ.ο.κ. Όπως αντιλαμβάνεται κανείς, ο σταθμός που θα επιλέξει τη μικρότερη αρχική τιμή για το χρονομετρητή θα είναι αυτός που θα μεταδώσει πρώτος. Είναι φυσικά πιθανό, δύο ή περισσότεροι χρονομετρητές να μηδενιστούν ταυτόχρονα. Στην περίπτωση αυτή έχουμε σύγκρουση, οπότε οι συγκεκριμένοι χρονομετρητές λαμβάνουν νέες τιμές, σύμφωνα με τον πίνακα *3.2.3.2.4, στη σελίδα 32*.

Το πλεονέκτημα του συγκεκριμένου αλγορίθμού είναι το ότι είναι δίκαιος: *Κάθε σταθμός πρέπει να συναγωνιστεί ξανά, μετά από κάθε μετάδοση, για την απόκτηση πρόσβασης στο μέσο*. Το βασικό μειονέκτημα όμως, είναι το ότι δεν παρέχει εγγυήσεις για την μέγιστη καθυστέρηση που θα υποστούν τα πακέτα. Έτσι, χρονικά ευαίσθητες εφαρμογές, όπως packet voice και video, δε μπορούν να υποστηριχθούν αποδοτικά από την DCF.

3.2.3.3 Point Coordination Function (PCF)

Η PCF είναι μια προαιρετικά υποστηριζόμενη λειτουργία του ασύρματου δικτύου και βασίζεται στον PC (*Point Coordinator*), ο οποίος έχει αναλάβει τη διαδικασία επιλογής του κόμβου που θα μεταδώσει για κάποια συγκεκριμένη χρονική διάρκεια. Οι κινητοί σταθμοί δε χρειάζεται πλέον να συναγωνιστούν για την απόκτηση πρόσβασης στο κανάλι. Συνήθως οι λειτουργίες που έχουν ανατεθεί στον PC εκτελούνται από το Access Point (*AP*). Ο τρόπος επιλογής της σειράς με την οποία θα μεταδώσουν οι σταθμοί μπορεί να επιλεγεί από τον κατασκευαστή. Η PCF έχει υλοποιηθεί προκειμένου να υποστηρίζονται ευαίσθητες, σε χρονικές καθυστερήσεις, εφαρμογές.

Όπως γίνεται κατανοητό, για να λειτουργήσει η PCF είναι απαραίτητη η παρουσία ενός AP. Όλοι οι ασύρματοι κόμβοι υπακούουν στους κανόνες πρόσβασης στο μέσο, κανόνες οι οποίοι καθορίζονται από την PCF. Καθώς η υποστήριξη PCF από ένα 802.11 είναι προαιρετική, είναι επίσης επιλογή ενός κόμβου για το αν θα υποστηρίζει PCF ή όχι. Όταν το AP δίνει εντολή σε ένα σταθμό για μετάδοση, ο σταθμός έχει τη δυνατότητα να μεταδώσει μόνο ένα πακέτο, το οποίο μπορεί να προορίζεται προς οποιονδήποτε δέκτη, κι όχι μόνο το AP/PC. Αν έρθει θετική επιβεβαίωση στον πομπό, τότε αυτός γνωρίζει ότι το πακέτο του έχει παραληφθεί σωστά. Διαφορετικά, ο πομπός δε μπορεί να επιχειρήσει επαναμετάδοση του πακέτου, προτού έρθει ξανά εντολή από το PC για μετάδοση.

Η επιβεβαίωση σε έναν πομπό αποστέλλεται στο ίδιο χρονικό διάστημα, κατά το οποίο το PC επικοινωνεί με τον επόμενο κόμβο, αφού δεν πρέπει να ξεχνούμε, ότι το μέσο διάδοσης είναι ο αέρας, οπότε ό,τι εκπέμπεται, παραλαμβάνεται από όλους. Ως αποτέλεσμα, η εκπεμπόμενη επιβεβαίωση προς ένα σταθμό, (μαζί με πληροφορία εκπεμπόμενη προς τον επόμενο σταθμό) θα φτάσει στον προορισμό της, παρόλο που θα επεξεργαστεί από όλους τους κόμβους.

Όπως έχουμε πει, το πρωτόκολλο μπορεί να εναλλάσσει τη λειτουργία του μεταξύ δύο τρόπων: με ανταγωνισμό και χωρίς ανταγωνισμό σταθμών. Η PCF ελέγχει την λειτουργία χωρίς ανταγωνισμό (*CFP – Contention Free Period*). Στο ξεκίνημα της CFP, το PC ελέγχει τη διαθεσιμότητα του μέσου. Όταν το μέσο θεωρηθεί ότι είναι διαθέσιμο για χρόνο μεγαλύτερο από PIFS, τότε το PC στέλνει ένα σήμα (*beacon*), ενδεικτικό του ότι έχει ξεκινήσει η λειτουργία CFP. Μετά τη μετάδοση του beacon, το PC περιμένει (τουλάχιστον) χρόνο SIFS, κι έπειτα μεταδίδει ένα από τα επόμενα:

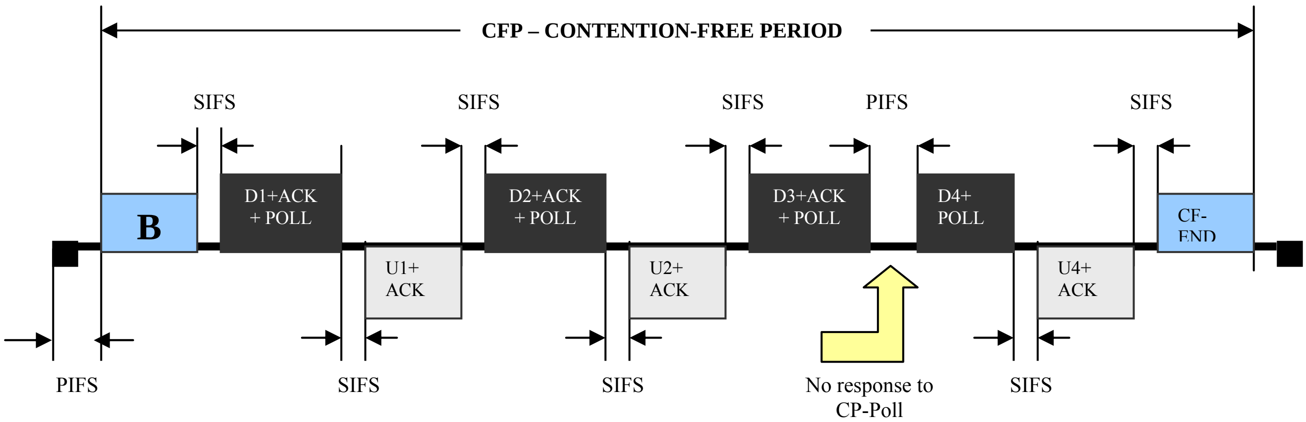
- Ένα frame δεδομένων (*Data frame*),
- Ένα frame εγκαθίδρυσης επικοινωνίας με σταθμό (*CF-Poll frame*),
- Ένα data frame και ένα CF-Poll frame μαζί,
- Ένα frame ειδοποίησης ότι τελείωσε η CFP (*CF-End frame*).

Αν δεν υπάρχουν πακέτα προς αποστολή, ούτε από το AP αλλά ούτε κι από τους κόμβους, τότε το PC μπορεί να τερματίσει την CFP, αμέσως μετά την αποστολή του beacon!

Εν γένει, κατά τη διάρκεια της PCF, οι ασύρματοι κόμβοι ανταλλάσσουν πακέτα μεταξύ τους, μέσω του AP. Αυτό σημαίνει ότι το AP συνομιλεί με καθένα από τους κόμβους, στέλνοντας πακέτα σε αυτούς (που προέρχονται από άλλους σταθμούς) και παραλαμβάνοντας πακέτα που προορίζονται προς άλλους σταθμούς. Όταν δίνεται η δυνατότητα σε ένα σταθμό να μεταδώσει, τότε ο σταθμός αυτός μπορεί να διατηρήσει τον έλεγχο του καναλιού για κάποιο προκαθορισμένο χρονικό διάστημα. Το χρονικό αυτό διάστημα είναι κανονισμένο έτσι ώστε να αρκεί για την μετάδοση ενός πακέτου και την παραλαβή της επιβεβαίωσης. Σε περίπτωση που ο σταθμός καταλάβει από την αρχή, ότι ο χρόνος που του έχει ανατεθεί δεν είναι αρκετός, τότε αναβάλλει τη μετάδοση και στέλνει ειδοποίηση στο AP.

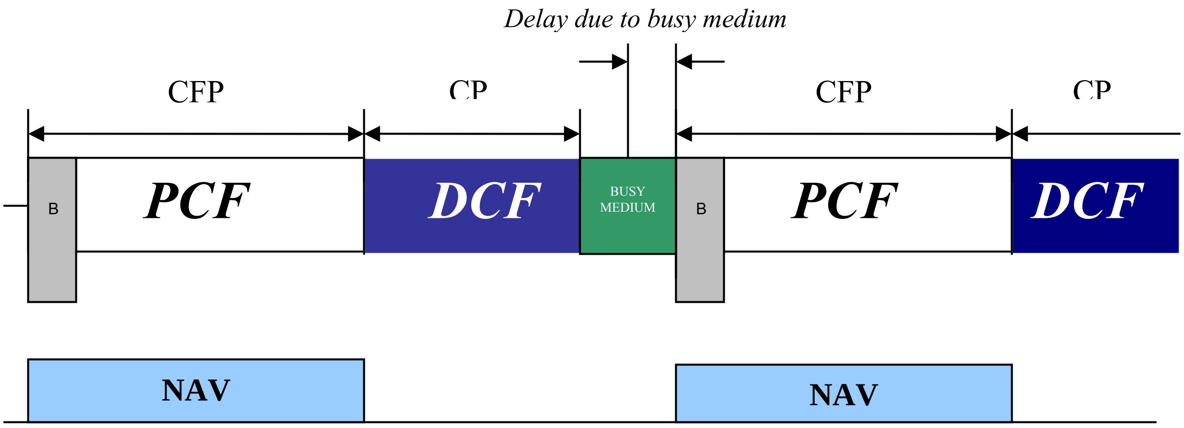
Το PC διατηρεί μια λίστα (*Polling list*) με τους σταθμούς που συμμετέχουν στην PCF. Κάθε φορά, το AP/PC επικοινωνεί με το σταθμό που βρίσκεται στην κορυφή της λίστας. Εφόσον ο σταθμός που βρίσκεται στην κορυφή της λίστας ολοκληρώσει τη μετάδοση του, τότε μπαίνει στο τέλος της λίστας, και τη θέση της κορυφής παίρνει ο επόμενος σταθμός (Round Robin). Το PC έχει τη δυνατότητα να βγάλει από τη λίστα ένα σταθμό, για κάποιο χρονικό διάστημα, αν παρατηρήσει ότι ο συγκεκριμένος σταθμός δεν έχει τίποτα να μεταδώσει για κάποιο συνεχόμενο αριθμό φορών επικοινωνίας AP - κόμβου. Αν δηλαδή ο κόμβος δεν έχει να στείλει τίποτα για ***k*** συνεχόμενες φορές που ερωτάται, τότε μπορεί να βγει εκτός λίστας για κάποιο χρόνο. Πρέπει να σημειωθεί βέβαια, ότι κατά την PCF, ένας σταθμός μπορεί να στείλει δεδομένα απευθείας σε κάποιον άλλο, χωρίς τα δεδομένα αυτά να περάσουν από το AP. Ωστόσο, το πρότυπο του 802.11 [1, 2] δεν αναφέρει λεπτομέρειες για τον τρόπο αυτό λειτουργίας.

Ένα παράδειγμα μεταφοράς frames κατά την PCF, με μετάδοση πακέτων μέσω AP, φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί:



Σχήμα 3.2.3.2.5: Παράδειγμα μετάδοσης στην PCF

Ενώ η PCF ελέγχει την πρόσβαση στο κανάλι κατά την CFP, η DCF κάνει αυτό τον έλεγχο κατά την CF (*Contention Period*), την οποία έχουμε αναλύσει εκτενώς παραπάνω. Το 802.11 μπορεί να εναλλάσσει περιοδικά τη λειτουργία των δύο αυτών συναρτήσεων, έτσι ώστε η μια να ακολουθεί την άλλη μετά από προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα. Έτσι, κατά τη διάρκεια της CFP, ο έλεγχος του καναλιού βρίσκεται στην ευθύνη της PCF, κι έπειτα από κάποιο χρονικό διάστημα περνά στην DCF. Ξεχωριστά, οι δύο αυτές συναρτήσεις λειτουργούν με τον τρόπο που περιγράφηκε παραπάνω. Κατά τη διάρκεια της PCF, το AP καθορίζει τον επόμενο σταθμό που μεταδίδει (είτε προς το AP, είτε απευθείας προς έναν άλλο σταθμό), ενώ κατά την διάρκεια της DCF οι ασύρματοι κόμβοι συναγωνίζονται βάσει του πρωτοκόλλου CSMA-CA, προκειμένου να μεταδώσουν. Η εναλλασσόμενη λειτουργία φαίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα:



B: Beacon, PCF: Point Coordination Function, DCF: Distributed Coordination Function, CP: Contention Period, CFP: Contention Free Period, NAV: Network Allocation Vector

Σχήμα 3.2.3.2.6: Εναλλαγή CFP/CP

Η χρονική διάρκεια της CFP καθορίζεται από το PC, μέσω μιας παραμέτρου (*CFP-MaxDuration*). Γενικά, όπως σε όλα σχεδόν τα πρωτόκολλα, έτσι και στο 802.11 έχει προβλεφθεί η πιθανότητα μιας παράτασης της PCF ή της DCF, ώστε να ολοκληρωθεί μια μετάδοση frame, που λαμβάνει χώρα τη στιγμή κατά την οποία τελειώνει η διάρκεια της PCF ή DCF. Το PC μπορεί να τερματίζει την CFP πριν το πέρας του χρονικού διαστήματος CFP-MaxDuration, ανάλογα με το φόρτο του δικτύου και το μέγεθος της λίστας των σταθμών (*Polling list*). Πάντως, στην περίπτωση που το μέσο είναι απασχολημένο, λόγω κίνησης στην DCF, το σήμα έναρξης της CFP (beacon) θα καθυστερήσει όσο απαιτείται για να ολοκληρωθεί η λειτουργία της CP, με το τέλος της παρούσας μετάδοσης.

Κάτι το οποίο πρέπει να τονιστεί εδώ, είναι ότι το beacon εκπέμπεται για να ενημερώσει τους σταθμούς για την έναρξη της CFP. Έτσι οι κόμβοι ενημερώνουν το NAV τους, βάσει του CFP-MaxDuration, ώστε να γνωρίζουν πότε θα ξεκινήσει ξανά η DCF. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, καθώς μπορεί να υπάρχουν σταθμοί που δεν επιθυμούν να συμμετάσχουν στην CFP. Επιπλέον, ενημέρωση του NAV μειώνει την πιθανότητα κάποιοι κρυμμένοι σταθμοί να προσπαθήσουν να αποκτήσουν πρόσβαση στο κανάλι κατά την CFP. Ο βασικός λόγος πάντως, για τον οποίο εισάγεται μηχανισμός ενημέρωσης του NAV στην CFP, είναι για τη διευκόλυνση της λειτουργίας του πρωτοκόλλου, όταν υπάρχουν πολλά BSS σε μια περιοχή, που λειτουργούν με PCF.

Αξίζει ακόμα να σημειωθεί, ότι ένας σταθμός που συμμετέχει στην PCF, μπορεί να στέλνει πακέτα με αποδέκτη ένα σταθμό που είτε μετέχει, είτε δε μετέχει σε αυτήν (*οπότε αν ο αποδέκτης του πακέτου δε μετέχει, δε μεταδίδει παρά μόνο επιβεβαιώσεις, μέχρι να έρθει πάλι η κατάσταση με DCF*). Σε οποιαδήποτε από τις δύο περιπτώσεις ο πομπός λαμβάνει επιβεβαίωση, είτε μέσω του AP, είτε απευθείας από τον παραλήπτη του πακέτου. (*Επειδή δεν εξετάζουμε τέτοια περίπτωση στα πλαίσια αυτής της εργασίας, δε θα επεκταθούμε περισσότερο πάνω σε αυτό το θέμα)*.

Τελειώνοντας με την περιγραφή του επιπέδου ζεύξης δεδομένων, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι, λόγω των δύο διαφορετικών τρόπων λειτουργίας του πρωτοκόλλου, μπορούμε να μεταδίδουμε διαφορετικού είδους δεδομένα σε κάθε κατάσταση. Έτσι, μπορούμε να αφιερώσουμε τη χρονική διάρκεια της PCF για μετάδοση δεδομένων που είναι ευαίσθητα σε χρονικές καθυστερήσεις, αφήνοντας δεδομένα άλλου τύπου να μεταδίδονται κατά την DCF. Πράγματι, χρονικά ευαίσθητα δεδομένα δε μπορούν να μεταδίδονται αποδοτικά, όταν υπόκεινται σε συνεχείς συγκρούσεις, με συνέπεια να αντιμετωπίζουν σημαντικές καθυστερήσεις. Υπερβολικές καθυστερήσεις σε τέτοια πακέτα είναι καταστροφικές, μιας και μετά το πέρας συγκεκριμένου χρόνου ζωής τους στο σύστημα απορρίπτονται, γιατί θεωρούνται πλέον άχρηστα στην εφαρμογή που τρέχει στο επίπεδο εφαρμογών. Εφόσον η PCF δίνει τη δυνατότητα σε κάθε σταθμό για μετάδοση με ένα προκαθορισμένο μοντέλο, δίνεται ουσιαστικά εγγύηση για μια μέγιστη καθυστέρηση πρόσβασης στο σύστημα. Αντίθετα, δεδομένα, για τα οποία δε μας ενδιαφέρει η παράδοση μέσα σε καθορισμένα χρονικά πλαίσια, όπως πακέτα αρχείων που μεταφέρονται μέσω FTP ή μηνυμάτων e-mail, μπορούν να περιμένουν περισσότερο, οπότε μεταδίδονται συνήθως κατά την DCF. Ένα μειονέκτημα της PCF είναι το ότι, ένα μόνο σημείο πρόσβασης (*AP*) πρέπει να έχει τον έλεγχο του καναλιού και να δίνει εντολές μετάδοσης σε όλους τους κόμβους, κάτι το οποίο είναι αναποτελεσματικό σε δίκτυα μεγάλης έκτασης. Φυσικά, κανείς δεν απαγορεύει τη χρήση PCF για τη μεταφορά οποιουδήποτε είδους δεδομένων, παρά μόνο ίσως ο αγοραστής του συστήματος, ο οποίος πρέπει να υπολογίσει την αγορά Access Point κι επιπλέον λογισμικού.

