



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΩΝ

Διπλωματική εργασία:

**Σχεδιασμός και Μελέτη Απόδοσης
Μηχανισμού Εξοικονόμησης Ενέργειας
για Prerecorded Multimedia Streaming
σε IEEE802.11 Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα**

Κακλαμάνης Πέτρος
ΑΜ : 1998030455

Εξεταστική Επιτροπή

Καθ. Μ. Πατεράκης (επιβλέπων)
Καθ. Β. Διγαλάκης
Καθ. Ν. Σιδηρόπουλος

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Μετά την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας και συγχρόνως των προπτυχιακών σπουδών μου στα Χανιά, νιώθω την υποχρέωση να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου σε εκείνους που με βοήθησαν και με στήριξαν τα τελευταία χρόνια.

Χιλιάδες ευχαριστώ οφείλω...

Στη μητέρα μου Νίκη για την καθοδήγηση, στήριξη και κυρίως υπομονή, που μου έδειξε από τόσο παλιά, όσο μπορώ να θυμάμαι. Ομολογουμένως ο δικός της αγώνας υπήρξε δυσκολότερος.

Στον πατέρα μου Πέτρο για τα όνειρά του και στην επιμονή του σε αυτά. Ελπίζω να μη τον απογοητεύσω.

Στον Καθηγητή Μιχάλη Πατεράκη, τυπικά επιβλέποντα, μα ουσιαστικά μέντορα μου στην επιστήμη των δικτύων υπολογιστών και στην εργασία αυτή. Αισθάνομαι τυχερός που είχα την ευκαιρία να εργαστώ υπό την αιγίδα ενός καλού επιστήμονα μα συγχρόνως έντιμου κι αξιόλογου ανθρώπου.

Στους Καθηγητές Βασίλη Διγαλάκη και Νίκο Σιδηρόπουλο που συμμετέχουν στην εξεταστική επιτροπή και με δίδαξαν όσα ξέρω από την επιστήμη του τηλεπικοινωνιακού σήματος.

Στον Καθηγητή Ανδρέα Μαρά και στους Διδάσκοντες ΠΔ/407 Γιάννη Βαρδιάμπαση και Σοφία Τσακιρίδου για όσα με δίδαξαν μέσα από τα ενδιαφέροντα μαθήματά τους που παρακολούθησα στο Πολυτεχνείο Κρήτης.

Σε όσους θεωρώ φίλους μου, ανθρώπους που στο χρονικό συνεχές ήταν είτε συμφοιτητές, είτε συμμαθητές, είτε δάσκαλοι, είτε απλώς γνωστοί και στάθηκαν δίπλα μου σε διάφορες περιστάσεις. Ξέρουν ποιοι είναι. Τους είμαι ευγνώμων.

Εύχομαι ότι καλύτερο. Να είστε πάντα καλά.

Πέτρος Κακλαμάνης,
Χανιά, Ιούλιος 2003

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ	2
1.1 Εισαγωγή και Σκοπός της Εργασίας	2
1.1.1 Εισαγωγή	2
1.1.2 Σκοπός της Εργασίας	2
1.2 Περίληψη	3
1.2.1 Περίληψη	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΑΣΥΡΜΑΤΟ INTERNET ΚΑΙ ΠΟΛΥΜΕΣΑ	4
2.1 Ασύρματο Internet	4
2.1.1 Ιστορική Αναδρομή του Internet	4
2.1.2 Το Ασύρματο Internet	5
2.2 Τα Πολυμέσα (Multimedia) στο Internet	5
2.2.1 Εφαρμογές Πολυμέσων	5
2.2.2 Αρχιτεκτονικές Πρόσβασης Video/Audio μέσω ενός Web Server	6
2.3 Κωδικοποίηση Πολυμέσων	9
2.3.1 Κωδικοποίηση Video	9
2.3.2 Κωδικοποίηση Audio	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΤΟ ΑΣΥΡΜΑΤΟ ΚΑΝΑΛΙ	11
3.1 Το Ασύρματο Κανάλι	11
3.1.1 Γενικά	11
3.1.2 Διαλείψεις	11
3.1.3 Αντιμετώπιση Διαλείψεων	12
3.2 Το Gilbert - Elliot Model	12
3.2.1 Ένα Χρήσιμο Μοντέλο για το Ασύρματο Κανάλι	12
3.3 Το Gilbert - Elliot Model που χρησιμοποιούμε	14
3.3.1 Παράμετροι για το Μοντέλο	14
3.3.2 Αριθμητικά Αποτελέσματα	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – Η ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ	16
4.1 Κατανάλωση Ισχύος σε Ασύρματες Συσκευές	16
4.1.1 Γενικά	16
4.2 Κατανάλωση Ισχύος στη Wireless Network Interface Card	16
4.2.1 Γενικά	16
4.2.2 Μπαταρία	16
4.2.3 Κεραίες και Κυκλώματα RF	17
4.2.4 DSP Αλγόριθμοι και VLSI Κυκλώματα	17
4.2.5 Τεχνικές Διαμόρφωσης και Κωδικοποίησης	17
4.2.6 Το Δίκτυο και η Αρχιτεκτονική του	17
4.2.7 Η Ανάγκη για Cross Layer Design	18
4.3 Ασύρματα Δίκτυα και Τεχνικές Εξοικονόμησης Ενέργειας	18

4.3.1	Ασύρματα Δίκτυα που ευνοούνται από την Εξοικονόμηση Ενέργειας	18
4.3.2	To μAMPS Sensor Network	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΤΟ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ IEEE802.11		20
5.1	Αρχιτεκτονική του Πρωτοκόλλου	20
5.1.1	Τμήματα της Αρχιτεκτονικής	20
5.1.2	Logical Service Interfaces	22
5.1.3	Μοντέλο Αναφοράς	22
5.2	Περιγραφή των Υπηρεσιών MAC	23
5.2.1	Asynchronous Data Service	23
5.2.2	Security Services	23
5.2.3	MSDU Ordering	23
5.3	Είδη των MAC Frames	24
5.3.1	Γενική Μορφή και Είδη των MAC Frames	24
5.3.2	Control Frames	24
5.3.3	Management Frames	24
5.3.4	Data Frames	24
5.4	Η Ασφάλεια του Πρωτοκόλλου	25
5.4.1	Υπηρεσία Authentication	25
5.4.2	Υπηρεσία Privacy	25
5.5	Λειτουργία του MAC Sublayer	26
5.5.1	Αρχιτεκτονική του MAC Sublayer	26
5.5.2	Distributed Coordination Function (DCF)	27
5.5.3	Point Coordination Function (PCF)	31
5.5.4	Fragmentation και Defragmentation	33
5.6	Διαχείριση του MAC Sublayer	33
5.6.1	Γενικά	33
5.6.2	Συγχρονισμός	33
5.6.3	Διαχείριση Ενέργειας	33
5.7	Το Φυσικό Επίπεδο του IEEE802.11 WLAN	34
5.7.1	Λειτουργία και Είδη του Φυσικού Επιπέδου	34
5.7.2	FHSS	34
5.7.3	DSSS	35
5.7.4	IR	35
5.8	Higher-Speed Physical Layer Extension: IEEE802.11b	35
5.8.1	Η Επέκταση IEEE802.11b	35
5.8.2	Η CCK Διαμόρφωση	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – Ο ΠΡΩΤΟΣ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΣ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ		37
6.1	Προδιαγραφές των Εφαρμογών και Εξοικονόμηση Ενέργειας	37
6.1.1	Περιγραφή των Εφαρμογών	37
6.1.2	Εξοικονόμηση Ενέργειας	37
6.2	Παράμετροι του Συστήματος	38
6.2.1	Απόδοση Τιμών στις Παραμέτρους του Συστήματος	38
6.3	Ο Πρώτος Μηχανισμός Εξοικονόμηση Ενέργειας	39
6.3.1	Οι Εφαρμογές και τα Βάρη του Scheduling Αλγόριθμου	39
6.3.2	Η Λειτουργία των Σταθμών κι ο Ρόλος του Beacon Frame	39
6.3.3	Τα MSDUs των Εφαρμογών	39

6.4	Η Προσομοίωση	40
6.4.1	Ο Προσομοιωτής και το Μηχάνημα Προσομοίωσης	40
6.4.2	Προσομοιώσεις και Ζευγάρια Χρηστών	40
6.4.3	Τα MSDUs των Εφαρμογών στην Προσομοίωση	40
6.5	Αποτελέσματα Προσομοίωσης	41
6.5.1	Αποτελέσματα QoS	41
6.5.2	Αποτελέσματα Κατανομής Χρόνου στους Σταθμούς	45
6.5.3	Αποτελέσματα Κατανάλωσης Ενέργειας στους Σταθμούς	49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 – Ο ΔΕΥΤΕΡΟΣ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΣ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ		
	ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	52
7.1	Προδιαγραφές των Εφαρμογών και Εξοικονόμηση Ενέργειας	52
7.1.1	Περιγραφή των Εφαρμογών	52
7.1.2	Εξοικονόμηση Ενέργειας	52
7.2	Παράμετροι του Συστήματος	52
7.2.1	Απόδοση Τιμών στις Παραμέτρους του Συστήματος	52
7.3	Ο Δεύτερος Μηχανισμός Εξοικονόμηση Ενέργειας	52
7.3.1	Οι Εφαρμογές και τα Βάρη του Scheduling Αλγόριθμου	52
7.3.2	Η Λειτουργία των Σταθμών κι ο Ρόλος του Beacon Frame	53
7.3.3	Τα MSDUs των Εφαρμογών	53
7.4	Η Προσομοίωση	53
7.4.1	Ο Προσομοιωτής και το Μηχάνημα Προσομοίωσης	53
7.4.2	Προσομοιώσεις και Ζευγάρια Χρηστών	54
7.4.3	Τα MSDUs των Εφαρμογών στην Προσομοίωση	54
7.5	Αποτελέσματα Προσομοίωσης	54
7.5.1	Αποτελέσματα QoS	54
7.5.2	Αποτελέσματα Κατανομής Χρόνου στους Σταθμούς	59
7.5.3	Αποτελέσματα Κατανάλωσης Ενέργειας στους Σταθμούς	62
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 – ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΔΥΟ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΩΝ		
	ΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	65
8.1	Αποτελέσματα για την Quality of Service	65
8.1.1	Οι Μετρικές PDR και mean Delay	65
8.1.2	Συμπεράσματα	67
8.2	Αποτελέσματα για την Εξοικονόμηση Ενέργειας	68
8.2.1	Η Μετρική System Gain	68
8.2.2	Συμπεράσματα	70
8.3	Τελική Σύγκριση των δύο Μηχανισμών	71
8.3.1	Το Trade-Off μεταξύ της Χωρητικότητας και της Εξοικονόμηση Ενέργειας	71
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ		72
9.1	Συμπεράσματα	72
9.1.1	Quality of Service και Εξοικονόμηση Ενέργειας	72
9.2	Μελλοντικές Επεκτάσεις	72
9.2.1	Ως προς τις Εφαρμογές	72
9.2.2	Ως προς τα Είδη Ασύρματων Δικτύων	73
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		74

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Τα σύγχρονα δίκτυα επικοινωνιών προσπαθούν να εκμεταλλευτούν όσο πιο αποδοτικά μπορούν το διαθέσιμο bandwidth προκειμένου να παρέχουν στους συνδρομητές ολοένα και περισσότερες υπηρεσίες. Ειδικά στα ασύρματα δίκτυα, η πρόκληση γίνεται μεγαλύτερη, δεδομένης της φύσης του ασύρματου μέσου και της κινητικότητας των χρηστών. Η κινητικότητα συνεπάγεται την αναγκαστική τροφοδοσία των συσκευών των χρηστών από μπαταρίες, οι οποίες προσφέρουν στους χρήστες πεπερασμένη μόνο αυτονομία. Έχει παρατηρηθεί ότι μεγάλο μέρος της ενέργειας που καταναλώνουν τα ασύρματα τερματικά καταναλώνεται στο wireless RF interface και γι' αυτό τελευταία γίνεται πολύς λόγος για την ανάπτυξη μηχανισμών που θα μειώνουν την κατανάλωση ενέργειας σε ένα ασύρματο δίκτυο, με σκοπό τη μεγαλύτερη αυτονομία των χρηστών.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η δυνατότητα εξοικονόμησης ενέργειας στο IEEE802.11b Wireless LAN με χρήση κατάλληλων αλγορίθμων χρονοπρογραμματισμού στο MAC layer του πρωτοκόλλου. Μελετήθηκε η εφαρμογή του video/audio streaming σε indoor environment. Οι δύο αλγόριθμοι που σχεδιάστηκαν εκμεταλλεύτηκαν χαρακτηριστικά του MAC layer του πρωτοκόλλου κι έδωσαν αποτελέσματα που ενθαρρύνουν το σχεδιασμό και την ανάπτυξη αλγορίθμων χρονοπρογραμματισμού με κύριο στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Εισαγωγή και Σκοπός της Εργασίας

1.1.1 Εισαγωγή

Η ραγδαία εξέλιξη του Internet και των ασύρματων δικτύων τα τελευταία χρόνια οδήγησε στην ανάπτυξη όλο και περισσότερων εφαρμογών και την παροχή όλο και περισσότερων υπηρεσιών προς τους χρήστες. Με την πάροδο του χρόνου οι εφαρμογές γίνονται περισσότερο απαιτητικές, ως προς το bandwidth, οδηγώντας στην ανάγκη ανάπτυξης αλγορίθμων που να εξασφαλίζουν την παροχή των απαιτούμενων υπηρεσιών προς όλους τους χρήστες. Το όνειρο της προσφοράς στα ασύρματα δίκτυα - κυρίως Wireless LANs και Cellular Mobile Networks – υπηρεσιών ίδιας ποιότητας με τους χρήστες του ενσύρματου Internet βρίσκει εμπόδιο το ασύρματο κανάλι, το οποίο χαρακτηρίζεται από μεγάλες απώλειες διάδοσης, υψηλό θόρυβο και παρεμβολές. Επιπλέον οι χρήστες των ασύρματων δικτύων, λόγω της κινητικότητας τους, έχουν μικρές συσκευές (laptops, PDAs, cell phones), οι οποίες λειτουργούν με την υποστήριξη μπαταρίας κι όχι κάποιας σταθερής πηγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η αργή εξέλιξη της τεχνολογίας μπαταριών σε συνάρτηση με την ολοένα και μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας από τις συσκευές έχει οδηγήσει στην εμφάνιση του ‘ενεργειακού προβλήματος’ στα ασύρματα δίκτυα, καθώς όταν τελειώνει η μπαταρία ενός συνδρομητή αυτός εγκαταλείπει το δίκτυο απογοητευμένος. Το γεγονός ότι ένα σημαντικό ποσοστό της ενέργειας καταναλώνεται στο wireless RF interface των συσκευών οδήγησε τελευταία την έρευνα στην ανάπτυξη τεχνικών με στόχο τη μείωση της ενέργειας που καταναλώνεται στα ασύρματα δίκτυα. Ταυτόχρονα, σχεδιάζονται νέα είδη ασύρματων δικτύων έχοντας ως βασική προδιαγραφή την κατανάλωση της ελάχιστης απαιτούμενης ενέργειας.

1.1.2 Σκοπός της Εργασίας

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία μελετάται η δυνατότητα εξοικονόμησης ενέργειας στους συνδρομητές ενός IEEE802.11b Wireless LAN σε indoor environment, κατά την υλοποίηση των ευαίσθητα χρονικά εφαρμογών του video και audio streaming, χρησιμοποιώντας κατάλληλους αλγορίθμους χρονοπρογραμματισμού στο MAC layer του πρωτοκόλλου. Οι δύο αλγόριθμοι που αναπτύχθηκαν εκμεταλλεύτηκαν την infrastructure μορφή του IEEE802.11b Wireless LAN για την ανάπτυξη της streaming εφαρμογής καθώς και το Power Management του πρωτοκόλλου που επιτρέπει στους σταθμούς – χρήστες να λειτουργούν σε power saving mode, κλείνοντας τα wireless RF interfaces τους όταν δεν υπάρχει ανάγκη για λήψη ή μετάδοση δεδομένων. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι ενθαρρυντικά για την ανάπτυξη παρόμοιων αλγορίθμων και για άλλες εφαρμογές, στο ίδιο καθώς και σε άλλα είδη ασυρμάτων δικτύων.

1.2 Περίληψη

1.2.1 Περίληψη

Το 1^ο Κεφάλαιο αποτελεί την εισαγωγή του παρόντος συγγράμματος.

Το 2^ο Κεφάλαιο επικεντρώνεται στο Internet και στις Multimedia Applications που κυριαρχούν σε αυτό. Αναφερόμαστε επίσης σε γνωστές μεθόδους για συμπίεση multimedia που χρησιμοποιούνται στο Internet.

Το 3^ο Κεφάλαιο περιγράφει τις ιδιαιτερότητες του ασύρματου καναλιού, όπως φαινόμενα πολύοδης διάδοσης, διαλείψεων, παρεμβολών, κλπ. Κατόπιν περιγράφει ένα μοντέλο ασύρματου καναλιού που χρησιμοποιείται συχνά: το Gilbert Elliot Model. Τέλος, δίνονται οι παράμετροι που περιγράφουν το Gilbert Elliot Model που χρησιμοποιούμε στη δική μας μελέτη.

Το 4^ο Κεφάλαιο αφιερώνεται στις τελευταίες έρευνες πάνω στις τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας. Ξεκινά αναλύοντας την κατανάλωση ενέργειας στις συσκευές και καταλήγει στο ότι η εξοικονόμηση ενέργειας μπορεί να επιτευχθεί πραγματικά όταν το δίκτυο σχεδιάζεται με αυτήν την προδιαγραφή. Ο σχεδιασμός πρέπει να γίνει με Cross Layer Design κατά μήκος ολόκληρου του δικτύου, όπως εξηγείται.

Το 5^ο Κεφάλαιο περιγράφει το IEEE802.11 Wireless LAN, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στο MAC layer και στην έκδοση b αυτού, μαζί με το αντίστοιχο Physical layer αυτής.

Το 6^ο και το 7^ο Κεφάλαιο περιγράφουν τον πρώτο και το δεύτερο αλγόριθμο χρονοπρογραμματισμού που υλοποιήσαμε, αντίστοιχα. Εξηγούνται οι προδιαγραφές των εφαρμογών, επιλέγονται οι παράμετροι του συστήματος κι αναλύονται οι αλγόριθμοι. Ακόμη περιγράφονται οι προσομοιώσεις και δίνονται αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα αυτών, τόσο για την QoS, όσο και για τη ζητούμενη εξοικονόμηση ενέργειας.

Το 8^ο Κεφάλαιο συγκρίνει τους δύο αλγορίθμους, διακρίνοντας ένα trade-off μεταξύ της χωρητικότητας του δικτύου και της εξοικονόμησης ενέργειας.

Τέλος, το 9^ο Κεφάλαιο αναλύει τα συμπεράσματα που προέκυψαν και δίνει μερικές ιδέες για μελλοντικές εργασίες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΑΣΥΡΜΑΤΟ INTERNET ΚΑΙ ΠΟΛΥΜΕΣΑ

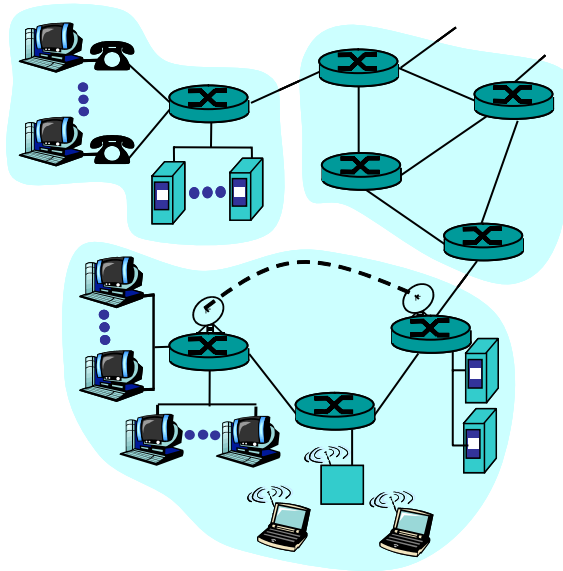
2.1 Ασύρματο Internet

2.1.1 Ιστορική Αναδρομή του Internet

Το σημερινό Internet [Σχ. 1] έχει τις ρίζες του στις αρχές της δεκαετίας του 1960, οπότε ξεκίνησαν οι πρώτες έρευνες για τη Μεταγωγή Πακέτων (packet switching), που οδήγησαν στο πρώτο δίκτυο υπολογιστών, το ARPAnet. Το ARPAnet κατασκευάστηκε από το Advanced Research Project Agency (ARPA) των ΗΠΑ και ξεκίνησε να λειτουργεί το 1969.

Την επόμενη δεκαετία κατασκευάστηκαν τα πρώτα Τοπικά Δίκτυα (LAN) και γεννήθηκε το ενδιαφέρον για μία αρχιτεκτονική που θα διασυνδέει τα διάφορα δίκτυα. Έτσι γεννήθηκε το πρωτόκολλο TCP, που μαζί με τα πρωτόκολλα UDP και IP τελειοποιήθηκαν στο τέλος της δεκαετίας του 1970. Το Internet είχε πλέον γεννηθεί.

Τη δεκαετία του 1980 το Internet εξαπλώθηκε με γρήγορους ρυθμούς μεταξύ των δημόσιων και εκπαιδευτικών οργανισμών των διαφόρων κρατών. Στη Γαλλία αναπτύχθηκε το Minitel, το οποίο υπήρξε ο πρόδρομος του Internet για τους Γάλλους ιδιώτες, αφού εισέβαλλε σε πολλά σπίτια ανοίγοντας τους ορίζοντες του διαδικτύου στον εμπορικό και στον ιδιωτικό τομέα.



Σχ 1: Internet

Η πιο δραματική δεκαετία για την ανάπτυξη του Internet ήταν όμως αυτή του 1990, αφού αναπτύχθηκαν υπηρεσίες οι οποίες ενθάρρυναν κι επιτάχυναν την αποδοχή

και χρήση του από τον ιδιωτικό τομέα. Η πιο επαναστατική υπηρεσία ήταν αυτή του Παγκόσμιου Ιστού (World Wide Web – WWW). Δημιουργήθηκαν οι πρώτοι Web Browsers, ενώ ο οικονομικός ανταγωνισμός των εταιριών κατασκευής Web Browsers, Netscape και Microsoft, θεωρείται ιστορικός. Παράλληλα αναπτύχθηκαν κι άλλες υπηρεσίες, όπως αυτή του ηλεκτρονικού ταχυδρομείου (e-mail), του ηλεκτρονικού εμπορίου (e-commerce) και της μετάδοσης πληροφορίας πολυμέσων (streamed multimedia).

Ταυτόχρονα άνθησε η βιομηχανία παραγωγής λογισμικού (software) και υλικού (hardware) για το Internet, δημιουργώντας εταιρίες – κολοσσούς, όπως τη Microsoft, την AOL, τη Cisco, με δυναμική παρουσία στην παγκόσμια οικονομία.

Τα τελευταία χρόνια η τεχνολογία έχει στραφεί στην οικιακή ευρυζωνική πρόσβαση στο Internet (broadband residential internet access), στο Ασύρματο Internet (Wireless Internet) και στα Peer-To-Peer δίκτυα.

2.1.2 Το Ασύρματο Internet

Το Wireless Internet αναπτύχθηκε ραγδαία στην Ιαπωνία με την τεχνολογία του mobile Internet Access System και του i-mode. Οι συσκευές i-mode, με μέγεθος ενός τυπικού κινητού τηλεφώνου με λίγο μεγαλύτερη οθόνη για την καλύτερη εμφάνιση των ιστοσελίδων, κατέκτησαν την Ιαπωνική αγορά.

Στις ΗΠΑ πάλι το ενδιαφέρον στράφηκε προς τα Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα (Wireless Local Area Networks – WLANs), τα οποία εξασφαλίζουν πρόσβαση στο Internet για τους χρήστες μιας περιοχής που διαθέτουν το κατάλληλο τερματικό, laptop ή Personal Digital Assistant (PDA). Πρωταρχικός στόχος ήταν η κάλυψη πολυσύχναστων κτιρίων, όπως αεροδρομίων, πανεπιστημίων, ξενοδοχείων, καθώς και η ασύρματη επικοινωνία οικιακών συσκευών. Η ανάπτυξη του WLAN γρήγορα ξεπέρασε αυτή του αντίστοιχου Ευρωπαϊκού προτύπου για Ασύρματα Δίκτυα, του HIPERLAN. Ο στόχος είναι πλέον η παροχή στους χρήστες WLANs όσο το δυνατόν περισσότερων υπηρεσιών από αυτές που παρέχει το Internet.

2.2 Τα Πολυμέσα (Multimedia) στο Internet

2.2.1 Εφαρμογές Πολυμέσων

Αυτό που κάνει τις εφαρμογές multimedia (πολυμέσων) να διαφέρουν από τις άλλες εφαρμογές δεδομένων είναι ότι είναι πολύ πιο ευαίσθητες στις καθυστερήσεις (delay-sensitive) αλλά από την άλλη είναι πιο ανθεκτικές στην απώλεια δεδομένων (loss-tolerant) αφού οι απώλειες αυτές μπορούν συχνά να διορθωθούν από την εφαρμογή. Οι πιο γνωστές εφαρμογές multimedia είναι οι ακόλουθες τρεις [1] :

- Streaming Stored Video and Audio

Σε αυτές τις εφαρμογές οι χρήστες ζητούν να δουν ή να ακούσουν συμπιεσμένο video ή audio, το οποίο βρίσκεται αποθηκευμένο σε κάποιο server. Τα κύρια

χαρακτηριστικά αυτού του είδους της εφαρμογής είναι γνωστά ως stored media, streaming και continuous playout.

Με τον όρο stored media εννοούμε ότι το αρχείο multimedia έχει προεγγραφεί κι αποθηκευτεί στο server και ότι ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επέμβει στη ροή της πληροφορίας κάνοντας pause, rewind ή fast-forward στην εφαρμογή του. Η καθυστέρηση από τη στιγμή που έγινε η επέμβαση του χρήστη μέχρι αυτή να εκδηλωθεί στην εφαρμογή πρέπει να είναι της τάξης των λίγων δευτερολέπτων, ώστε οι χρήστες να μείνουν ικανοποιημένοι.

Η έννοια του streaming έγκειται στο ότι ο χρήστης αρχίζει να ‘παίζει’ το video/audio λίγα δευτερόλεπτα αφού ξεκινήσει να το λαμβάνει από το server. Η εφαρμογή συνεχίζει ‘παίζοντας’ τμήματα του multimedia αρχείου ενώ συγχρόνως λαμβάνει μεταγενέστερα τμήματα αυτού.

Από τη χρονική στιγμή που ο χρήστης ξεκινά να ‘παίζει’ το αρχείο multimedia που τον ενδιαφέρει, η εφαρμογή είναι υποχρεωμένη να συνεχίσει να ‘παίζει’ βασισμένη στο χρόνο εγγραφής της εφαρμογής. Σε αυτό το χαρακτηριστικό αναφέρεται ο όρος continuous playout, βάσει του οποίου γεννιέται η ευαισθησία της εφαρμογής στις καθυστερήσεις.

- **Streaming Live Video and Audio**

Αυτές οι εφαρμογές επιτρέπουν στους χρήστες να παρακολουθήσουν ζωντανά μία τηλεοπτική ή ραδιοφωνική μετάδοση. Εδώ οι χρήστες δεν έχουν τη δυνατότητα να επέμβουν στη ροή της πληροφορίας της εφαρμογής, ωστόσο η έννοιες των streaming και continuous playout παραμένουν και οι χρονικοί περιορισμοί στις καθυστερήσεις είναι εξίσου αυστηροί.

- **Real-Time Interactive Video and Audio**

Αυτές οι εφαρμογές επιτρέπουν στους χρήστες να επικοινωνούν μεταξύ τους σε πραγματικό χρόνο. Ουσιαστικά η μετάδοση audio είναι η τηλεφωνική συνδιάλεξη και η μετάδοση video είναι η τηλεδιάσκεψη. Χαρακτηριστικό αυτών των εφαρμογών είναι η μεγάλη τους ευαισθησία στις χρονικές καθυστερήσεις.