3.2.4 Εισαγωγή σταθμού στο δίκτυο (Joining – Association)

Όταν ένας σταθμός θέλει να έχει πρόσβαση σε ένα BSS, μπορεί να λάβει πληροφορία πρόσβασης με δύο διαφορετικούς τρόπους:

- ***Passive Scanning***: Ο σταθμός περιμένει ένα σήμα (*Beacon*) από το AP, το οποίο περιέχει πληροφορία συγχρονισμού.
- ***Active Scanning***: Ο σταθμός προσπαθεί να βρει ένα AP μέσω της μετάδοσης "*Probe Request Frames*" και περιμένει απάντηση από το AP ("*Probe Response*").

Εφόσον ο σταθμός αναγνωριστεί, ξεκινά η διαδικασία εισαγωγής στο δίκτυο (*association process*). Αυτή περιλαμβάνει ανταλλαγή πληροφοριών για τα χαρακτηριστικά σταθμών και BSS, κάτι το οποίο επιτρέπει στο AP να γνωρίζει την παρούσα θέση των σταθμών. Χωρίς διαδικασία εισαγωγής, ένας σταθμός δε μπορεί να στείλει ή να λάβει πακέτα.

3.2.5 Περιαγωγή (Roaming)

Η περιαγωγή είναι η μετακίνηση από κυψέλη σε κυψέλη σε WLANs, χωρίς να χάνεται η σύνδεση του κινητού σταθμού με το δίκτυο. Η λειτουργία αυτή είναι παρόμοια με αυτή των κινητών επικοινωνιών (*handover*) [24], ωστόσο υπάρχουν δύο βασικές διαφορές:

- Σε ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο, μέσα από το οποίο μεταφέρεται πληροφορία με μορφή πακέτων (*packet-based*), η μετακίνηση από τη μία κυψέλη στην άλλη μπορεί να γίνει μεταξύ των μεταδόσεων δύο πακέτων, σε αντίθεση με την κινητή τηλεφωνία, όπου η μετακίνηση λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια της συνομιλίας. Η διαφορά αυτή καθιστά την περιαγωγή σε WLANs ευκολότερη.
- Σε ένα σύστημα κινητής τηλεφωνίας, μια προσωρινή διακοπή μπορεί να μην επηρεάσει τη συνομιλία, ενώ σε ένα WLAN μειώνει σημαντικά την απόδοση του δικτύου, καθώς απαιτούνται επαναμεταδόσεις των πακέτων που χάνονται κατά την αλλαγή κυψέλης.

Το 802.11 δεν καθορίζει συγκεκριμένο τρόπο roaming ωστόσο προσδιορίζει τα εργαλεία: Active/Passive scanning, association, κτλ.

3.2.6 Παρεχόμενη ασφάλεια στις μεταδόσεις

Το 802.11 μπορεί να χρησιμοποιήσει μηχανισμούς κρυπτογράφησης, που είναι γνωστοί ως Ισοδύναμη Ενσύρματη Μυστικότητα (*WEP – Wired Equivalent Privacy*). Για ασφαλή μετάδοση, το πρωτόκολλο παρέχει προαιρετική κρυπτογράφηση χρησιμοποιώντας ένα διαμοιραζόμενο κλειδί των 40 bits. Την κρυπτογράφηση έχει αναλάβει ο αλγόριθμος RC4 PRNG από την εταιρία RSA Data Security [7,*http://www.rsasecurity.com*]. Όλα τα δεδομένα, που αποστέλλονται και παραλαμβάνονται μεταξύ ενός σταθμού και του AP, μπορούν να κρυπτογραφηθούν χρησιμοποιώντας το κλειδί αυτό. Εκτός αυτού, όταν το σύστημα κρυπτογράφησης είναι ενεργοποιημένο, το AP θα δημιουργήσει και θα στείλει ένα ειδικά κρυπτογραφημένο πακέτο – πρόκληση (*encrypted challenge packet*) σε οποιονδήποτε σταθμό προσπαθεί να μπει στο δίκτυο. Για να μπει τελικά ο κόμβος αυτός στο δίκτυο πρέπει να λάβει το πακέτο και να χρησιμοποιήσει το κλειδί, προκειμένου να κρυπτογραφήσει την απάντηση και να τη στείλει πίσω στο AP. Αν το AP θεωρήσει ότι η διαδικασία έγινε σωστά, τότε δίνει άδεια στο σταθμό να γίνει μέλος του δικτύου.

3.3 Εκδόσεις του 802.11 και βασικές διαφορές μεταξύ τους

Οι προδιαγραφές του πρωτοκόλλου IEEE 802.11 αφορούν μόνο το φυσικό επίπεδο και το επίπεδο ζεύξης δεδομένων. Η πρώτη έκδοση του πρωτοκόλλου έγινε επίσημα διαθέσιμη το 1997 και, όπως είδαμε, ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων μπορούσε να φτάσει το 1 Mbps, ή 2 Mbps, ανάλογα με την υλοποίηση που ακολουθείται στο φυσικό επίπεδο, όπως εξηγήθηκε στην παράγραφο *3.2.2*. Με εξαίρεση μια ή δύο περιπτώσεις, όλες οι επόμενες εκδόσεις του πρωτοκόλλου διαφέρουν μόνο στην υλοποίηση του φυσικού επιπέδου, ενώ το επίπεδο ζεύξης δεδομένων παραμένει το ίδιο.

Η έκδοση 802.11b χρησιμοποιεί CCK, μπορεί να υποστηρίξει ρυθμούς μετάδοσης 5,5 Mbps και 11 Mbps και είναι η έκδοση η οποία έχει επικρατήσει κατά κόρον στην παγκόσμια αγορά. Ωστόσο, εκδόσεις που έχουν βγει τελευταία, ή βρίσκονται υπό υλοποίηση, αναμένεται να είναι πολύ ταχύτερες. Το 802.11g είναι επέκταση του 802.11b και παρέχει μέγιστο ρυθμό μετάδοσης 54 Mbps. Χρησιμοποιεί OFDM *(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)* ενώ το μεταδιδόμενο σήμα καταναλώνει περί τα 30 MHz. Έχει τις ίδιες δυσκολίες ανάθεσης καναλιών με το 802.11b, σε περιβάλλον με πολλούς χρήστες. Αναμένεται να είναι επίσημα διαθέσιμο στα μέσα του 2003. Το 802.11a διαφέρει στο ότι λειτουργεί στη μπάντα των 5MHz με 12 μη αλληλοεπικαλυπτόμενα κανάλια. Έτσι μπορούν να συνυπάρχουν πάνω από 12 Access Points. Επίσης, παρεμβολές λόγω RF είναι μικρότερες από ό,τι στο 802.11g. Το βασικό πρόβλημα που παρουσιάζει είναι το ότι δεν είναι απευθείας συμβατό με τα 802.11b και 802.11g. Ωστόσο, ανεπίσημα έχουν βγει προϊόντα που διορθώνουν το μειονέκτημα αυτό. Επιπλέον, η έκδοση 802.11e θα παρέχει επίσης ρυθμούς 54 Mbps. Η έκδοση αυτή έχει και κάποιες διαφορές στο επίπεδο ζεύξης δεδομένων, καθώς έχει σχεδιαστεί ειδικά για να υποστηρίζει διαφοροποιημένες υπηρεσίες (*differentiated services*). Η επίσημη έκδοση αναμένεται στις αρχές του 2004.

Πώς μπορεί λοιπόν κάποιος να αποφασίσει για το ποια έκδοση πρέπει να αγοράσει; Πλέον το δίλημμα είναι μεταξύ 802.11g και 802.11a, καθώς το 802.11e θα αργήσει αρκετά, ενώ το 802.11b είναι αρκετά παλιό κι αργό σε σχέση με τις νεότερες εκδόσεις. Τόσο το 802.11g όσο και το 802.11a χρησιμοποιούν OFDM. Η έκδοση “a” παρέχει μεγαλύτερη χωρητικότητα και επηρεάζεται λιγότερο από RF παρεμβολές. Ακόμη είναι φθηνότερο, ωστόσο ασύμβατο με άλλες εκδόσεις. Έτσι θα μπορούσε να το αγοράσει κανείς, αν πρόκειται να στήσει το δίκτυο από την αρχή κι αν απαιτείται η λειτουργία του όσο συντομότερα γίνεται. Από την άλλη, κάποιος θα μπορούσε να αγοράσει προϊόντα “g” αν έχει ήδη εγκατεστημένη 802.11b υποδομή κι επιθυμεί να κάνει αναβάθμιση. Διάφοροι παράγοντες, τους οποίους πρέπει να λάβει κανείς υπόψη του πριν επιλέξει μια έκδοση ασύρματου δικτύου, παρατίθενται στο 5^{ο} κεφάλαιο. Πάντως, για περιβάλλον με ιδιαίτερες ανάγκες σε ταχύτητα, όπως τηλεδιάσκεψη και μεγάλες ταχύτητες για μεταφορά δεδομένων, παλιές εκδόσεις του πρωτοκόλλου (802.11 και 802.11b) δεν υποστηρίζουν μεγάλο αριθμό χρηστών, συμπέρασμα που τεκμηριώνεται αναλυτικά από τα πειράματα που έγιναν στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας, τα οποία παρατίθενται συνοπτικά στο κεφάλαιο 4.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Ανάλυση σεναρίων κίνησης στο IEEE 802.11

4.1 Γενικά

Μετά την εκτενή περιγραφή και ανάλυση της λειτουργίας του πρωτοκόλλου που προηγήθηκε στο κεφάλαιο 3, προχωρήσαμε στην προσομοίωση του πρωτοκόλλου, εξετάζοντας διάφορα σενάρια κίνησης και παρατηρώντας την απόδοση και τη γενική συμπεριφορά του. Τα σενάρια σχετίζονται με την ενοποιημένη μετάδοση πληροφορίας τηλεδιάσκεψης MPEG και δεδομένων. Έτσι, θεωρούμε κάποιες περιπτώσεις λειτουργίας του συστήματος, όπου ορισμένοι ασύρματοι κόμβοι βρίσκονται σε τηλεδιάσκεψη πραγματικού χρόνου, ενώ παράλληλα ανταλλάσσουν και δεδομένα μεταξύ τους. Στόχος της προσομοίωσης είναι να εξάγουμε συμπεράσματα, σχετικά με το κατά πόσο μπορεί να λειτουργήσει αποδοτικά το πρωτόκολλο σε ποικίλες καταστάσεις κίνησης (με πολλούς ή λίγους χρήστες, που στέλνουν πολλά ή λίγα δεδομένα).

Θεωρούμε ότι έχουμε ένα περιβάλλον απαλλαγμένο από θόρυβο κι άρα δεν έχουμε επαναμεταδόσεις λόγω χαμένων από θόρυβο πακέτων. Επίσης, έχουμε αγνοήσει το πρόβλημα των κρυμμένων σταθμών (*hidden nodes*). Στα σενάρια που προσομοιώσαμε, θεωρήσαμε ότι υπάρχει ένας αριθμός χρηστών, που βρίσκονται σε σχετικά κοντινή απόσταση μεταξύ τους και οι οποίοι θέλουν να τρέξουν μια κοινή εφαρμογή τηλεδιάσκεψης (*videoconference*). Ταυτόχρονα, οι χρήστες αυτοί θα έχουν τη δυνατότητα να ανταλλάσσουν πακέτα δεδομένων σταθερού μεγέθους. Αρχικά, η ποιότητα του video που γεννάται κι ανταλλάσσεται μεταξύ των χρηστών είναι χαμηλή. Ειδικότερα, υποθέσαμε ότι το video πραγματικού χρόνου έχει μέσο ρυθμό άφιξης bits 42 Kbps και μέγιστο ρυθμό 690 Kbps, κάτι το οποίο σημαίνει ότι ο ρυθμός άφιξης πληροφορίας video, που θα σταλεί από τους πομπούς, υφίσταται αρκετές διακυμάνσεις. Επιπρόσθετα, τα δεδομένα (*data*) που αποστέλλονται, χωρίζονται σε πακέτα σταθερού μεγέθους 53 bytes, δηλαδή αναφερόμαστε σε πακέτα ATM (*Asynchronous Transfer Mode*) [19].

4.2 Ο προσομοιωτής που χρησιμοποιήθηκε

Για τη διεξαγωγή μετρήσεων, ήταν απαραίτητη η εξ' αρχής κατασκευή ενός προσομοιωτή. Όπως έχουμε αναφέρει, ο προσομοιωτής δεν περιλαμβάνει περιπτώσεις περιβάλλοντος θορύβου ή κρυμμένων σταθμών (*hidden nodes*). Γενικά η υλοποίηση προσομοιωτή για το πρωτόκολλο αυτό είναι μια εξαιρετικά δύσκολη υπόθεση, λόγω της μεγάλης πολυπλοκότητας του πρωτοκόλλου. Για τον προσομοιωτή που χρησιμοποιήσαμε, πρέπει να πούμε ότι σχεδιάστηκε βάσει των σεναρίων κίνησης που εφαρμόστηκαν σε αυτόν, ενώ δεν θα ήταν δυνατή η πλήρης απεικόνιση της λειτουργίας του 802.11. Κατά συνέπεια, έχουν γίνει ορισμένες παραδοχές για τη λειτουργία του πρωτοκόλλου, αφενός λόγω του ότι δε μπορούσαν να βρεθούν μέσα στο πρότυπο [1, 2] κάποια συγκεκριμένα χαρακτηριστικά λειτουργίας, κι αφετέρου επειδή ο προγραμματισμός – υλοποίηση κώδικα που θα αναπαριστούσε τις λειτουργίες αυτές ήταν πραγματικά δύσκολος.

Πιο συγκεκριμένα, μερικές από τιμές των χαρακτηριστικών λειτουργίας του 802.11, είτε δε μπόρεσαν να βρεθούν, είτε αφήνονται, σύμφωνα με το πρότυπο, στην κρίση του διαχειριστή (*administrator*). Έτσι, με βάση στοιχεία της βιβλιογραφίας, εισάγαμε τιμές που έχουν χρησιμοποιηθεί σε παλιότερες προσομοιώσεις του 802.11, ενώ τις τιμές που καθορίζονται από τον διαχειριστή, τις εισάγαμε βάσει παρατηρήσεων της γενικότερης δομής του πρωτοκόλλου. Εξάλλου, μεταβάλλοντας πολλές φορές τις τελευταίες αυτές τιμές, παρατηρήσαμε ότι τα αποτελέσματα δε διαφέρουν αισθητά, δηλαδή δε διαμορφώνουν τις τάσεις των συμπερασμάτων που εξάγουμε. Όπως είναι φυσικό, οι μετρήσεις που λάβαμε από την προσομοίωση δεν είναι οι ίδιες με αυτές που θα λαμβάναμε αν είχαμε ένα τέλειο προσομοιωτή. Ωστόσο, παρόλο που οι μετρήσεις αυτές μπορεί να παρουσιάζουν κάποιες (μικρές ελπίζουμε) αποκλίσεις από αυτές μιας τέλειας προσομοίωσης, είναι αρκετές και ικανές ώστε να μας δώσουν σημαντικά αποτελέσματα και να μας οδηγήσουν σε συμπεράσματα. Το πρωτόκολλο καλύπτει τη συνολική πορεία των πακέτων στο σύστημα, από τη στιγμή που γεννώνται στους σταθμούς, μέχρι τη στιγμή που παραδίδονται στους παραλήπτες τους.

Ο προσομοιωτής αντιπροσωπεύει το όλο σύστημα ως εξής: Κάθε ασύρματος κόμβος έχει δύο διαφορετικές ουρές, μια για τα πακέτα video και μια για τα πακέτα δεδομένων. Στην ουρά video εισάγονται πακέτα, τα οποία προέρχονται από τον τεμαχισμό (*fragmentation*) των αντίστοιχων video frames. Τα τελευταία διαβάζονται από ένα αρχείο (*trace file*), το οποίο περιέχει 90000 διαφορετικά πραγματικά video frames – ειδικότερα περιέχει το μέγεθός καθενός από τα παραπάνω video frames σε bytes, που αντιστοιχούν σε μια ώρα “playback time” του video. Έτσι, κάθε 40 msecs διαβάζεται ένα νέο video frame και εισάγεται στην ουρά video του σταθμού. Κάθε σταθμός έχει το δικό του αρχείο, διαφορετικό από αυτό των άλλων, με την έννοια ότι κάθε 40 msecs διαβάζονται διαφορετικά video frames από τους σταθμούς. Τα frames αυτά τεμαχίζονται σε πακέτα αν χρειάζεται, κι έπειτα εισάγονται στις ουρές για να μεταδοθούν. Επιπλέον, η ουρά δεδομένων γεμίζει βάσει μιας διαδικασίας αφίξεων ATM πακέτων Poisson, με ρυθμό $\boldsymbol{\lambda}$, όπως αναφέρουμε παρακάτω. Το σύστημα των σταθμών υλοποιείται σαν μια κυκλική ουρά, ώστε να εφαρμόζεται ο αλγόριθμος *round robin*. Κάθε κόμβος της κυκλικής ουράς περιέχει την αντίστοιχη απλή ουρά του σταθμού. Και βέβαια, έχουμε δύο διαφορετικές κυκλικές ουρές, μια για το video και μια για τα δεδομένα. Στο AP έχουμε μια ανάλογη διάταξη για τα video: Υπάρχει μια κυκλική ουρά, κόμβοι της οποίας είναι απλές ουρές. Όταν ένα πακέτο φτάσει στο AP, μπαίνει στην αντίστοιχη ουρά του σταθμού για τον οποίο προορίζεται, οπότε όταν το AP επικοινωνήσει με εκείνο το σταθμό, του στέλνει πακέτα από την αντίστοιχη ουρά. Για τα δεδομένα δεν απαιτείται τέτοια υλοποίηση στο AP, καθώς τα πακέτα δεδομένων στέλνονται απευθείας μεταξύ κόμβων (στο DCF) και όχι μέσω του AP (*για την προσομοίωση*).

Ο προσομοιωτής είναι “*time – triggering*”. Θεωρούμε την ύπαρξη ενός ελάχιστου χρονικού διαστήματος (*slot – 1μsec*) και αντιπροσωπεύουμε όλες τις χρονικές σταθερές του πρωτοκόλλου, ως πολλαπλάσια του διαστήματος αυτού. Ο προσομοιωτής υλοποιήθηκε σε γλώσσα προγραμματισμού *C++*, σε περιβάλλον UNIX *(Linux Mandrake 8.2),* με χρήση ενός υπολογιστή Intel Pentium 4, στα 1,7 GHz και με μνήμη 256 Mbytes. Στο ίδιο περιβάλλον μάλιστα, τρέξαμε και τις προσομοιώσεις.

4.3 *Σενάριο 1^ο*: Πλήρης τηλεδιάσκεψη & ταυτόχρονη μετάδοση δεδομένων

4.3.1 Ανάλυση σεναρίου και παραδοχές

Το σενάριο αυτό είναι το πρώτο το οποίο εξετάσαμε. Θεωρούμε ότι σε ένα BSS υπάρχει ένας αριθμός χρηστών που βρίσκονται σε κοινή τηλεδιάσκεψη, υπό το IEEE 802.11b, με ρυθμό μετάδοσης στα 11Mbps. Κάθε χρήστης διαθέτει κάμερα που είναι συνδεδεμένη στο φορητό υπολογιστή του και, είτε κινείται μέσα στο BSS είτε μπορεί να βρίσκεται ακίνητος σε κάποιο σημείο του BSS. Εκτός από την εφαρμογή τηλεδιάσκεψης, θεωρούμε ότι ο κινητός χρήστης τρέχει κι άλλες εφαρμογές, εκ των οποίων μια είναι η ανταλλαγή δεδομένων (για παράδειγμα *FTP – File Transfer Protocol*) με άλλους χρήστες του ίδιου δικτύου, οι οποίοι, προς το παρόν, μετέχουν κι αυτοί στην τηλεδιάσκεψη. Το video που εξάγεται από την τηλεδιάσκεψη είναι MPEG4 και ο χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών αφίξεων frames είναι 40 msec. Τα υπόλοιπα δεδομένα (*data*) γεννώνται σύμφωνα με διαδικασία Poisson με ρυθμό αφίξεων ***λ***. Επίσης, υποθέτουμε ότι το πρωτόκολλο χρησιμοποιεί και τους δύο τρόπους λειτουργίας. Έτσι, οι σταθμοί που μεταδίδουν video στέλνουν τα πακέτα video κατά τη διάρκεια της PCF, η οποία άλλωστε έχει σχεδιαστεί ειδικά για μετάδοση χρονικά ευαίσθητων δεδομένων, και ακόμη, στέλνουν ό,τι δεδομένα έχουν κατά την περίοδο DCF, ακολουθώντας τον CSMA-CA αλγόριθμό πρόσβασης στο κανάλι. Υποθέτουμε επίσης, ότι ο κάθε κόμβος μπορεί να κατανοήσει το είδος των πακέτων από τις ξεχωριστές εφαρμογές που τρέχουν σε αυτόν, οπότε να ξέρει ότι κατά την PCF θα στέλνει video ενώ κατά την DCF τα υπόλοιπα δεδομένα.

Πιο συγκεκριμένα, κατά την PCF, το AP διατηρεί μια λίστα με τους κόμβους, οπότε δίνει εντολή για μετάδοση στον κόμβο που κάθε φορά βρίσκεται στην κορυφή της λίστας. Όταν το AP επικοινωνεί με έναν κόμβο, αρχικά του στέλνει ένα πακέτο από αυτά που έχει στον αντίστοιχο buffer του για τον κόμβο αυτό. Έπειτα, ο σταθμός έχει τη δυνατότητα να στείλει ένα μόνο πακέτο προς το AP. Το AP, βάσει της διαδικασίας που έχουμε περιγράψει στο κεφάλαιο 3, θα προωθήσει το πακέτο στον προορισμό του, όταν έρθει η σειρά του τελευταίου να επικοινωνήσει με το AP. Όσον αφορά τη μετάδοση video, όλα τα πακέτα περνούν μέσα από το AP. Θα μπορούσαν να αποστέλλονται απευθείας μεταξύ των κόμβων, ωστόσο, η βασική λειτουργία της PCF προϋποθέτει επικοινωνία μεταξύ κόμβων μέσω του AP και μόνο. Κατά την

DCF, η αποστολή πακέτων γίνεται απευθείας μεταξύ των κόμβων, χωρίς την παραμικρή επέμβαση από το AP.

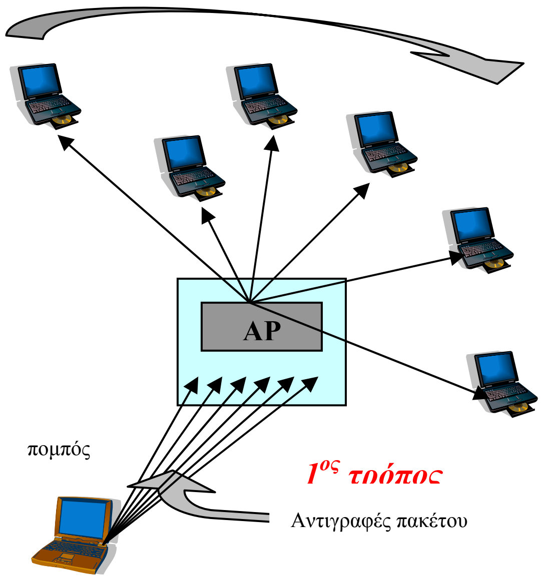
Στην προσομοίωση επίσης, υποθέτουμε ότι όλοι οι τερματικοί σταθμοί ξεκινούν την τηλεδιάσκεψη την ίδια στιγμή. Αυτό σημαίνει ότι όλες οι κάμερες των σταθμών ξεκινούν να λειτουργούν την ίδια χρονική στιγμή, στιγμή κατά την οποία το σύστημα της τηλεδιάσκεψης ξεκινά. Αυτό επισημαίνεται, γιατί ο προσομοιωτής δεν παρέχει κάποια ψευδοτυχαία λειτουργία για τις διαφορετικές χρονικές στιγμές που φτάνουν τα video frames στις ουρές των σταθμών. Θεωρούμε δηλαδή ότι την ίδια χρονική στιγμή t_i φτάνουν video frames στους σταθμούς (ένα στον κάθε σταθμό) και την χρονική στιγμή t_j, με $t_j = t_i$+40msec θα έρθουν τα επόμενα video frames σε όλους τους σταθμούς. Τα video frames τα εξάγαμε από το video trace. Πιο συγκεκριμένα, έχοντας στη διάθεσή μας ένα video trace από πραγματική τηλεδιάσκεψη [12] δημιουργούμε πολλά video traces, επιλέγοντας τυχαία το χρονικό σημείο εκκίνησης εκάστου. Με τον τρόπο αυτό, κάθε ασύρματος σταθμός έχει το δικό του video trace, το οποίο είναι χρονικά διαφορετικό από αυτά των άλλων σταθμών. Όταν λοιπόν έρθει η στιγμή να γεννηθεί ένα νέο video frame στον προσομοιωτή, κάθε κόμβος διαβάζει από το ξεχωριστό trace αρχείο του, το μέγεθος του νέου (διαφορετικού για κάθε κόμβο) video frame.

Όσον αφορά τη λειτουργία διακοπής της PCF όταν δεν υπάρχουν video πακέτα στις ουρές, αυτή (στον προσομοιωτή) λαμβάνει χώρα με τον ακόλουθο *ιδιόρρυθμο* τρόπο: Όταν δεν υπάρχουν πακέτα video στις ουρές, τότε η PCF διακόπτεται αυτομάτως κι όταν έρθουν πακέτα, τότε η PCF ξεκινά πάλι. Αυτό δεν συμβαίνει στην πραγματικότητα, καθώς το AP δεν γνωρίζει ακριβώς το πότε θα έρθουν νέα video πακέτα, ώστε να τρέξει πάλι την PCF. Στην πραγματικότητα, όταν το AP λαμβάνει ειδοποίηση από έναν χρήστη ότι δεν υπάρχει video στην ουρά του, τότε, αν αυτό επαναλαμβάνεται συνεχώς για κάποιο αριθμό φορών, ο σταθμός τίθεται προσωρινά εκτός λίστας (*polling list*). Η λειτουργία αυτή δεν υποστηρίζεται στον προσομοιωτή. Αυτό που γίνεται, είναι να διακόπτεται η PCF όταν όλες οι video ουρές είναι άδειες και να επαναφέρεται όταν έρθουν νέα video frames.

Εκτός των άλλων, θεωρούμε ότι η ίδια η εφαρμογή τηλεδιάσκεψης, που τρέχει στο επίπεδο εφαρμογών, τεμαχίζει τα video frames (*fragmentation*) σε πακέτα συγκεκριμένου μέγιστου αριθμού από bytes (*fragmentation threshold*). Όπως αναφέραμε, όταν ένα video πακέτο υπερβεί το χρόνο ζωής των 40 msecs, θεωρείται παλιό και απορρίπτεται. Κατά συνέπεια, θα απορριφθούν και όλα τα μετέπειτα video πακέτα που ανήκουν στο ίδιο video frame. Θεωρούμε ότι όλα τα πακέτα που τελικά λαμβάνονται σωστά από τους αποδέκτες, μπορούν να χρησιμοποιηθούν από την εφαρμογή της τηλεδιάσκεψης, οπότε δεν απορρίπτονται.

Προκειμένου οι ασύρματοι κόμβοι να βρίσκονται σε τηλεδιάσκεψη, πρέπει το video που γεννά και στέλνει ο κάθε κόμβος να παραλαμβάνεται από όλους τους υπόλοιπους κόμβους. Για να γίνει αυτό, πρέπει ένα video frame που προέρχεται από έναν κόμβο της τηλεδιάσκεψης να αποστέλλεται σε όλους τους άλλους συμμετέχοντες. Έτσι, όταν ένας κόμβος δέχεται ένα video frame/packet, το ίδιο frame/packet έχει αποσταλεί σε όλους τους άλλους κόμβους, εκτός από αυτόν που το έστειλε. Κάτι τέτοιο θα μπορούσε να γίνει εύκολα, αν υποστηριζόταν κάποια λειτουργία broadcasting ή multicasting από το 802.11. Με τον τρόπο αυτό, ένας συμμετέχων θα μπορούσε να στείλει το video πακέτο του σε όλους τους συνδιαλεγόμενούς του με μία μόνο μετάδοση! Δυστυχώς όμως, κάτι τέτοιο δεν υποστηρίζεται από το 802.11, τουλάχιστον όχι για πακέτα δεδομένων (*data*), αλλά μόνο για πακέτα διαχείρισης (*management*) και ελέγχου (*control*). Είμαστε, επομένως, αναγκασμένοι να βρούμε κάποιον άλλο τρόπο, προκειμένου τα πακέτα αυτά να φτάνουν στους προορισμούς τους μέσα στο καθορισμένο διάστημα ζωής των 40 msecs που τους δίνεται, από την στιγμή που γεννώνται στο σύστημα.

Θεωρούμε, ότι υπάρχει ένα πρωτόκολλο μεταφοράς (*transport protocol*), το οποίο αναλαμβάνει την παράδοση πακέτων από άκρο σε άκρο, όπως το UDP, και το οποίο στήνει το μονοπάτι που ακολουθούν τα πακέτα. Έτσι, ένας ασύρματος κόμβος έχει μια ξεχωριστή UDP σύνδεση με κάθε άλλο κόμβο. Μια λύση που προσομοιώθηκε, ήταν η αποστολή των πακέτων ξεχωριστά σε κάθε κόμβο που μετέχει στην τηλεδιάσκεψη ("*multicast through unicast*"). Με τον τρόπο αυτό, ένα πακέτο αντιγράφεται τόσες φορές, όσοι είναι οι παραλήπτες του (*δηλαδή όλοι οι κόμβοι εκτός του πομπού*), και κάθε αντίγραφο αποστέλλεται ξεχωριστά σε κάθε κόμβο. Υπάρχουν δύο τρόποι για να υλοποιηθεί η λειτουργία αυτή:

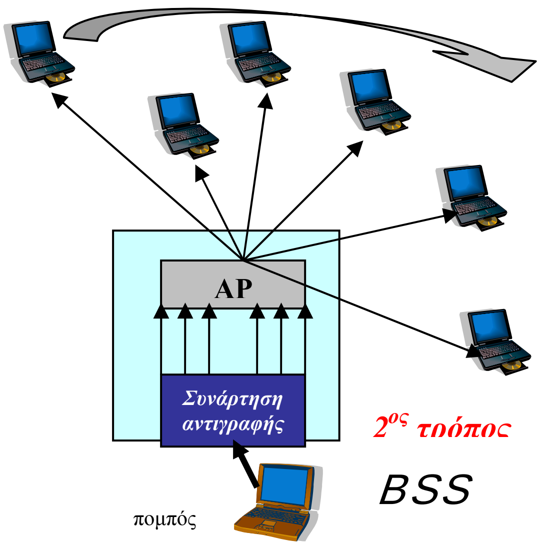


1ος τρόπος:

- Η διαδικασία της αντιγραφής αναλαμβάνεται από το σταθμό που γεννά το προς αντιγραφή πακέτο. Συνεπώς, όταν έρθει η σειρά του σταθμού να επικοινωνήσει με το Access Point, πρέπει να μεταδώσει τόσα αντίγραφα, όσοι είναι και οι υπόλοιποι συμμετέχοντες. Στο σημείο αυτό, υφίστανται δύο σημαντικά προβλήματα: α) δεν επιτρέπεται στον κινητό σταθμό να μεταδώσει συνεχόμενα όλα τα αντίγραφα, καθώς, όταν έρθει η σειρά του σταθμού να μεταδώσει, μπορεί να στείλει μόνο ένα πακέτο. Συνεπώς, αν έχει να μεταδώσει π.χ. 5 αντίγραφα, τότε θα πρέπει να περάσουν τουλάχιστον πέντε κύκλοι στον αλγόριθμο *round robin*, προτού μεταδοθούν όλα και, β) ακόμη και αν είναι εφικτή η σειριακή μετάδοση, όπως γίνεται σε νεότερες εκδόσεις (π.χ. 802.11e), θα περάσει αρκετός συνεχόμενος χρόνος μέχρι να μεταδοθούν όλα τα αντίγραφα. Το πρόβλημα αυτό είναι αρκετά σημαντικό, καθώς τα υπόλοιπα πακέτα, που περιμένουν στις ουρές των άλλων κόμβων, υφίστανται σημαντική καθυστέρηση, οπότε σύντομα «παλιώνουν» και απορρίπτονται από το σύστημα.

2ος τρόπος:

- Η διαδικασία της αντιγραφής αναλαμβάνεται από μια διεργασία που τρέχει πίσω από το Access Point. Στην περίπτωση αυτή είμαστε υποχρεωμένοι να δεχτούμε ότι λειτουργεί μια τέτοια διαδικασία αντιγραφής πακέτων, πίσω από το Access Point. Με την προϋπόθεση αυτή, όταν φτάνει ένα video πακέτο στο Access Point με προορισμό όλους τους άλλους σταθμούς, το Access Point δημιουργεί αντίγραφα του πακέτου, τα τοποθετεί στους buffers του και τα στέλνει στους αντίστοιχους σταθμούς, όταν έρθει η σειρά καθενός να επικοινωνήσει με αυτό. Ακόμα και τότε όμως, έχουμε απώλειες πακέτων. Σε αυτή την περίπτωση παρατηρούνται απώλειες πακέτων στο downlink, παρά στο uplink: το Access Point έχει δημιουργήσει αντιγραφές και δεν προλαβαίνει να τις μεταδώσει όλες, καθώς σε κάποιο χρονικό σημείο, κάποιες από αυτές εξαντλούν το χρονικό όριο των 40 msecs. Αντίθετα με την προηγούμενη περίπτωση, τώρα στο uplink κάθε σταθμός μεταδίδει ένα μόνο πακέτο, οπότε προλαβαίνει να στείλει τα πακέτα που έχει στην ουρά του, στο AP, με σχετικά μικρή καθυστέρηση στην ουρά.