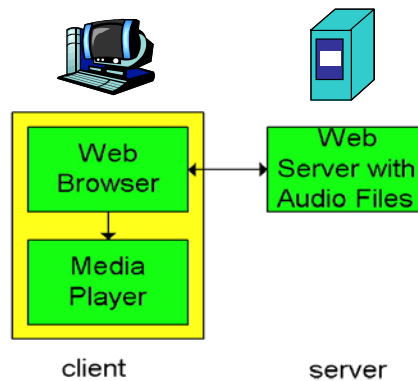
2.2.2 Αρχιτεκτονικές Πρόσβασης Video/Audio μέσω ενός Web Server

Το αποθηκευμένο αρχείο multimedia μπορεί να βρίσκεται είτε σε ένα Web Server, ο οποίος μεταδίδει το αρχείο στο χρήστη μέσω HTTP, είτε σε έναν multimedia streaming server, ο οποίος χρησιμοποιεί κάποιο άλλο από το HTTP πρωτόκολλο (είτε ιδιωτικό, είτε κάποιο open standard). Οι τρεις πιο συνηθισμένες αρχιτεκτονικές για video/audio streaming είναι οι επόμενες:

- Η πιο απλή αρχιτεκτονική λειτουργεί ως εξής:
 - Ο browser του χρήστη εγκαθιδρύει μια TCP σύνδεση με το Web server και ζητά το αρχείο multimedia με ένα HTTP μήνυμα.

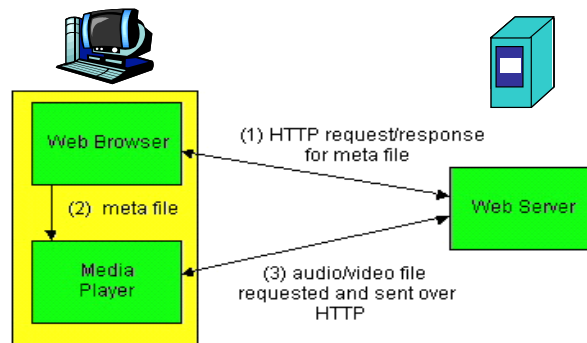
- Ο Web server στέλνει το αρχείο multimedia στο browser του χρήστη χρησιμοποιώντας ένα HTTP μήνυμα.
- Η επικεφαλίδα αυτού του μηνύματος παρέχει στο browser του χρήστη πληροφορία για την κωδικοποίηση που έχει χρησιμοποιηθεί κι έτσι αυτός περνάει το αρχείο στον κατάλληλο multimedia player.
- Ο multimedia player διαχειρίζεται στη συνέχεια το αρχείο.

Δυστυχώς ο ρόλος του browser του χρήστη ως interface αυξάνει δραματικά την καθυστέρηση της εφαρμογής με αποτέλεσμα να μην προτιμάται η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική [Σχ. 2].



Σχ 2 : Πρώτη Αρχιτεκτονική

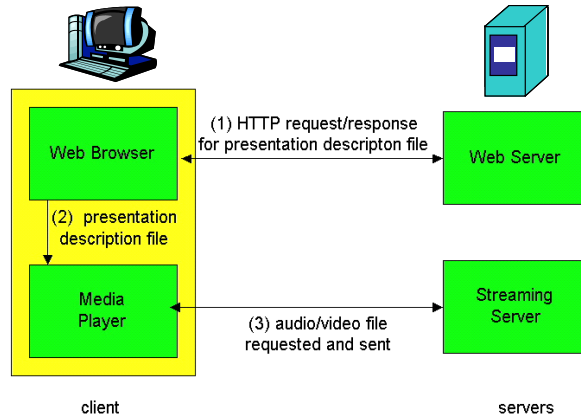
- Η δεύτερη αρχιτεκτονική που θα παρουσιάσουμε έχει το πλεονέκτημα ότι ο server στέλνει απευθείας το αρχείο multimedia στο multimedia player του χρήστη, μειώνοντας τη συνολική καθυστέρηση της εφαρμογής [Σχ. 3].



Σχ 3 : Δεύτερη Αρχιτεκτονική

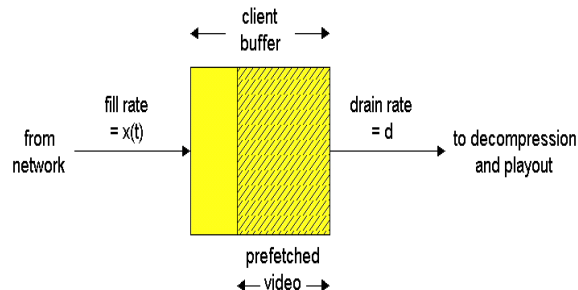
- Ο χρήστης ζητά ένα αρχείο multimedia μέσω ενός link.
- Το link δείχνει σε ένα meta file, το οποίο περιέχει τη URL του πραγματικού αρχείου multimedia. Ο Web server στέλνει το meta file στο browser του χρήστη χρησιμοποιώντας ένα HTTP μήνυμα.

- Ο browser του χρήστη αποκωδικοποιεί το μήνυμα και περνά το meta file στον κατάλληλο multimedia player.
 - Ο multimedia player εγκαθιδρύει τη δική του TCP σύνδεση με τον HTTP server και ζητά το αρχείο multimedia με ένα HTTP μήνυμα.
 - Το αρχείο γίνεται streamed μέσω της TCP σύνδεσης.
- Η τρίτη αρχιτεκτονική χρησιμοποιεί επιπλέον ένα streaming server, ο οποίος αναλαμβάνει το streaming του αρχείου multimedia. [Σχ. 4]. Έτσι, ο multimedia player του χρήστη κι ο streaming server μπορούν να επικοινωνήσουν χρησιμοποιώ-



Σχ 4 : Τρίτη Αρχιτεκτονική

ντας δικό τους πρωτόκολλο. Υπάρχουν έτσι αρκετοί τρόποι με τους οποίους μπορεί να γίνει η μετάδοση του αρχείου multimedia αλλά κατά τον πιο συνηθισμένο ο multimedia player καθυστερεί για λίγα (2 ως 5) δευτερόλεπτα την εκκίνηση της εφαρμογής, γεμίζοντας τον buffer της εφαρμογής, ώστε να εξαλείψει το jitter. Ο όρος jitter αναφέρεται στη μεταβλητότητα της καθυστέρησης των πακέτων του ίδιου stream. Αφού γεμίσει με μερικά πακέτα ο buffer της εφαρμογής, τότε ο multimedia player ξεκινά να 'παίζει' το αρχείο με σταθερό ρυθμό d . [Σχ. 5].



Σχ 5 : Ο buffer της εφαρμογής

2.3 Κωδικοποίηση Πολυμέσων

Το μεγάλο μέγεθος των multimedia αρχείων οδήγησε στην ανάπτυξη αλγορίθμων συμπίεσης για αυτά, με στόχο την ευκολότερη αποθήκευση τους στις μονάδες αποθήκευσης δεδομένων των Ηλεκτρονικών Υπολογιστών καθώς και την ευκολότερη μετάδοση τους από τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα.

2.3.1 Κωδικοποίηση Video

Ο πλέον δημοφιλής αλγόριθμος για τη συμπίεση του video είναι αυτός του MPEG 4 [2]. Το video είναι μία ακολουθία από εικόνες με ρυθμό 24-30 fps (frames per second). Η ακολουθία αυτή προσφέρεται για συμπίεση, τόσο στο διαστάσιμο χώρο, όσο και στο χρόνο. Ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί τρεις διαφορετικούς αλγορίθμους για τη συμπίεση των εικόνων παράγοντας τις συμπιεσμένες εικόνες τύπου I, P και B. Η σειρά που τις γράψαμε ξεκινά από την περισσότερο πολύτιμη σε πληροφορία και μεγαλύτερη σε μέγεθος συμπιεσμένη εικόνα προς τη μικρότερη. Αυτές οι εικόνες μεταδίδονται με διαφορετική αλληλουχία από την αλληλουχία παραγωγής τους από τον αλγόριθμο συμπίεσης, με αποτέλεσμα η εφαρμογή αποσυμπίεσης τους, δηλαδή ο multimedia player, να χρειάζεται λίγα MByte μνήμης. Στα σύγχρονα laptops και PDAs, στα οποία η μνήμη είναι άφθονη, αυτό δε δημιουργεί πρόβλημα. Ο αλγόριθμος πετυχαίνει συμπίεση της τάξης του 30:1 με 60:1.

Άλλοι δημοφιλείς αλγόριθμοι για συμπίεση video είναι οι MPEG2, H.261, ενώ τελευταία γίνεται πολύς λόγος για το MPEG7.

2.3.2 Κωδικοποίηση Audio

Η συνηθισμένη διαδικασία μετατροπής ενός αναλογικού ηχητικού σήματος σε ψηφιακό γίνεται με την κωδικοποίηση PCM (Pulse Code Modulation), στα εξής βήματα:

- Δειγματοληψία του αναλογικού σήματος. Συνήθως ο ρυθμός δειγματοληψίας, βάσει του θεωρήματος Nyquist, ισούται με 8000 samples/second.
- Κβαντισμός των δειγμάτων σε μία τιμή από ένα πεπερασμένο σύνολο τιμών. Αυτές οι τιμές ονομάζονται επίπεδα κβαντισμού. Το σύνολο επιπέδων έχει συνήθως 2^k επίπεδα (k : ακέραιος), με συνηθέστερη τιμή τα 256. Ο κβαντισμός μπορεί να είναι είτε ομοιόμορφος (τυπικά), είτε όχι (μ -law, A-law PCM).
- Κωδικοποίηση των κβαντισμένων δειγμάτων χρησιμοποιώντας ένα συγκεκριμένο αριθμό από bit. Για 2^k επίπεδα κβαντισμού χρησιμοποιούνται k bit.

Συνήθως για τα συνηθισμένα αναλογικά ηχητικά σήματα χρησιμοποιείται δειγματοληψία με ρυθμό 8000 samples/sec και κβαντισμός με 256 επίπεδα, οδηγώντας σε ψηφιακό ηχητικό σήμα με ρυθμό 64 kbps.

Άλλες δημοφιλείς τεχνικές κωδικοποίησης audio είναι η κωδικοποίηση GSM (13 kbps), που είναι κατάλληλη για ομιλία (speech), και το MPEG1 layer3 (γνωστό ως MP3) που είναι κατάλληλο για συμπίεση stereo μουσικής. Η κωδικοποίηση MP3 βασίζεται σε

μοντέλα της ανθρώπινης ακοής και χρησιμοποιείται για να δώσει ρυθμούς από 64 ως και 128 kbps (stereo), με λόγο συμπίεσης από 24:1 ως 12:1, αντίστοιχα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΤΟ ΑΣΥΡΜΑΤΟ ΚΑΝΑΛΙ

3.1 Το Ασύρματο Κανάλι

3.1.1 Γενικά

Το ασύρματο κανάλι χαρακτηρίζεται από μεγάλες απώλειες ισχύος καθώς τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα ταξιδεύουν στον ελεύθερο χώρο. Στο εξωτερικό των κτιρίων περιβάλλον (outdoor environment) οι απώλειες (path loss), μετρημένες σε dB, δίνονται από τη σχέση $PL = 20\log(4\pi d/\lambda)$ [3], όπου d η απόσταση πομπού-δέκτη και λ το μήκος κύματος του μεταδιδόμενου σήματος. Στο εσωτερικό των κτιρίων (indoor environment) οι απώλειες αυξάνονται καθώς τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα συναντούν εμπόδια όπου ανακλώνται και στα οποία μερικώς διεισδύουν, δημιουργώντας φαινόμενα πολύοδης διάδοσης (multipath propagation) και σκίασης (shadowing). Γι' αυτό ένας εμπειρικός κανόνας λέει ότι για αποστάσεις πομπού-δέκτη μεγαλύτερες των 20 ποδών (ft) πρέπει να προστίθεται ένας διορθωτικός παράγοντας των 30 dB ανά 100 ft.

3.1.2 Διαλείψεις

Εξαιτίας της πολύοδης διάδοσης πολλαπλά αντίγραφα του αρχικού σήματος φτάνουν με διαφορά φάσης στο δέκτη με αποτέλεσμα τα σήματα να εξουδετερώνουν το ένα το άλλο, όταν η διαφορά φάσης είναι 180° , ή να ενισχύουν το ένα το άλλο, όταν η διαφορά φάσης είναι 0° . [4]

Αν επιπλέον κάποιος από τους χρήστες κινείται (mobility), τότε μεταβάλλονται οι σχετικές φάσεις των πολλαπλών αντιγράφων του εκπεμπόμενου σήματος που λαμβάνει ο δέκτης. Έτσι προκύπτουν εντονότερα φαινόμενα διάλειψης (multipath fading). Όταν ο βαθμός ενίσχυσης ή αναίρεσης του λαμβανόμενου σήματος είναι διαφορετικός για τις διαφορετικές συχνότητες του εκπεμπόμενου σήματος, τότε η απόκριση συχνότητας του καναλιού παρουσιάζει βυθίσματα σε ορισμένες συχνότητες. Αυτό το είδος διάλειψης είναι γνωστό ως frequency selective fading. Αν αντιθέτως ο βαθμός ενίσχυσης ή αναίρεσης του λαμβανόμενου σήματος είναι παρόμοιος για διαφορετικές συχνότητες μετάδοσης του εκπεμπόμενου σήματος, τότε η απόκριση συχνότητας του καναλιού μοιάζει επίπεδη και έχουμε διάλειψη τύπου flat fading (frequency non-selective). Στην τελευταία περίπτωση η εξασθένηση του σήματος είναι πιθανό να ακολουθεί την κατανομή Rayleigh, Rice ή Nakagami, οπότε λέμε ότι έχουμε διάλειψη Rayleigh, Rice ή Nakagami fading αντίστοιχα. Σημειώνουμε τέλος ότι οι διαλείψεις στο πεδίο του χρόνου εμφανίζονται με το φαινόμενο της διασυμβολικής παρεμβολής (Inter Symbol Interference) [4].

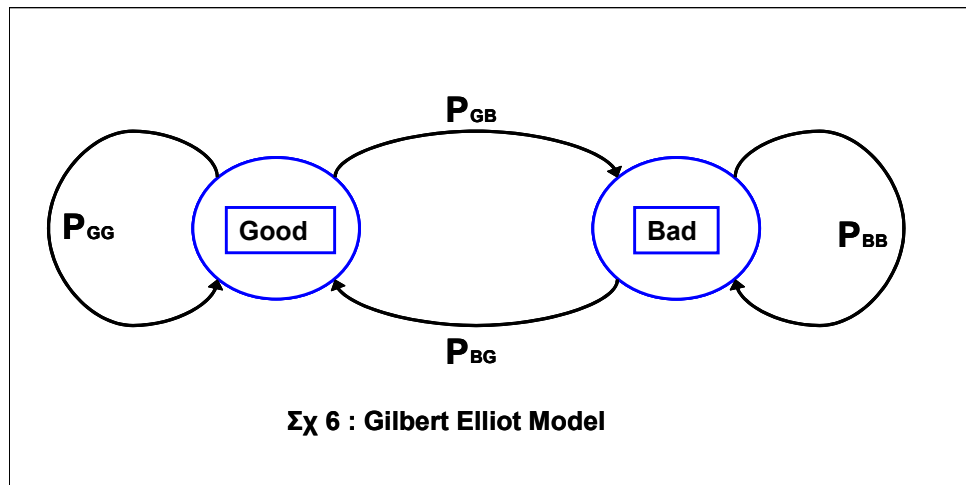
3.1.2 Αντιμετώπιση Διαλείψεων

Για την αντιμετώπιση της πολύοδης διάδοσης έχουν προταθεί διάφορες τεχνικές. Πολύ γνωστή είναι η διεύρυνση του φάσματος (Spread Spectrum) που γίνεται είτε με μία ευθεία ακολουθία δεδομένων (Direct Sequence) είτε με άλματα στη συχνότητα μετάδοσης (Frequency Hopping). Το Direct Sequence Spread Spectrum ενσωματώθηκε στο πρότυπο του WLAN IEEE802.11 και στην επέκταση b αυτού. Άλλη γνωστή τεχνική είναι η χρήση παράλληλων καναλιών δεδομένων, με διαφορετικό πιλοτικό τόνο στο καθένα. Έτσι οδηγούμαστε στο Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM), που ενσωματώθηκε στην επέκταση a του WLAN IEEE802.11. Άλλες τεχνικές χρησιμοποιούν ισοσταθμιστές για το κανάλι ή και κατευθυντικές κεραίες.

3.2 Το Gilbert-Elliot Model

3.2.1 Ένα χρήσιμο μοντέλο για το Ασύρματο Κανάλι

Το μοντέλο των Gilbert-Elliot είναι ιδιαίτερα χρήσιμο, απλό και δημοφιλές [5]. Θεωρεί μία Μαρκοβιανή αλυσίδα δύο καταστάσεων, οι οποίες ονομάζονται Καλή (Good) και Κακή (Bad), αντίστοιχα [Σχ. 6]. Κάθε κατάσταση χαρακτηρίζεται από μία τιμή του Symbol Error Rate (SER), με όνομα E_G και E_B αντίστοιχα. Συνήθως $E_G \ll E_B$.



Σε κάθε κατάσταση θεωρούμε ότι τα σφάλματα των bits συμβαίνουν ανεξάρτητα το ένα από το άλλο. Το μοντέλο προσδιορίζεται πλήρως από τις τιμές των E_G και E_B καθώς και

τον 2x2 στοχαστικό πίνακα μετάβασης καταστάσεων $P = \begin{bmatrix} P_{GG} & P_{GB} \\ P_{BG} & P_{BB} \end{bmatrix}$. Προφανώς

$P_{GG} + P_{GB} = 1$ και $P_{BG} + P_{BB} = 1$. Ο μέσος χρόνος που περνά το κανάλι σε κάθε κατάσταση (sojourn time) υπολογίζεται, με βάση τη Γεωμετρική κατανομή, ίσος με

$T_G = \frac{1}{1-P_{GG}} T_s$ και $T_B = \frac{1}{1-P_{BB}} T_s$ αντίστοιχα, όπου T_s η διάρκεια μετάδοσης ενός

συμβόλου. Η μέση τιμή του BER για το κανάλι υπολογίζεται ως $E = E_G P(\text{State} = \text{Good}) + E_B P(\text{State} = \text{Bad})$ [6].

Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι το Gilbert-Elliot μοντέλο κατασκευάζεται λαμβάνοντας υπόψη την κατανομή του Signal-to-Noise Ratio (SNR) στην είσοδο του δέκτη, δηλαδή του Received-SNR ή R-SNR, καθώς επίσης και την κινητικότητα των χρηστών. Το μοντέλο υποθέτει ότι το κανάλι χαρακτηρίζεται από Rayleigh fading, δηλαδή ότι ο πομπός κι ο δέκτης κινούνται με μικρές ταχύτητες, ώστε η συχνότητα Doppler να είναι αρκετά μικρότερη από το ρυθμό μετάδοσης συμβόλων (Symbol Rate), και ότι υπάρχουν μερικές - όχι πολύ λίγες όμως - διαδρομές διάδοσης του σήματος (paths) μεταξύ του πομπού και του δέκτη, που φέρνουν στο δέκτη σήματα με περίπου την ίδια ισχύ. Η τελευταία παραδοχή εξασφαλίζει την ισχύ του Κεντρικού Οριακού Θεωρήματος στη σχετική απόδειξη – κατασκευή του μοντέλου. Οι παραδοχές αυτές ωστόσο μπορούν να γίνουν με σχετική ευκολία στο indoor environment των WLANs, όπου υπάρχουν κι άλλα μονοπάτια διάδοσης, εκτός από το απευθείας (line-of-sight path) [6].

Για την κατασκευή της Μαρκοβιανής αλυσίδας με καταστάσεις $\{0,1\} = \{\text{Bad}, \text{Good}\}$ ορίζουμε ως $P_{2 \times 2} = ((p_{ij}))$, $i, j \in \{0,1\}$ το πίνακα μετάβασης καταστάσεων, και $U = (u_0, u_1)^T$ το διάνυσμα σταθερής κατάστασης αυτού. Ορίζουμε επίσης $E = (e_0, e_1)^T$ το διάνυσμα της τιμής του SER για κάθε κατάσταση. Στόχος είναι ο προσδιορισμός των τιμών των P και E [6].

Κβαντίζουμε στη συνέχεια το λαμβανόμενο SNR (R-SNR) σε δύο διαστήματα, τα (A_0, A_1) και (A_1, A_2) , με A_0 την ελάχιστη τιμή του R-SNR, A_1 ένα ενδιάμεσο κατώφλι του R-SNR και A_2 τη μέγιστη τιμή του R-SNR. Συνήθως είναι $A_0 = 0$ και $A_2 = \infty$. Ορίζουμε επίσης τη μέση τιμή του λαμβανόμενου SNR ως $\rho = E[R\text{-SNR}]$.

Άλλες σημαντικές παράμετροι του συστήματος είναι ο ρυθμός μετάδοσης συμβόλων (Symbol Rate - R_s), η μέγιστη συχνότητα Doppler και το level-crossing στο κατώφλι A_1 [6]. Η μέγιστη συχνότητα Doppler για το σύστημα υπολογίζεται ως

$f_{dm} = \frac{u}{\lambda}$, όπου u η ταχύτητα κίνησης του δέκτη και λ το μήκος κύματος της ζεύξης. Ως level-crossing ορίζεται ο ρυθμός με τον οποίο το R-SNR πέφτει κάτω από ένα δεδομένο κατώφλι K ως: $N_K = \sqrt{\frac{2\pi K}{\rho}} f_{dm} \exp(-\frac{K}{\rho})$. Έτσι για το κατώφλι A_1 έχουμε απλά $K=A_1$.

Με τις κατάλληλες τιμές των παραμέτρων R_s , λ , u , ρ και A_1 υλοποιούνται οι παρακάτω υπολογισμοί [6]. Σημειώνουμε ότι με $R_F(R-SNR)$ και με $P_S(R-SNR)$ συμβολίζουμε τις συναρτήσεις του Rayleigh Fading και του Probability of Erroneous Symbol ως προς το λαμβανόμενο SNR (R-SNR), αντίστοιχα. Υπενθυμίζουμε ακόμη ότι στα P , U και E συμβολίζουμε $\{0,1\} = \{\text{Bad}, \text{Good}\}$.

- f_{dm} και N_{A_1}
- $u_i = \int_{A_i}^{A_{i+1}} [R_F(R-SNR)] d(R-SNR)$, $i \in \{0,1\}$
- $e_i = \left(\int_{A_i}^{A_{i+1}} [R_F(R-SNR) P_S(R-SNR)] d(R-SNR) \right) / u_i$, $i \in \{0,1\}$

$$- P_{01} = \frac{N_{A_1}}{(R_s u_0)} \text{ και } P_{00} = 1 - P_{01}$$

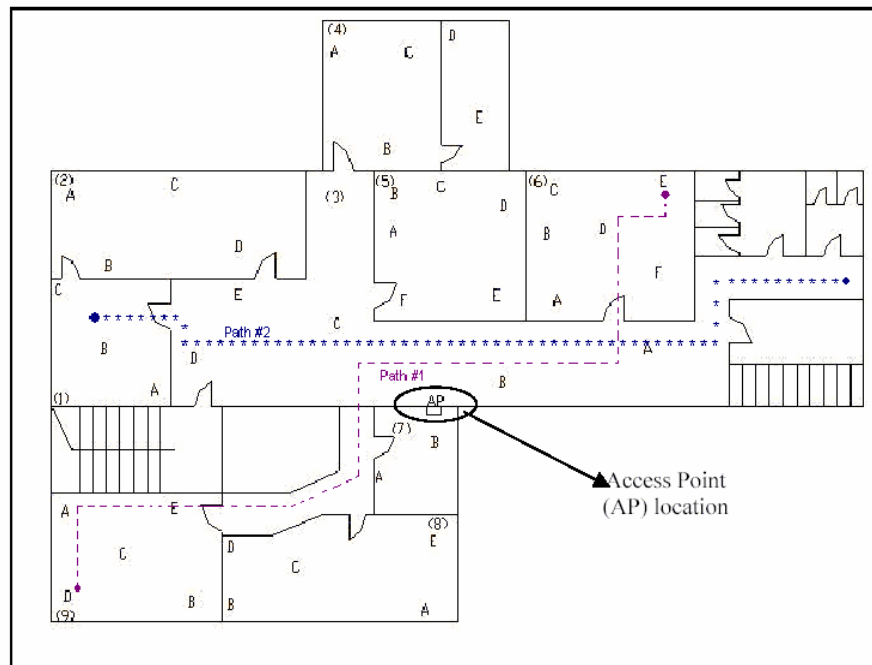
$$- P_{10} = \frac{N_{A_1}}{(R_s u_1)} \text{ και } P_{11} = 1 - P_{10}$$

3.3 Το Gilbert-Elliott Model που χρησιμοποιούμε

3.3.1 Παράμετροι για το Μοντέλο

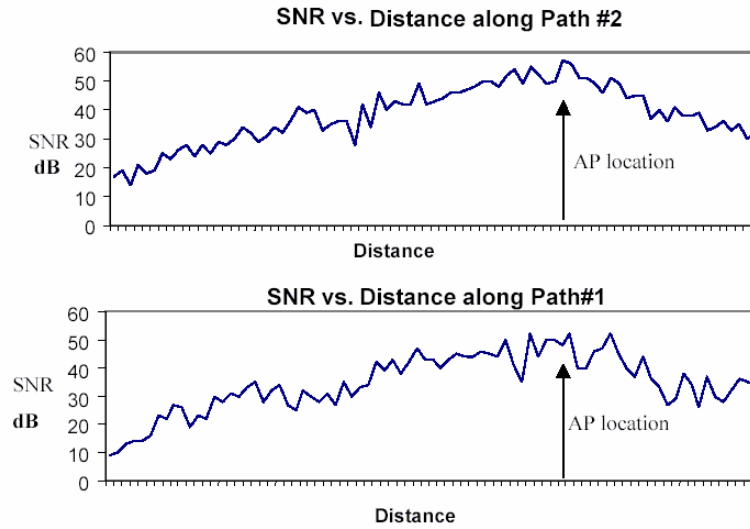
Το WLAN IEEE802.11b χρησιμοποιεί τη διαμόρφωση CCK (Complementary Code Keying) στα 11 Mbps. Αυτή η διαμόρφωση κωδικοποιεί οκτάδες από bit σε σύμβολα. Περισσότερα για αυτήν έχουμε στο 5^ο Κεφάλαιο της εργασίας. Έτσι λοιπόν έχουμε $R_s = 1.375$ MSps. Το μήκος κύματος για τη συχνότητα των 2.4 GHz που χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο είναι $\lambda = 125$ mm. Θεωρώντας τώρα το εσωτερικό ενός κτιρίου (Indoor environment), όπου οι χρήστες κινούνται με μικρές ταχύτητες – περίπου 2 ή 3 km/h – παρατηρούμε ότι $f_{dm} < 7$ Hz, δηλαδή αρκετά μικρή.

Μελετώντας τη συμπεριφορά του R-SNR [7] βλέπουμε ότι σε πανεπιστημιακά κτίρια με εσωτερικούς τοίχους από πολυμερή υλικά [Σχ. 7] και για αποστάσεις το πολύ



Σχ 7 : Εσωτερικό ενός κτιρίου – SNR Testbed

25-30 m αυτό παίρνει αρκετά υψηλές τιμές [Σχ. 8]. Γι' αυτό θεωρήσαμε ότι η μέση τιμή του λαμβανόμενου SNR είναι $E[R-SNR] = 27$ dB.



Σχ. 8 : Μετρούμενο SNR στα δύο μονοπάτια

3.3.2 Αριθμητικά Αποτελέσματα

Επειδή η τιμή του $E[R-SNR]$ είναι αρκετά υψηλή, συμπεραίνουμε ότι το κανάλι είναι σχετικά 'καλό'. Μετά τους υπολογισμούς της 3.2.1 έχουμε ότι $E_G = 8E-8$ και $E_B = 4E-5$ ενώ $P_{GB} = 6.19944E-6$ και $P_{BG} = 1.36388E-5$. Και οι δύο τιμές για το SER είναι αρκετά υψηλές, συμφωνώντας με το γεγονός ότι το $E[R-SNR]$ είναι υψηλό. Τέλος παρατηρούμε ότι το κανάλι μένει περισσότερο χρόνο στην 'Καλή' κατάσταση, επειδή $P_{GB} < P_{BG}$ και $T_G > T_B$.