Από τις δύο παραπάνω διαφορετικές υλοποιήσεις μπορούμε να συμπεράνουμε την αισθητή αύξηση στη χωρητικότητα κόμβων του συστήματος, όταν οι αντιγραφές πακέτων συμβαίνουν στο AP κι όχι ξεχωριστά στους κόμβους. ***Από εδώ και στο εξής, θεωρούμε ότι για το συγκεκριμένο σενάριο οι αντιγραφές γίνονται από διεργασία που τρέχει στο AP.***

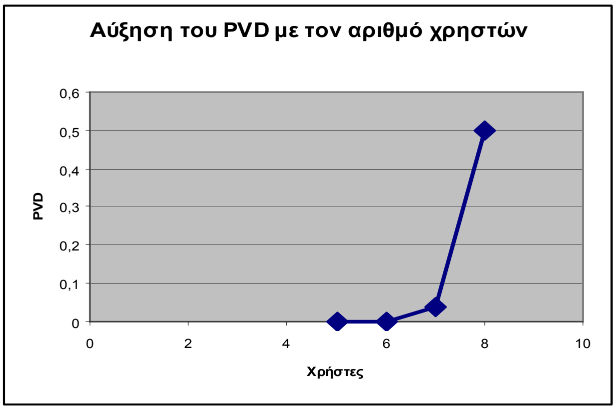
4.3.2 Εύρεση χαρακτηριστικών τιμών του συστήματος για το σενάριο

Βάσει των παραπάνω παραδοχών, προσομοιώσαμε το πρωτόκολλο, χρησιμοποιώντας κάθε φορά διαφορετικές τιμές σε ορισμένες τιμές μεταβλητών και σταθερών του.

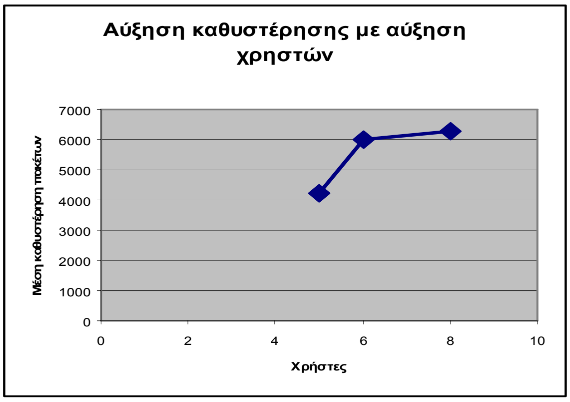
Αρχικά, θεωρούμε ότι η εφαρμογή τηλεδιάσκεψης τεμαχίζει τα video frames που γεννάει, σε πακέτα με κάποιο μέγιστο μέγεθος, το οποίο προς το παρόν θωρούμε ίσο με 1000 bytes. Το video που μεταδίδεται είναι σχετικά χαμηλής ποιότητας, καθώς πρόκειται για τηλεδιάσκεψη, οπότε υπάρχουν κάποιες ανοχές στην ποιότητα της εικόνας του video, το οποίο όπως είπαμε μεταδίδεται κατά την PCF. Έτσι, ο μέσος ρυθμός άφιξης (*mean bit rate*) στους πομπούς είναι 42 Kbps, και ο μέγιστος ρυθμός (*peak bit rate*) είναι 690Kbps. Παρατηρούμε δηλαδή, ότι ενώ ο μέσος ρυθμός είναι αρκετά μικρός, ο μέγιστός είναι αρκετά μεγαλύτερος, οπότε συμβαίνουν αρκετές διακυμάνσεις στο φορτίο video που πρόκειται να μεταδοθεί. Τα video πακέτα έχουν 34 bytes επικεφαλίδα. Επίσης, όπως προαναφέραμε, τα πακέτα δεδομένων, που μεταδίδονται κατά την DCF, είναι σταθερού μεγέθους 53 bytes, και γεννώνται με ρυθμό $\boldsymbol{\lambda} = 4*10^{-4}$, δηλαδή 4 πακέτα ανά 10 msec. Επιπροσθέτως, απαιτούμε να μη χάνονται εν γένει πολλά video πακέτα (λόγω εξάντλησης του ορίου ζωής τους, των 40msecs). Συγκεκριμένα, το:

Packet Video Drop (PVD) = (Συνολικός #χαμένων video πακέτων / Συνολικός #video πακέτων) ≤ 10^{-4}.

Η κάθε προσομοίωση αντιστοιχεί σε 100 sec πραγματικής λειτουργίας του δικτύου, ενώ κάθε PCF διαρκεί 10 msec και η DCF που ακολουθεί, 1 msec. *(Έγιναν προσομοιώσεις και για 500 sec και 1000 sec πραγματικής λειτουργίας, όπου δεν παρατηρήθηκαν διαφορετικά αποτελέσματα).* Βάσει των παραπάνω χαρακτηριστικών και απαιτήσεων, τρέχουμε τον προσομοιωτή προκειμένου να βρούμε τη χωρητικότητα του συστήματος, δηλαδή το μέγιστο αριθμό χρηστών που μπορούν να συμμετέχουν ταυτόχρονα και αποδοτικά στην τηλεδιάσκεψη. Τα ακόλουθα διαγράμματα παρουσιάζουν την αύξηση του κλάσματος των απορριφθέντων video πακέτων (PVD), όπως και τη μεταβολή της μέσης καθυστέρησης, με την αύξηση των χρηστών της τηλεδιάσκεψης στο σύστημα, αντίστοιχα.



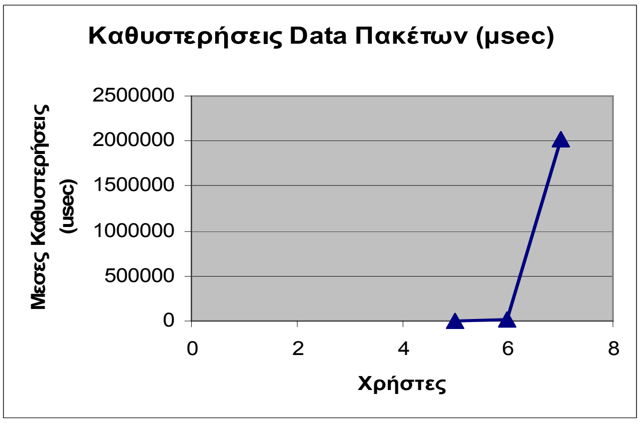
Σχήμα 4.3.2.1:
Σχέση αριθμού χρηστών – PVD

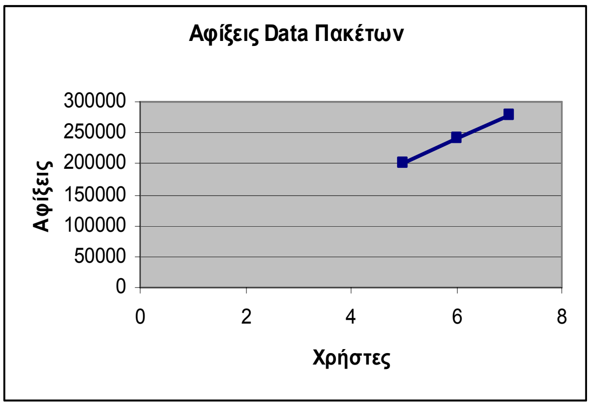


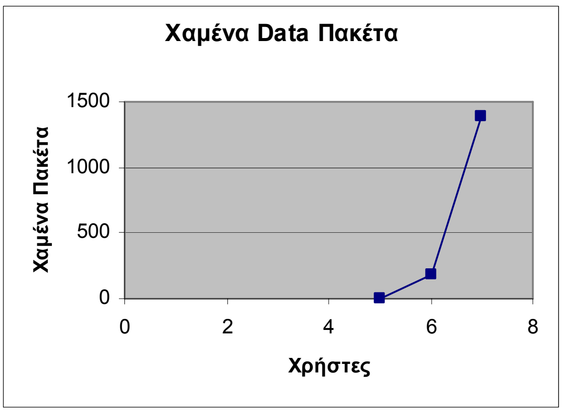
Σχήμα 4.3.2.2:
Σχέση αριθμού χρηστών – Delay(**μsecs**)

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι το σύστημα λειτουργεί αποδοτικά όταν έχει το πολύ 6 χρήστες. Αύξηση του αριθμού των χρηστών σε 7 ή περισσότερους, αυξάνει δραματικά το PVD, σε σημείο, που δεν είναι αποδεκτό για την απαιτούμενη ποιότητα υπηρεσίας (QoS), ενώ, όπως είναι αναμενόμενο, αυξάνεται και η μέση καθυστέρηση video πακέτων στο σύστημα, αφού περισσότερα πακέτα περιμένουν τώρα να μεταδοθούν. Όμως, 6 χρήστες είναι πιθανά σχετικά μικρός αριθμός για το συγκεκριμένο σενάριο εφαρμογής. Σε τι οφείλεται όμως ο μικρός αυτός αριθμός;

Το πρωτόκολλο έχει ένα αρκετά υψηλό overhead. Όλες οι χρονικές δικλείδες ασφαλείας που έχουν επιβληθεί δίνουν ένα αρκετά μικρό χρονικό περιθώριο στους σταθμούς για μετάδοση πακέτων, μειώνοντας έτσι αρκετά το throughput του καναλιού. Όπως παρατηρούμε επίσης, όσον αφορά την DCF, εμφανίζονται σημαντικά προβλήματα καθυστέρησης, με αύξηση χρηστών, κάνοντας το σύστημα ασταθές (κάτι το οποίο εξηγούμε αναλυτικά παρακάτω). Για 6 χρήστες ωστόσο, οι χρονικές καθυστερήσεις των πακέτων είναι σχετικά μικρές, ενώ επίσης τα χαμένα πακέτα είναι λίγα, όπως φαίνεται κι από τα διαγράμματα που ακολουθούν:

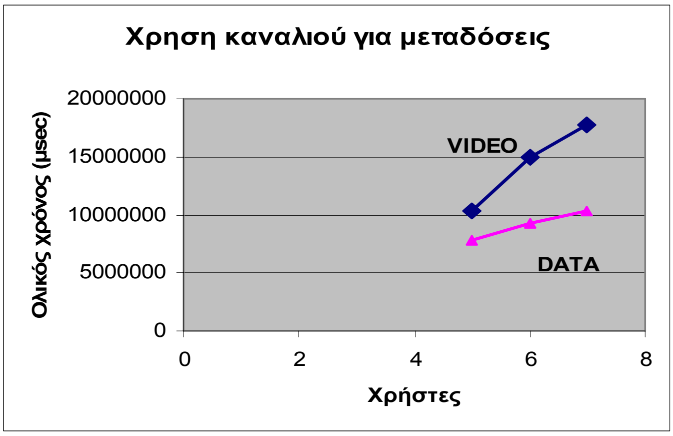






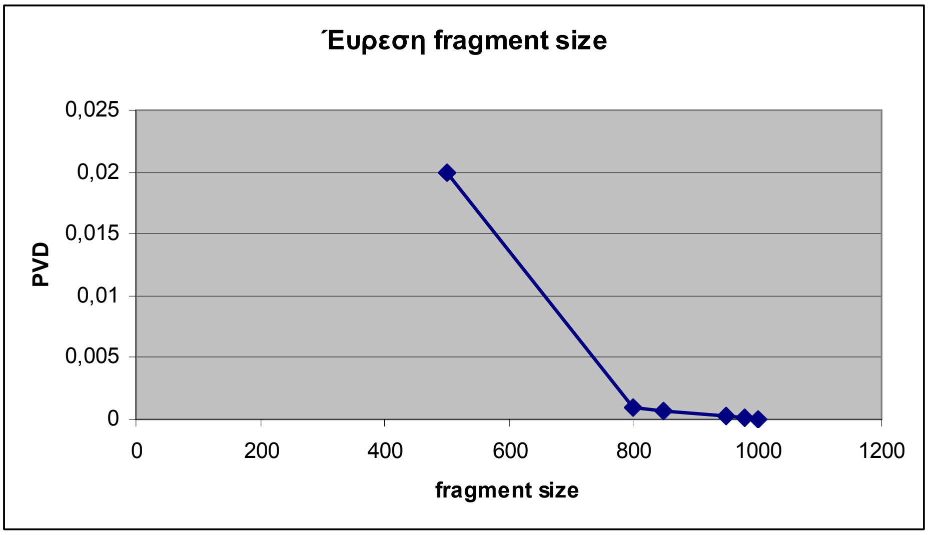
Σχήμα 4.3.2.4

Οι μέσες χρονικές καθυστερήσεις, που φαίνονται παραπάνω, είναι σε κλίμακα ***μsecs***. Η χρήση του καναλιού για μεταδόσεις είναι μικρή. Παρατηρούμε, ότι από τα 100 sec συνολικής λειτουργίας του δικτύου, μόνο 15 sec συνολικά χρησιμοποιούνται για μεταδόσεις video, και μόνο 10 sec για μεταδόσεις δεδομένων στους 6 χρήστες. Οι αριθμοί αυτοί δε φαίνεται να μεταβάλλονται αισθητά καθώς αυξάνονται οι κόμβοι του δικτύου, όπως χαρακτηριστικά φαίνεται από το παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα 4.3.2.5: Χρονική χρήση καναλιού για μεταδόσεις

Ο αριθμός χαμένων πακέτων λόγω παλαιότητας εξαρτάται κι από το μέγιστο μέγεθος πακέτων video (*maximum fragment size*) στα οποία η εφαρμογή τεμαχίζει τα video frames. Αυτό, διότι, όπως προείπαμε, όταν έρχεται η σειρά ενός σταθμού για μετάδοση, μπορεί να στείλει μόνο ένα από τα πακέτα αυτά. Έτσι, μια μικρή τιμή για το μέγιστο μέγεθος πακέτου συνεπάγεται τεμαχισμό σε περισσότερα πακέτα, τα οποία αποθηκεύονται στην ουρά του αντίστοιχου κόμβου. Και βέβαια, περισσότερα πακέτα στην ουρά σημαίνει μεγαλύτερη καθυστέρηση για τη μετάδοση και λήψη τους. Έχοντας, λοιπόν, ως δεδομένα τα χαρακτηριστικά του video, των δεδομένων (*data*) και το μέγιστο δυνατό αριθμό χρηστών, μπορούμε να μεταβάλλουμε το μέγιστο μέγεθος πακέτου video, προκειμένου να υπολογίσουμε το *«ελάχιστο μέγιστο μέγεθος πακέτου»* για το οποίο δεν παρατηρούνται σημαντικές απώλειες πακέτων. Το παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζει τις διάφορες προσπάθειες μείωσης του μεγέθους αυτού και την τιμή για την οποία οι απώλειες πακέτων video είναι ανεκτές. Από το διάγραμμα 4.3.2.6 βλέπουμε, ότι μπορούμε να έχουμε ένα μέγιστο μέγεθος πακέτου video στα 800 bytes χωρίς να χάνουμε πολλά πακέτα video σε σχέση με αυτά που μεταδίδονται. Η μείωση του μέγιστου μεγέθους πακέτου, από τα 1000 bytes στα 800 bytes έχει το εξής πλεονέκτημα: αν χαθεί ένα πακέτο, *λόγω θορύβου*, θα έχει χαθεί λιγότερη πληροφορία. Συνεπώς η επαναμετάδοση του πακέτου αυτού, από το δίκτυο, θα σπαταλήσει λίγο χρόνο.



Σχήμα 4.3.2.6: Εύρεση ανεκτού μέγιστου μεγέθους πακέτου

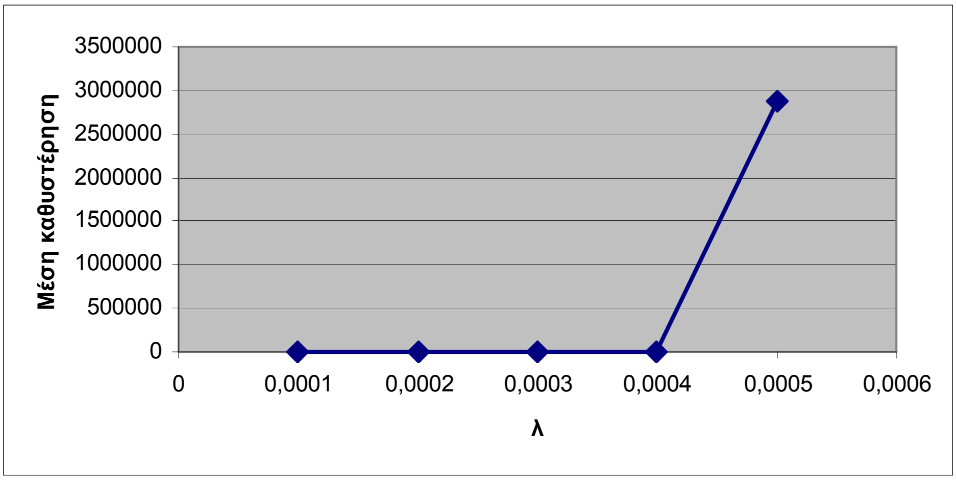
Για την προσομοίωση βέβαια, θεωρούμε ότι δεν χάνονται πακέτα λόγω θορύβου. Άλλωστε, στο σύστημα που σχεδιάζουμε, θεωρούμε ότι δεν έχουμε επαναμεταδόσεις video πακέτων, για δύο λόγους:

- Όταν επαναμεταδώσουμε ένα αντίγραφο, αυτό θα ακολουθήσει την ίδια διαδρομή με αυτό που χάθηκε: θα αποσταλεί αρχικά στο AP, όπου θα αποθηκευτεί, κι έπειτα θα σταλεί στον αποδέκτη του, όταν το AP επικοινωνήσει με αυτόν. Συνήθως το αντίγραφο αυτό απορρίπτεται τελικά, μιας και έχει παλιώσει αρκετά - έχει ξεπεράσει το χρόνο ζωής του, των 40 msecs.
- Η επαναμετάδοση ενός χαμένου (από θόρυβο) πακέτου επιφέρει σημαντική καθυστέρηση για τα υπόλοιπα video πακέτα που περιμένουν στην ουρά του ίδιου κόμβου.

Όταν το 802.11b παρατηρήσει ότι του έχει ανατεθεί η μετάδοση πακέτου με μέγεθος μεγαλύτερο από 1034 bytes, τότε προχωρά σε επιμέρους τμηματοποίηση του πακέτου αυτού, μεταδίδοντας τα κομμάτια σαν ξεχωριστά πακέτα. Λόγω του γεγονότος αυτού, για την προσομοίωση θα αφήσουμε το μέγιστο μέγεθος πακέτου στα ***1000 bytes***, προκειμένου να μην απαιτείται επιμέρους τεμαχισμός των πακέτων στο επίπεδο MAC, εκτός από τον τεμαχισμό που κάνει η ίδια η εφαρμογή. Φυσικά, στα 1000 bytes δεδομένων σε κάθε πακέτο (*payload*) παρατηρούμε ***μηδενικές*** απώλειες video πακέτων λόγω υπερβολικών καθυστερήσεων, για 6 χρήστες.

Όπως έχουμε αναφέρει πριν, για τα δεδομένα (*data*) κατά την DCF έχουμε υποθέσει ότι γεννώνται στους ασύρματους κόμβους σε πακέτα σταθερού μεγέθους 53 bytes (συμπεριλαμβανομένης της επικεφαλίδας) και με διαδικασία αφίξεων Poisson(***λ***). Η παράμετρος ***λ*** αντιπροσωπεύει το ρυθμό αφίξεων πακέτων στους επιμέρους κόμβους. Έτσι, όταν θέτουμε ***λ*** = 0,0004 = $4*10^{-4}$, εννοούμε ότι έρχονται 4 πακέτα κάθε 10 msec. Συνεπώς γεννώνται 400 πακέτα ανά δευτερόλεπτο, δηλαδή 21200 bps, σε κάθε κόμβο ξεχωριστά. Έχει ενδιαφέρον να παρατηρήσουμε τη μεταβολή της μέσης καθυστέρησης και τις απώλειες ***πακέτων δεδομένων***, για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου ***λ***. Θεωρούμε ότι έχουμε 6 χρήστες τηλεδιάσκεψης και μέγιστο μέγεθος πακέτου video στα 1000 bytes. Ο πίνακας που ακολουθεί περιέχει αυτά τα αποτελέσματα. *Οι τιμές είναι αθροιστικές για τα πακέτα όλων των κόμβων*:

λ	***Αφίξεις***	***Απώλειες***	***Μέση Καθυστέρηση***
10^{-4}	59908	0	1439,5 μsec
$2*10^{-4}$	120278	1	2968,09 μsec
$3*10^{-4}$	179301	16	4975,05 μsec
$4*10^{-4}$	240134	178	11054 μsec
$5*10^{-4}$	299446	1050	2868192 μsec

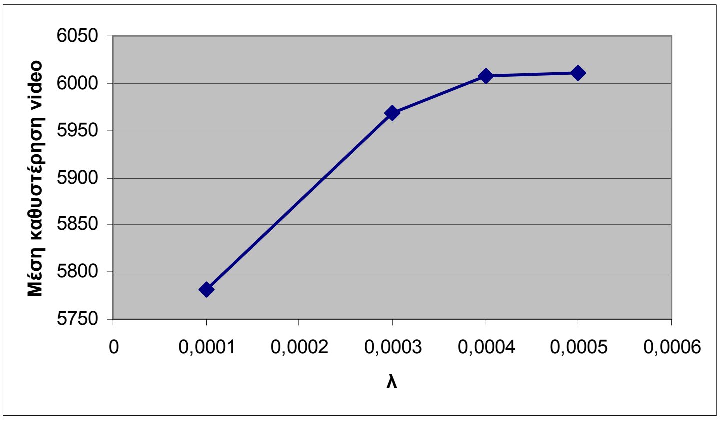


Σχήμα 4.3.2.7: Επίδραση του λ στην απόδοση μετάδοσης δεδομένων (*data*)

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι η αύξηση του ρυθμού ***λ*** αυξάνει τόσο την μέση καθυστέρηση των πακέτων δεδομένων που μεταδίδονται κατά την DCF, όσο και τις απώλειες των πακέτων αυτών. Τα αποτελέσματα αυτά είναι αναμενόμενα. Μεγαλύτερο ***λ*** σημαίνει εισαγωγή περισσότερων πακέτων δεδομένων στο σύστημα, οπότε περισσότερες συγκρούσεις και κατ' επέκταση, μεγαλύτερο χρόνο παραμονής των πακέτων στο σύστημα. Άλλωστε, όπως είναι φυσικό, όσο περισσότερα πακέτα περιμένουν στις ουρές των κόμβων, τόσο περισσότερος χρόνος χρειάζεται για να μεταδοθούν όλα, οπότε και η μέση καθυστέρηση αυξάνεται. Από τα διαγράμματα παρατηρούμε επίσης, ότι για ***λ*>**$5*10^{-4}$ και για την οριακή περίπτωση των 6 χρηστών, το σύστημα αρχίζει να γίνεται ασταθές: οι απώλειες πακέτων και οι καθυστερήσεις είναι αρκετά μεγάλες και αυξάνονται με την πάροδο του χρόνου της προσομοίωσης.

Εξάλλου, πρέπει να αναφέρουμε το γεγονός ότι οι σημαντικές μεταβολές του ***λ*** δεν επηρεάζουν τις απώλειες ***πακέτων video***, που μεταδίδονται κατά την PCF, ενώ επηρεάζουν πολύ ελαφρά τη μέση καθυστέρηση των πακέτων αυτών, όπως φαίνεται και στον ακόλουθο πίνακα και στο διάγραμμα.

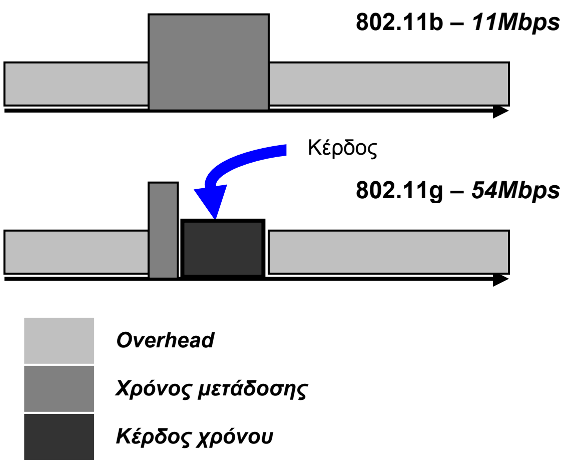
λ	***Απώλειες***	***Μέση Καθυστέρηση***
10^{-4}	5	5781,7 μsec
$3*10^{-4}$	5	5969,13 μsec
$4*10^{-4}$	5	6008.2 μsec
$5*10^{-4}$	7	6010,2 μsec



Σχήμα 4.3.2.8: Επίδραση του λ στη μέση καθυστέρηση πακέτων **video**

Αυτό συμβαίνει για τον εξής λόγο: Σε υψηλές τιμές του ***λ*** γεμίζει πιο συχνά η ουρά κάθε σταθμού. Αυτό σημαίνει ότι κάθε κόμβος χρησιμοποιεί το κανάλι και μεταδίδει περισσότερες φορές στην όλη διάρκεια της προσομοίωσης. Έτσι, ενώ στην περίπτωση που έχουμε μικρό ***λ*** πολλές φορές περνάει ο χρόνος της DCF χωρίς να έχουμε μεταδόσεις αφού δεν υπάρχουν πακέτα στις ουρές δεδομένων, με μεγάλο ***λ*** οι ουρές έχουν πακέτα, οπότε συμβαίνουν μεταδόσεις. Είναι λοιπόν πιθανό, να συμβαίνουν συχνές μεταδόσεις, ακόμα και τη χρονική στιγμή που τελειώνει η διάρκεια της DCF, οπότε το πρωτόκολλο αναγκάζεται να επιμηκύνει τη διάρκειά της, έως ότου ολοκληρωθεί η τρέχουσα μετάδοση. Η χρονική αυτή επιμήκυνση δρα επιβαρυντικά για τα video πακέτα, μιας κι αυτά περιμένουν αντίστοιχα επιπλέον χρόνο, όσο διαρκεί η επιμήκυνση αυτή. Αύξηση της διάρκειας της DCF, λοιπόν, αυξάνει γενικά τις καθυστερήσεις όλων των πακέτων που διακινούνται, είτε αυτά είναι πακέτα δεδομένων, είτε είναι πακέτα video.

Έστω ότι όλοι οι σταθμοί, που συμμετέχουν στην τηλεδιάσκεψη, ανταλλάσσουν και δεδομένα μεταξύ τους, όπως συμβαίνει στην προσομοίωση. Αυτό σημαίνει ότι έχουν να στείλουν πακέτα κατά την περίοδο διάρκειας της DCF. Εν γένει, η περίοδος DCF αποτελεί ένα ακόμα overhead για τις video μεταδόσεις. Αντιστοιχεί σε ένα ποσοστό χρόνου, κατά το οποίο δεν μπορεί να μεταδοθεί video. Κατά συνέπεια, τα πακέτα video πρέπει να περιμένουν στις ουρές των σταθμών, μέχρι να τελειώσει η DCF περίοδος. Η αναμονή αυτή επιβαρύνει με μια σημαντική καθυστέρηση τα video πακέτα. Ακόμη κι αν αυξήσουμε το ρυθμό μετάδοσης στα 54 Mbps, το μόνο που επιτυγχάνουμε είναι να μειώσουμε το χρόνο μετάδοσης των video και data πακέτων, όπως αναφέρουμε παρακάτω.



Σχήμα 4.3.2.9: Κέρδος με αύξηση του ρυθμού μετάδοσης

Όλες οι άλλες χρονικές παράμετροι όμως (DIFS, SIFS, BEACON… κτλ.) δε μεταβάλλονται, οπότε δε μειώνεται τελικά το overhead του συστήματος. Η παρατήρηση αυτή επιβεβαιώνεται αν προσομοιώσουμε ένα σενάριο, όπου δεν υπάρχει καθόλου περίοδος DCF (*κάτι το οποίο δε συμβαίνει στην πραγματικότητα*): θα μπορούσαμε τότε να υποστηρίξουμε επιπλέον δύο ή και περισσότερους χρήστες τηλεδιάσκεψης.

Η τελευταία παρατήρηση μπορεί να γενικευτεί. Όταν ένα γεγονός καταλαμβάνει αρκετό συνεχή χρόνο, τότε έχουμε ακόμα μεγαλύτερες απώλειες πακέτων. Αν για παράδειγμα μπορούσαμε να επιτρέψουμε στους σταθμούς να μεταδίδουν συνεχόμενα πακέτα, τότε τα υπόλοιπα πακέτα που μένουν στις ουρές του συστήματος, «αδικούνται». Αυτό συμβαίνει και όταν έχουμε μετάδοση μεγάλων πακέτων. Η μετάδοση ενός μεγάλου πακέτου διαρκεί πολύ. Αυτό έχει αρνητικές συνέπειες για την καθυστέρηση των υπόλοιπων πακέτων. Αντίθετα, αν μεταδίδουμε μικρότερα πακέτα, τότε προλαβαίνουν να μεταδοθούν περισσότερα στο χρόνο που θα χρειαζόταν για να μεταδοθεί ένα μεγάλο. Μετάδοση περισσότερων πακέτων αντί για ένα (στον ανάλογο χρόνο), σημαίνει λιγότερα χαμένα πακέτα. Βέβαια, δεν μπορούμε να μεταδίδουμε αρκετά μικρά πακέτα. Το μέγεθος των video πακέτων καθορίζεται από το πόσο μεγάλα είναι τα video frames που παράγει η εφαρμογή του video, δηλαδή από την ποιότητα του video. Αν καθορίσουμε ένα αρκετά μικρό μέγεθος πακέτου video (video fragment size) τότε αυτό που καταφέρνουμε είναι να δημιουργούμε πολλά video πακέτα στις αντίστοιχες ουρές. Ένας αυξημένος αριθμός πακέτων που περιμένουν να μεταδοθούν δεν είναι επιθυμητός, καθώς πάλι δεν θα προλάβουν να μεταδοθούν όλα, λόγω του ότι δεν επιτρέπονται σειριακές μεταδόσεις. Έτσι πολλά μικρά πακέτα θα χάνονται, και έτσι το packet video drop (PVD) θα αυξάνεται. Όπως έχουμε άλλωστε πει, το 802.11 προχωρά σε περαιτέρω τεμαχισμό πακέτων, όταν αυτά ξεπερνούν ένα όριο, το οποίο καθορίζεται μεν από τον διαχειριστή του δικτύου (*administrator*), ωστόσο συνήθως δεν ξεπερνά τα 1034 bytes. Τελικά τα 1000 bytes που έχουμε επιλέξει, ως μέγιστο μέγεθος video πακέτου, είναι αρκετά, δοθέντος του ότι τα video πακέτα, που μεταδίδονται κατά την PCF, έχουν και επικεφαλίδα μεγέθους 34 bytes [1].

Φυσικά, αντίστοιχα θα μπορούσαμε να μιλήσουμε για τις καθυστερήσεις πακέτων δεδομένων, λόγω επιμήκυνσης της PCF. Ο φόρτος video επηρεάζει την καθυστέρηση που υφίστανται τα data πακέτα. Παρόμοια δηλαδή, όταν οι video ουρές των σταθμών είναι φορτωμένες, η PCF λειτουργία μπορεί να παρατείνεται, προκειμένου να ολοκληρώνεται κάθε φορά μια μετάδοση video. Στην διάρκεια αυτή, νέα πακέτα δεδομένων ενδέχεται να μπαίνουν στις ουρές, ενώ τα ήδη υπάρχοντα καθυστερούν. Αντίθετα, όταν δεν υπάρχει μεγάλος φόρτος video, (συνήθως επειδή έχουμε σχετικά λίγους ασύρματους χρήστες), τότε η μετάδοση δεδομένων ευνοείται: Ενδεχομένως, οι video ουρές αδειάζουν σχετικά σύντομα (αρκετά πριν ολοκληρωθεί το χρονικό όριο των 40 msecs, οπότε θα έρθουν νέα πακέτα), οπότε η λειτουργία PCF αναστέλλεται προσωρινά, τουλάχιστον μέχρι να έρθουν νέα video frames. Αυτή η αναστολή λειτουργίας, που μπορεί να υποστηριχθεί από το πρωτόκολλο, ευνοεί σημαντικά την DCF, καθώς, όσο οι video ουρές είναι άδειες, η DCF δεν διακόπτεται (*με μόνη εξαίρεση έναν έλεγχο για το αν έχουν έρθει νέα video πακέτα*), μέχρις ότου νέα video πακέτα μπουν στις ουρές.

Αν θεωρήσουμε ότι η έκδοση 802.11g του πρωτοκόλλου δεν έχει διαφορές στο επίπεδο MAC, παρά μόνο στο φυσικό επίπεδο (*κάτι το οποίο δε γνωρίζουμε με απόλυτη σιγουριά, δεδομένου ότι πρότυπο 802.11g δεν έχει βγει ακόμη*), τότε μπορούμε να συγκρίνουμε τις εκδόσεις 802.11b και 802.11g, ως προς την χωρητικότητα του συστήματος, δηλαδή το μέγιστο αριθμό χρηστών που μπορούν να λαμβάνουν μέρος στην τηλεδιάσκεψη, έτσι ώστε να μην έχουμε σημαντικές απώλειες πακέτων, αλλά ούτε και μεγάλες καθυστερήσεις. Αν η διαφορά των δύο εκδόσεων υφίσταται μόνο στο φυσικό επίπεδο, τότε απλά μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το 802.11g επιτυγχάνει μεγαλύτερο ρυθμό μετάδοσης στο κανάλι (54Mbps), έναντι του 802.11b (11Mbps). Με βάση τη θεώρηση αυτή, αυξάνουμε το ρυθμό μετάδοσης video στον προσομοιωτή, προκειμένου να βρούμε τη νέα χωρητικότητα (*capacity*) του συστήματος. Από τις προσομοιώσεις παρατηρούμε, ότι με αύξηση του ρυθμού μετάδοσης στα 54Mbps δεν έχουμε ανάλογη αύξηση της χωρητικότητας. Παρόλο το γεγονός ότι έχουμε σχεδόν πενταπλασιάσει το ρυθμό μετάδοσης, μπορούμε να υποστηρίξουμε επιπλέον μόνο τέσσερις με πέντε χρήστες, σε σχέση με το 802.11b. Η αύξηση του ρυθμού μετάδοσης επενεργεί θετικά μόνο στο χρόνο μετάδοσης ενός πακέτου. Δεν επηρεάζει το υπόλοιπο overhead του πρωτοκόλλου, το οποίο παραμένει το ίδιο, ως ποσοστό του συνολικού χρόνου λειτουργίας του δικτύου, όπως αναφέραμε παραπάνω, στο σχήμα *4.3.2.6*. Δυστυχώς, δε γνωρίζουμε σίγουρα αν το 802.11g θα έχει το ίδιο χρονικό overhead με το 802.11b. Από τις προσομοιώσεις προέκυψε ο παρακάτω συγκριτικός πίνακας:

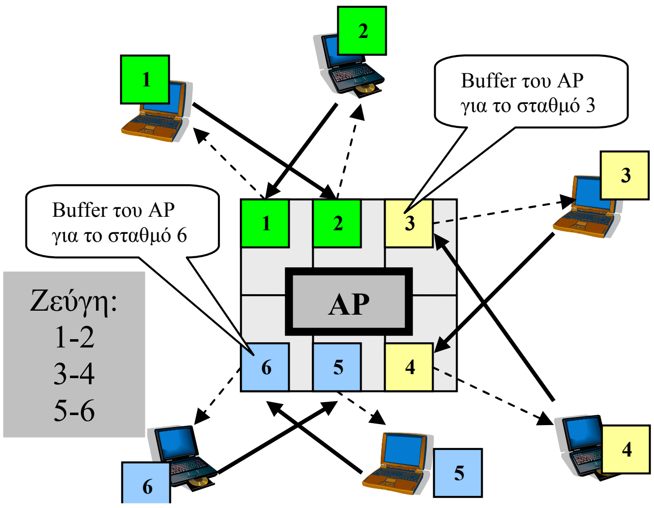
802.11b	***802.11g***
Μέγιστος αριθμός χρηστών: **6** Μέση καθυστέρηση video: **6008,205 μsec** Μέση καθυστέρηση data: **11054,42,8 μsec** Απώλειες πακέτων video: **5**, $\lambda = 4*10^{-4}$	Μέγιστος αριθμός χρηστών: **11** Μέση καθυστέρηση video: **7500,8 μsec** Μέση καθυστέρηση data: **7690,1 μsec** Απώλειες πακέτων video: **0**, $\lambda = 2*10^{-4}$

Σχήμα 4.3.2.10: Μετρήσεις για τις εκδόσεις **'b'** και **'g'**

4.4 *Σενάριο 2^o*: Τηλεδιάσκεψη ανά ζεύγη χρηστών & ταυτόχρονη μετάδοση δεδομένων

4.4.1 *Ανάλυση σεναρίου και παρατηρήσεις*

Η περίπτωση αυτή διαφέρει από την προηγούμενη, στο ότι κάθε ζευγάρι χρηστών επικοινωνεί μέσω μιας ξεχωριστής διαδικασίας τηλεδιάσκεψης. Κάθε χρήστης λοιπόν, ανήκει σε ξεχωριστή τηλεδιάσκεψη, οπότε βρίσκονται σε εξέλιξη τόσες διαφορετικές τηλεδιασκέψεις, όσα ζεύγη χρηστών έχουμε. Εννοείται πως έχουμε άρτιο αριθμό από χρήστες.