Η πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης πακέτου μπορεί να υπολογιστεί εύκολα. Θεωρούμε ένα πακέτο με L symbols - στην περίπτωση μας $8L$ bits ή L bytes - από τα οποία L_G symbols μεταδίδονται όσο το κανάλι βρίσκεται στην κατάσταση Good και L_B symbols όσο το κανάλι βρίσκεται στην κατάσταση Bad. Προφανώς $L_G + L_B = L$. Το

πακέτο μεταδίδεται σωστά όταν όλα τα symbols μεταδίδονται σωστά. Έτσι υπολογίζουμε

$$\text{ότι } P_{success} = (1 - SER_G)^{L_G} (1 - SER_B)^{L_B}.$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : **Η ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΑ** **ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ**

4.1 Κατανάλωση Ισχύος Σε Ασύρματες Συσκευές

4.1.1 Γενικά

Οι ασύρματες συσκευές οι οποίες κύρια μας ενδιαφέρουν είναι οι φορητοί υπολογιστές (laptops) και τα PDAs. Από σχετικές μελέτες [8] έχει αποδειχθεί ότι οι συσκευές ενός laptop που καταναλώνουν την περισσότερη ισχύ είναι ο επεξεργαστής (CPU), ο σκληρός δίσκος, η οθόνη και η κάρτα του ασύρματου δικτύου (wireless network interface card). Από την άλλη, οι ασύρματες συσκευές είναι εφοδιασμένες με μπαταρία, η οποία όμως έχει αποθηκευμένη πεπερασμένη ποσότητα ενέργειας. Με στόχο τη μεγαλύτερη αυτονομία της συσκευής άρχισαν να αναπτύσσονται διάφορες τεχνικές, οι οποίες μειώνουν την κατανάλωση ισχύος στα διάφορα υποσυστήματα αυτής. Οι πιο συνηθισμένες τεχνικές, σβήνουν (turn off) εκείνα τα τμήματα των υποσυστημάτων των συσκευών που δε χρησιμοποιούνται. Πολλές φορές δε, σβήνουν ολόκληρα υποσυστήματα. Έτσι, η καταναλισκόμενη ισχύς μειώνεται. Μακροπρόθεσμα, αυτές οι τεχνικές μπορούν να παρατείνουν αρκετά τη διάρκεια μιας μπαταρίας και είναι γνωστές ως Τεχνικές Εξοικονόμησης Ενέργειας (Power Saving Techniques). Εμείς ενδιαφερόμαστε για την ισχύ που καταναλώνει η wireless network interface card.

4.2 Κατανάλωση Ισχύος Στη Wireless Network Interface Card

4.2.1 Γενικά

Όπως θα δούμε πολλά επίπεδα του ασύρματου δικτύου και της κάρτας δικτύου επηρεάζουν τη συνολικά καταναλισκόμενη ισχύ. Αυτό μας οδηγεί σε σημαντικά συμπεράσματα σχετικά με τη δομή ενός ασύρματου δικτύου με περιορισμούς κατανάλωσης ενέργειας (power saving constraints).

4.2.2 Μπαταρία

Έχουμε ήδη μιλήσει για το σπουδαίο ρόλο που παίζει η μπαταρία σε μία φορητή συσκευή. Συνήθως η μπαταρία επιλέγεται έτσι ώστε το σύστημα να είναι αυτόνομο για αρκετό χρονικό διάστημα. Τέλος, η τεχνολογία κατασκευής μπαταριών δε δείχνει γρήγορα βήματα εξέλιξης [9]. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι η ενεργειακή πυκνότητα των μπαταριών διπλασιάζεται κάθε 15 χρόνια περίπου, γεγονός που οφείλεται στο ότι η τεχνολογία μπαταριών βασίζεται στη χημεία και στις χημικές ενώσεις.

4.2.3 Κεραίες και Κυκλώματα RF

Σημαντική είναι επίσης και η επιλογή της κεραίας της wireless network interface card όπως και η κατανάλωση ισχύος στα RF κυκλώματα που τη συνοδεύουν, δηλαδή στους ενισχυτές και στα φίλτρα [9,10]. Ως γνωστόν οι κατευθυντικές κεραίες εκμεταλλεύονται την εκπεμπόμενη ισχύ περισσότερο αποδοτικά από τις ομοιοκατευθυντικές. Τελευταία γίνεται αρκετή έρευνα και για low power electronics με ενθαρρυντικά αποτελέσματα.

4.2.4 DSP Αλγόριθμοι και VLSI Κυκλώματα

Εξίσου σημαντικός είναι και ο ρόλος των ψηφιακών κυκλωμάτων (VLSI κυκλώματα) μίας wireless network interface card. Αυτά υλοποιούν την επεξεργασία του λαμβανόμενου, και πλέον ψηφιακού, σήματος. Τα low power VLSI είναι αρκετά διαδεδομένα και συνεχίζεται η έρευνα στο συγκεκριμένο τομέα, τόσο με την περισσότερο διαδεδομένη τεχνολογία CMOS, όσο και με άλλες, όπως είναι αυτή του GaAs και του InP [9]. Οι DSP (Digital Signal Processing) αλγόριθμοι που υλοποιούνται από τα VLSI κυκλώματα πρέπει επίσης να είναι σχεδιασμένοι με γνώμονα τη μικρότερη δυνατή κατανάλωση ισχύος [10].

4.2.5 Τεχνικές Διαμόρφωσης και Κωδικοποίησης

Οι τεχνικές διαμόρφωσης και κωδικοποίησης παίζουν επίσης σημαντικό ρόλο. Αυτό συμβαίνει γιατί σημαντικές παράμετροι του τηλεπικοινωνιακού συστήματος, όπως το bit rate και η ενέργεια bit καθορίζονται σε αυτά. Βέβαια, αυτές οι τεχνικές πρέπει να είναι αποδοτικές, κυρίως ως προς το Bit Error Rate, και γι' αυτό λαμβάνεται υπόψη η συμπεριφορά του καναλιού για το οποίο σχεδιάζονται [11,12].

4.2.6 Το Δίκτυο και η Αρχιτεκτονική αυτού

Ο κατάλληλος σχεδιασμός ενός δικτύου μπορεί να εξοικονομήσει αρκετή ισχύ στους χρήστες του. Ο σχεδιασμός αυτός αναφέρεται σε όλα τα επίπεδα του δικτύου και έχει πολλές πτυχές [13].

Τα πακέτα πρέπει να έχουν όσο το δυνατόν μικρότερο overhead ώστε να μεγιστοποιείται η ωφέλιμη ισχύς που δαπανάται στα bits.

Ο σχεδιασμός του MAC layer επιβάλλει για λόγους απόδοσης την αποφυγή των συγκρούσεων μεταξύ των πακέτων των χρηστών που επιθυμούν να μεταδώσουν δεδομένα. Παράλληλα όμως η κάθε σύγκρουση σημαίνει και απώλεια ενέργειας στους συγκρουόμενους χρήστες. Ο χρονοπρογραμματισμός των μεταδόσεων στο MAC layer ενώ οι χρήστες ανοίγουν και κλείνουν τις συσκευές τους (on-off mode) προσπαθώντας να εξοικονομήσουν ισχύ έχει δώσει πολύ καλά αποτελέσματα σε ορισμένες εφαρμογές. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι τροποποιώντας το TCP/IP πρωτόκολλο στο base station ενός Mobile Network [14] για την εφαρμογή του World Wide Web, οι συγγραφείς κατάφεραν να εξοικονομήσουν περίπου το 60% της καταναλισκόμενης ενέργειας του συστήματος.

Σημαντικές βελτιώσεις μπορούν να γίνουν και στα πρωτόκολλα δρομολόγησης του δικτύου. Ειδικά για τα ασύρματα δίκτυα προτιμάται το routing με πολλά hops, αφού η μεταδιδόμενη ισχύς μειώνεται εκθετικά με την απόσταση: $P(r) = P_o r^{-\alpha}$, όπου $2 \leq \alpha \leq 4$ και P_o η εκπεμπόμενη ισχύς [10].

Η αρχιτεκτονική του δικτύου έχει κι αυτή αρκετές παραμέτρους που επηρεάζουν την κατανάλωση ενέργειας. Το αν το δίκτυο είναι ad-hoc ή infrastructure δίνει εντελώς διαφορετικό προφίλ κατανάλωσης ισχύος στους χρήστες. Στη δεύτερη περίπτωση, αν τα πρωτόκολλα είναι ασύμμετρα, και ρίχνουν το βάρος των λειτουργιών και της κατανάλωσης ενέργειας στο ακίνητο και τροφοδοτούμενο από ηλεκτρικό ρεύμα base station ή access point, μπορούν να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας στους κινητούς χρήστες. Τέλος, το μέγεθος της κυψέλης (cell) καθορίζει τις απαιτήσεις για μεταδιδόμενη ενέργεια. Όσο μικρότερη η κυψέλη, τόσο πιο κοντά βρίσκονται οι χρήστες μέσα σε αυτήν, και τόσο λιγότερη ενέργεια απαιτείται για τη μεταξύ τους επικοινωνία.

4.2.7 Η Ανάγκη για Cross Layer Design

Μετά από τα παραπάνω βλέπουμε ότι εξοικονόμηση ενέργειας σε ένα ασύρματο δίκτυο μπορεί γίνει σε πολλά επιμέρους επίπεδα. Σχεδιάζοντας όμως όλα αυτά τα τμήματα ξεχωριστά το ένα από το άλλο δε θα έχουμε ικανοποιητικά αποτελέσματα, επειδή πολλά από τα επίπεδα αυτά συσχετίζονται. Μόνη λύση είναι λοιπόν ο ταυτόχρονος σχεδιασμός των επιπέδων που συσχετίζονται σε μεγάλο βαθμό. Τέτοια σημεία συσχέτισης είναι οι κεραίες και το ηλεκτρονικό μέρος (RF , VLSI), το MAC layer και το routing protocol του δικτύου [10,15].

Προτείνεται λοιπόν [16] να αναλύεται πρώτα το δίκτυο σε διάφορα συσχετιζόμενα επίπεδα. Η συσχέτιση φαίνεται από κοινές παραμέτρους των διαφόρων επιπέδων, όπως είναι το SNR, η μεταδιδόμενη ισχύς, το bit rate, κλπ. Σε δεύτερη φάση πρέπει να βρεθεί η συνάρτηση που περιγράφει την εξάρτηση της απόδοσης (performance) του δικτύου από τις διάφορες παραμέτρους του συστήματος. Τέλος, ακολουθεί η βελτιστοποίηση της παραπάνω συνάρτησης ως προς τις power saving constraints του συστήματος. Η παραπάνω διαδικασία είναι συνήθως πολύπλοκη, όπου όμως μπορεί να ακολουθηθεί αντιμετωπίζει το πρόβλημα με αυστηρό και πλήρη τρόπο.

4.3 Ασύρματα Δίκτυα και Τεχνικές Εξοικονόμησης Ενέργειας

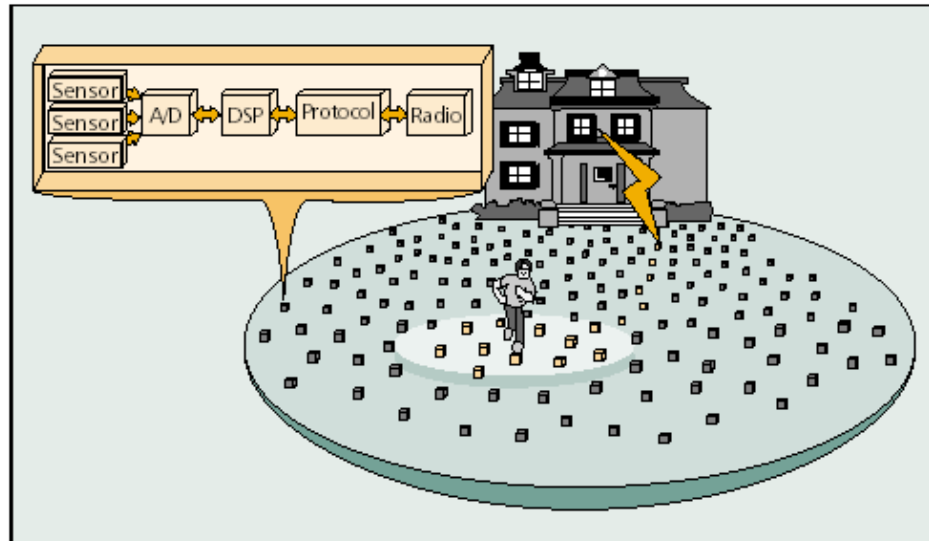
4.3.1 Ασύρματα Δίκτυα που ευνοούνται από την Εξοικονόμηση Ενέργειας

Αρκετά είδη ασυρμάτων δικτύων βελτιώνουν την ενεργειακή τους συμπεριφορά χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας. Τα πιο διαδεδομένα είναι τα Δίκτυα Δεδομένων (Data Networks), όπως τα IEEE802.11 WLAN και HIPERLAN, τα οποία έχουν και τη μεγαλύτερη εμβέλεια από αυτά που εξετάζουμε [15]. Τα Δίκτυα Συσκευών (Device Networks), όπως το Bluetooth, έρχονται κατόπιν, τα οποία κερδίζουν έδαφος σε περιβάλλον γραφείου [15]. Έρευνες γίνονται για τα Οικιακά Δίκτυα (Home

Networks), στα οποία πολλές οικιακές συσκευές θα συνδέονται ασύρματα μεταξύ τους και με το Internet. Πρωτόκολλα για τέτοια δίκτυα είναι τα γνωστά HomeRF protocol και το Shared Wireless Access Protocol (SWAP) [15]. Τελευταία γίνεται επίσης πολύς λόγος για τα Δίκτυα Αισθητήρων (Sensor Networks). Σε αυτά μικρές συσκευές ενσωματώνουν συστήματα αισθητήριων, επεξεργασίας δεδομένων των αισθητήριων και δικτύου. Τέτοια δίκτυα χαρακτηρίζονται από μεγάλη πυκνότητα κόμβων, κοντινές μεταδόσεις και μικρούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων [15]. Ένα τέτοιο παράδειγμα συζητούμε στη συνέχεια.

4.3.2 Το μAMPS Sensor Network

Η ονομασία του οφείλεται στους αισθητήρες μAMPS: micro-Adaptive Multidomain Power-Aware Sensors [17]. Ολόκληροι οι αισθητήρες κατασκευάζονται με προδιαγραφές για power saving. Ένα ad-hoc δίκτυο από αισθητήρια δημιουργείται όταν μερικές εκατοντάδες ή και χιλιάδες από αυτά διασπείρονται σε μια περιοχή. Κάθε αισθητήρας αποτελείται από τα εξής υποσυστήματα: μονάδα αισθητηρίου, μετατροπή A/D, επεξεργασία δεδομένων (DSP), πρωτόκολλο επικοινωνίας και μονάδα ραδιομετάδοσης (RF).



Σχήμα 9 : The μAMPS microsensors network

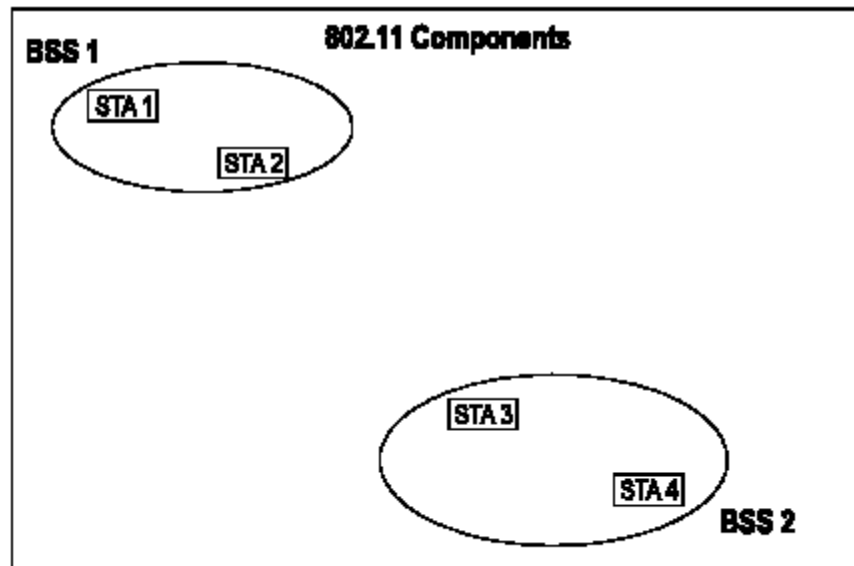
Ολόκληρο το δίκτυο – από τις συσκευές ως το πρωτόκολλο δικτύου – σχεδιάστηκε βασισμένο σε power saving constraints. Το power management έγινε σε τρία επίπεδα: αισθητηρίου, επεξεργασίας δεδομένων και ραδιομεταδόσεων. Εφαρμόστηκαν τεχνικές power saving από VLSI, DSP, routing πρωτόκολλα και RF μεταδόσεων. Τα αποτελέσματα ήταν θεαματικά. Σύμφωνα με τα συμπεράσματα του [17], το δίκτυο δουλεύει με βάση τις λειτουργικές και ενεργειακές προδιαγραφές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΤΟ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ IEEE802.11

5.1 Αρχιτεκτονική του Πρωτοκόλλου

5.1.1 Τμήματα της Αρχιτεκτονικής

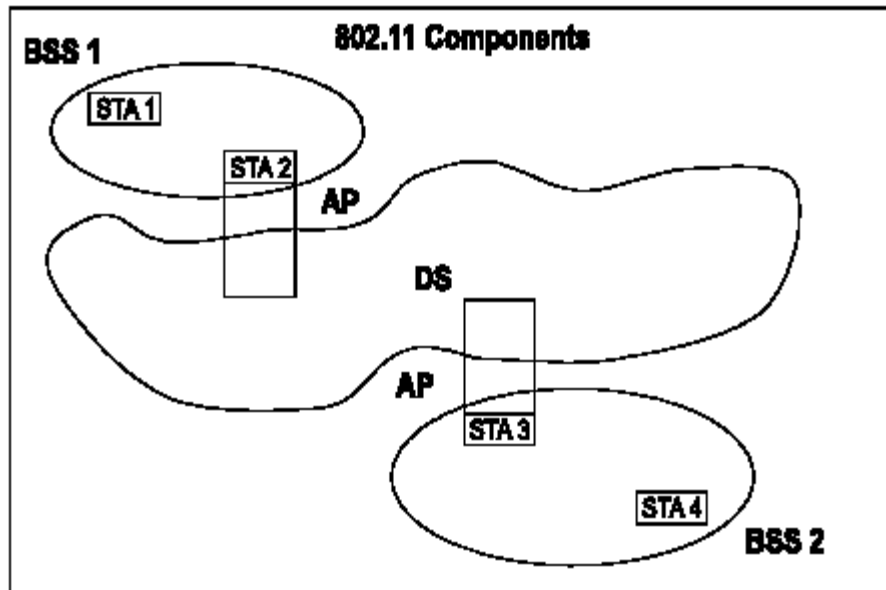
Η βασική δομική μονάδα της αρχιτεκτονικής του πρωτοκόλλου είναι το Basic Service Set (BSS) [18]. Μπορούμε να θεωρήσουμε ως BSS την περιοχή που οι σταθμοί που ανήκουν σε αυτήν μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους.



Σχήμα 10 : Independent Basic Service Sets

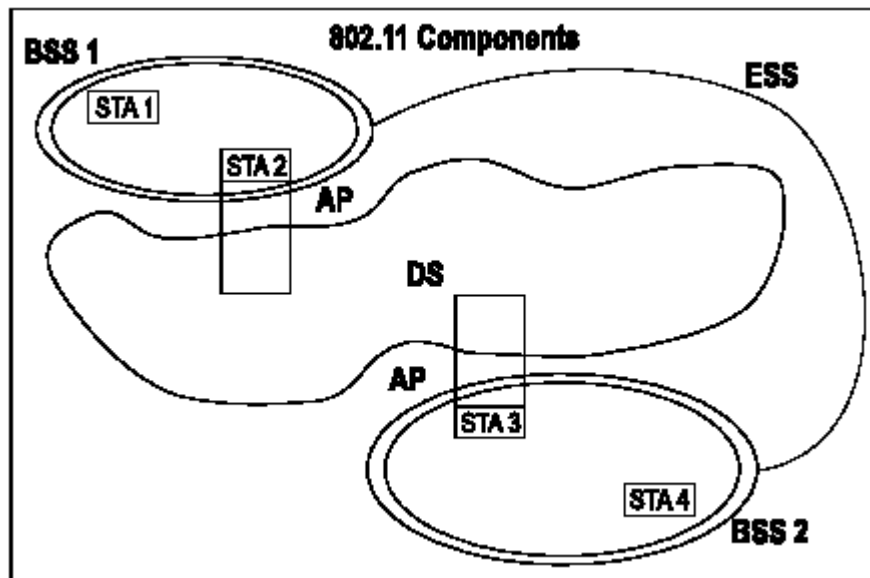
Το Independent Basic Service Set (IBSS) [Σχ. 10] είναι το απλούστερο BSS που σχηματίζεται όταν τουλάχιστον δύο σταθμοί επικοινωνούν απευθείας σε ad-hoc μορφή.

Το BSS μπορεί πάλι να σχηματίσει ένα εκτεταμένο δίκτυο από πολλά BSSs. Για να γίνει αυτό πρέπει τα διάφορα BSSs να επικοινωνούν χρησιμοποιώντας ένα Distribution System (DS) [Σχ. 11]. Για να γίνει αυτό σε κάθε BSS ένας σταθμός παίζει το ρόλο του Access Point (AP) παρέχοντας στους υπόλοιπους σταθμούς πρόσβαση στο DS.



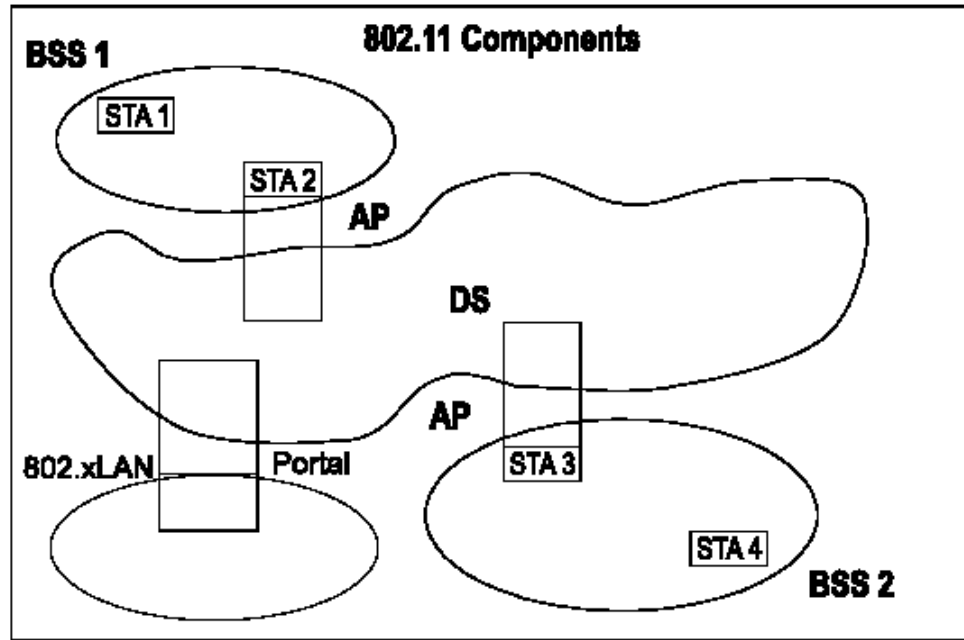
Σχήμα 11 : Distribution System and Access Points

Η επόμενη βαθμίδα επέκτασης του BSS είναι το Extended Service Set (ESS) που σχηματίζεται από συνδυασμούς BSS και DS [Σχ. 12].



Σχήμα 12 : Extended Service Set

Ένα BSS πάλι μπορεί να επικοινωνήσει με ένα ενσύρματο LAN χρησιμοποιώντας ως interface μια αρχιτεκτονική δομή γνωστή ως portal [Σχ. 13].



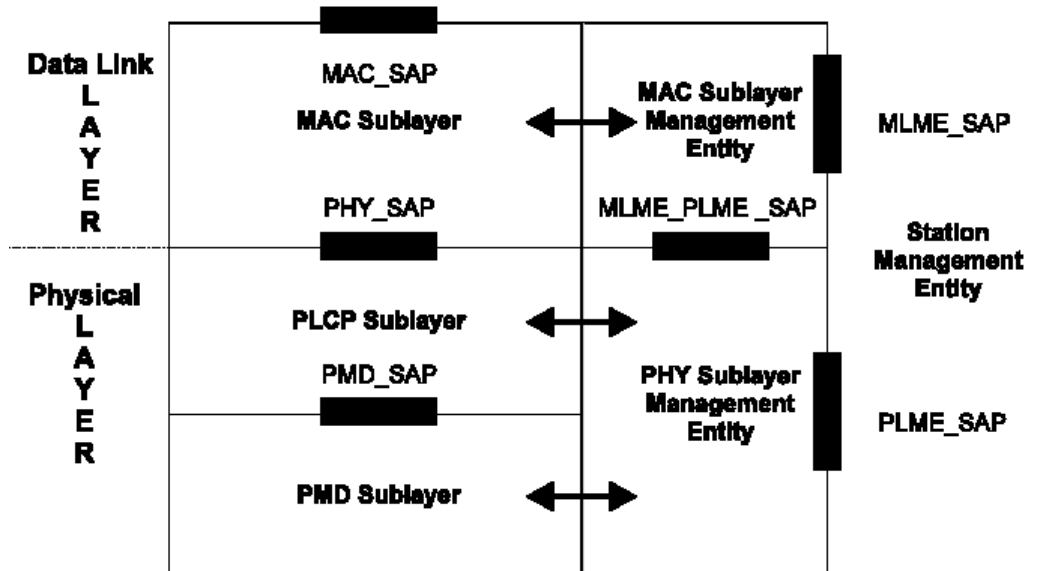
Σχήμα 13 : Interfacing other IEEE802.x LANs

5.1.2 Logical Service Interfaces

Το IEEE802.11 προσδιορίζει services (υπηρεσίες) κι όχι λεπτομέρειες για την υλοποίηση του πρωτοκόλλου. Οι services χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Σε αυτές των σταθμών (Station Service – SS) και αυτές του Distribution System (Distribution System Service – DSS). Οι υπηρεσίες SS είναι οι: authentication, deauthentication, privacy και MSDU delivery, ενώ οι υπηρεσίες DSS είναι οι: association, disassociation, distribution, integration και reassociation.

5.1.3 Μοντέλο Αναφοράς

Μολονότι το standard του IEEE802.11 δίνει έμφαση στο διαχωρισμό του συστήματος σε δύο τμήματα, το Medium Access Control (MAC) και το Physical (PHY) layer, τα layers σχεδιάστηκαν ώστε να είναι ‘κοντά’ στην αρχιτεκτονική του μοντέλου αναφοράς του Open System Interconnection (OSI). Στο standard του IEEE802.11 περιγράφονται τα layers και sublayers του Σχήματος 14.



Σχήμα 14 : IEEE802.11 Reference Model

5.2 Περιγραφή των Υπηρεσιών MAC

5.2.1 Asynchronous Data Service

Η υπηρεσία παρέχει την ανταλλαγή μονάδων δεδομένων του MAC layer (MAC Service Data Units – MSDUs). Η υπηρεσία παρέχεται χωρίς εγγυήσεις (best-effort) και χωρίς σύνδεση (connectionless). Εκτός από unicast υποστηρίζει multicast και broadcast μεταδόσεις.

5.2.2 Security Services

Αυτή η υπηρεσία παρέχεται από την υπηρεσία authentication και το μηχανισμό Wired Equivalent Privacy (WEP). Ο τελευταίος παρέχει confidentiality και authentication.

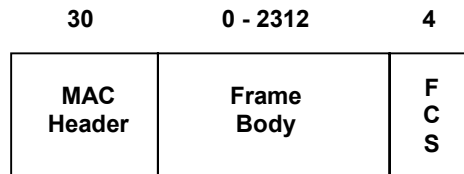
5.2.3 MSDU Ordering

Κάποιες φορές, ανάλογα με το φορτίο του δικτύου, το πρωτόκολλο αλλάζει τη σειρά μετάδοσης των MSDUs. Συνήθως έτσι επηρεάζονται multicast και broadcast μεταδόσεις, αφού για να υλοποιηθούν πρέπει όλοι οι σταθμοί – δέκτες των δεδομένων να είναι ικανοί να λάβουν δεδομένα, δηλαδή να βρίσκονται σε Receive mode.

5.3 Είδη των MAC Frames

5.3.1 Γενική Μορφή και Είδη των MAC Frames

Ένα MAC frame αποτελείται πάντα από τρία τμήματα. Την επικεφαλίδα (MAC header), το κυρίως τμήμα του (frame body) και ένα τμήμα ελέγχου του πακέτου (Frame Check Sequence) [Σχ. 15]. Η επικεφαλίδα φέρει πληροφορία διαχείρισης του πακέτου, το κυρίως τμήμα του την ωφέλιμη πληροφορία, η οποία εξαρτάται από το είδος του πακέτου, ενώ το τμήμα ελέγχου αποτελείται από έναν Cyclic Redundancy Code των 32 bit (CRC-32). Το μέγεθος κάθε πεδίου είναι σε octets από bit, δηλαδή bytes.



Σχήμα 15 : MAC Frame Format

Τα τρία είδη πακέτων που έχουμε είναι πακέτα ελέγχου (control frames), πακέτα διαχείρισης (management frames) και πακέτα δεδομένων (data frames).

5.3.2 Control Frames

Αυτά τα πακέτα επιτελούν συγκεκριμένες λειτουργίες του πρωτοκόλλου κι έχουν μικρό μέγεθος (από 14 ως 20 bytes). Τέτοια πακέτα είναι τα Request To Send (RTS), Clear To Send (CTS), Acknowledgement (ACK), Power-Save Poll (PS-Poll), CF-End και το CF-End + CF-Ack.