Σχήμα 4.4.1.1: Υλοποίηση PCF με προώθηση πακέτων μέσω AP

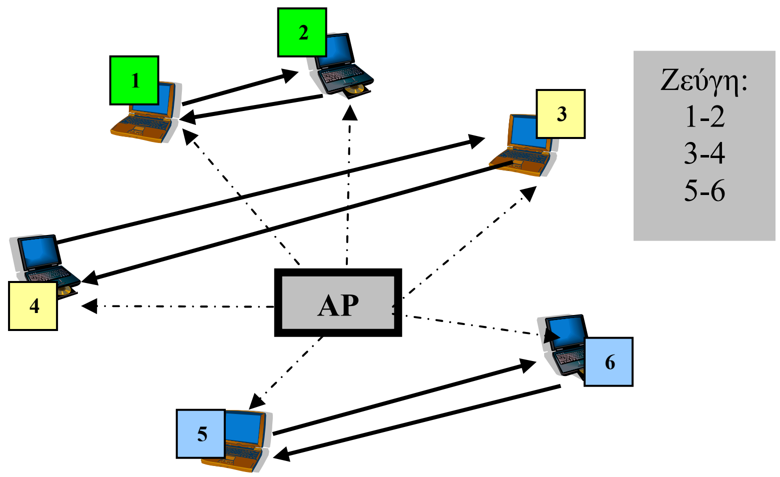
Όπως και παραπάνω, όλες οι τηλεδιασκέψεις ξεκινούν την ίδια χρονική στιγμή, οπότε νέα video frames έρχονται στους σταθμούς τις ίδιες χρονικές στιγμές. Λόγω της φύσης του σεναρίου αυτού, ένα video πακέτο που στέλνει ένας χρήστης έχει ως προορισμό του μόνο το συνομιλητή του, δηλαδή ένα χρήστη. Ως αποτέλεσμα, δεν είμαστε αναγκασμένοι να καταφεύγουμε σε αντιγραφές πακέτων που προορίζονται για διαφορετικούς χρήστες. Ο πομπός στέλνει το πακέτο του σε ένα μόνο δέκτη. Ωστόσο και στην περίπτωση αυτή, το σύστημα μπορεί να υλοποιηθεί με δύο διαφορετικούς τρόπους:

1^{ος} τρόπος:

- Ο αποστολέας στέλνει τα πακέτα του μέσω του AP, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.4.1.1. Επομένως, όταν το AP επικοινωνήσει με τον πομπό, ο τελευταίος στέλνει ένα πακέτο στο AP, που προορίζεται για το συνομιλητή του. Έτσι, όταν το AP επικοινωνήσει με τον παραλήπτη του πακέτου, του το δίνει και παίρνει από αυτόν (αν υπάρχει) ένα πακέτο, το οποίο θα δώσει πίσω στον αρχικό αποστολέα, κ.ο.κ. Δηλαδή, όπως και στην περίπτωση της πλήρους τηλεδιάσκεψης – σενάριο 1^o, έτσι κι εδώ, όλα τα video πακέτα περνούν μέσω του AP, το οποίο αναλαμβάνει να τα προωθήσει στους προορισμούς τους, όταν έρθει η σειρά τους να επικοινωνήσει με αυτούς.

2ος τρόπος:

- Ο αποστολέας στέλνει τα πακέτα του απευθείας στον κόμβο προορισμού,



Σχήμα 4.4.1.2: Υλοποίηση PCF με απευθείας αποστολή

σύμφωνα με το σχήμα 4.4.1.2. Η περίπτωση αυτή μπορεί να υποστηριχθεί από το πρωτόκολλο, αν και το πρότυπο δεν αναφέρει λεπτομέρειες για τη λειτουργία της PCF με αυτό τον τρόπο. Στην περίπτωση αυτή λοιπόν αποφασίζεται απλά από το AP για το ποιος σταθμός θα έχει τον έλεγχο του καναλιού, ώστε να του δοθεί το δικαίωμα να μεταδώσει ένα πακέτο.

Η υλοποίηση με τον 2ο τρόπο είναι εμφανώς αποδοτικότερη, μιας και αποφεύγουμε τη μετάδοση μέσω AP. Ωστόσο, όπως αναφέραμε, το πρότυπο δεν καθορίζει την ακριβή λειτουργία της μεθόδου αυτής. Για παράδειγμα, δεν αναφέρει το κατά πόσο ο δέκτης είναι σε θέση να ακούσει τον πομπό τη στιγμή που ο τελευταίος στέλνει ένα video πακέτο, μιας και ο δέκτης περιμένει εντολή από το AP να στείλει και να παραλάβει πακέτα.

Η υλοποίηση με αποστολή video πακέτων μέσω AP (*1ος τρόπος*) είναι αποδοτική, καθώς τώρα το σύστημα μπορεί να υποστηρίξει πολύ αποδοτικά μέχρι και 16 χρήστες (8 ζεύγη χρηστών), ενώ στην πλήρη τηλεδιάσκεψη μπορούσε να υποστηρίξει το πολύ 6 χρήστες. Άλλωστε, αυτό που μας ενδιαφέρει κυρίως είναι η μελέτη των δύο σεναρίων με τον ίδιο τρόπο λειτουργίας, ώστε να μπορέσουμε τελικά να συγκρίνουμε την απόδοση του συστήματος στις δύο περιπτώσεις. Εκτός αυτού, το πρότυπο [1] δεν αναφέρει τον ακριβή αυτό τρόπο λειτουργίας του δικτύου, παρά μόνο ότι το δίκτυο μπορεί να λειτουργήσει και με τον τρόπο αυτό. Εν γένει, στόχος μας είναι ο σχεδιασμός ενός συστήματος που θα μπορεί να διακινεί video, όσο πιο αποδοτικά γίνεται, λαμβάνοντας, εν μέρει, υπόψη και την πραγματικότητα. Μέσω της αναζήτησης στη διεθνή βιβλιογραφία και της επικοινωνίας με αντίστοιχους ερευνητές, διαπιστώσαμε ότι ο 2ος τρόπος λειτουργίας δε χρησιμοποιείται σχεδόν καθόλου. Για τους λόγους αυτούς δεν προβήκαμε σε εκτενείς προσομοιώσεις του 2ου τρόπου λειτουργίας του συστήματος, παρόλο που θα προέκυπταν μετρήσεις αυξημένης απόδοσης από πλευράς καθυστερήσεων και χαμένων πακέτων, καθώς το AP δε συμμετέχει στην αποστολή και λήψη πακέτων, παρά μόνο επιλέγει εκείνον που θα μεταδώσει κάθε φορά.

Έτσι, προσομοιώσαμε τον 1ο τρόπο λειτουργίας. Η απόδοση αυτή τη φορά ήταν αρκετά μεγαλύτερη. Ο λόγος, όπως είπαμε, είναι ότι οι ουρές του AP δε γεμίζουν τόσο απότομα – εκρηκτικά, οπότε το AP προλαβαίνει να μεταδώσει όλα τα πακέτα στους προορισμούς τους. Όπως είναι αναμενόμενο, όσο περισσότερα ζεύγη χρηστών έχουμε, τόσο περισσότερο αυξάνονται οι καθυστερήσεις, τόσο των video, όσο και των data πακέτων. Με την αύξηση του αριθμού των χρηστών έχουμε ιδιαίτερη αύξηση στις καθυστερήσεις και στις απώλειες των πακέτων δεδομένων, τα οποία μεταδίδονται κατά την DCF. Όσο περισσότερους σταθμούς έχουμε, τόσο δυσκολότερο είναι να αποκτήσει κάποιος έλεγχο του καναλιού, ώστε να μεταδώσει ένα πακέτο. Μεγάλος αριθμός χρηστών συνεπάγεται πολλές συγκρούσεις και κατά συνέπεια, αργοπορία στη μετάδοση πακέτων δεδομένων που βρίσκονται στις ουρές. Μέχρι ενός ορισμένου σημείου (*16 χρήστες*), δεν παρατηρούνται απώλειες πακέτων video, ενώ οι καθυστερήσεις των πακέτων video στο σύστημα είναι ανεκτές:

N	***Αφίξεις***	***Απώλειες***	***Μέση Καθυστέρηση***
6	16252	0	2378,303 μsec
8	21654	0	3196,96 μsec
10	27098	0	3991,544 μsec
12	32766	0	4837,17 μsec
14	38207	0	5304,612 μsec
16	43640	0	6148,205 μsec
18	49060	372	6603,696 μsec

Σχήμα 4.4.1.3: Επίδραση αριθμού χρηστών στις καθυστερήσεις και τις απώλειες **video** πακέτων, *(N = Αριθμός χρηστών)*

Ειδικά, εκτελέστηκαν κάποιες συγκριτικές μετρήσεις, όσον αφορά τα δεδομένα. Πιο συγκεκριμένα, τρέξαμε το σενάριο με τους 6 χρήστες σε μια τηλεδιάσκεψη ($1^{ο}$ σενάριο), και παρατηρήσαμε τις απώλειες και τις καθυστερήσεις που υφίστανται τα πακέτα δεδομένων. Στη συνέχεια τρέξαμε το σενάριο με τα 8 ζεύγη χρηστών, αλλά θεωρήσαμε ότι μόνο οι 6 χρήστες από αυτούς μεταδίδουν δεδομένα, σε αντιστοιχία με την $1^{η}$ περίπτωση. Είχαμε $\boldsymbol{\lambda} = 4*10^{-4}$ και διάρκεια πραγματικής λειτουργίας του δικτύου ίση με 100 sec. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα σχήματα *4.4.1.4 (για τους 6 κόμβους)* και *4.4.1.5 (για τους 16 κόμβους)*.

***************************** VIDEO SYSTEM **********************************

Station	Arrivals	Transmissions	Lost	Average Delays
0	2709	2708	0	6651.609007
1	2709	2708	0	7118.839276
2	2709	2708	0	6703.647693
3	2708	2707	4	4343.271270
4	2708	2707	1	5068.223708
5	2709	2708	0	6163.643042

Overall VideoFrame Arrivals	: 15000
Overall VideoPacket Arrivals	: 16252
Overral Lost VideoPackets	: 5
Overral VideoPacket Transmissions from STAs	: 16246
Overral VideoPacket Transmissions from AP	: 81225
Video - STAs System Size	: 6
Video - AP System Size	: 0
Average VideoPacket delay	: 6008.205666
Overral Video Transmission time	: 14983199

***************************** DATA SYSTEM **********************************

Station	Arrivals	Transmissions	Lost
0	39814	39783	31
1	40170	40146	24
2	39682	39647	35
3	39694	39668	25
4	40223	40189	34
5	39836	39807	29

Overral DataPacket Transmissions	: 239240
Overral DataPacket Arrivals	: 239419
Overral DataPacket Loss	: 178
Data System Size	: 1
Average DataPacket Delay	: 11054.421353
Overral Data Transmission time	: 9330360

Σχήμα 4.4.1.4: Μετρήσεις για το σύστημα μιας τηλεδιάσκεψης με ***6 κόμβους***

```
***************************  VIDEO SYSTEM ********************************
Station   Arrivals      Transmissions          Lost        Average Delays

  0         2710              2709              0            7682.943173
  1         2710              2709              0            6794.950554
  2         2710              2709              0            7123.084502
  3         2709              2708              0            4972.382429
  4         2709              2708              0            5165.241417
  5         2710              2709              0            4784.988192
  6         2710              2709              0            6624.052030
  7         2710              2709              0            5631.069373
  8         2710              2709              0            5330.679705
  9         2710              2709              0            5858.066421
  10        2709              2708              0            6698.641951
  11        2710              2709              0            6844.922509
  12        2710              2709              0            5957.353137
  13        2709              2708              0            6491.681432
  14        2709              2708              0            6109.868217
  15        2710              2709              0            6432.661993

Overral VideoFrame Arrivals                       : 40016
Overral VideoPacket Arrivals                      : 43640
Overral Lost VideoPackets                         : 0
Overral VideoPacket Transmissions from STAs       : 43624
Overral VideoPacket Transmissions from AP         : 43624
Video - STAs System Size                          : 16
Video - AP   System Size                          : 0
Average VideoPacket delay                         : 6156.411690
Overral Video Transmission time                   : 13927276

****************************  DATA SYSTEM ********************************

Station            Arrivals           Transmissions            Lost

  0                39582              39565              17
  1                39754              39732              22
  2                40201              40184              17
  3                39818              39803              15
  4                40260              40242              18
  5                39809              39795              14
  6                0                  0                  0
  7                0                  0                  0
  8                0                  0                  0
  9                0                  0                  0
  10               0                  0                  0
  11               0                  0                  0
  12               0                  0                  0
  13               0                  0                  0
  14               0                  0                  0
  15               0                  0                  0

Overall DataPacket Transmissions     : 240110
Overall DataPacket Arrivals          : 240280
Overall DataPacket Loss              : 74
Data System Size                     : 96
Average DataPacket Delay             : 6470.578667
Overall Data Transmission time       : 9364290
```

Σχήμα 4.4.1.5: Μετρήσεις για το σύστημα ζευγαριών με τους ***16 κόμβους***

Παρατηρήθηκαν ο ίδιες σχεδόν απώλειες και οι ίδιες σχεδόν καθυστερήσεις πακέτων δεδομένων, κάτι από το οποίο συμπεραίνουμε ότι οι δύο εναλλασσόμενοι τρόποι λειτουργίας (PCF $\leftrightarrow$ DCF) είναι εν γένει ανεξάρτητοι μεταξύ τους. Ακόμα και οι σταθμοί που μετείχαν και στους δύο τρόπους λειτουργίας, δεν παρουσίασαν διαφορετικές καθυστερήσεις στα video πακέτα τους, σε σχέση με αυτούς που δεν είχαν δεδομένα να μεταδώσουν. Η μόνη εξάρτηση του ενός τρόπου από τον άλλο είναι σε περιπτώσεις επιμήκυνσης της PCF ή της DCF, προκειμένου να ολοκληρωθούν τρέχουσες μεταδόσεις, όπως έχουμε εξηγήσει προηγούμενα.

4.5 *Σενάριο 3ο*: Τηλεδιάσκεψη ανά ομάδες χρηστών & ταυτόχρονη μετάδοση δεδομένων

4.5.1 Ανάλυση σεναρίου και παρατηρήσεις

Στο σενάριο αυτό έχουμε ομάδες διαφορετικού αριθμού χρηστών σε διαφορετικές τηλεδιασκέψεις, υπό το ίδιο όμως Access Point. Έτσι, θεωρούμε περιπτώσεις όπου δύο άτομα βρίσκονται σε τηλεδιάσκεψη και την ίδια στιγμή άλλα τρία έχουν τη δική τους ξεχωριστή τηλεδιάσκεψη, ενώ παράλληλα μια άλλη ομάδα έχει τη δική της, κ.ο.κ.

Στο σενάριο αυτό μπορούμε να παρατηρήσουμε συγκεντρωτικά όλους τους παραπάνω τρόπους λειτουργίας του δικτύου και τα ανάλογα αποτελέσματα. Έτσι, στις περιπτώσεις όπου έχουμε περισσότερους από δύο χρήστες σε μια ομάδα, απαιτείται αντιγραφή πακέτων από το AP, οπότε τα συγκεκριμένα video πακέτα υφίστανται αρκετά μεγαλύτερες καθυστερήσεις. Αντίθετα, στις ομάδες όπου έχουμε μόνο δύο χρήστες, δεν απαιτούνται αντιγραφές, οπότε οι αντίστοιχες ουρές δε γεμίζουν τόσο απότομα και γρήγορα, παρόλο που τα πακέτα όλων των χρηστών περνούν μέσα από το AP. Ως αποτέλεσμα, τα πακέτα των χρηστών αυτών υφίστανται πολύ μικρότερες καθυστερήσεις από τα υπόλοιπα. Εν γένει, όσο περισσότερα άτομα συμμετέχουν σε μια συγκεκριμένη τηλεδιάσκεψη, τόσο μεγαλύτερες καθυστερήσεις παρουσιάζουν τα πακέτα τους. Μάλιστα, απώλειες πακέτων παρατηρούνται κυρίως στις ομάδες με πολλούς χρήστες, καθώς, πολλές αντιγραφές πακέτων απορρίπτονται μετά την πάροδο ζωής τους των 40 msecs από την εισαγωγή τους στο σύστημα. Παρακάτω παραθέτουμε κάποια αποτελέσματα προσομοιώσεων που προέκυψαν για διαφορετικά υποσενάρια κίνησης. Συγκεκριμένα αναφέρουμε τις ξεχωριστές ομάδες χρηστών που βρίσκονταν σε τηλεδιασκέψεις και τις επιμέρους μετρήσεις για τις ομάδες αυτές:

1. Μια ομάδα με τρεις χρήστες και μια με δύο χρήστες:

VIDEO:

Ομάδες	Αφίξεις	Απώλειες	Μέση καθυστέρηση
0 – 1 – 2	0: 2709 1: 2709 2: 2709	0	6055.66 μsec
3 – 4	3: 2708 4: 2708	0	2055 μsec

DATA:

λ	Αφίξεις	Απώλειες	Μέση καθυστέρηση
0.0004	199460	0	1016.298 μsec

Σχήμα 4.5.1: Μετρήσεις για τις ομάδες: 0-1-2, 3-4

2. Μια ομάδα με τρεις χρήστες και δύο ομάδες με δύο χρήστες:

VIDEO:

Ομάδες	Αφίξεις	Απώλειες	Μέση καθυστέρηση
0 – 1 – 2	0: 2707 1: 2707 2: 2707	0	8101.66 μsec
3 – 5	3: 2706 4: 2706	0	2821 μsec
4 – 6	5: 2707 6: 2707	0	3051.5 μsec

DATA:

λ	Αφίξεις	Απώλειες	Μέση καθυστέρηση
0.0004	279303	91	4447,46 μsec

Σχήμα 4.5.2: Μετρήσεις για τις ομάδες: 0-1-2, 3-5, 4-6

Όπως μπορεί να παρατηρήσει κανείς από τα παραπάνω υποσενάρια, τα αποτελέσματα είναι αρκετά αναμενόμενα αλλά και ικανοποιητικά. Έτσι, στο πρώτο σενάριο, η ομάδα των τριών κόμβων αντιμετωπίζει μεγαλύτερες καθυστερήσεις πακέτων, λόγω των αντιγραφών που αναγκάζεται να κάνει το AP. Αντίθετα, η ομάδα των δύο κόμβων αντιμετωπίζει αρκετά μικρότερες καθυστερήσεις. Στη δεύτερη περίπτωση παρατηρούμε ανάλογα αποτελέσματα. Πρέπει εδώ να τονίσουμε, ότι στη δεύτερη περίπτωση, τα πακέτα των ομάδων τηλεδιάσκεψης με δύο κόμβους αντιμετωπίζουν μεγαλύτερη καθυστέρηση, απ ό,τι αυτά της ομάδας των δύο κόμβων του $1^{ου}$ υποσεναρίου, καθώς τώρα έχουν αυξηθεί οι ομάδες και οι χρήστες που βρίσκονται υπό τον έλεγχο του ίδιου AP. Τα αποτελέσματα αυτά είναι ακόμη εντονότερα στις περιπτώσεις που ακολουθούν:

3. Δύο ομάδες με τρεις χρήστες και μια ομάδα με δύο χρήστες:

VIDEO:

Ομάδες	Αφίξεις	Απώλειες	Μέση καθυστέρηση
0 – 1 – 2	0: 2709 1: 2709 2: 2709	0	9618.61 μsec
3 – 4	3: 2708 4: 2708	0	3145.7 μsec
5 – 6 – 7	5: 2709 6: 2709 7: 2709	0	9668.8 μsec

DATA:

λ	Αφίξεις	Απώλειες	Μέση καθυστέρηση
0,0004	319443	2164	*1479940.163* μsec

Σχήμα 4.5.4: Μετρήσεις για τις ομάδες: 0-1-2, 3-4, 5-6-7

4. Δύο ομάδες με δύο χρήστες και μια ομάδα με πέντε χρήστες:

VIDEO:

Ομάδες	Αφίξεις	Απώλειες	Μέση καθυστέρηση
0 – 1 – 2 – 7 – 8	0: 2709 7: 2709 1: 2709 8: 2709 2: 2709	0: 415 7: 447 1: 427 8: 431 2: 433	24189.4 μsec
3 – 5	3: 2708 4: 2708	0	3564,9 μsec
4 – 6	5: 2709 6: 2709	0	3876,77 μsec

DATA:

λ	Αφίξεις	Απώλειες	Μέση καθυστέρηση
0,0002	179290	47	4104,09 μsec

Σχήμα 4.5.5: Μετρήσεις για τις ομάδες: 0-1-2-7-8, 3-5, 4-6

5. Τρεις ομάδες με δύο χρήστες και μια ομάδα με πέντε χρήστες:

VIDEO:

Ομάδες	Αφίξεις	Απώλειες	Μέση καθυστέρηση
0 – 1 – 2 – 7 – 8	0: 2710 7: 2710 1: 2710 8: 2710 2: 2710	0: 629 7: 652 1: 615 8: 651 2: 622	24721,56 μsec
3 – 6	3: 2710 4: 2710	0	4367,2 μsec
5 – 9	5: 2710 6: 2710	0	4750 μsec
4 – 10	9: 2710 10: 2710	0	4383 μsec

DATA:

λ	Αφίξεις	Απώλειες	Μέση καθυστέρηση
0,0002	218578	205	7074,45 μsec

Σχήμα 4.5.6: Μετρήσεις για τις ομάδες: 0-1-2-7-8, 3-6, 5-9, 4-10

Ιδιαίτερα στην τελευταία περίπτωση, παρατηρούμε όλα όσα έχουμε αναφέρει σε ξεχωριστές προσομοιώσεις του συστήματος. Έτσι, η ομάδα με τους πολλούς κόμβους αντιμετωπίζει πολλές καθυστερήσεις και απώλειες video πακέτων, σε αντίθεση με τις άλλες ομάδες, όπου όλα φαίνεται να λειτουργούν κανονικά. Τα αποτελέσματα στις περιπτώσεις ‘3’ και ‘4’ είναι επίσης τα αναμενόμενα.

Όπως έχουμε αναφέρει παραπάνω, στην περίπτωση μιας τηλεδιάσκεψης με πολλούς χρήστες, το σύστημα μπορούσε να υποστηρίξει άνετα μέχρι περίπου 6 σταθμούς. Όπως είναι λοιπόν αναμενόμενο, στο τελευταίο αυτό σενάριο με ομάδες τερματικών σταθμών, δεν είναι δυνατόν να έχουμε μεγάλη απόδοση στο σύστημα, όταν μια από τις ομάδες ξεπερνά τους έξι χρήστες. Στην πραγματικότητα παρατηρούμε ότι, ανάλογα με τον αριθμό των ομάδων και τον αριθμό των χρηστών ανά ομάδα, το σύστημα μπορεί να υποστηρίξει αποδοτικά περισσότερες ή λιγότερες παράλληλες τηλεδιασκέψεις. Δυνητικά, ένας μέγιστος αριθμός κόμβων ανά ομάδα είναι τέσσερα με πέντε άτομα, αλλά με λιγότερους χρήστες ανά ομάδα μπορούμε να αυξήσουμε τον αριθμό ταυτόχρονων τηλεδιασκέψεων.

Όσον αφορά την μετάδοση πακέτων δεδομένων κατά τη διάρκεια της DCF, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων είναι τα αναμενόμενα. Άνοδος του αριθμού των χρηστών αυξάνει την καθυστέρηση και τις απώλειες πακέτων.

Συμπερασματικά, μπορούμε να πούμε ότι οι μετρήσεις που πήραμε από τις προσομοιώσεις είναι σύμφωνες με τη διαίσθηση και αναδεικνύουν εμφανώς τη δυσκολία του πρωτοκόλλου να υποστηρίξει αρκετά ευαίσθητες εφαρμογές σε χρονικές καθυστερήσεις, ιδιαίτερα όταν αυξάνεται ο αριθμός των ασύρματων κόμβων που βρίσκονται υπό τον έλεγχο του ίδιου Access Point.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Επίλογος (Προτάσεις, κόστη, συμπεράσματα)

Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναλύσαμε εκτενώς τις μετρήσεις που προέκυψαν από την προσομοίωση του δικτύου, για διαφορετικά σενάρια κίνησης. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις αυτές και τα οποία διατυπώθηκαν αναλυτικά, δείχνουν ότι οι παλιές εκδόσεις του 802.11, δηλαδή η αρχική έκδοση και η 802.11b, γενικά δεν μπορούν να υποστηρίξουν εφαρμογές τηλεδιάσκεψης για μεγάλο αριθμό χρηστών. Η υποστήριξη τέτοιων εφαρμογών από το 802.11b δεν είναι αποδοτική, καθώς το throughput του δικτύου είναι αρκετά χαμηλό και δεν αρκεί για να υποστηρίξει τις απαιτήσεις σε ποιότητα της υπηρεσίας, δηλαδή να μη χάνονται πολλά πακέτα, και τα υπόλοιπα που μεταδίδονται να μην υφίστανται υψηλή καθυστέρηση στο σύστημα. Παρότι η PCF έχει προταθεί για να υποστηρίζει ευαίσθητες σε χρονικές καθυστερήσεις εφαρμογές, το overhead είναι μεγάλο και ο επιτυγχανόμενος ρυθμός μετάδοσης μικρός, τουλάχιστον στην έκδοση 802.11b. Εκδόσεις που βρίσκονται υπό υλοποίηση υπόσχονται μεγαλύτερες ταχύτητες μετάδοσης και αποδοτική υποστήριξη απαιτητικών εφαρμογών για μεγάλο αριθμό χρηστών.

5.1 Προβλήματα, λύσεις κι επεκτάσεις στο IEEE 802.11b

Όπως είδαμε και από την ανάλυση των μετρήσεων στο κεφάλαιο 4, το 802.11b είναι μάλλον δύσκολο να υποστηρίξει εφαρμογές τηλεδιάσκεψης υψηλής ποιότητας και με πολλούς χρήστες, οι οποίες πλημμυρίζουν τις ουρές των κόμβων του δικτύου με πολλά πακέτα. Παρόλο που τα 11 Mbps της ονομαστικής ταχύτητας μετάδοσης του καναλιού φαίνονται αρκετά, οι δυσκολίες που αντιμετωπίζει το πρωτόκολλο, στην υποστήριξη αυτών των εφαρμογών, δε μπορούν να καλυφθούν από την ονομαστική ταχύτητά μετάδοσης.

Οι δυσκολίες αυτές οφείλονται στο υπερβολικά μεγάλο χρονικό overhead του πρωτοκόλλου. Προκειμένου να εξασφαλιστεί η παράδοση πακέτων και να αποφευχθούν, όσο περισσότερο γίνεται, οι συγκρούσεις και η αρνητική επίδραση της ύπαρξης κρυμμένων σταθμών, το πρωτόκολλο εισάγει χρονικές δικλίδες ασφαλείας υπό μορφή κατάλληλων χρονικών πλαισίων, τα οποία επιβαρύνουν με σημαντικές καθυστερήσεις τα πακέτα που βρίσκονται στις ουρές. Φυσικά, δε μπορεί εύκολα να γίνει κάτι διαφορετικό πάνω στο πρόβλημα αυτό, αφού η φύση του πρωτοκόλλου όσο και του μέσου μετάδοσης, επιβάλλουν την χρησιμοποίηση αυτών των χρονικών διαστημάτων, πράγμα που δεν απαιτείται στα ενσύρματα δίκτυα καθώς σε αυτά δεν εμφανίζονται τα αντίστοιχα προβλήματα.

Πολύ σημαντικός παράγοντας είναι επίσης η φύση του σεναρίου της κίνησης που διακινείται στο δίκτυο. Όπως είδαμε, για παράδειγμα στο αρχικό σενάριο τηλεδιάσκεψης, το AP είναι αναγκασμένο να εκτελεί πολλαπλές αντιγραφές στα video πακέτα που λαμβάνει, γεμίζοντας έτσι πολύ γρήγορα τις ουρές του. Ως άμεση συνέπεια, μια μικρή αύξηση στον αριθμό των χρηστών της τηλεδιάσκεψης δημιουργεί ανυπέρβλητα εμπόδια στην περαιτέρω λειτουργία του AP: περισσότερα πακέτα αντιγράφονται κι αποθηκεύονται στις ουρές, οπότε το AP δεν προλαβαίνει να τα μεταδώσει όλα, καθώς το χρονικό περιθώριο ζωής των 40 msec λήγει και τα πακέτα που το ξεπέρασαν πρέπει να απορριφθούν από το σύστημα. Αντίθετα, στο δεύτερο σενάριο όπου δεν χρειάζονται αντιγραφές πακέτων, το σύστημα υποστηρίζει πολύ περισσότερους χρήστες και μάλιστα πιο αποδοτικά, μιας και οι καθυστερήσεις τώρα είναι μικρότερες.

Το πρόβλημα της μεγάλης καθυστέρησης που αντιμετωπίζουν τα πακέτα σε περιβάλλον με πολλούς χρήστες, θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί με επιτυχία, αν το πρωτόκολλο υποστήριζε λειτουργίες multicasting και broadcasting πακέτων δεδομένων, τουλάχιστον κατά την PCF. Με τον τρόπο αυτό, ένα πακέτο video θα μπορούσε να σταλεί απευθείας σε όλους τους κόμβους, οπότε δεν θα ήταν απαραίτητο ούτε να αντιγράφεται, ούτε να αποθηκεύεται σε μνήμες του AP. Το πρότυπο τουλάχιστον δεν αναφέρει λεπτομέρειες για τέτοιες λειτουργίες.

Ένας αποδοτικός τρόπος αύξησης της χωρητικότητας του συστήματος είναι η ταυτόχρονη χρησιμοποίηση πολλαπλών καναλιών για μεταδόσεις, κάτι το οποίο έχει προταθεί και βρίσκεται στο στάδιο του σχεδιασμού, με το όνομα *EN-3000* [14]. Η εταιρία που κατασκευάζει το chipset, ισχυρίζεται ότι θα επιτευχθούν πολύ μεγαλύτερες χωρητικότητες στα μελλοντικά ασύρματα συστήματα, καθώς θα αξιοποιούνται πολλά κανάλια παράλληλα. Η κατασκευή έχει να κάνει με υλικό (hardware) που θα τοποθετείται στα Access Points μόνο, έτσι ώστε αυτά να μπορούν να λειτουργούν σε όλα τα κανάλια, όλη την ώρα. Δεν έχει απολύτως καμία σχέση με τερματικά, οπότε οι κάρτες 802.11 θα λειτουργούν και με το νέο σύστημα! Βασικός στόχος είναι να εξασφαλιστεί το ότι το διαμοιραζόμενο εύρος ζώνης δεν θα οδηγεί σε περισσότερες συγκρούσεις μεταξύ ασύρματων κόμβων. Η υλοποίηση αυτή θα είναι προφανώς αποδοτικότερη, γιατί η ταυτόχρονη χρήση πολλών καναλιών δίνει τη δυνατότητα σε ασύρματα τερματικά να μεταδίδουν ταυτόχρονα, χωρίς να περιμένουν να ολοκληρωθεί μια μετάδοση, προκειμένου να χρησιμοποιήσουν το κοινό κανάλι για να μεταδώσουν, βάσει του CSMA-CA.

Τέλος, δεν πρέπει να ξεχνάμε, ότι οι προσομοιώσεις του πρωτοκόλλου, στο κεφάλαιο 4, έγιναν θεωρώντας ιδανικό περιβάλλον λειτουργίας, όπου δε συμβαίνουν λάθη στις μεταδόσεις πακέτων λόγω θορύβου, ούτε έχουμε κρυμμένους σταθμούς. Η προσομοίωση σε πραγματικές συνθήκες είναι εξαιρετικά δύσκολη, καθώς πρέπει να συμπεριληφθούν όλα τα προβλήματα που παρουσιάσαμε στη μελέτη του φυσικού επιπέδου. Αν θεωρήσουμε τέτοια φαινόμενα, τότε τα πράγματα γίνονται ακόμη πιο δύσκολα για το πρωτόκολλο.

Προκειμένου να διασταυρωθούν τα συμπεράσματα που προέκυψαν, ζητήθηκε η γνώμη έμπειρων ατόμων, που έχουν ασχοληθεί με το πρωτόκολλο, με τον ένα ή τον άλλο τρόπο. Όλοι συμφώνησαν στο ότι, σε ένα τυπικό περιβάλλον indoor καναλιού, το 802.11 χάνει πολλά πακέτα. Κάποια από τα άτομα αυτά μάλιστα, έχοντας στη διάθεσή τους τον αναγκαίο δικτυακό εξοπλισμό, έτρεξαν το πρωτόκολλο, οπότε παρατήρησαν σημαντικές απώλειες πακέτων. Συγκεκριμένα, με τον φορητό υπολογιστή (*laptop*) σε οριζόντια απόσταση 5 ποδών από το Access Point, δηλαδή σε πολύ κοντινή απόσταση, παρατηρούνταν κάποιες απώλειες πακέτων. Απομακρύνοντας τον υπολογιστή στα 20 πόδια (με οριζόντιους και κάθετους συνδυασμούς), παρατηρήθηκε ότι χάνεται περίπου το 10% των μεταδιδόμενων πακέτων! Σε συγκεκριμένες εκτελέσεις, από τα 194.950 πακέτα που στάλθηκαν, τα 13.168 χάθηκαν, δηλαδή περίπου το 6,75%. Και φυσικά, το ολικό throughput είναι αρκετά μικρότερο από αυτό ενός Ethernet LAN των 10 Mbps. Συνεπώς, ακόμα και με μια «τέλεια ζεύξη» (ένας τερματικός σταθμός κοντά στο AP) υπάρχουν σημαντικά προβλήματα. Τέλος, το πρόβλημα των συγκρούσεων πακέτων είναι πολύ πιο σοβαρό από ότι σε ένα ενσύρματο μέσο, καθώς το φαινόμενο των κρυμμένων σταθμών είναι έντονο σε ασύρματα LANs.