5.3.3 Management Frames

Αυτά τα πακέτα διαχειρίζονται διάφορες λειτουργίες του πρωτοκόλλου και τις περισσότερες φορές έχουν μέγεθος αρκετά bytes. Τέτοια πακέτα είναι τα Beacon frames, τα IBSS Announcement Traffic Indication Message (ATIM) frames, τα Disassociation frames, τα Association Request frames, τα Association Response frames, τα Reassociation Request frames, τα Reassociation Request frames, τα Probe Request frames, τα Probe Response frames, τα Authentication frames και τα Deauthentication frames.

5.3.4 Data Frames

Η δομή των πακέτων δεδομένων φαίνεται στο Σχήμα 16. Το πεδίο Frame Control φέρει πληροφορίες για το πακέτο και τις παραμέτρους μετάδοσης αυτού. Το Duration Field φέρει τη διάρκεια μετάδοσης του πακέτου για κάθε τύπου πακέτο εκτός από τα PS-

Poll control frames για τα οποία δηλώνει το Association ID (AID) του σταθμού μετάδοσης του πακέτου. Το Sequence Control Field δίνει πληροφορίες για τη σειρά

Main Field	Field	Size in Octets
H E A D E R	Frame Control	2
	Duration / ID	2
	Address 1	6
	Address 2	6
	Address 3	6
	Sequence Control	2
	Address 4	6
BODY	Frame Body	0-2312
TAIL	FCS	4

Σχήμα 16 : Data Frame Format

(sequence) ενός MSDU πακέτου. Τα πεδία των Addresses κρατούν τη διεύθυνση προορισμού (destination address – αφορά μια MAC entity), τη διεύθυνση πηγής (source address – αφορά μια MAC entity), τη διεύθυνση του αποδέκτη (receiver address – αφορά ένα σταθμό), τη διεύθυνση του πομπού (transmitter address – αφορά ένα σταθμό) κι όλα αυτά αναλόγως τις απαραίτητες για τη μετάδοση του πακέτου διευθύνσεις.

5.4 Η Ασφάλεια του Πρωτοκόλλου

5.4.1 Υπηρεσία Authentication

Το authentication πετυχαίνεται με δύο αλγορίθμους, τους Open System και Shared Key. Ο πρώτος υλοποιείται σε δύο βήματα ενώ ο δεύτερος σε τέσσερα. Ο τελευταίος απαιτεί επίσης τη χρήση του αλγορίθμου WEP στην υπηρεσία privacy.

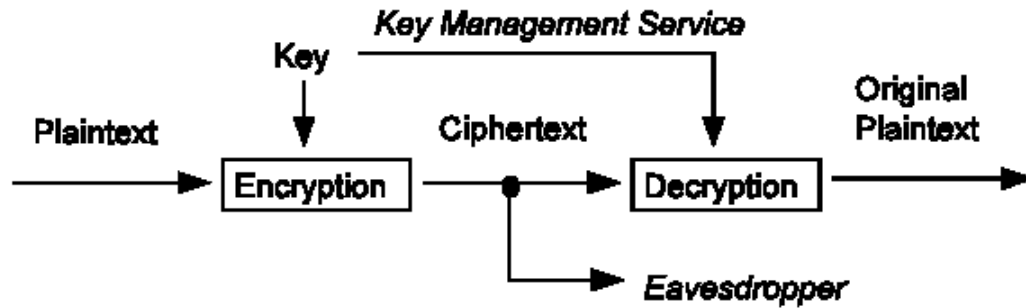
5.4.2 Υπηρεσία Privacy

Πετυχαίνεται με χρήση του αλγορίθμου WEP, ο οποίος σχεδιάστηκε ώστε να παρέχει στους χρήστες του WLAN την ίδια ασφάλεια που απολαμβάνουν οι χρήστες των ενσύρματων LANs. Αυξάνει το μέγεθος του πακέτου κατά 8 bytes όταν χρησιμοποιείται.

Οι ιδιότητες του αλγορίθμου είναι οι ακόλουθες:

- Είναι ικανοποιητικά δυνατός, δηλαδή η πιθανότητα εύρεσης του κλειδιού του με μία brutal attack είναι πολύ μικρή.
- Συγχρονίζεται μόνος του για κάθε μήνυμα.
- Είναι αποδοτικός και υλοποιείται είτε με software, είτε με hardware.
- Η χρήση του δεν είναι υποχρεωτική.

Η λειτουργία του ακολουθεί τα συνηθισμένα πρότυπα τέτοιων αλγορίθμων [Σχ 17]. Η διαδικασία μετατροπής των δεδομένων προκειμένου να προστατευθούν ονομάζεται Encryption. Τα μη κρυπτογραφημένα δεδομένα ονομάζονται Plaintext ενώ τα



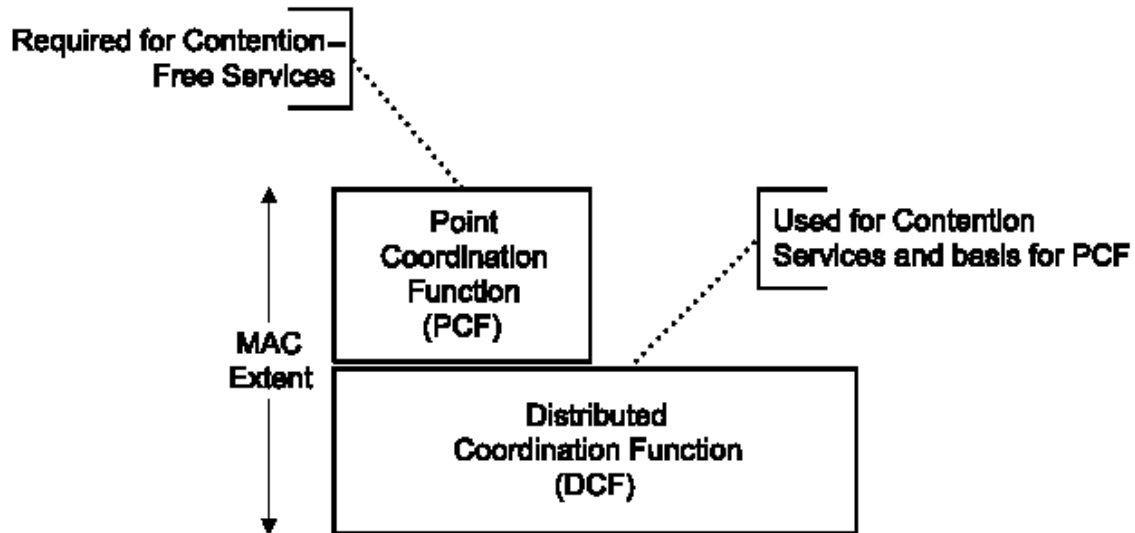
Σχήμα 17 : Ασφαλές Κανάλι Επικοινωνίας

κρυπτογραφημένα Ciphertext. Η διαδικασία μετατροπής των κρυπτογραφημένων δεδομένων σε μη κρυπτογραφημένα ονομάζεται Decryption. Κρυπτογραφικός αλγόριθμος (Cipher) ονομάζεται η μαθηματική συνάρτηση που χρησιμοποιείται για Encryption και για Decryption. Οι αλγόριθμοι αυτοί χρησιμοποιούν μία ακολουθία κλειδιών (Key sequence) για να τροποποιούν την έξοδό τους. Θέτοντας $P \leftarrow \text{Plaintext}$, $C \leftarrow \text{Ciphertext}$, $E \leftarrow \text{Encryption}$, $D \leftarrow \text{Decryption}$ και $K \leftarrow \text{Key sequence}$ έχουμε τις σχέσεις: $E_K(P) = C$, $D_K(C) = P$ και $D_K(E_K(P)) = P$.

5.5 Λειτουργία του MAC Sublayer

5.5.1 Αρχιτεκτονική του MAC Sublayer

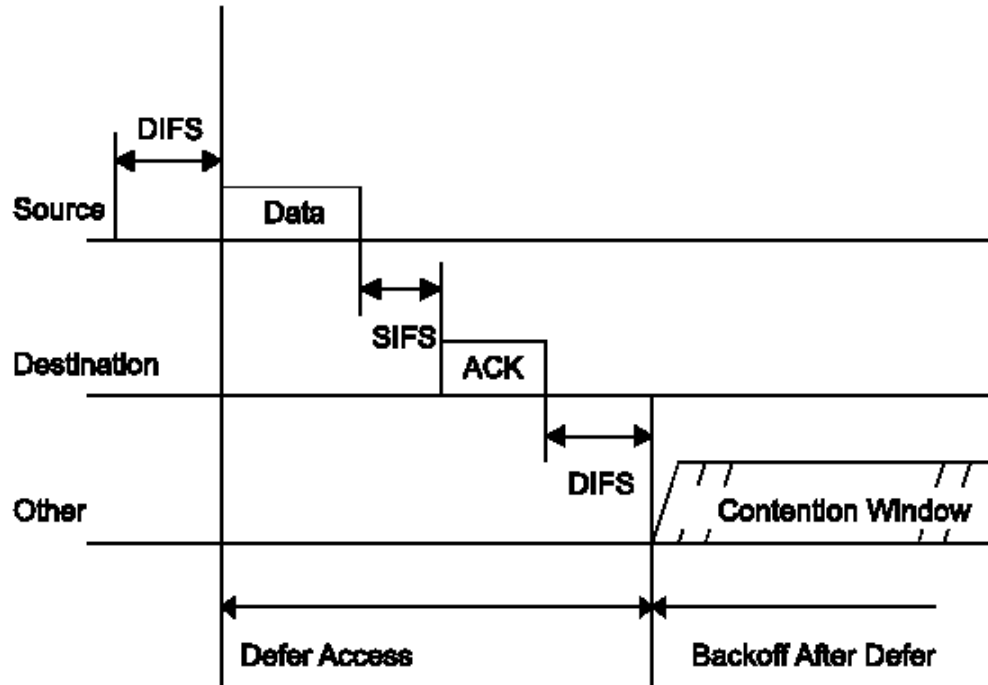
Η αρχιτεκτονική του MAC Sublayer στηρίζεται στη συνύπαρξη των μηχανισμών Distributed Coordination Function (DCF) και Point Coordination Function (PCF). Το DCF δρα ως βάση για το PCF [Σχ. 18] και χρησιμοποιείται για εφαρμογές που δεν είναι χρονικά ευαίσθητες. Το PCF χρησιμοποιείται αντιθέτως κυρίως για χρονικά ευαίσθητα εφαρμογές. Κατά τη διάρκεια του PCF έχουμε τη χρονική περίοδο Contention Free Period (CFP) και κατά τη διάρκεια του DCF τη Contention Period (CP).



Σχήμα 18 : Αρχιτεκτονική του MAC Layer

5.5.2 Distributed Coordination Function (DCF)

Το DCF αποτελεί τη βασική μέθοδο πρόσβασης του πρωτοκόλλου και χρησιμοποιεί Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA), το οποίο στοχεύει στην αποφυγή των συγκρούσεων (collisions). Το carrier sense πετυχαίνεται με φυσικούς και εικονικούς (virtual) μηχανισμούς. Ο εικονικός μηχανισμός, Network Allocation Vector (NAV), προβλέπει τη μελλοντική κίνηση στο κανάλι χρησιμοποιώντας την πληροφορία που περιέχεται στα RTS/CTS control frames, που ανταλλάσσονται πριν την ανταλλαγή δεδομένων μειώνοντας έτσι την πιθανότητα σύγκρουσης.



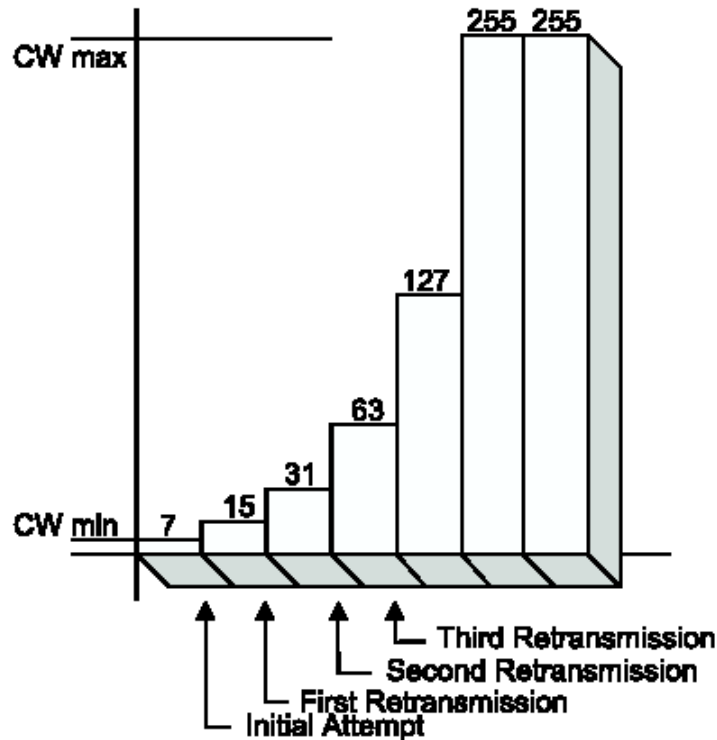
Σχήμα 19 : Μετάδοση MPDU και ACK

Το πρωτόκολλο χρησιμοποιεί θετικές επιβεβαιώσεις (ACK) για να δείξει ότι μια μετάδοση ήταν πετυχημένη [Σχ. 19]. Αν χαθεί μία από αυτές επαναμεταδίδεται το MPDU.

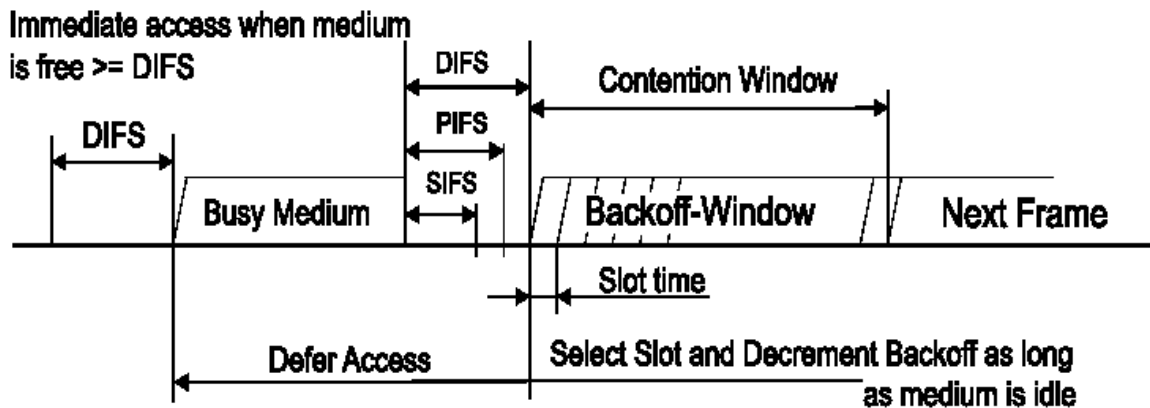
Το χρονικό διάστημα ανάμεσα σε δύο frames ονομάζεται interframe space (IFS). Υπάρχουν τέσσερα IFS, το Short IFS (SIFS), το PCF IFS (PIFS), το DCF IFS (DIFS) και το Extended IFS (EIFS). Το SIFS χρησιμοποιείται για τα ACK frames, τα CTS frames, τα fragments ενός MSDU και στο polling του PCF. Το PIFS χρησιμοποιείται από σταθμούς στο PCF που θέλουν να αποκτήσουν πρόσβαση στο κανάλι στην αρχή του CFP. Το DIFS χρησιμοποιείται από το DCF για τη μετάδοση πακέτων. Το EIFS τέλος χρησιμοποιείται από το DCF μετά από αποτυχημένη μετάδοση πακέτων.

Χαρακτηριστικό του DCF είναι ο μηχανισμός που ένας σταθμός χρησιμοποιεί για να αποφασίσει πότε θα ξαναελέγξει την κατάσταση του καναλιού όταν ανακαλύψει ότι το κανάλι χρησιμοποιείται από άλλο χρήστη. Συγκεκριμένα ο σταθμός τότε κάνει backoff για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, που λέγεται Backoff Time. Ισχύει $\text{Backoff Time} = \text{Random}() \cdot \text{aSlotTime}$, όπου $\text{Random}()$ ακέραιος που ακολουθεί την κατανομή $\text{Uniform}[0, CW]$, με CW (Contention Window) ακέραιο που εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του φυσικού επιπέδου. Ο αριθμός αυτός έχει ελάχιστο και μέγιστο: $\text{aCWmin} \leq CW \leq \text{aCWmax}$. Το aSlotTime εξαρτάται από το Physical Layer και έχει συγκεκριμένη χρονική διάρκεια ώστε να επιτελούνται συγκεκριμένες λειτουργίες του πρωτοκόλλου. Το Contention Window ισούται με $CW = 2^X - 1$, όπου $\text{aXmin} \leq X \leq \text{aXmax}$. Όλοι οι σταθμοί έχουν αρχικά $X = \text{aXmin}$. Κάθε φορά που ένας σταθμός συμμετέχει σε σύγκρουση με ένα fragment ενός συγκεκριμένου MSDU αυξάνει το X κατά ένα, αν είναι $X < \text{aXmax}$. Στο Σχήμα 20 έχουμε ένα παράδειγμα με $\text{aXmin} = 3$ και $\text{aXmax} = 8$. Πρακτικά το μέγεθος του Contention Window διπλασιάζεται (εκθετική

αύξηση) κι αυτό έχει στόχο τη μείωση της πιθανότητας να συγκρουστούν ξανά τα πακέτα των χρηστών που μετείχαν στην αρχική σύγκρουση. Όταν μεταδίδεται ένα MSDU, τότε τίθεται πάλι $X=aX_{min}$.



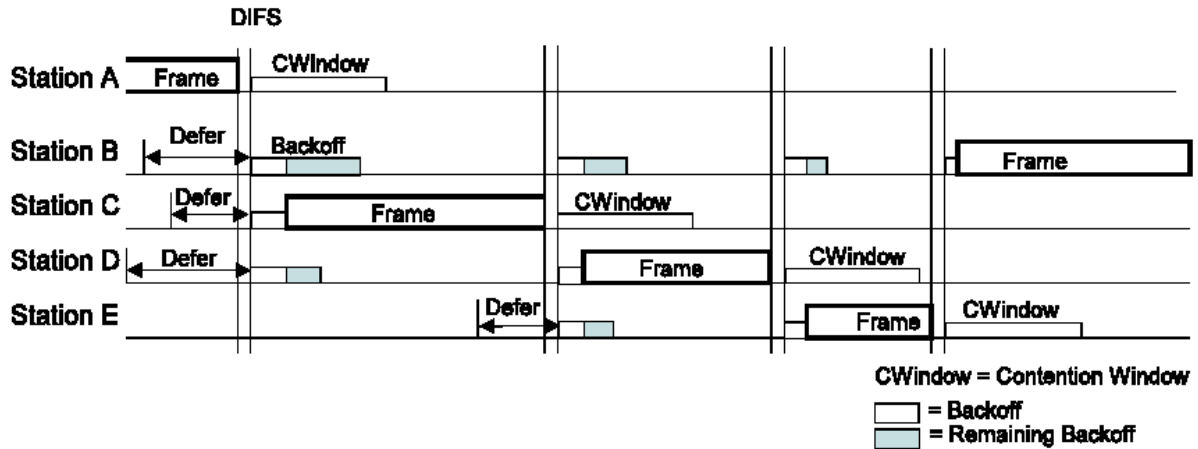
Σχήμα 20 : Εκθετική Αύξηση του Contention Window



Σχήμα 21 : Πρόσβαση στο Κοινό Κανάλι

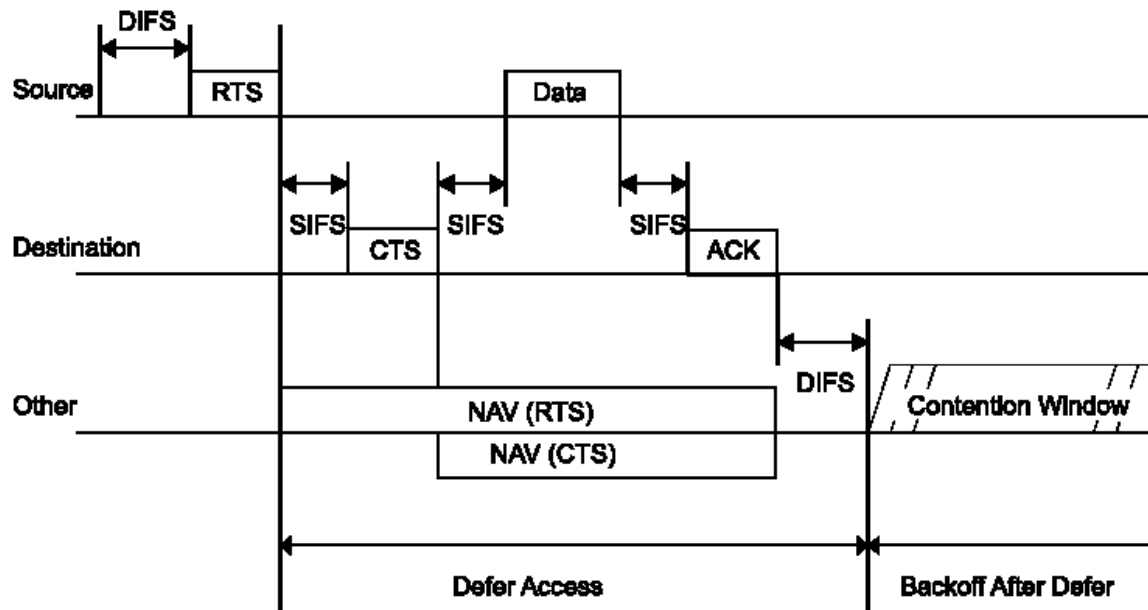
Κάθε σταθμός που περιμένει για να μεταδώσει ένα MPDU ανιχνεύει το κανάλι. Όταν το κανάλι μείνει ελεύθερο για χρόνο περισσότερο από DIFS, τότε ο σταθμός

μεταδίδει [Σχ. 21]. Σε περίπτωση σύγκρουσης με κάποιον άλλο σταθμό υποχωρεί, όπως είπαμε, για κάποιο χρονικό διάστημα [Σχ. 22].



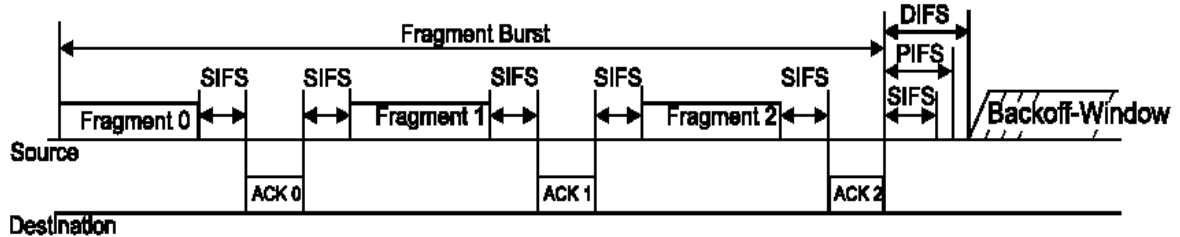
Σχήμα 22 : Διαδικασία Υποχώρησης

Προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοση του πρωτοκόλλου και να αποφεύγονται ευκολότερα οι συγκρούσεις χρησιμοποιούνται τα RTS/CTS control frames [Σχ. 23]. Ο σταθμός που θέλει να μεταδώσει και έχει την προτεραιότητα (χρονικά) να το κάνει δε μεταδίδει το μεγάλου μεγέθους MPDU αλλά το RTS, το οποίο ειδοποιεί τους υπόλοιπους χρήστες του καναλιού ώστε να θέσουν κατάλληλα το NAV τους και να υποχωρήσουν τις δικές τους μεταδόσεις. Ο σταθμός-δέκτης από την άλλη μόλις λάβει το RTS απαντά με ένα CTS. Μόλις το λάβει αυτό ο σταθμός-πομπός μεταδίδει το MPDU προς το σταθμό-δέκτη.



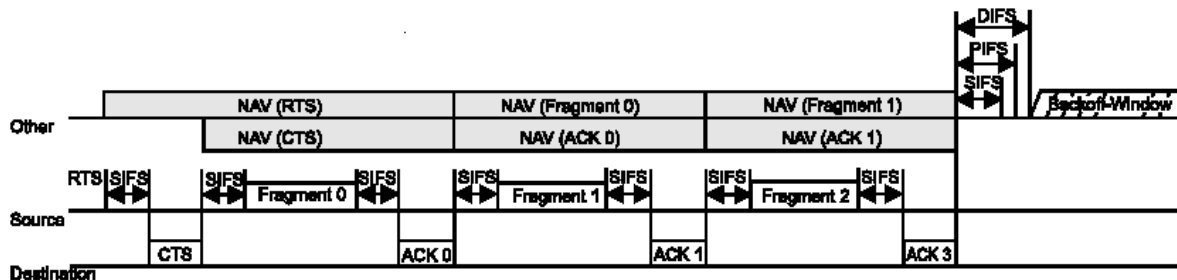
Σχήμα 23 : Χρήση RTS/CTS

Στην περίπτωση που έχουμε ένα MSDU με πολλά fragments τότε είναι συχνά επιθυμητό να μεταδίδονται αυτά συνεχόμενα. Έτσι όταν αποκτήσει πρόσβαση στο κοινό κανάλι ένας σταθμός τότε μεταδίδει ολόκληρο το MSDU, ακόμη κι αν αυτό αποτελείται από αρκετά fragments. Η μετάδοση του επίμαχου MSDU μπορεί να υλοποιηθεί είτε με



Σχήμα 24 : Μετάδοση multifragmented MSDU με SIFS

χρήση μόνο SIFS [Σχ. 24], είτε με χρήση των RTS/CTS control frames [Σχ. 25]

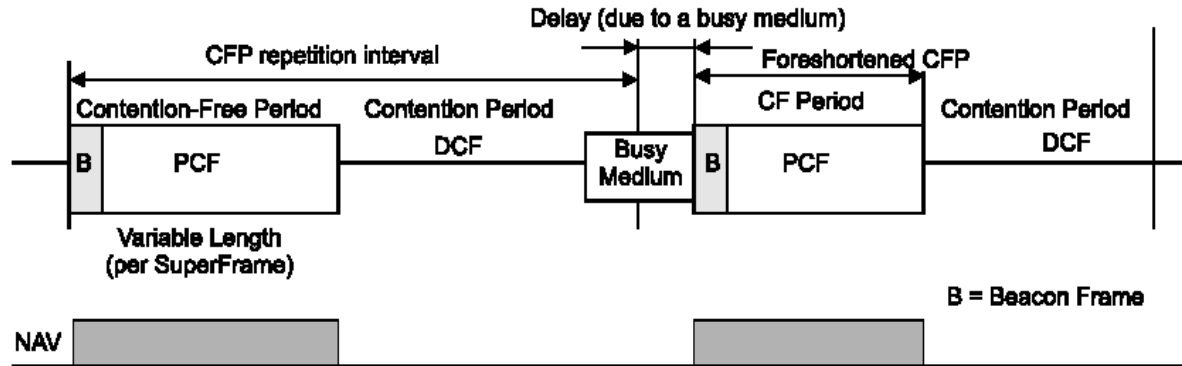


Σχήμα 25 : Μετάδοση multifragmented MSDU με Χρήση RTS/CTS

5.5.3 Point Coordination Function (PCF)

Το PCF προσφέρει, όπως είπαμε, στους χρήστες πρόσβαση στο μέσο χωρίς να υπάρχει ανταγωνισμός (Contention Free - CF). Υλοποιείται πάνω στο DCF και η αρχιτεκτονική του MAC layer να είναι αυτή του Σχήματος 18. Σκοπός του είναι η μετάδοση ευαίσθητων χρονικά ροών πληροφορίας, οι οποίες δε θα μπορούσαν να μεταδοθούν με τις μεγάλες καθυστερήσεις που εισάγει το DCF. Ο μηχανισμός Point Coordination (PC) του PCF βρίσκεται στο Access Point (AP).

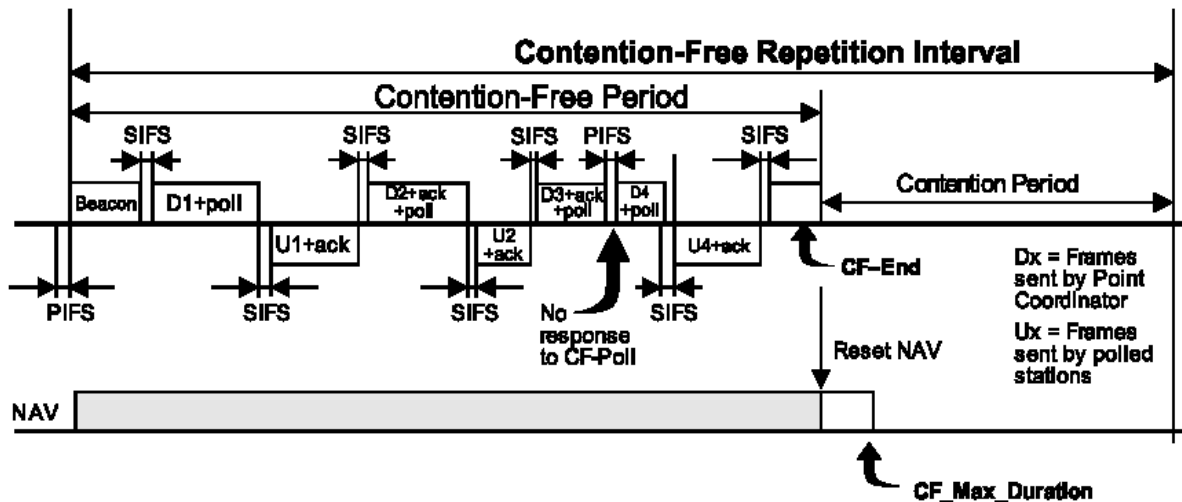
Η εναλλαγή μεταξύ των Contention Free Period (CFP) και Contention Period (CP) γίνεται περιοδικά. Τα CFP γεννιούνται σταθερά από το AP κάθε Contention-Free Repetition Rate (CFPRate) [Σχ. 26]. Η έναρξη του CFP γίνεται με ένα Beacon frame, το οποίο φέρει πληροφορίες για το σύστημα. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι φέρει ορισμένες παραμέτρους του συστήματος, πληροφορία συγχρονισμού και ανακοινώνει για ποιους χρήστες υπάρχουν αποθηκευμένα δεδομένα προς μετάδοση στο AP. Όταν το κοινό κανάλι δεν είναι ελεύθερο τότε το CFP καθυστερεί την έναρξη του και μειώνει αντίστοιχα τη διάρκεια του, ώστε να ολοκληρωθεί το προηγούμενο CP. Το CFP έχει διάρκεια το πολύ ίση με CFPMaDuration, η οποία είναι σταθερή παράμετρος του συστήματος και κυμαίνεται από CFPMaDuration_min (επιτρέπει τη μετάδοση



Σχήμα 26 : Εναλλαγή των CFP και CP

τουλάχιστον ενός MPDU στο CFP) ως $CFP_{MaxDuration_max}$ (επιτρέπει τη μετάδοση τουλάχιστον ενός MPDU στο CP).

Η λειτουργία του CFP στηρίζεται στη δειγματοληψία του AP προς τους σταθμούς ρωτώντας τους αν έχουν δεδομένα να μεταδώσουν και μεταδίδοντας τους συγχρόνως δεδομένα, τα οποία βρίσκονται αποθηκευμένα για αυτούς στο AP [Σχ. 27]. Η δειγματοληψία (Polling) των σταθμών εξαρτάται από την εφαρμογή αλλά συνήθως γίνεται με κυκλικό τρόπο. Κατά τη δειγματοληψία, αν κάποιος σταθμός έχει δεδομένα



Σχήμα 27 : Μετάδοση Δεδομένων κατά το PCF

προς μετάδοση τα μεταδίδει προς το AP, το οποίο αναλαμβάνει την περαιτέρω μετάδοση τους. Οι σταθμοί και το AP μπορούν να μεταδίδουν data frames τύπου Data (δεδομένα), Data+CF-Ack (δεδομένα και acknowledgment), CF-Ack (acknowledgment), NF (null function). Επιπλέον το AP μπορεί να μεταδώσει data frames τύπου Data+CF-Poll (δεδομένα και polling), Data+CF-Ack+CF-Poll (δεδομένα και acknowledgment και polling), CF-Ack+CF-Poll (acknowledgment και polling) και CF-Poll (polling). Σημειώνουμε ότι ο συνδυασμός polling, acknowledgment και data transfer από το AP και τους σταθμούς εξοικονομεί πολύτιμο bandwidth στο σύστημα. Το AP κράτα μία λίστα με

τους σταθμούς τους οποίους δειγματολειτουργεί (polling list), την οποία ανανεώνει με βάση τα management frames που ανταλλάσσονται στο δίκτυο.

5.5.4 Fragmentation και Defragmentation

Προκειμένου να αυξηθεί η πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης δεδομένων στο ασύρματο μέσο, τα MSDUs τεμαχίζονται σε MPDUs τα οποία έχουν το πολύ aFragmentationThreshold octets. Το aFragmentationThreshold είναι μία ρυθμιζόμενη παράμετρος του δικτύου. Το MAC layer είναι υπεύθυνο για τον τεμαχισμό (fragmentation) του MSDU και την ανακατασκευή του (defragmentation) από τα MPDUs. Στο fragmentation χρησιμοποιείται αρίθμηση των MPDUs προκειμένου να διατηρηθεί η σειρά τους κατά το defragmentation.

5.6 Διαχείριση του MAC Sublayer

5.6.1 Γενικά

Η διαχείριση του MAC Sublayer είναι ζωτικής σημασίας για το πρωτόκολλο αφού περιλαμβάνει μερικές από τις πιο δύσκολες λειτουργίες του, όπως είναι ο συγχρονισμός όλων των σταθμών, η διαχείριση ενέργειας των σταθμών, οι διαδικασίες association και reassociation των σταθμών με το AP και η διαχείριση της Information Base του δικτύου. Παρακάτω θα μιλήσουμε για τις δύο πρώτες λειτουργίες που παίζουν σημαντικό ρόλο στο σκοπό της εργασίας.

5.6.2 Συγχρονισμός

Ο συγχρονισμός όλων των σταθμών σε ένα κοινό ρολόι είναι μία βασική λειτουργία του δικτύου. Στην infrastructure μορφή το AP εκτελεί την Timing Synchronization Function (TSF) διατηρώντας ένα ρολόι. Περιοδικά μεταδίδει Beacon frames στους σταθμούς που περιέχουν την τιμή του ρολογιού του. Έτσι οι σταθμοί συγχρονίζονται με το AP. Τα Beacon frames μεταδίδονται προς τους σταθμούς κάθε aBeaconPeriod. Το aBeaconPeriod είναι μία παράμετρος του συστήματος. Στην ad-hoc μορφή πάλι ο συγχρονισμός υλοποιείται από έναν κατανεμημένο αλγόριθμο που ‘τρέχει’ σε όλους τους σταθμούς του δικτύου.

5.6.3 Διαχείριση Ενέργειας

Με στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας από τους σταθμούς που δεν ανταλλάζουν μεγάλες ποσότητες πληροφορίας με το δίκτυο το πρωτόκολλο προβλέπει δύο ενεργειακές καταστάσεις για τους σταθμούς. Οι δύο καταστάσεις είναι η Active Mode (AM) και η Power Save (PS). Στην AM ο σταθμός είναι ‘ξύπνιος’, καταναλώνει πολλή ισχύ και μπορεί να λάβει ή να μεταδώσει πακέτα οποιαδήποτε στιγμή, σύμφωνα με το πρωτόκολλο. Στην PS, ο σταθμός κοιμάται για το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, καταναλώνει λίγη ισχύ και δεν μπορεί να ανταλλάξει πακέτα με το υπόλοιπο δίκτυο.

Είναι υποχρεωμένος όμως να ξυπνάει περιοδικά, να λαμβάνει ορισμένα Beacon frames, κι αν υπάρχουν αποθηκευμένα δεδομένα - είτε προς λήψη, είτε προς μετάδοση - να μείνει στην AM ώσπου αυτά να μεταδοθούν. Σημειώνουμε ότι μεταδόσεις broadcast και multicast λαβαίνουν χώρα μόνο όταν όλοι οι συμμετέχοντες σταθμοί βρίσκονται σε AM.

Όταν οι σταθμοί υιοθετούν power saving συμπεριφορά, κατά τη διάρκεια του CFP, τότε ισχύουν τα παρακάτω, από τη σκοπιά του AP και των σταθμών, αντιστοίχως.

Όσον αφορά το AP, όταν έρχονται δεδομένα (MSDUs) για ένα σταθμό που βρίσκεται σε PS mode, τότε αυτά αποθηκεύονται σε αυτό. Όταν το AP μεταδίδει τα Beacon frames, συμπληρώνει στο πεδίο Delivery Traffic Indication Message (DTIM) για ποιους σταθμούς υπάρχουν αποθηκευμένα MSDUs που περιμένουν να μεταδοθούν. Το ίδιο γίνεται και με τα broadcast και multicast μηνύματα όταν υπάρχουν σταθμοί σε PS mode. Η aging function για τα αποθηκευμένα MSDUs δεν προσδιορίζεται στο standard. Στην polling list του AP δεν μπορούν να βρίσκονται σταθμοί σε PS mode. Όταν κάποιος σταθμός αλλάζει mode από PS σε AM, τότε το AP, χρησιμοποιώντας τη scheduling policy του, του μεταδίδει τα αποθηκευμένα MSDUs.

Οι σταθμοί φροντίζουν με τη σειρά τους να εισέρχονται σε AM περιοδικά και να λαμβάνουν τα Beacon frames. Αν διαπιστώσουν από αυτά ότι υπάρχουν αποθηκευμένα MSDUs για αυτούς – unicast, broadcast ή multicast – τότε μένουν σε AM μέχρι να τα λάβουν. Μόνο όταν αδειάσει ο αντίστοιχος buffer στο AP μπορούν να μουν ξανά σε PS mode.

Η συμπεριφορά του AP και των σταθμών διαφέρουν όταν οι τελευταίοι λειτουργούν σε PS mode, αλλά βρισκόμαστε σε infrastructure network κατά τη διάρκεια του CP ή βρισκόμαστε σε ad-hoc network. Δε θα αναφερθούμε σε αυτά όμως, επειδή είναι εκτός της σκοπιάς του παρόντος συγγράμματος.

5.7 Το Φυσικό Επίπεδο του IEEE802.11 WLAN

5.7.1 Λειτουργία και Είδη του Φυσικού Επιπέδου

Ο ρόλος του φυσικού επιπέδου (Physical layer) είναι να φέρνει τα MPDUs σε κατάλληλη μορφή ώστε να μπορέσουν αυτά να μεταδοθούν πάνω από το ασύρματο μέσο. Αναλαμβάνει τη διαμόρφωση, κωδικοποίηση, κλπ της πληροφορίας. Τρία είδη φυσικού επιπέδου ορίστηκαν το 1998. Το Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS), το Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) και το Infrared (IR).

5.7.2 FHSS

Το FHSS ορίστηκε να λειτουργεί στα 2.4 GHz στην Industrial, Scientific and Medical band (ISM band). Υποστηρίζει δύο τιμές για το bit rate, 1 και 2 Mbps, χρησιμοποιώντας διαμόρφωση 2GFSK και 4GFSK αντίστοιχα. Πρέπει να επισημάνουμε ότι ειδικά στο θέμα των συχνοτήτων το standard διακρίνει τις εξής γεωγραφικές περιοχές: Β. Αμερική, Ευρώπη, Ιαπωνία, Γαλλία και Ισπανία. Για την Βόρεια Αμερική και την Ευρώπη έχουμε ένα hopping set με το πολύ 79 channels, δηλαδή με 3 hopping sequence sets και 26 hopping sequences ανά set, ενώ το ελάχιστο hopping rate ορίζεται στα 2.5

hops/s. Τα διαδοχικά κανάλια απέχουν 1 MHz κι οι συχνότητες τους κυμαίνονται στην περιοχή των 2.4000-2.4835 GHz.

5.7.3 DSSS

Το DSSS ορίστηκε επίσης στην ISM band των 2.4 GHz (2.4000-2.4835 GHz). Ορίζονται 15 κεντρικές συχνότητες, οι οποίες απέχουν 30 MHz. Υποστηρίζει επίσης δύο τιμές για το bit rate, 1 και 2 Mbps, χρησιμοποιώντας διαμόρφωση DBPSK και DQPSK αντίστοιχα. Η διεύρυνση του φάσματος γίνεται με μια ακολουθία Barker των 11 chip: $\{+1, -1, +1, +1, -1, +1, +1, +1, -1, -1, -1\}$. Το διευρυμένο RF φάσμα ισούται με 22 MHz.

5.7.4 IR

Το IR ορίστηκε στην περιοχή των 850 – 950 nm και υποστηρίζει bit rate 1 και 2 Mbps, χρησιμοποιώντας διαμόρφωση 16-PPM και 4-PPM αντίστοιχα. Σχεδιάστηκε για indoor εφαρμογές μόνο και για απευθείας (line-of-site) και ανακλώμενες μεταδόσεις.

5.8 Higher-Speed Physical Layer Extension: IEEE802.11b

5.8.1 Η Επέκταση IEEE802.11b

Η ανάγκη για μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης έδωσε το έναυσμα για διάφορες επεκτάσεις στο αρχικό πρωτόκολλο του IEEE802.11. Έτσι οδηγηθήκαμε σε νέου τύπου Physical layers, τα οποία χρησιμοποιώντας αποδοτικότερες τεχνικές διαμόρφωσης πετυχαίνουν μεγαλύτερα bit rates. Η πρώτη επέκταση, IEEE802.11a, χρησιμοποιεί την τεχνική OFDM πετυχαίνοντας θεωρητικά bit rate της τάξης των 54 Mbps. Πρακτικά η τεχνική OFDM δεν έχει τελειοποιηθεί ακόμη. Ωστόσο, υιοθετήθηκε και στην έκδοση IEEE802.11g του πρωτοκόλλου. Η δεύτερη επέκταση, IEEE802.11b, χρησιμοποιεί την τεχνική DSSS αλλά αυτή τη φορά με τη διαμόρφωση Complementary Code Keying (CCK) πετυχαίνοντας bit rates ίσα με 5.5 ή 11 Mbps. Για λόγους συμβατότητας με το αρχικό IEEE802.11 διατηρεί και το ‘παλιό’ Physical layer των DSSS-DMPSK, με bit rates ίσα με 1 και 2 Mbps.

5.8.2 Η CCK Διαμόρφωση

Η διαμόρφωση CCK είναι μία M-ary Orthogonal Keying (MOK) διαμόρφωση [19,20]. Η διαμόρφωση CCK των 11 Mbps χρησιμοποιεί ένα διάνυσμα από ένα σύνολο 64 μιγαδικών QPSK διανυσμάτων μεγέθους 8 chip και γι’ αυτό διαμορφώνει 6 bit σε καθένα διευρυμένο κωδικό σύμβολο (code symbol) των 8 chip. Ακόμη 2 bit, QPSK διαμορφωμένα, διαμορφώνουν ολόκληρη την κωδική λέξη (codeword). Έτσι κάθε symbol περιέχει 8 bits. Ο ρυθμός chipping ισούται με 11 Mchip/s και χρησιμοποιείται η ίδια ακολουθία Barker των 11 chip με το DSSS-DQPSK. Το διευρυμένο RF φάσμα είναι και πάλι ίσο με 22 MHz.

Η διαμόρφωση CCK προτιμήθηκε από άλλες διαμορφώσεις που ήταν υποψήφιος για το IEEE802.11b, επειδή έχει καλά χαρακτηριστικά κωδικοποίησης και καλύτερη απόκριση BER ως προς Eb/No μετρημένη σε Indoor Environment [21].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : Ο ΠΡΩΤΟΣ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

6.1 Προδιαγραφές των Εφαρμογών και Εξοικονόμηση Ενέργειας

6.1.1 Περιγραφή των Εφαρμογών

Η εφαρμογή στην οποία επικεντρώνεται αυτή η εργασία είναι το streaming video και audio αρχείων. Το video που χρησιμοποιούμε είναι mpeg4 ενώ το audio είναι PCM. Θεωρούμε ότι τα αρχεία βρίσκονται αποθηκευμένα σε κάποιον κοντινό proxy server ώστε οι καθυστερήσεις που εισάγονται από το TCP/IP να είναι αμελητέες. Εμείς μελετήσαμε μόνο τις καθυστερήσεις του IEEE802.11b WLAN.

Οι περιορισμοί που φέρει η κάθε εφαρμογή συνοψίζονται στα εξής. Στο AP έρχονται νέα video και audio frames κάθε 40 και 20 msec, αντίστοιχα. Θεωρούμε ότι όλα έχουν μέγιστη διάρκεια ζωής 40 msec, δηλαδή μετά από 40 msec τα frames διαγράφονται από την aging function του AP και αυξάνεται το Packet Drop Ratio (PDR). Ως PDR ορίζουμε το λόγο των Απωλεσθέντων λόγω υπερβολικής καθυστέρησης MPDUs – μεγαλύτερης από 40 msec – προς το συνολικό αριθμό MPDUs που εισάγονται στο σύστημα. Για να διατηρείται η QoS του συστήματος μας υποθέτουμε ότι θα πρέπει το PDR των video πακέτων να είναι $PDR_v \leq 10^{-4}$ και το PDR των audio πακέτων να είναι $PDR_a \leq 10^{-3}$. Κατά συνέπεια, αντιπροσωπευτικές μετρικές απόδοσης του συστήματος είναι η Μέση Τιμή της Καθυστέρησης των Πακέτων, η Τυπική Απόκλιση αυτής, και το PDR, για κάθε εφαρμογή.

Μία άλλη ενδιαφέρουσα μετρική αφορά την επίδραση των απωλειών του ασύρματου καναλιού. Ορίζουμε ως Packet Stricken Ratio (PSR) το λόγο των Χτυπημένων από Θόρυβο MPDUs – τα οποία επαναμεταδίδονται από το σύστημα, αν δεν έχουν ξεπεράσει το όριο της μέγιστης διάρκειας ζωής τους (40 msec) – προς το συνολικό αριθμό MPDUs που εισάγονται στο σύστημα.

6.1.2 Εξοικονόμηση Ενέργειας

Εξοικονομούμε ενέργεια χρησιμοποιώντας χρονοπρογραμματισμό κι εκμεταλλευόμενοι την ευελιξία του MAC layer του IEEE802.11 WLAN σε αυτόν τομέα. Ο άλλος λόγος που ευνοεί την προσέγγιση του προβλήματος με χρονοπρογραμματισμό είναι ότι μπορούμε χάρη σε αυτόν να εξοικονομήσουμε ικανοποιητική ποσότητα ενέργειας. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι από το datasheet μίας τυπικής IEEE802.11 WLAN κάρτας [22], έχουμε τα στοιχεία του Πίνακα 1 όσον αφορά την τυπική κατανάλωση ισχύος αυτής, ανάλογα με την κατάσταση στην οποία βρίσκεται.

Μελετώντας τον Πίνακα 1 συμπεραίνουμε ότι αν πετύχουμε να κρατούμε τις WLAN κάρτες για μεγάλα χρονικά διαστήματα στην κατάσταση Asleep (οι χρήστες σε

Doze Mode σύμφωνα με το πρωτόκολλο), τότε μπορούμε να μειώσουμε δραματικά την κατανάλωση ισχύος. Επισημαίνουμε ότι η αναλογία για την κατανάλωση ισχύος είναι: $P_{cc}(Tx):P_{cc}(Rx):P_{cc}(Dz) = 30:18:1$. Η κατανάλωση ισχύος πρέπει βέβαια να μειωθεί διατηρώντας το QoS που απαιτούν οι εφαρμογές των χρηστών.

Typical Power Consumption	
State	Power (mW)
Transmit (*)	2250
Receive	1350
Doze	75
(*) at 100mW transmit power setting	

Πίνακας 1 : Η Κατανάλωση Ισχύος σε μία τυπική IEEE802.11WLAN card

6.2 Παράμετροι του Συστήματος

6.2.1 Απόδοση Τιμών στις Παραμέτρους του Συστήματος

Οι σημαντικότερες παράμετροι ενός IEEE802.11b WLAN πρέπει να ρυθμιστούν κατάλληλα ώστε να το σύστημα να έχει καλή απόδοση. Η εφαρμογή streaming είναι χρονικά ευαίσθητη (time sensitive) και γι' αυτό αποφασίζουμε να την υλοποιήσουμε στο CFP μέρος του πρωτοκόλλου. Έτσι δίνουμε μεγάλο μέρος του CFP Repetition Interval στο PCF και λιγότερο στο DCF.

Δεδομένου ότι το σύστημα μας αντιμετωπίζει και τα προερχόμενα από το ασύρματο κανάλι λάθη στη μετάδοση, καλό είναι να κρατήσουμε το Fragmentation Threshold σε ένα μέσο επίπεδο. Το θέτουμε λοιπόν ίσο με 1000 octets [23,24].

Τέλος, το πρωτόκολλο καθορίζει πόσο θα διαρκούν τα interframe spaces αυτού. Όλες οι τιμές των προαναφερόμενων μεταβλητών συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα [Πιν. 2]. Σημειώνουμε ότι στην επιλογή τους μας βοήθησαν τα [23,24].

Parameter	Value	Unit
CFP Repetition Interval	11.8691	msec
CFP Max Duration	10.0091	msec
Beacon Frame Duration	349.1	μsec
SIFS	10	μsec
PIFS	30	μsec
Fragmentation Threshold	1000	bytes

Πίνακας 2 : Παράμετροι του Συστήματος

6.3 Ο Πρώτος Μηχανισμός Εξοικονόμησης Ενέργειας

6.3.1 Οι Εφαρμογές και τα Βάρη του Scheduling Αλγόριθμου

Η εφαρμογή του streaming είναι χρονικά ευαίσθητη (time sensitive). Επομένως θα πρέπει ο scheduler που χρησιμοποιούμε να λαμβάνει υπόψη του το χρόνο κατά τον οποίο ένα MSDU περιμένει στο AP χωρίς να μεταδοθεί καθώς και τον εναπομένοντα χρόνο ζωής του MSDU, πριν το διαγράψει η aging function από το σύστημα. Θα πρέπει όμως συγχρόνως να λάβουμε υπόψη και το μέγεθος του κάθε MSDU, ώστε τα MSDUs που φέρουν περισσότερη πληροφορία να έχουν μεγαλύτερη προτεραιότητα. Επιπλέον παρατηρούμε ότι οι εφαρμογές video και audio έχουν διαφορετική ανοχή στο PDR, άρα θα πρέπει πιθανά να δώσουμε προτεραιότητα στην πιο ευαίσθητη εφαρμογή από τις δύο, δηλαδή το video. Ορίζουμε λοιπόν τα εξής βάρη για ένα MSDU:

- Wsize = Μέγεθος του εν λόγω MSDU
- Wlife = $1/($ Εναπομένων Χρόνος Ζωής για το εν λόγω MSDU)

Το βάρος που προκύπτει συνδυάζοντας τα παραπάνω βάρη είναι το: $W = Wsize \cdot Wlife$.

Ο scheduler μετρά το βάρος W του MSDU που βρίσκεται στην κορυφή της ουράς του κάθε χρήστη. Κατόπιν μεταδίδει εκείνο το MSDU που έχει το μεγαλύτερο βάρος W.

Αξιίζει να παρατηρήσουμε ότι σε αυτόν τον αλγόριθμο δε δώσαμε προτεραιότητα σε κάποια εφαρμογή έναντι της άλλης. Και οι δύο εφαρμογές αντιμετωπίστηκαν ισοδύναμα.

6.3.2 Η Λειτουργία των Σταθμών κι ο Ρόλος του Beacon Frame

Το Beacon frame περιέχει το DTIM, το οποίο ενημερώνει τους χρήστες για το αν υπάρχουν αποθηκευμένα MSDUs για αυτούς στο AP. Έτσι, όταν κάποιος χρήστης δει στο Beacon frame ότι υπάρχουν δεδομένα για αυτόν μένει σε Awake – Receive mode όσο χρόνο χρειαστεί, μέχρι να τα λάβει. Αν τελειώσει το PCF χωρίς να τα λάβει, τότε μπαίνει σε Sleep mode κατά τη διάρκεια του DCF, και ξυπνάει εγκαίρως για να λάβει το επόμενο Beacon frame στην αρχή του νέου PCF. Αν κάποιο Beacon frame χτυπηθεί από θόρυβο, τότε όλοι οι σταθμοί μένουν σε Awake – Receive mode χωρίς να ξέρουν αν υπάρχουν δεδομένα γι' αυτούς ή όχι.

6.3.3 Τα MSDUs των Εφαρμογών

Η εφαρμογή του video είναι VBR και μας δίνει ένα MSDU, το οποίο είναι ουσιαστικά ένα Video Block Mpeg4, κάθε 40 msec. Το μέγεθος του ποικίλει και μπορεί να αντιστοιχεί σε ένα ή περισσότερα MPDUs.

Η εφαρμογή του audio είναι CBR και μας δίνει ένα MSDU κάθε 20 msec. Επειδή χρησιμοποιούμε PCM αυτό το MSDU έχει μέγεθος 160 bytes κι αντιστοιχεί σε ακριβώς ένα MPDU [25].

6.4 Η Προσομοίωση

6.4.1 Ο Προσομοιωτής και το Μηχάνημα Προσομοίωσης

Υλοποιήσαμε τον Προσομοιωτή σε γλώσσα προγραμματισμού C++, υλοποιώντας τις απαραίτητες δομές για τις εφαρμογές. Το μηχάνημα στο οποίο έτρεξαν οι προσομοιώσεις έχει Λειτουργικό Σύστημα Unix, 2 CPUs των 2.4 GHz (dual) και μνήμη RAM 1 GByte.

6.4.2 Προσομοιώσεις και Ζευγάρια Χρηστών

Αποφασίζουμε να δοκιμάσουμε το σύστημα, όταν αυτό είναι φορτωμένο με τόσους χρήστες όσους μπορεί να ‘χωρέσει’, διατηρώντας την απαιτούμενη QoS, βλέποντας πόση ενέργεια μπορούμε να εξοικονομήσουμε υπό αυτές τις συνθήκες. Ο χρόνος προσομοίωσης ορίστηκε ίσος με 1 ώρα: TSIM=1h. Αναζητήσαμε λοιπόν μέσα από προσομοιώσεις τα οριακά ‘σημεία’ του συστήματος, στα οποία έχουμε το μέγιστο πλήθος χρηστών και για τους οποίους ισχύει $PDR_v \leq 10^{-4}$ και $PDR_a \leq 10^{-3}$. Για κάθε ζευγάρι video/audio χρηστών (V,A) τρέξαμε 10 runs και κατόπιν επεξεργαστήκαμε στατιστικά τα 10 αποτελέσματα που προέκυψαν. Υπολογίσαμε Στατιστικό Μέσο Όρο και Διαστήματα Εμπιστοσύνης για αυτά, βασιζόμενοι σε κλασσικά στατιστικά αποτελέσματα [26]. Τα αποτελέσματα που μας ενδιέφεραν για κάθε εφαρμογή (video, audio) είναι το PDR, το PSR, η Μέση Τιμή και η Τυπική Απόκλιση της Καθυστερήσης των πακέτων, καθώς και το ποσοστό του συνολικού χρόνου της προσομοίωσης (TSIM) που πέρασαν οι σταθμοί σε κάθε mode και η ενέργεια που δαπανήθηκε σε αυτό το χρονικό διάστημα.

6.4.3 Τα MSDUs των Εφαρμογών στην Προσομοίωση

Τα MSDUs που χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα στο σύστημα ήταν πολύ κοντά σε πραγματικά. Για το CBR audio στα 64 kbps PCM χρησιμοποιήσαμε μία γεννήτρια, που έδινε ένα audio MSDU μεγέθους 160 bytes κάθε 20 msec. Για το VBR video χρησιμοποιήσαμε το video trace file ‘Alpine Ski’ [27], επειδή αν και low quality, έχει αρκετά υψηλό bit rate και είναι αρκετά bursty (μεγάλος ο λόγος P/M), όπως είναι φανερό:

Film	Alpine Ski
Encoding	Mpeg4, Low Quality
Compression Ratio	40.65
Duration	1 hour
Frame Size, min	26 bytes
Frame Size, max	9127 bytes
Mean Bit Rate (M)	187 kbps
Peak Bit Rate (P)	1825 kbps
P/M Ratio	9.76

Πίνακας 3 : Χαρακτηριστικά του video trace file ‘Alpine Ski’

6.5 Αποτελέσματα Προσομοίωσης

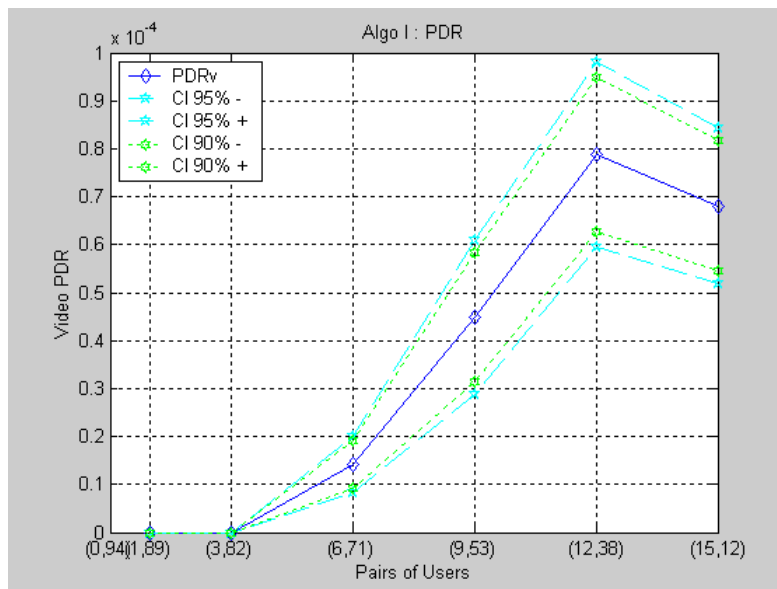
6.5.1 Αποτελέσματα Quality of Service

Δοκιμάζοντας διάφορες τιμές για το πλήθος των video και audio χρηστών καταφέραμε να προσδιορίσουμε πόσοι χρήστες ‘φορτώνουν’ το σύστημα. Μέσα από τις προσομοιώσεις προέκυψαν τα επόμενα ζεύγη [Πιν. 4]. Σημειώνουμε ότι όταν οι video χρήστες είναι 16, τότε η απόδοση του συστήματος είναι εκτός απαιτήσεων QoS ακόμη κι όταν δεν υπάρχουν audio χρήστες.