Η αναβάθμιση από 802.11b σε 802.11g δεν εξαλείφει τα προβλήματα, γιατί το τελευταίο χρησιμοποιεί τις ίδιες συχνότητες με το πρώτο, οπότε τα RF προβλήματα παραμένουν. Το κύριο πρόβλημα λοιπόν δεν είναι η υλοποίηση του επιπέδου ζεύξης, αλλά η υλοποίηση του RF κομματιού του πρωτοκόλλου. Γίνονται πολλές αγορές εξοπλισμού (AP) χωρίς την εκχώρηση άδειας, κάτι το οποίο επιτρέπει η FCC (*Federal Communications Committee - ΗΠΑ*). Ως συνέπεια, λόγω του περιορισμένου διαθέσιμου φάσματος συχνοτήτων, δίκτυα που λειτουργούν στην ίδια γεωγραφική περιοχή αναγκάζονται να χρησιμοποιούν τις ίδιες συχνότητες, και άρα,

- οι συσκευές που έχουν συνδεθεί σε τέτοια δίκτυα είναι αναγκασμένες να λειτουργούν σε χαμηλά επίπεδα ισχύος
- δέχονται παρεμβολές από χρήστες που έχουν άδειες λειτουργίας.

Μια εναλλακτική λύση θα ήταν η άσκηση πιέσεων στην FCC να παραχωρήσει μια ξεχωριστή μπάντα συχνοτήτων για χρήστες με άδεια λειτουργίας, ώστε να μπορούν οι αντίστοιχες συσκευές να δουλεύουν σε μεγαλύτερα επίπεδα ισχύος. Παρόλα αυτά, αυτό ίσως να προκαλούσε ακόμα περισσότερους πονοκεφάλους, καθώς το διαθέσιμο εύρος (*spectrum space*) είναι ήδη περιορισμένο.

Τελικά, δεν υπάρχει μια τέλεια λύση για τα προβλήματα αυτά, και μάλλον δεν πρόκειται να βρεθεί μια τέτοια λύση, τουλάχιστον στο προσεχές μέλλον. Όπως και να έχουν τα πράγματα πάντως, τα ασύρματα δίκτυα IEEE 802.11 είναι ήδη ευρέως χρησιμοποιούμενα. Το πρότυπο του πρωτοκόλλου αυτού είναι το πρώτο που έκανε τα ασύρματα δίκτυα γνωστά στην ευρεία αγορά, καθώς υπόσχεται ευρωστία και ταχύτητα, κυρίως όσον αφορά στις τελευταίες εκδόσεις του.

5.2 Χαρακτηριστικά ωφέλιμα στην επιλογή του κατάλληλου ασύρματου δικτυακού συστήματος

Κάθε υποψήφιος αγοραστής πρέπει να λαμβάνει σοβαρά υπόψη κάποια θεμελιώδη χαρακτηριστικά, ώστε τελικά να καταλήγει στη σωστή απόφαση επιλογής του ασύρματου δικτύου που ικανοποιεί τις ανάγκες του. Μερικά από τα χαρακτηριστικά αυτά είναι τα ακόλουθα:

1. ***Εμβέλεια και απόδοση:*** Τα ασύρματα τοπικά δίκτυα 802.11 χρησιμοποιούν ραδιοκύματα, γιατί αυτά διεισδύουν μέσα από πολλά υλικά, ή ανακλώνται όταν συναντούν κάποια εμπόδια. Το throughput των δικτύων αυτών εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, στους οποίους συμπεριλαμβάνονται ο αριθμός των συνδεδεμένων κόμβων, η κάλυψη των μικροκυψελών, οι παρεμβολές, η πολυοδική διασπορά (*multipath propagation*) και η ποιότητα του υλικού (*hardware*) που χρησιμοποιείται στην κατασκευή του εξοπλισμού. Και φυσικά, οτιδήποτε επηρεάζει την κίνηση στα ενσύρματα τμήματα των δικτύων, όπως η καθυστερήσεις και η συμφόρηση, θα επηρεάζει επίσης την απόδοση στα ασύρματα τμήματα του δικτύου.

2. ***Ευκολία στη μετακίνηση:*** Παρόλο που το πρότυπο του 802.11 καθορίζει το πώς ένας σταθμός θα επικοινωνεί με ένα AP, δεν καθορίζει το πώς τα AP βρίσκουν τη θέση των κινητών κόμβων όταν αυτοί κινούνται, είτε από κυψέλη σε κυψέλη του ίδιου υποδικτύου, είτε από ένα υποδίκτυο σε κάποιο άλλο.

   Μια λύση είναι η χρήση κοινών πρωτοκόλλων για όλα τα AP, (*vendor-specific inter AP protocols*), τα οποία διαφέρουν ως προς την απόδοσή τους. Αν το πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται για το σκοπό αυτό δεν είναι αποδοτικό, τότε υπάρχουν μεγάλες πιθανότητες να χάνονται πολλά πακέτα όταν ο έλεγχος του κόμβου περνάει από ένα AP σε άλλο. Οι αρμόδιες επιτροπές της IEEE ήδη ερευνούν το σχεδιασμό τέτοιων πρωτοκόλλων.

   Μία άλλη λύση είναι η χρήση «κινητών διευθύνσεων» (*Mobile IP*). Το Mobile IP λειτουργεί με το να αναθέτει ένα AP ως “home agent” για κάθε χρήστη. Όταν ένας σταθμός εγκαταλείπει αυτό το AP πού του έχει ανατεθεί και μπαίνει υπό τον έλεγχο κάποιου νέου, τότε το νέο αυτό AP ρωτάει το σταθμό για το ποιο είναι το home agent του. Εφόσον το νέο AP εντοπίσει το home agent, μια προώθηση πακέτων ξεκινά αυτόματα μεταξύ των δύο AP, προκειμένου να εξακριβωθεί ότι η IP διεύθυνση του σταθμού έχει διατηρηθεί και ότι ο σταθμός μπορεί να λαμβάνει πακέτα.

Τέλος, μια (ατελής) εναλλακτική λύση είναι η χρήση του πρωτοκόλλου DHCP (*Dynamic Host Configuration Protocol*) κατά μήκος του δικτύου. Το DHCP επιτρέπει σε κόμβους που σταματούν να λειτουργούν, ή αναβάλλουν την εισαγωγή τους σε νέο δίκτυο, να λαμβάνουν αυτόματα μια νέα IP διεύθυνση αμέσως μόλις ξεκινήσουν να λειτουργούν ξανά.

3. ***Έλεγχος ισχύος:*** Οι ασύρματοι τερματικοί σταθμοί τυπικά σχεδιάζονται έτσι ώστε να λειτουργούν χωρίς υποστήριξη καλωδίων ρεύματος, καθώς φέρουν μπαταρίες. Το πρότυπο του 802.11b προβλέπει εξοικονόμηση ισχύος, με την εισαγωγή ενός κατάλληλου πρωτοκόλλου (*Power Saving Protocol*), προκειμένου να μεγιστοποιήσει τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας του κινητού κόμβου.

4. ***Ασφάλεια στις μεταδόσεις:*** Η χρήση του WEP, στο οποίο αναφέρθηκαμε στην παράγραφο 3.2.6 του κεφαλαίου 3, είναι αρκετή για τις περισσότερες εφαρμογές. Παρόλα αυτά, η ασφάλεια των ασύρματων δικτύων πρέπει να ενοποιηθεί σε μια συνολική δικτυακή στρατηγική. Πιο συγκεκριμένα, ένας χρήστης μπορεί να υλοποιήσει μια κρυπτογράφηση στο επίπεδο δικτύου (π.χ. *IPSec*), η οποία να εξαλείφει την ανάγκη για παρεχόμενη ασφάλεια από το 802.11. Και φυσικά, οι ίδιοι οι αγοραστές (*WISPs – Wireless Internet Service Providers*) μπορούν να επιλέξουν να τρέχουν εφαρμογές που κάνουν ειδική κρυπτογράφηση στα δεδομένα τους, έτσι ώστε να βεβαιώνονται ότι οι IP και MAC διευθύνσεις είναι καλά προστατευμένες μαζί με τα δεδομένα (*payload*) που μεταδίδονται.

Εκτός από το WEP, υπάρχουν κι άλλες τεχνικές πιστοποίησης κι ελέγχου πρόσβασης στο δίκτυο. Μια από αυτές είναι η χρήση της μεταβλητής ESSID, που εφαρμόζεται στα AP: αν κάποιος σταθμός δε γνωρίζει την τιμή της μεταβλητής αυτής, δεν του επιτρέπεται η πρόσβαση στο δίκτυο και η επικοινωνία του με το AP. Επιπροσθέτως, κάποιοι κατασκευαστές παρέχουν την εξής λειτουργία: κάθε AP διατηρεί έναν πίνακα με διευθύνσεις σταθμών, οπότε ένας κόμβος παίρνει άδεια εισαγωγής στο δίκτυο, μόνο αν η διεύθυνσή του βρίσκεται στον πίνακα αυτόν.

5. ***Κόστος:*** Συνήθως το κόστος υλικού (*hardware*) περιλαμβάνει προσθήκη APs στο δίκτυο υποδομής και καρτών δικτύου σε όλες τις ασύρματες συσκευές και υπολογιστές. Η περιοχή κάλυψης ενός AP εκτείνεται προς τα έξω σε μια συγκεκριμένη ακτίνα. Οι ζώνες κάλυψης των APs συχνά αλληλεπικαλύπτονται, ώστε να μην υπάρχουν περιοχές χωρίς κάλυψη, οπότε πιθανά να απαιτείται η εγκατάσταση πολλών AP, ώστε να καλυφθεί μια γεωγραφική περιοχή. Τελικά το κόστος αγοράς υλικού διαφέρει, ανάλογα με τα κριτήρια που θέτει ο αγοραστής, είτε είναι WISP είτε κόμβος, όπως η απόδοση, η κάλυψη, κ.ά.

Και βέβαια, εκτός από το κόστος αγοράς του εξοπλισμού, πρέπει να υπολογιστεί και το κόστος εγκατάστασης και συντήρησης του δικτύου, ιδιαίτερα όταν η εγκατάσταση βασίζεται κυρίως σε προϊόντα χαμηλής ποιότητας, που απαιτούν συχνή συντήρηση. Πολύ σύντομα, τα χρηματικά ποσά που διατίθεται για τους σκοπούς αυτούς, προσεγγίζουν το κόστος αγοράς του WLAN. Προϊόντα, τα οποία είναι εύκολα στην εγκατάσταση και χρήση τους, ακόμη κι αν είναι ακριβά, ίσως αξίζει να προτιμηθούν.

Τα νέα πρότυπα του 802.11 που θα βγουν σύντομα (*το 802.11g στα μέσα του 2003 και το 802.11e στις αρχές του 2004*), θα δίνουν στους αγοραστές την ελευθερία να επιλέξουν ευκινησία, συμβατότητα και μεγαλύτερες ταχύτητες. Οι μελλοντικοί χρήστες πρέπει να περιμένουν να συναντήσουν φυσιολογικά κόστη σε μεγάλης ταχύτητας ασύρματες λύσεις που εξαπλώνονται ραγδαία και προτιμούνται από χρήστες διαφορετικών απαιτήσεων: από τεράστιες επιχειρήσεις, μέχρι και από μικρά γραφεία και σπίτια. Το πρότυπο αυτό, λοιπόν, ανοίγει νέες εκπληκτικές ευκαιρίες για την περαιτέρω επέκταση των προνομίων που προσφέρουν τα δίκτυα υπολογιστών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΑΝΑΦΟΡΕΣ

[1] ANSI/IEEE 802.11 Standard, 1999 Edition.

[2] IEEE 802.11b Standard, 1999, (*Supplement to ANSI/IEEE 802.11 Standard, 1999 Edition*).

[3] Brian P. Crow, Indra Widjaja, Jeong Geun Kim, Prescott T. Sakai: "*IEEE 802.11 Wireless Local Area Networks*", IEEE Communications Magazine, 1997.

[4] James F. Kurose & Keith W. Ross: *Computer Networking: "A Top-Down Approach Featuring The Internet",* Addison – Wesley Publications, 2001.

[5] Brian P. Crow, Indra Widjaja, Jeong Geun Kim, Prescott T. Sakai: "*Investigation of the IEEE 802.11 Medium Access Control (MAC) Sublayer Functions*", IEEE Infocom 1997, http:// www.ieee-infocom.org/1997/papers/widjaja.pdf

[6] F. Cali, M. Conti, E. Gregori: "*IEEE 802.11 Wireless LAN: Capacity Analysis and Protocol Enhancement*", IEEE 1998, http://easy.intranet.gr/paper_9.pdf

[7] PulseWan, Data communications – Wide Area Networks – Computer Networking: *What is 802.11 & 802.11b,* http://www.pulsewan.com , 2000.

[8] Breeze Wireless Communications Ltd.: *IEEE 802.11 Technical Tutorial*, Israel 2000.

[9] Shreyas Sadalgi: "*A performance Analysis of the Access IEEE 802.11 Wireless LAN MAC Protocol (CSMA/CA")*, Rutgers University, Dept. of CS, 8 May 2000, http://paul.rutgers.edu/~sadalgi/network.pdf

[10] Daniel L. Lough, T. Keith Blankenship, Kevin J. Krizman: "*A Short Tutorial on Wireless LANS and IEEE 802.11"* http://www.computer.org/students/looking/summer97/ieee802.htm

[11] Jim Zyren, Al. Petrick: "*IEEE 802.11 Tutorial",* http://www.weca.net/OpenSection/pdf/IEEE_80211_Primer.pdf

[12] *Τα video traces περιέχονται στην ηλεκτρονική διεύθυνση:* http://www-tkn.ee.tu-berlin.de/research/trace/trace.html

[13] Averill M. Law, W. David Kelton: "*Simulation Modeling & Analysis"*, 2nd Edition, McGraw-Hill International Editions, 1991.

[14] *Η λύση με ταυτόχρονη χρήση πολλών καναλιών (κεφ. 5) βρίσκεται στην ηλεκτρονική διεύθυνση:* *http://www.80211-planet.com/news/article.php/2190841*

[15] Raffaele Bruno, Marco Conti, Enrico Gregori: "*Bluetooth: Architecture, Protocols and Scheduling Algorithms",* Cluster Computing 5, 117-131, ID:394376, 2002, *http://www.kluweronline.com/issn/1386-7857*

[16] Enzo Mingozzi: "*QoS Support by the HiperLAN/2 MAC Protocol: A Performance Evaluation",* Cluster Computing 5, 135-145, ID:394379, 2002 *http://www.kluweronline.com/issn/1386-7857*

[17] P. Barker, A.C. Boucouvalas*: "Performance comparison of the IEEE 802.11 and Air infrared wireless MAC protocols",* *http://dec.bournemouth.ac.uk/staff/MMCRG/pgnet2001.pdf*

[18] Rui T. Valadas, António R. Tavares, A. M. de Oliveira Duarte: "*The Infrared physical Layer of the IEEE 802.11 Standard for Wireless Local Area Networks",* IEEE Communications Magazine – December 1998, *http://www.comsoc.org/ci/private/1998/dec/Valadas.html*

[19] Onvural Raif : "*Asynchronous transfer mode networks : performance issues",* 2nd Edition, Boston: Artech House, 1995.

[20] *Jim Lansford: "Working Towards the Peaceful Coexistence of Wireless PANs, LANs, and WANs",* Communications Design Conference, San Jose, CA, September 2002, *http://www.chipcenter.com/wireless/images/W141LansfordPaper.pdf*

[21] Tom Siep: "*An Overview of Bluetooth and IEEE 802.15"*, Texas Instruments, 09/1999, *http://www.ti.com/sc/docs/general/dsp/fest99/wireless/7sieprev1.pdf*

[22] ANSI/IEEE 802.15 Standard, April 2002 Edition

[23] Rusty O. Baldwin, Nathaniel J. Davis, Scott E. Midkif, Richard A. Raines: *"Packetized Voice Transmission using RT-MAC, a Wireless Real-time Medium Access Control Protocol",* Mobile Computing and Communications Review, Volume 5, Number 3 *http://delivery.acm.org*

[24] Nishith D. Tripathi, Jeffrey H. Reed, Hugh F. VanLandingham: “*Handoff in Cellular Systems”,* IEEE Personal Communications - December 1998, *http://ntrg.cs.tcd.ie/htewari/papers/tripathi98.pdf*

[25] Frank H.P. Fitzek, Martin Reisslein: *“MPEG-4 and H.263 Video Traces for Network Performance Evaluation (Extended Version)”* , TU Berlin, Dept. of Electrical Engineering, Telecommunication Networks Group, Technical Report: TKN-00-06, October 2000, *http://www-tkn.ee.tu-berlin.de/research/trace/pub.html*

[26] Ohta Naohisa: “*Packet video: modelling and signal processing*”, Boston: Artech House 1994.

[27] P.N. Tudor: “*MPEG-2 Video Compression*”, Tutorial, Electronics and Communications Journal, December 1995, (IEE J Langham Thompson Award) *http://www.bbc.co.uk/rd/pubs/papers/paper_14/paper_14.html*