Video Users	Audio Users
0	94
1	89
3	82
6	71
9	53
12	38
15	12

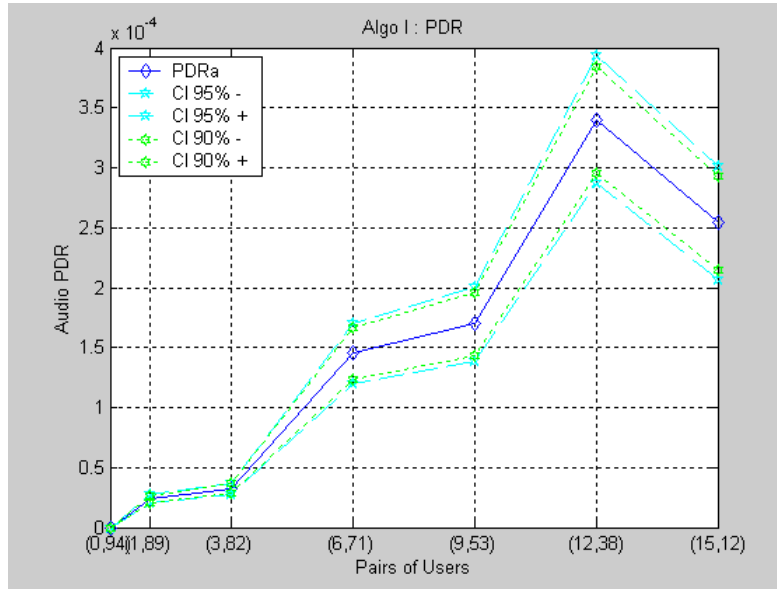
Πίνακας 4 : Ζεύγη Χρηστών για τον Αλγόριθμο I

Για τα παραπάνω ζεύγη χρηστών μετρήσαμε το PDR και για τις δύο υπηρεσίες κι έτσι προέκυψαν τα Γραφήματα 1 και 2. Σε αυτά φαίνονται και τα αντίστοιχα Διαστήματα Εμπιστοσύνης, με επίπεδο εμπιστοσύνης (confidence level) 95% και 90%, αντίστοιχα. Παρατηρούμε γενικά ότι όσο πολλαπλασιάζονται οι video χρήστες, τόσο αυξάνει το



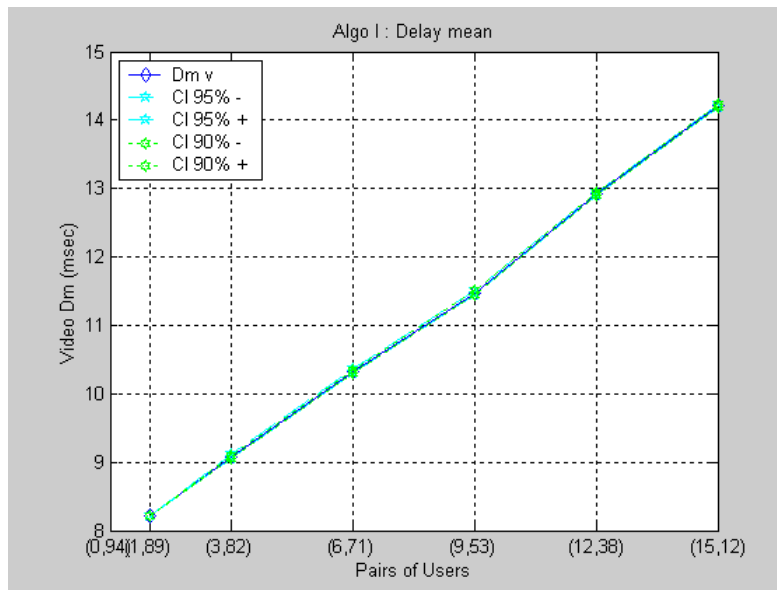
Γράφημα 1 : Video PDR του Αλγορίθμου I

PDR τους. Το ίδιο ισχύει και για τους audio. Επιπλέον, όσο αυξάνονται οι video χρήστες, που έχουν VBR κίνηση, αυξάνει έντονα η διασπορά του PDR.

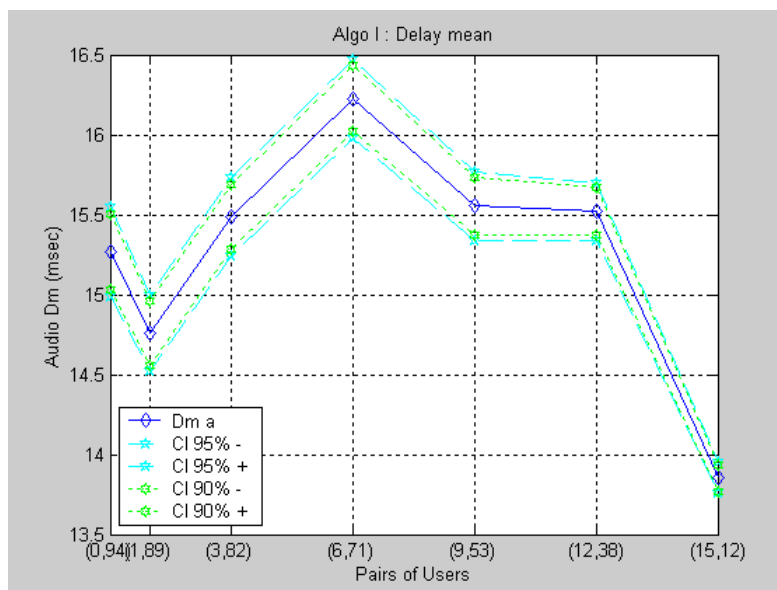


Γράφημα 2 : Audio PDR του Αλγορίθμου I

Ομοίως μετρήσαμε τη Μέση Τιμή της Καθυστέρησης πακέτου για κάθε μία από τις δύο υπηρεσίες [Γρ. 3,4]. Λόγω του μεγάλου τους μεγέθους τα video πακέτα κερδίζουν συνήθως προτεραιότητα απέναντι στα audio πακέτα. Έτσι, η Μέση Τιμή της Καθυστέρησης των video πακέτων αυξάνει ανάλογα με το πλήθος των χρηστών video. Η Μέση Τιμή της Καθυστέρησης των audio πακέτων είναι ανάλογη του πλήθους, τόσο των χρηστών video με VBR κίνηση, όσο και των audio χρηστών με CBR κίνηση. Γι' αυτό όταν έχουμε περισσότερους από 6 video χρήστες και μειώνονται οι audio χρήστες η μέση καθυστέρηση μειώνεται. Πάντα, η μέση καθυστέρηση κινείται σε χαμηλά επίπεδα μεταξύ 14 και 16.5 msec.

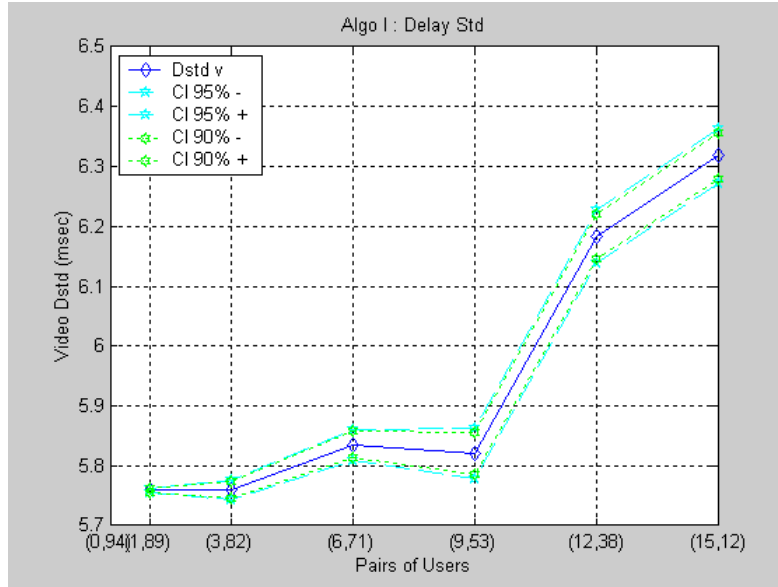


Γράφημα 3 : Video Mean Delay του Αλγορίθμου I

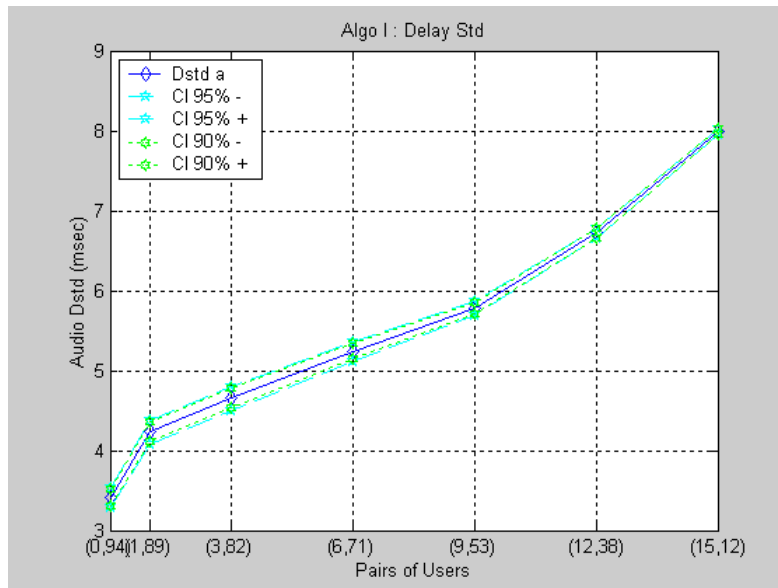


Γράφημα 4 : Audio Mean Delay του Αλγορίθμου I

Μετρήσαμε ακόμη την Τυπική Απόκλιση της Καθυστέρησης πακέτων για τις δύο υπηρεσίες [Γρ. 5,6]. Και στα δύο γραφήματα παρατηρούμε την αύξηση της όσο αυξάνουν οι video χρήστες και κατά συνέπεια αυξάνεται το ποσοστό της VBR κίνησης στο σύστημα.

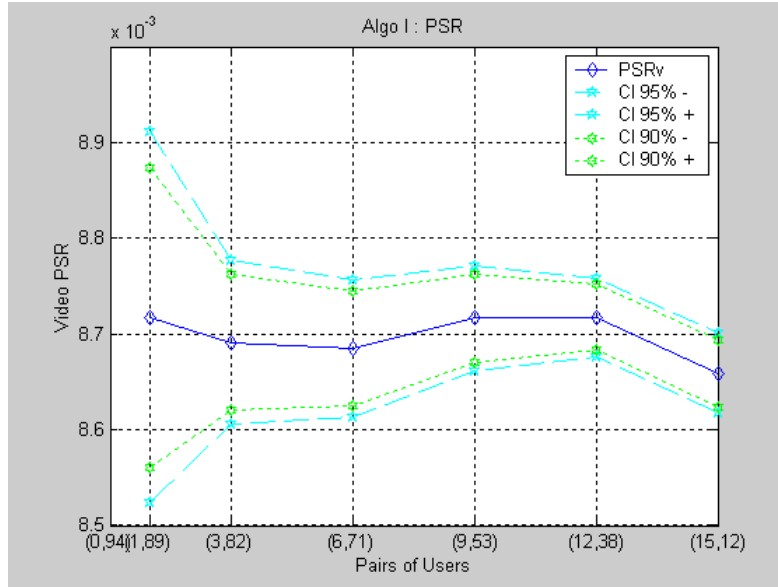


Γράφημα 5 : Video Standard Deviation του Αλγορίθμου I

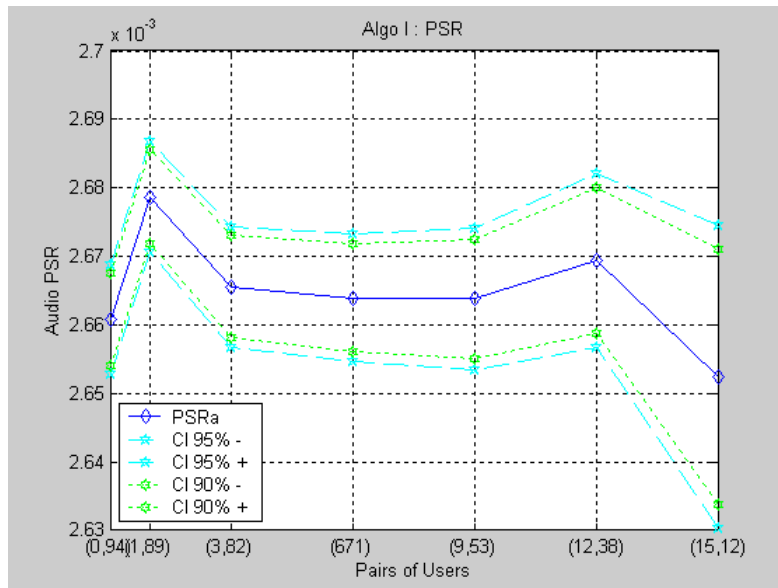


Γράφημα 6 : Audio Standard Deviation του Αλγορίθμου I

Τέλος μετρήσαμε και το PSR για τις δύο υπηρεσίες [Γρ. 7,8]. Παρατηρούμε ότι το PSR είναι πρακτικά σταθερό για κάθε υπηρεσία. Τα Διαστήματα Εμπιστοσύνης όμως ‘φαρδαίνουν’ αρκετά στα σημεία λειτουργίας όπου δεν έχουμε αρκετούς χρήστες μίας συγκεκριμένης εφαρμογής. Το τελευταίο οφείλεται στο ότι τα στατιστικά δείγματα που είχαμε ήταν πάντα δεκαπλάσια του πλήθους των χρηστών, αφού ‘τρέξαμε’ 10 runs και, ως γνωστόν, όσο περισσότερα δείγματα έχουμε τόσο πιο αξιόπιστα αποτελέσματα μπορούμε να υπολογίσουμε.



Γράφημα 7 : Video PSR του Αλγορίθμου I

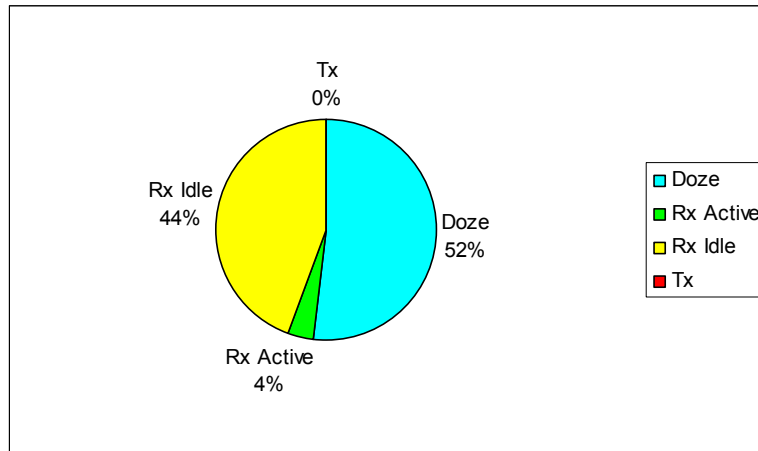


Γράφημα 8 : Audio PSR του Αλγορίθμου I

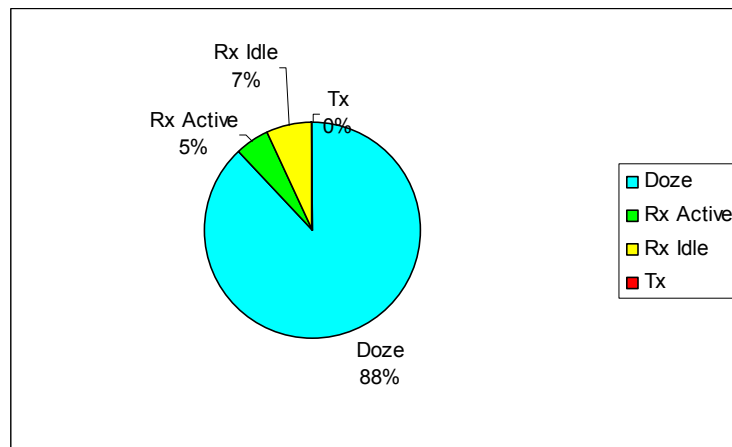
6.5.2 Αποτελέσματα Κατανομής Χρόνου στους Σταθμούς

Στην παράγραφο αυτή μελετήσαμε τι ποσοστό χρόνου περνούν οι σταθμοί-χρήστες σε κάθε μία από τις τέσσερις καταστάσεις : Doze, Receive (Rx) Active, Receive (Rx) Idle, Transmit (Tx). Rx Active είναι η κατάσταση στην οποία ο σταθμός λαμβάνει δεδομένα μέσω της κεραίας του, και Rx Idle η κατάσταση στην οποία ο σταθμός είναι on, αλλά δε λαμβάνει τίποτα. Στη δεύτερη περίπτωση ο σταθμός είναι κακώς on. Επειδή δεν έχουμε περισσότερα δεδομένα για τη WLAN card, θεωρούμε ότι $P_{cc}(Rx Active) =$

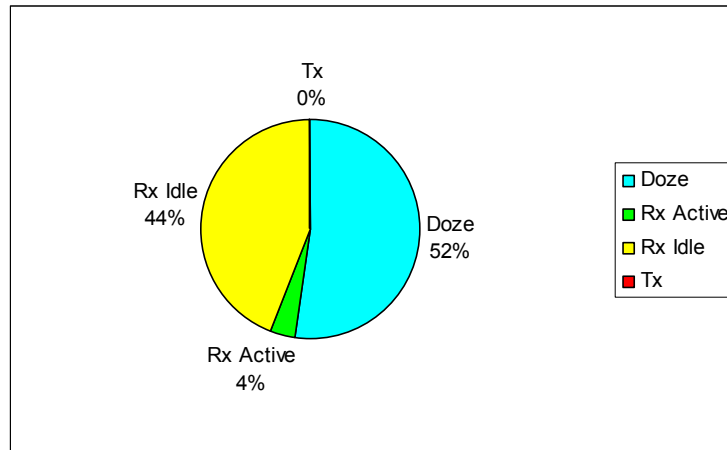
Pcc(Rx Idle). Όπως θα δούμε οι σταθμοί περνούν ένα ποσοστό του χρόνου σε κάθε κατάσταση. Χωρίς τον Αλγόριθμο Εξοικονόμησης Ενέργειας οι σταθμοί δεν μπαίνουν ποτέ σε Doze mode, αλλά μένουν σε Rx Idle mode. Από τα ζεύγη του Πιν. 4 επιλέγουμε να παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα μόνο για τέσσερα ζεύγη χρηστών, τα (0,94), (3,82), (9,53) και (15,12). Έχουμε λοιπόν τα γραφήματα 9 ως 15:



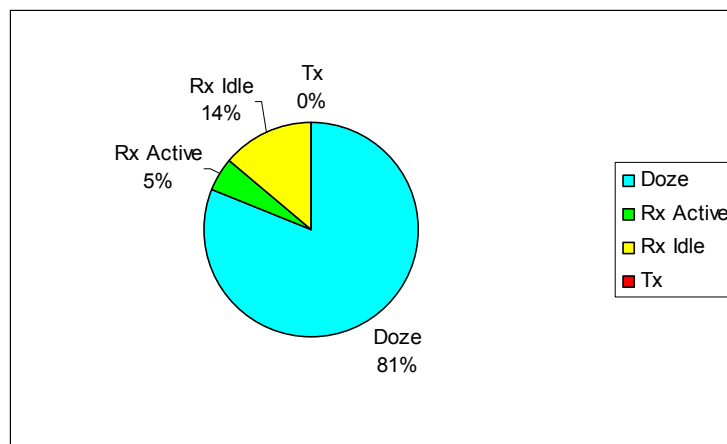
Γράφημα 9 : Κατανομή Χρόνου στους Audio Χρήστες για το ζεύγος (0,94)



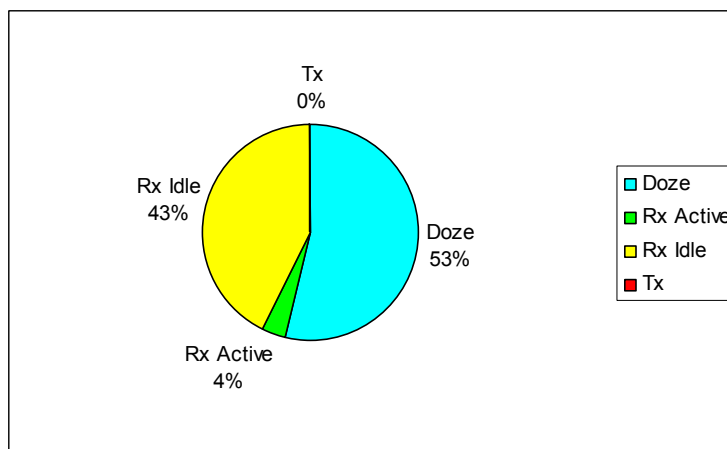
Γράφημα 10 : Κατανομή Χρόνου στους Video Χρήστες για το ζεύγος (3,82)



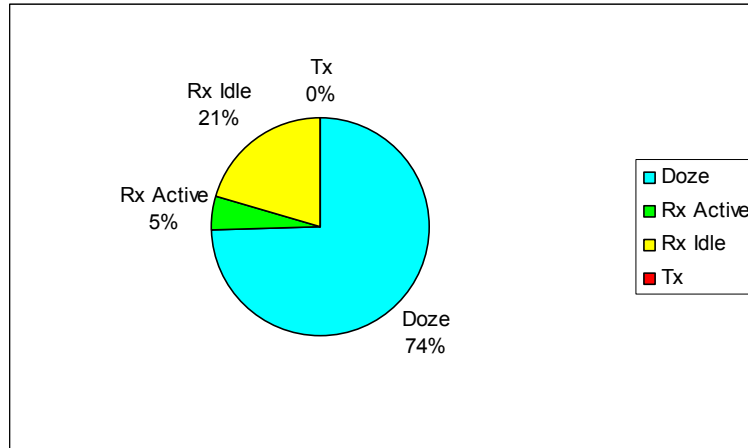
Γράφημα 11 : Κατανομή Χρόνου στους Audio Χρήστες για το ζεύγος (3,82)



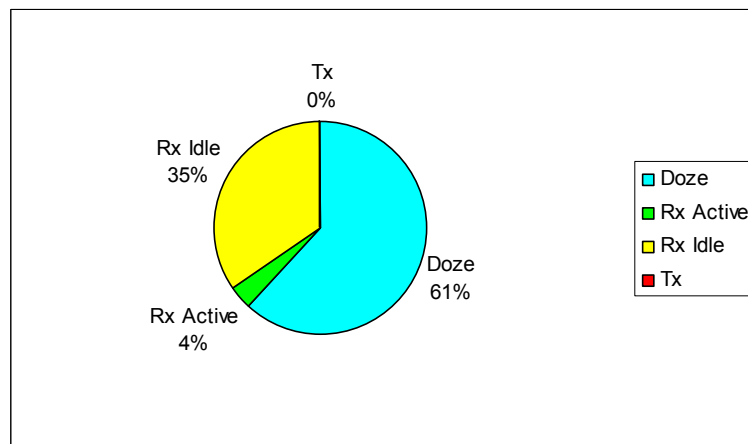
Γράφημα 12 : Κατανομή Χρόνου στους Video Χρήστες για το ζεύγος (9,53)



Γράφημα 13 : Κατανομή Χρόνου στους Audio Χρήστες για το ζεύγος (9,53)



Γράφημα 14 : Κατανομή Χρόνου στους Video Χρήστες για το ζεύγος (15,12)



Γράφημα 15 : Κατανομή Χρόνου στους Audio Χρήστες για το ζεύγος (15,12)

Στα παραπάνω γραφήματα παρατηρούμε ότι οι σταθμοί περνούν αμελητέο χρονικό διάστημα στην κατάσταση Transmit. Αυτό οφείλεται στη φύση της streaming εφαρμογής καθώς η πλειοψηφία της πληροφορίας διοχετεύεται από το AP προς τους σταθμούς (downlink traffic), ενώ η μόνη πληροφορία που μεταδίδεται από τους σταθμούς προς το AP είναι τα Acknowledgements για τα streaming πακέτα.

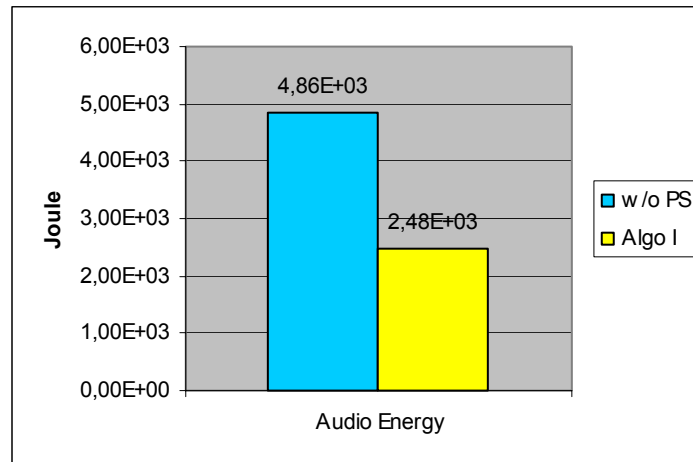
Ο χρόνος που περνούν οι σταθμοί στην κατάσταση Rx Active είναι επίσης ωφέλιμος χρόνος για το σύστημα, καθώς σε αυτά τα χρονικά διαστήματα οι σταθμοί λαμβάνουν τα MSDUs που περιμένουν. Αντιθέτως ο χρόνος που περνούν στην κατάσταση Rx Idle είναι ο χρόνος κατά τη διάρκεια του οποίου οι σταθμοί βρίσκονται σε awake mode και περιμένουν δεδομένα αλλά δε λαμβάνουν. Τότε καταναλώνουν περισσότερη ενέργεια απ' όση θα έπρεπε και το ιδανικό θα ήταν να βρίσκονται στην κατάσταση Doze.

Παρατηρώντας τα ποσοστά του χρόνου για τα οποία μπορέσαμε να βάλουμε το σύστημα σε κατάσταση Doze από την Rx Idle (μπλε χρώμα) έχουμε μία πρώτη εικόνα για την απόδοση του αλγορίθμου χρονοπρογραμματισμού μας. Όσο μεγαλύτερα είναι αυτά τα ποσοστά τόσο καλύτερα απέδωσε ο αλγόριθμος. Είναι φανερό ότι για το video

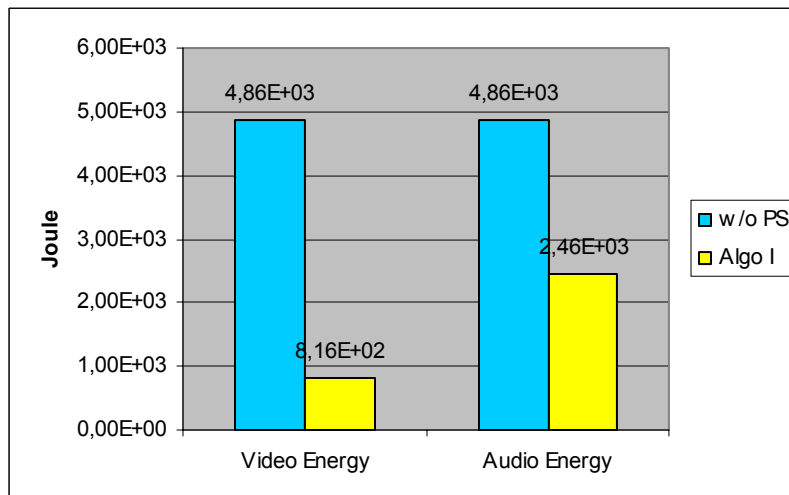
streaming αυτό το ποσοστό είναι τουλάχιστον ίσο με 74% και για το audio streaming τουλάχιστον ίσο με 52%. Προϊδεαζόμαστε λοιπόν ότι πετυχαίνουμε να εξοικονομήσουμε αξιόλογα ποσά ενέργειας.

6.5.3 Αποτελέσματα Κατανάλωσης Ενέργειας στους Σταθμούς

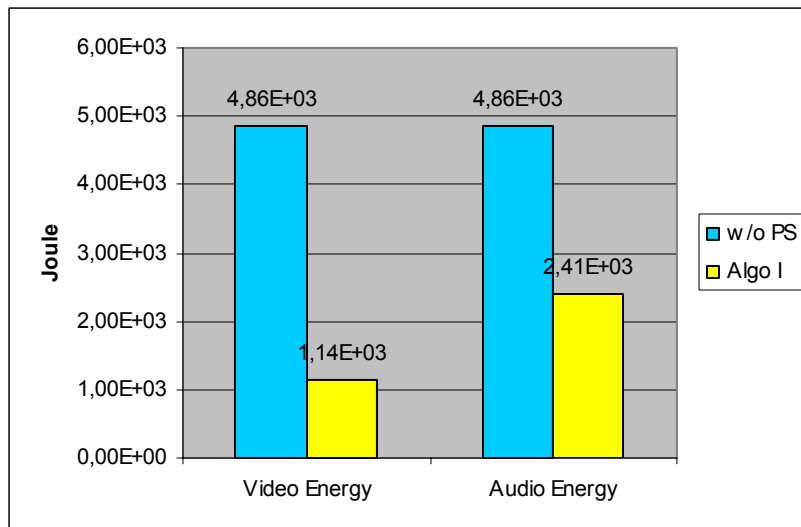
Υπολογίσαμε για κάθε ζεύγος χρηστών τη μέση ενέργεια που καταναλώνουν οι σταθμοί-χρήστες χωρίς χρήση μηχανισμού εξοικονόμησης ενέργειας και με χρήση ως τέτοιου μηχανισμού τον αλγόριθμο στην παράγραφο 6.3.1. Οι υπολογισμοί βασίστηκαν στα Γραφήματα 9-15 και στα στοιχεία του Πίνακα 4. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα Γραφήματα 16-19.



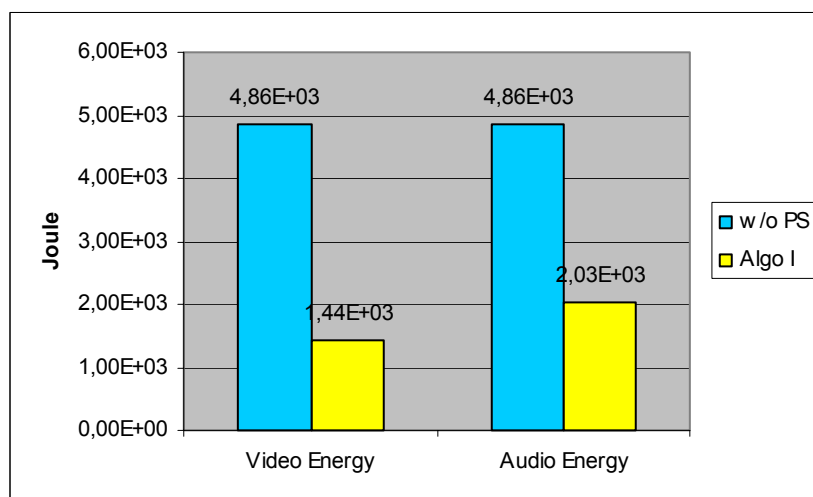
Γράφημα 16 : Κατανάλωση Ενέργειας για το ζεύγος (0,94)



Γράφημα 17 : Κατανάλωση Ενέργειας για το ζεύγος (3,82)



Γράφημα 18 : Κατανάλωση Ενέργειας για το ζεύγος (9,53)



Γράφημα 19 : Κατανάλωση Ενέργειας για το ζεύγος (15,12)

Αξίζει να δούμε από τα παραπάνω αποτελέσματα, το ποσοστό της ενέργειας που εξοικονομήθηκε για κάθε εφαρμογή και κάθε ζεύγος χρηστών. Ορίζουμε το % κέρδος μίας εφαρμογής $\%g_x$ και το % κέρδος του συστήματος $\%G$ ως εξής:

- $\%g_x = (1 - \text{"Energy Consumed using Algorithm I in application X"} / \text{"Energy Consumed in application X without Power Saving"}) \cdot (100\%)$
- $\%G = (1 - \text{"Energy Consumed using Algorithm I in System"} / \text{"Energy Consumed in System without Power Saving"}) \cdot (100\%).$

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.

Pairs of Users		Application Gain		System Gain
Video	Audio	Video (%g _v)	Audio (%g _a)	%G
0	94	-	49,03%	49,03%
1	89	85,59%	51,46%	51,84%
3	82	83,21%	49,30%	50,50%
6	71	79,69%	47,40%	49,92%
9	53	76,64%	50,49%	54,28%
12	38	73,27%	51,34%	56,61%
15	12	70,33%	58,17%	64,93%

Πίνακας 5 : % PS-Gain του Αλγορίθμου I

Παρατηρούμε ότι ο χρονοπρογραμματισμός οδηγεί σε σημαντικά κέρδη εξοικονόμησης ενέργειας - μεγαλύτερα από 45% - τόσο σε επίπεδο εφαρμογής όσο και σε επίπεδο συστήματος. Τα κέρδη είναι υψηλότερα για τη video εφαρμογή επειδή τα πακέτα video κερδίζουν πιο συχνά προτεραιότητα μετάδοσης καθώς έχουν μεγαλύτερο μέγεθος σε σχέση με τα audio. Γενικά, όσο λιγότεροι είναι οι χρήστες μιας εφαρμογής, τόσο μεγαλύτερο το κέρδος για την εφαρμογή. Επιπλέον, το σύστημα παρουσιάζει μεγαλύτερα κέρδη όσο μειώνεται ο συνολικός αριθμός των χρηστών του, πράγμα επίσης αναμενόμενο. Οι μικρές διακυμάνσεις οφείλονται στη VBR φύση του video.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : **Ο ΔΕΥΤΕΡΟΣ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ** **ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

7.1 Προδιαγραφές των Εφαρμογών και Εξοικονόμηση Ενέργειας

7.1.1 Περιγραφή των Εφαρμογών

Ο δεύτερος προτεινόμενος αλγόριθμος εξοικονόμησης ενέργειας διαπραγματεύεται την ίδια εφαρμογή με τον πρώτο. Έχουμε streaming video mpeg4 και audio PCM αρχείων. Οι αφίξεις των video πακέτων είναι κάθε 40 msec και των audio κάθε 20 msec. Όλα τα πακέτα έχουν μέγιστο χρόνο ζωής τα 40 msec. Οι μέγιστες επιτρεπτές τιμές για το PDR για κάθε εφαρμογή είναι $PDR_v \leq 10^{-4}$ και $PDR_a \leq 10^{-3}$, ώστε να διατηρείται η απαιτούμενη QoS.

7.1.2 Εξοικονόμηση Ενέργειας

Η Εξοικονόμηση Ενέργειας υλοποιήθηκε πάλι χάρη στην ευελιξία του MAC layer του IEEE802.11b WLAN. Χάρη σε αυτό οι σταθμοί μπορούν να αλλάζουν κατάσταση και να περνούν σε καταστάσεις όπου η κατανάλωση ισχύος είναι μικρή. Χρησιμοποιήθηκαν και πάλι τα δεδομένα του Πίνακα 1.

7.2 Παράμετροι του Συστήματος

7.2.1 Απόδοση Τιμών στις Παραμέτρους του Συστήματος

Οι χρονικές παράμετροι και το Fragmentation Threshold του IEEE802.11b WLAN ρυθμίστηκαν και πάλι στις τιμές που περιγράφονται στον Πίνακα 2.

7.3 Ο Δεύτερος Μηχανισμός Εξοικονόμησης Ενέργειας

7.3.1 Οι Εφαρμογές και τα Βάρη του Scheduling Αλγόριθμου

Επειδή αντιμετωπίζουμε την ίδια εφαρμογή ορίζουμε πάλι τα βάρη για ένα MSDU:

- Wsize = Μέγεθος του εν λόγω MSDU
- Wlife = 1/(Εναπομένον Χρόνος Ζωής για το εν λόγω MSDU)

Το βάρος που προκύπτει συνδυάζοντας όλα τα παραπάνω είναι το: $W = Wsize \cdot Wlife$.

Ο scheduler μεταδίδει το MSDU του χρήστη που έχει το μέγιστο βάρος W .

Σε αυτόν τον αλγόριθμο όμως δώσαμε πλήρη προτεραιότητα στο video streaming έναντι του audio. Αυτό το κάναμε γιατί μετά από κάποιες προσομοιώσεις διαπιστώσαμε ότι όταν οι δύο εφαρμογές αντιμετωπίζονταν ισοδύναμα, τότε το PDRν έπαιρνε υπερβολικά μεγάλες τιμές. Το πρόβλημα λύθηκε όταν δώσαμε πλήρη προτεραιότητα στο video.

Η καινοτομία σε αυτόν τον αλγόριθμο όμως είναι ότι κάνει έναν προϋπολογισμό της κίνησης που θα μπορέσει να μεταδοθεί κατά τη διάρκεια του CFP και αποφασίζει ποιοι σταθμοί από αυτούς για τους οποίους υπάρχουν αποθηκευμένα πακέτα στο AP θα μπορέσουν τελικά να τα λάβουν κατά τη διάρκεια του CFP, και δε θα απογοητευθούν περιμένοντας άδικα, καταναλώνοντας ενέργεια και λαβαίνοντας τα τελικά σε επόμενα CFP. Αφού αποφασισθεί ποιοι είναι αυτοί οι ‘τυχεροί’ σταθμοί τότε το AP γράφει μόνο αυτούς στο DTIM πεδίο του Beacon frame που σηματοδοτεί την έναρξη του CFP, με αποτέλεσμα μόνο αυτοί να μείνουν σε Awake – Receive mode κατά τη διάρκεια του τρέχοντος CFP. Η φιλοσοφία πίσω από αυτήν την αλλαγή στο πρωτόκολλο είναι ότι είναι κρίμα να μείνουν κατά τη διάρκεια ενός CFP σε Awake mode σταθμοί οι οποίοι τελικά δε θα λάβουν τα δεδομένα που περιμένουν. Θα ήταν προτιμότερο να μείνουν σε Doze mode και να μη δαπανήσουν άδικα ενέργεια. Επισημαίνουμε ότι αυτή η αλλαγή αναμένεται να βελτιώσει μόνο την ενεργειακή απόδοση του πρωτοκόλλου κι όχι την QoS που λαβαίνουν οι χρήστες.

7.3.2 Η Λειτουργία των Σταθμών κι ο Ρόλος του Beacon Frame

Όπως έχουμε ήδη πει, το Beacon frame ενημερώνει τους χρήστες για το αν υπάρχουν αποθηκευμένα MSDUs για αυτούς στο AP. Με την αλλαγή που εισάγαμε ειδοποιεί μόνο όσους χρήστες περιμένουν κάποια MSDUs και θα προλάβουν να τα λάβουν κατά τη διάρκεια του παρόντος CFP. Όταν κάποιος χρήστης δει στο Beacon frame ότι υπάρχουν δεδομένα για αυτόν μένει σε Awake – Receive mode μέχρι να τα λάβει. Όμοια με πριν, αν κάποιο Beacon frame χτυπηθεί από θόρυβο, τότε όλοι οι σταθμοί μένουν σε Awake – Receive mode χωρίς να ξέρουν αν υπάρχουν αποθηκευμένα δεδομένα γι’ αυτούς ή όχι.

7.3.3 Τα MSDUs των Εφαρμογών

Τα MSDUs των εφαρμογών είναι ίδια με αυτά που περιγράψαμε στην παράγραφο 6.3.3.

7.4 Η Προσομοίωση

7.4.1 Ο Προσομοιωτής και το Μηχάνημα Προσομοίωσης

Υλοποιήσαμε τον Προσομοιωτή σε γλώσσα προγραμματισμού C++, υλοποιώντας τις απαραίτητες δομές για τις εφαρμογές. Ο προσομοιωτής βασίστηκε στον προσομοιωτή του πρώτου αλγορίθμου, τον οποίο αλλάξαμε κατάλληλα. Όπως αναφέραμε πιο πριν, το

μηχάνημα στο οποίο έτρεξαν οι προσομοιώσεις έχει Λειτουργικό Σύστημα Unix, 2 CPUs των 2.4 GHz (dual) και μνήμη RAM 1 GByte.

7.4.2 Προσομοιώσεις και Ζευγάρια Χρηστών

Όπως πριν, δοκιμάσαμε το σύστημα, όταν αυτό είναι φορτωμένο με τόσους χρήστες όσους μπορεί να ‘χωρέσει’, διατηρώντας την απαιτούμενη QoS, βλέποντας πόση ενέργεια μπορούμε να εξοικονομήσουμε υπό αυτές τις συνθήκες. Ο χρόνος προσομοίωσης ορίστηκε πάλι ίσος με 1 ώρα: TSIM=1h. Αναζητήσαμε λοιπόν μέσα από προσομοιώσεις τα οριακά ‘σημεία’ του συστήματος, στα οποία έχουμε το μέγιστο πλήθος χρηστών και για τους οποίους ισχύει $PDR_v \leq 10^{-4}$ και $PDR_a \leq 10^{-3}$. Για κάθε ζευγάρι video/audio (V,A) χρηστών τρέξαμε 10 runs και κατόπιν επεξεργαστήκαμε στατιστικά τα 10 αποτελέσματα που προέκυψαν. Υπολογίσαμε Στατιστικό Μέσο Όρο και Διαστήματα Εμπιστοσύνης για τις μετρικές που εξετάζουμε. Οι μετρικές που μας ενδιέφεραν για κάθε εφαρμογή (video, audio) είναι όπως πριν τα PDR, PSR, Μέση Τιμή και Τυπική Απόκλιση της Καθυστερήσης των πακέτων, καθώς και το ποσοστό του συνολικού χρόνου της προσομοίωσης (TSIM) που πέρασαν οι σταθμοί σε κάθε mode και η ενέργεια που δαπανήθηκε σε αυτό το χρονικό διάστημα.

7.4.3 Τα MSDUs των Εφαρμογών στην Προσομοίωση

Τα MPDUs που χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα στο σύστημα είναι τα ίδια με αυτά στην παράγραφο 6.4.3.

7.5 Αποτελέσματα Προσομοίωσης

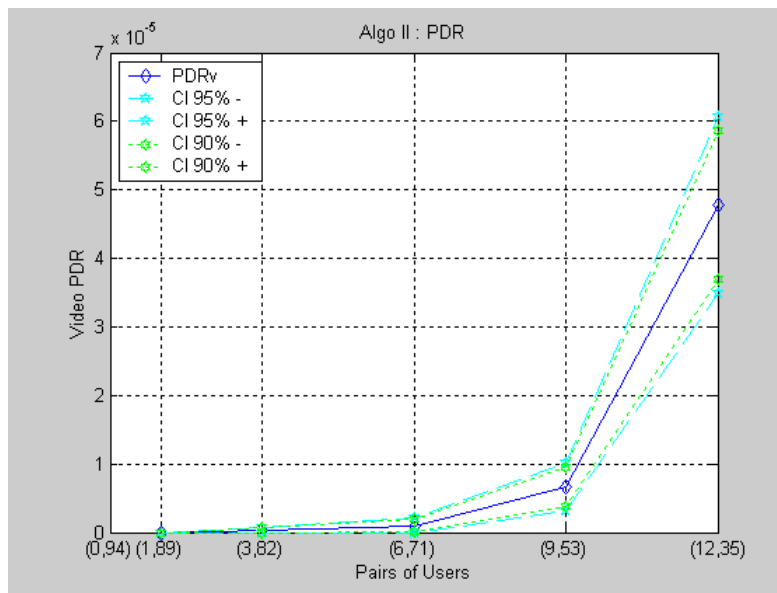
7.5.1 Αποτελέσματα Quality of Service

Δοκιμάζοντας διάφορες τιμές για το πλήθος των video και audio χρηστών καταφέραμε να προσδιορίσουμε πόσοι χρήστες ‘φορτώνουν’ το σύστημα. Από προσομοιώσεις προέκυψαν τα παρακάτω ζεύγη [Πιν. 4]. Σημειώνουμε ότι όταν οι video χρήστες γίνονται 13, τότε η απόδοση του συστήματος είναι εκτός απαιτήσεων QoS ακόμη κι όταν δεν υπάρχουν audio χρήστες. Η χωρητικότητα του συστήματος μειώνεται σε σχέση με τον Αλγόριθμο I για δύο λόγους κυρίως. Ο πρώτος λόγος είναι ότι κρατώντας περισσότερους χρήστες σε Doze mode αυξάνεται η καθυστέρηση μετάδοσης των πακέτων που βρίσκονται αποθηκευμένα στο AP και η πιθανότητα να διαγραφούν αυτά από την aging function του AP. Ο δεύτερος λόγος είναι ότι όταν έρθουν νέα MSDUs κατά τη διάρκεια του CFP τότε ο προηγούμενος προϋπολογισμός παύει να ισχύει και το σύστημα εξελίσσεται διαφορετικά. Αυτή η αλλαγή καθιστά το σύστημα απρόβλεπτο από εκείνη τη χρονική στιγμή.

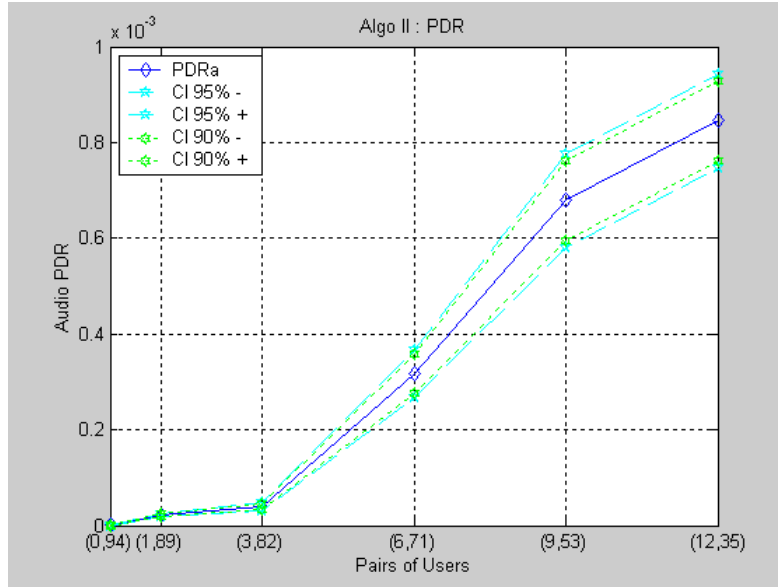
Video Users	Audio Users
0	94
1	89
3	82
6	71
9	53
12	35

Πίνακας 6 : Ζεύγη Χρηστών για τον Αλγόριθμο II

Για αυτά τα ζεύγη χρηστών μετρήσαμε το PDR και για τις δύο υπηρεσίες κι έτσι προέκυψαν τα Γραφήματα 29 και 30. Σε αυτά φαίνονται και τα Διαστήματα Εμπιστοσύνης με confidence level 95% και 90%, αντίστοιχα. Παρατηρούμε ότι όσο πολλαπλασιάζονται οι video χρήστες, που έχουν VBR κίνηση, τόσο αυξάνει το PDR όλων των χρηστών, καθώς και η διασπορά αυτού.

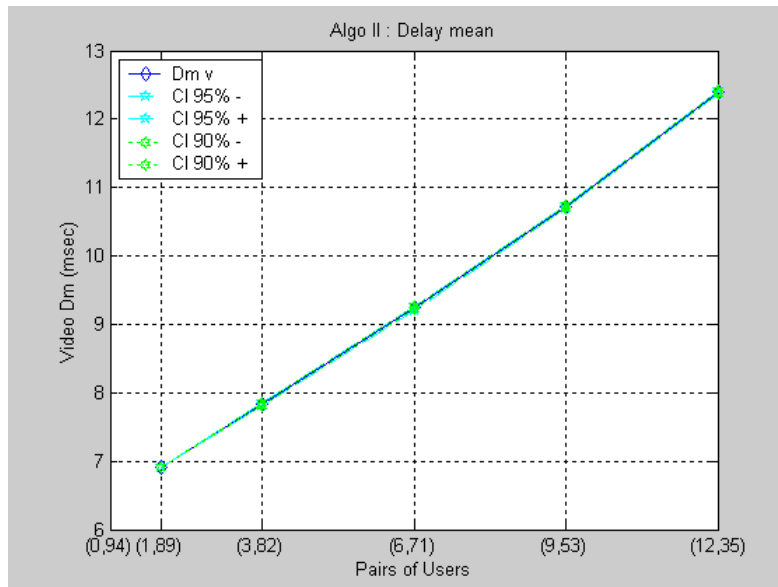


Γράφημα 20 : Video PDR του Αλγορίθμου II

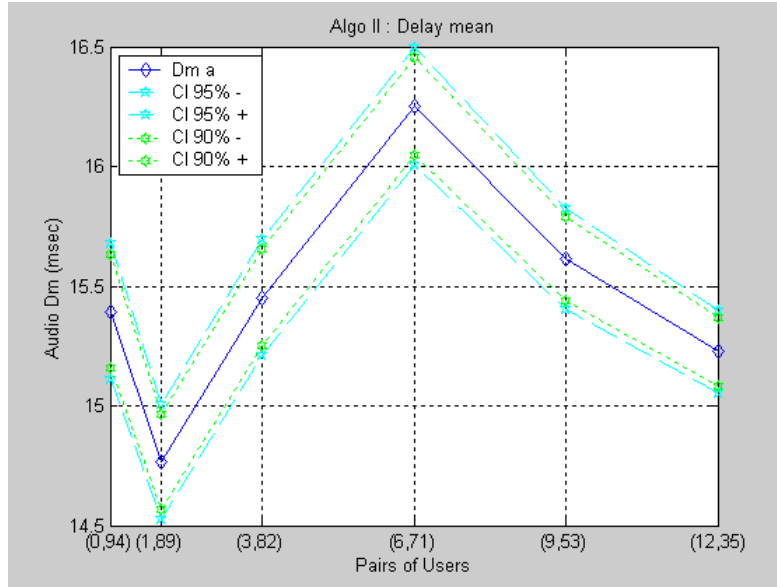


Γράφημα 21 : Audio PDR του Αλγορίθμου II

Μετρήσαμε επίσης τη Μέση Τιμή της Καθυστέρησης πακέτου για κάθε μία από τις δύο υπηρεσίες [Γρ. 31,32]. Όπως έχουμε πει τα video πακέτα έχουν προτεραιότητα σε αυτόν τον αλγόριθμο. Έτσι, η Μέση Τιμή της Καθυστέρησης των video πακέτων αυξάνει ανάλογα με το πλήθος των χρηστών video. Η Μέση Τιμή της Καθυστέρησης των audio πακέτων όμως είναι ανάλογη του πλήθους, τόσο των χρηστών video (με VBR κίνηση), όσο και των audio χρηστών (με CBR κίνηση).

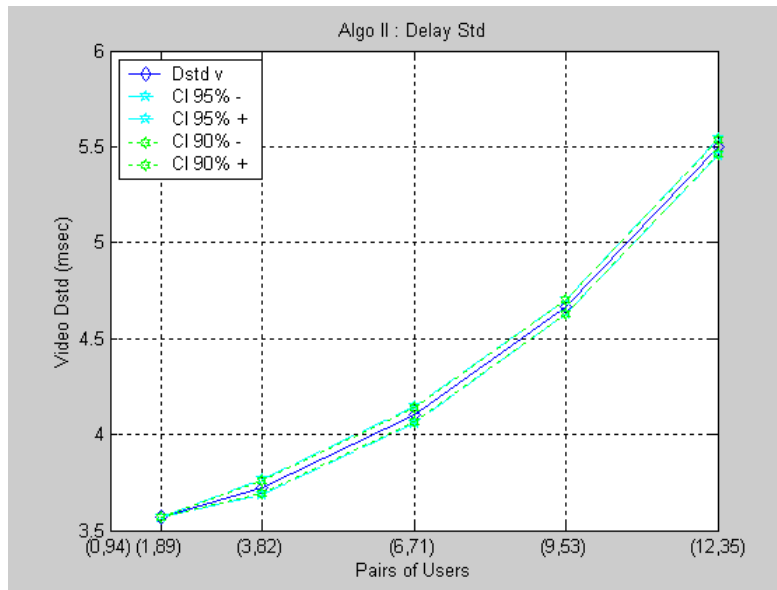


Γράφημα 22 : Video Mean Delay του Αλγορίθμου II

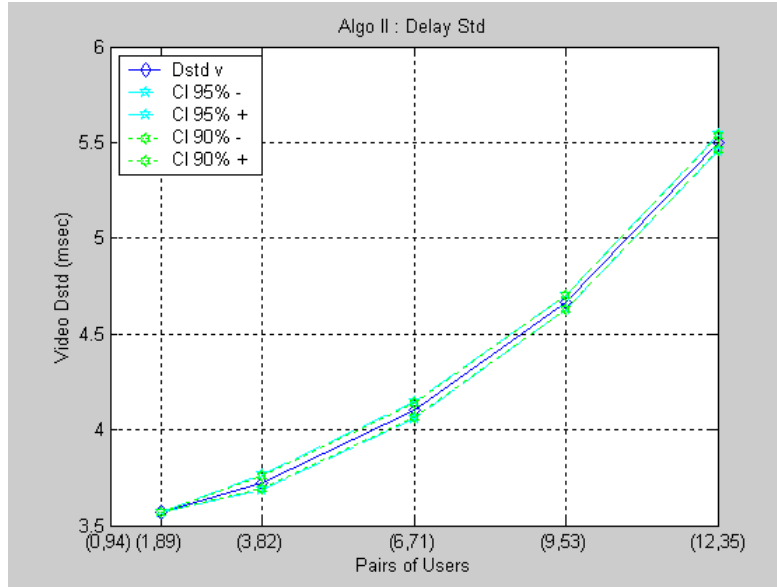


Γράφημα 23 : Audio Mean Delay του Αλγορίθμου II

Μετρήσαμε ακόμη την Τυπική Απόκλιση της Καθυστερήσης πακέτων για κάθε μία από τις δύο εφαρμογές [Γρ. 33,34]. Και στα δύο γραφήματα παρατηρούμε την αύξηση της όσο αυξάνουν οι video χρήστες και κατά συνέπεια αυξάνει το ποσοστό της VBR κίνησης στο σύστημα.

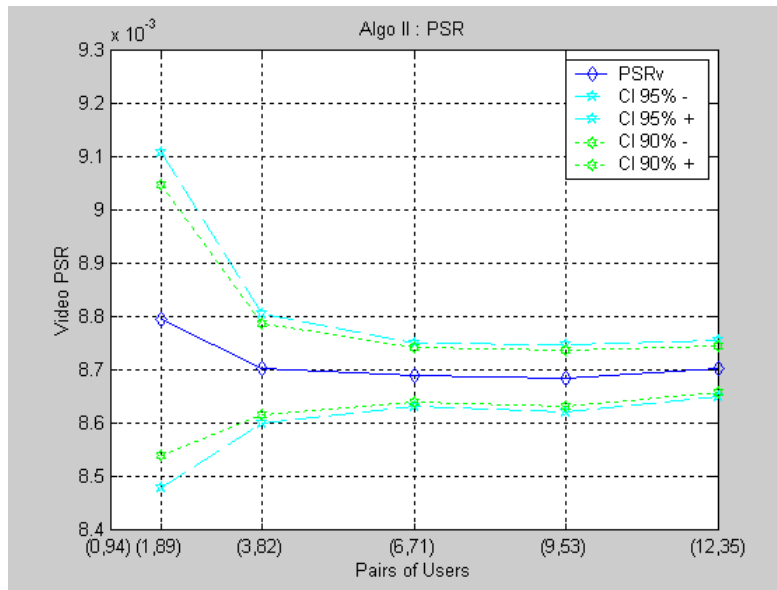


Γράφημα 24 : Video Standard Deviation του Αλγορίθμου II

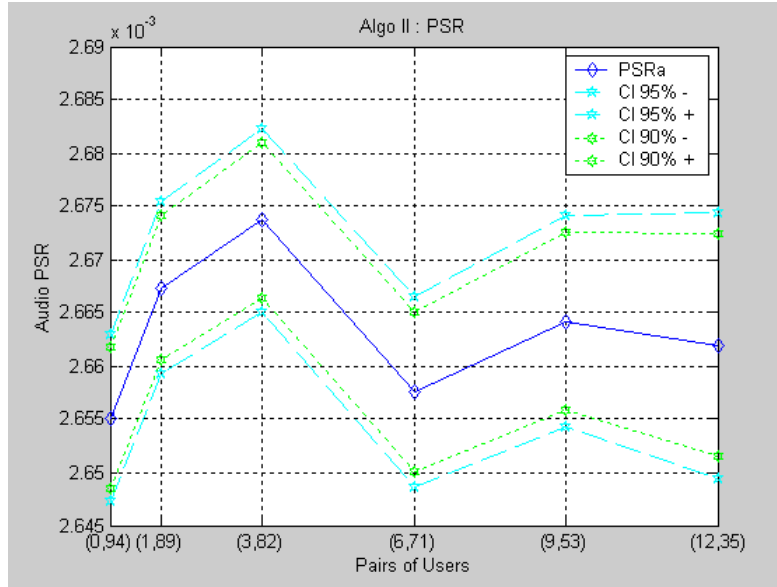


Γράφημα 25 : Audio Standard Deviation του Αλγορίθμου II

Τέλος μετρήσαμε και το PSR για τις δύο υπηρεσίες [Γρ. 35,36]. Παρατηρούμε ότι το PSR είναι πρακτικά σταθερό για κάθε υπηρεσία. Πάλι, τα Διαστήματα Εμπιστοσύνης ‘φαρδαίνουν’ αρκετά στα σημεία που δεν έχουμε αρκετούς χρήστες μίας συγκεκριμένης εφαρμογής.



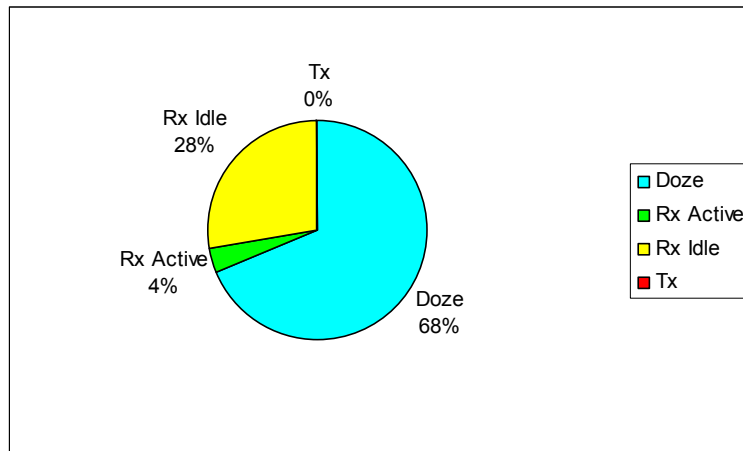
Γράφημα 26 : Video PSR του Αλγορίθμου II



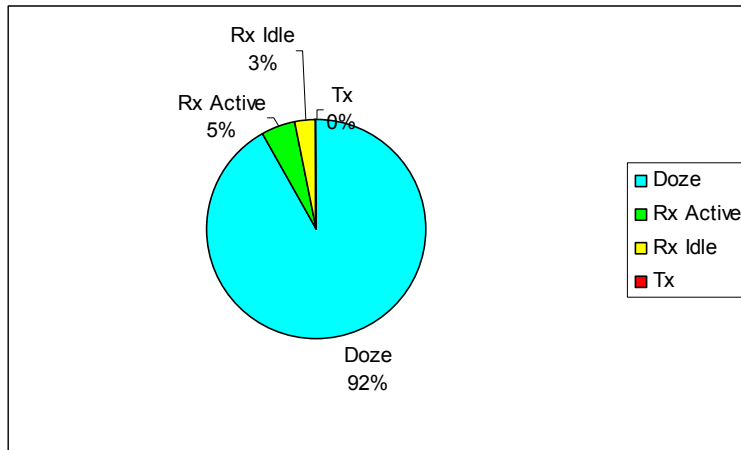
Γράφημα 27 : Audio PSR του Αλγορίθμου II

7.5.2 Αποτελέσματα Κατανομής Χρόνου στους Σταθμούς

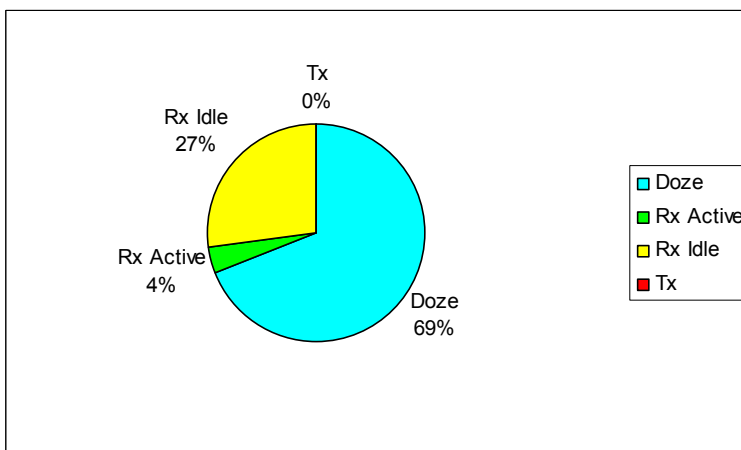
Μελετήσαμε το ποσοστό του χρόνου που περνούν οι σταθμοί-χρήστες σε κάθε μία από τις τέσσερις καταστάσεις: Doze, Receive (Rx) Active, Receive (Rx) Idle, Transmit (Tx). Όπως θα δούμε οι σταθμοί περνούν ένα ποσοστό του χρόνου σε κάθε κατάσταση. Για μερικά από τα ζεύγη σταθμών του Πίνακα 6 έχουμε τα γραφήματα 28 ως 34:



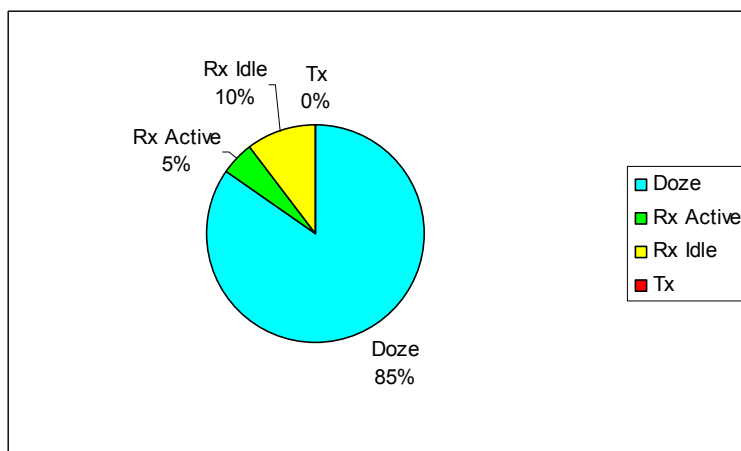
Γράφημα 28 : Κατανομή Χρόνου στους Audio Χρήστες για το ζεύγος (0,94)



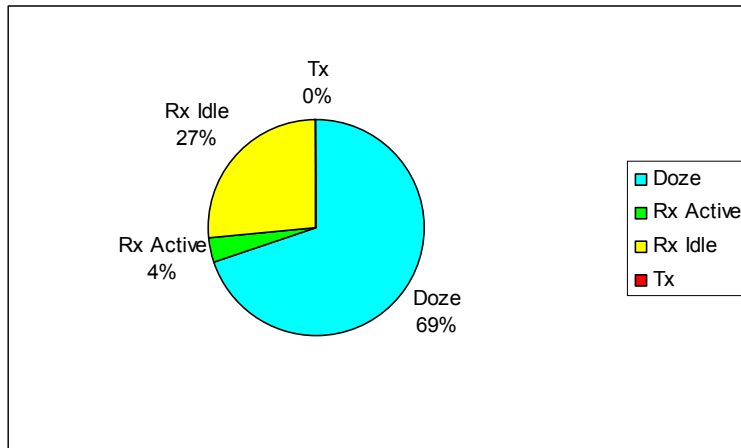
Γράφημα 29 : Κατανομή Χρόνου στους Video Χρήστες για το ζεύγος (3,82)



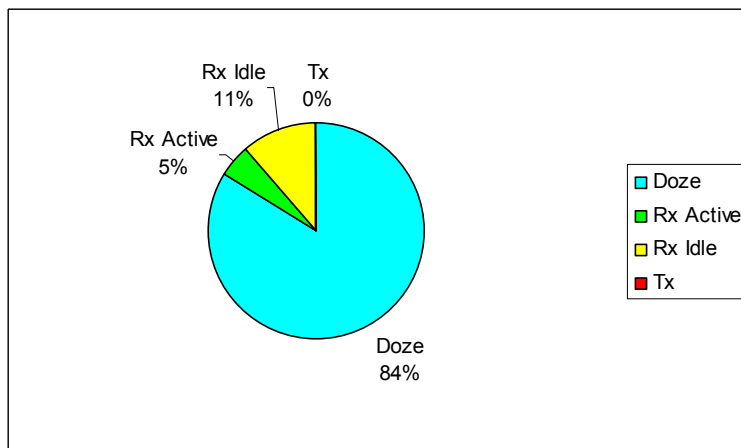
Γράφημα 30 : Κατανομή Χρόνου στους Audio Χρήστες για το ζεύγος (3,82)



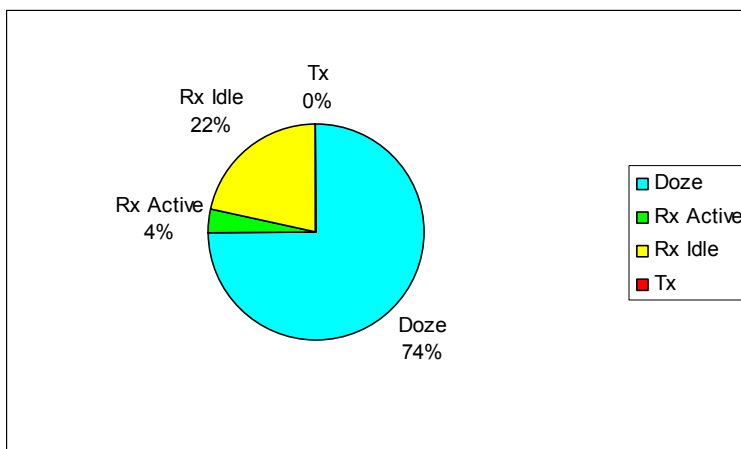
Γράφημα 31 : Κατανομή Χρόνου στους Video Χρήστες για το ζεύγος (9,53)



Γράφημα 32 : Κατανομή Χρόνου στους Audio Χρήστες για το ζεύγος (9,53)



Γράφημα 33 : Κατανομή Χρόνου στους Video Χρήστες για το ζεύγος (12,35)

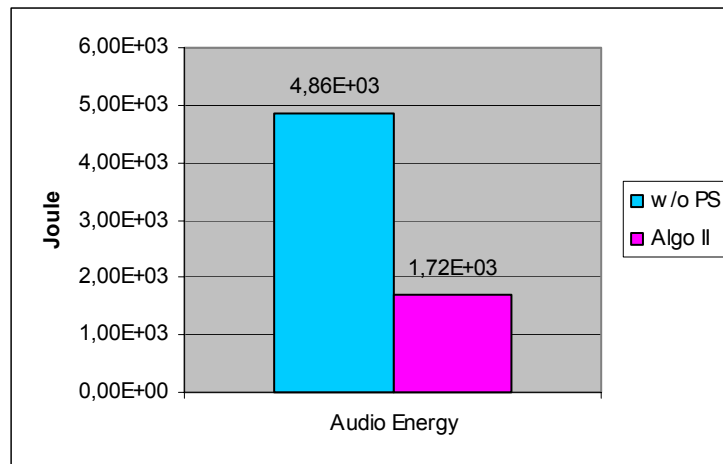


Γράφημα 34 : Κατανομή Χρόνου στους Audio Χρήστες για το ζεύγος (12,35)

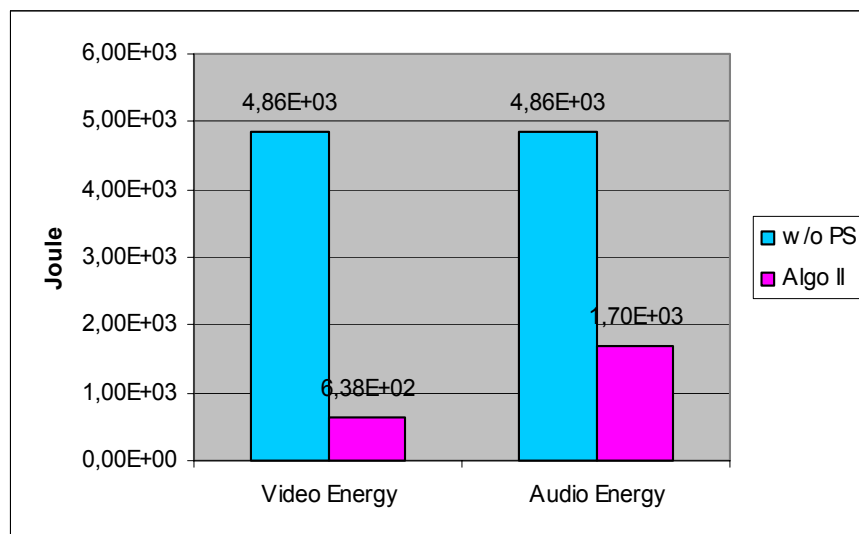
Όπως παρατηρούμε στα παραπάνω γραφήματα, τα ποσοστά του χρόνου για τα οποία μπορέσαμε να βάλουμε το σύστημα στην κατάσταση Doze από την κατάσταση Rx Idle (μπλε χρώμα) παίρνουμε μία πρώτη γεύση για την απόδοση του αλγορίθμου χρονοπρογραμματισμού. Όπως είναι φανερό για το video streaming αυτό το ποσοστό είναι τουλάχιστον ίσο με 84% και για το audio streaming τουλάχιστον ίσο με 68%. Τα ποσοστά αυτά είναι μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα αποτελέσματα που είχαμε για τον Αλγόριθμο I. Προϊδεαζόμαστε λοιπόν ότι η απόδοση του Αλγορίθμου II είναι μεγαλύτερη.

7.5.3 Αποτελέσματα Κατανάλωσης Ενέργειας στους Σταθμούς

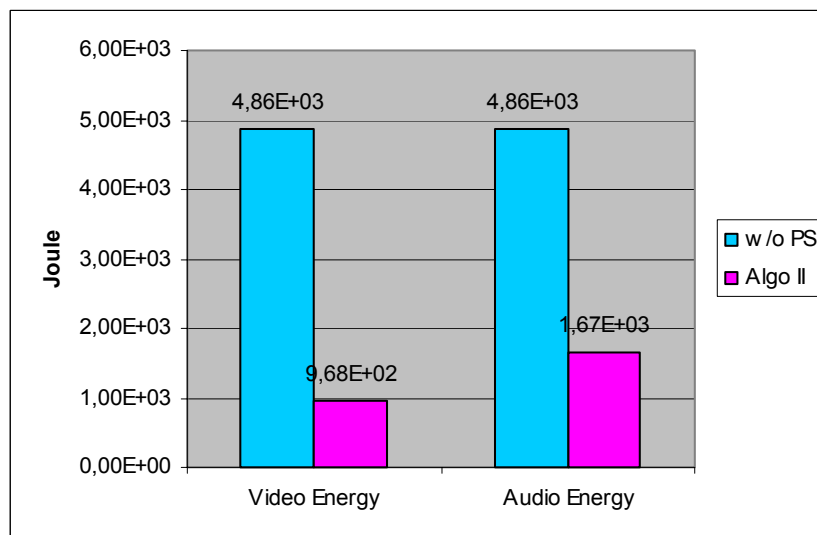
Υπολογίσαμε για κάθε ζεύγος χρηστών τη μέση ενέργεια που καταναλώνουν οι σταθμοί-χρήστες χωρίς χρήση αλγόριθμου εξοικονόμησης ενέργειας και με χρήση του δεύτερου προτεινόμενου αλγόριθμου εξοικονόμησης ενέργειας. Τα συγκριτικά αποτελέσματα φαίνονται στα Γραφήματα 35-38.



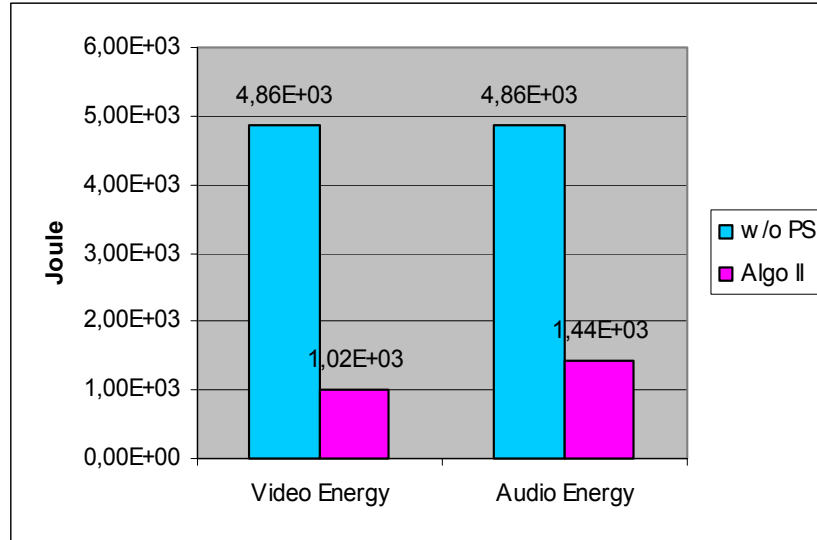
Γράφημα 35 : Κατανάλωση Ενέργειας για το ζεύγος (0,94)



Γράφημα 36 : Κατανάλωση Ενέργειας για το ζεύγος (3,82)



Γράφημα 37 : Κατανάλωση Ενέργειας για το ζεύγος (9,53)



Γράφημα 38 : Κατανάλωση Ενέργειας για το ζεύγος (12,35)

Υπολογίζουμε το % κέρδος των εφαρμογών video και audio, και το % κέρδος του συστήματος και για τον Αλγόριθμο II. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 7.

Pairs of Users		Application Gain		System Gain
Video	Audio	Video (%g _v)	Audio (%g _a)	%G
0	94	-	64,72%	64,72%
1	89	89,53%	66,27%	66,53%
3	82	86,87%	65,09%	65,86%
6	71	83,06%	63,91%	65,40%
9	53	80,10%	65,73%	67,81%
12	35	78,99%	70,46%	72,50%

Πίνακας 7 : % PS-Gain του Αλγορίθμου II

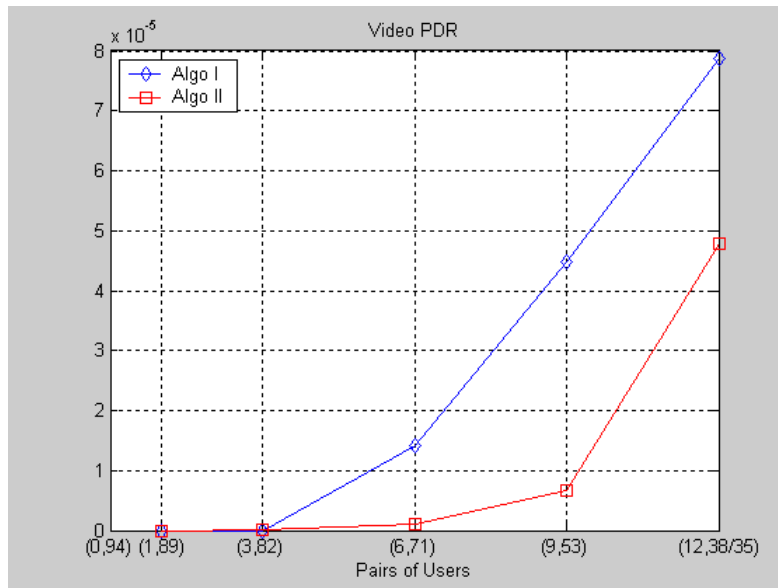
Από τα παραπάνω αποτελέσματα συμπεραίνουμε ότι ο κατάλληλος χρονοπρογραμματισμός δίνει αξιοσημείωτα κέρδη – μεγαλύτερα του 60% στην περίπτωση μας - και σε επίπεδο εφαρμογής και σε επίπεδο συστήματος. Τα κέρδη είναι σαφώς υψηλότερα για τη video εφαρμογή, διότι ο αλγόριθμος δίνει προτεραιότητα σε αυτήν. Γενικά, όσο λιγότεροι είναι οι χρήστες μιας εφαρμογής, τόσο μεγαλύτερο το κέρδος για τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Όπως αναμενόταν, το σύστημα συνολικά παρουσιάζει μεγαλύτερα κέρδη καθώς μειώνεται ο συνολικός αριθμός των χρηστών του.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 : ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΔΥΟ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΩΝ ΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

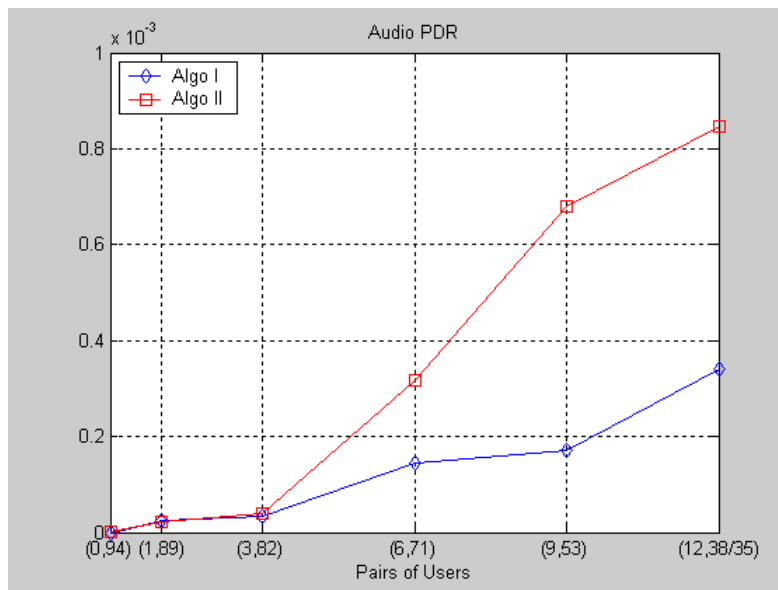
8.1 Αποτελέσματα για την Quality of Service

8.1.1 Οι Μετρικές PDR και mean Delay

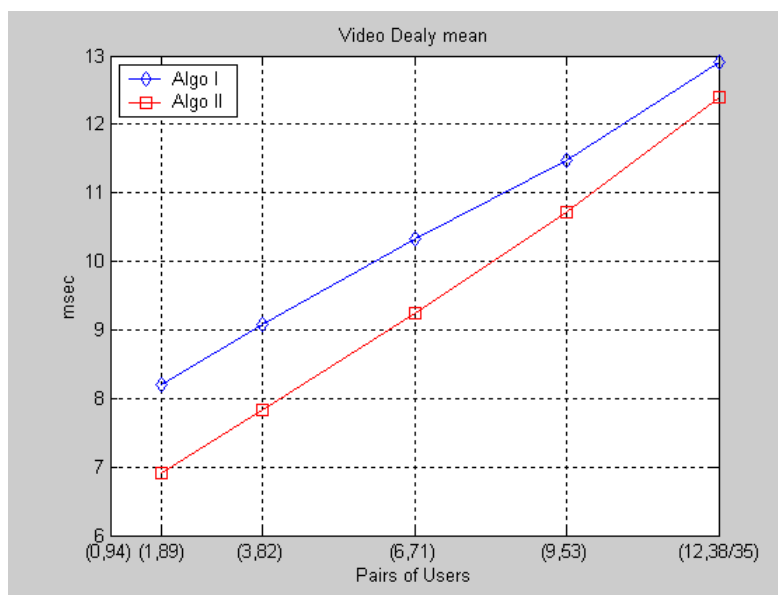
Οι μετρικές που μπορούν να μας δώσουν ενδιαφέροντα συμπεράσματα σχετικά με την προσφερόμενη QoS από το σύστημα είναι το PDR και το mean Delay για τις εφαρμογές video και audio streaming. Κατασκευάσαμε λοιπόν τα ακόλουθα γραφήματα [Γραφ. 39-42], στα οποία συγκρίνουμε τους δύο αλγορίθμους.



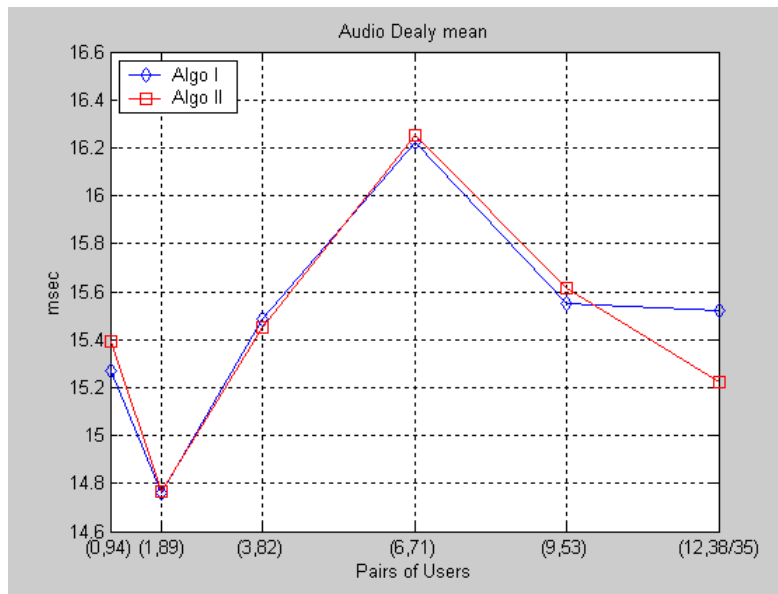
Γράφημα 39 : Σύγκριση των Αλγορίθμων ως προς το Video PDR



Γράφημα 40 : Σύγκριση των Αλγόριθμων ως προς το Audio PDR



Γράφημα 41 : Σύγκριση των Αλγόριθμων ως προς το Video mean Delay



Γράφημα 42 : Σύγκριση των Αλγόριθμων ως προς το Audio mean Delay

8.1.2 Συμπεράσματα

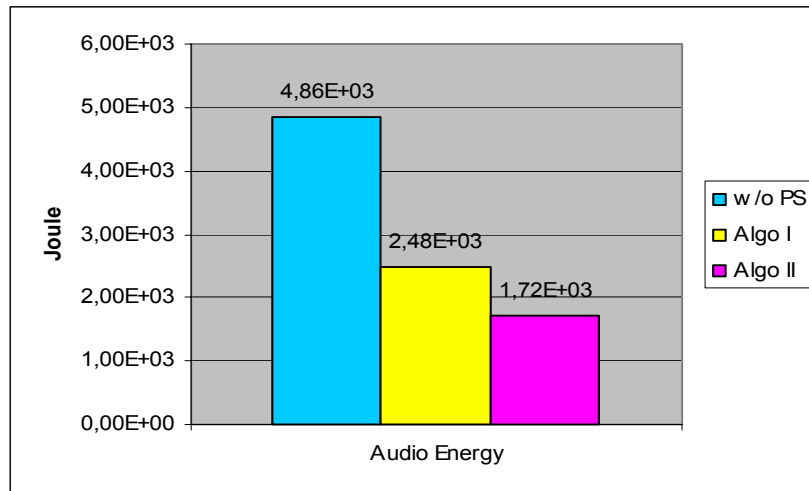
Από τα παραπάνω γραφήματα συμπεραίνουμε ότι οι δύο αλγόριθμοι προσφέρουν την ίδια περίπου QoS στους χρήστες, όταν οι video χρήστες είναι λίγοι – μέχρι και 9. Οι τιμές των PDR και mean Delay δε διαφέρουν σημαντικά. Όταν όμως αυξηθούν περαιτέρω οι video χρήστες – σε 12 ή περισσότερους – τότε ο δεύτερος αλγόριθμος δεν μπορεί να εξυπηρετήσει το ίδιο πλήθος από audio χρήστες, αφού τότε το PDRα ξεπερνά την τιμή 10^{-3} . Εξυπηρετεί λιγότερους. Επιπλέον, ο πρώτος αλγόριθμος μπορεί να εξυπηρετήσει μέχρι και 15 video χρήστες ενώ ο δεύτερος το πολύ 12. Το συμπέρασμα μας είναι λοιπόν ότι ο πρώτος αλγόριθμος παρέχει καλύτερη QoS στους χρήστες του.

Η αδυναμία του δεύτερου αλγορίθμου οφείλεται στη λειτουργία του. Όπως έχουμε ήδη περιγράψει κάνει έναν προγραμματισμό των πακέτων που θα μεταδοθούν στο επόμενο CFP, κρατώντας σε Awake - Receive mode μόνο τους σταθμούς που θα μπορέσουν να λάβουν δεδομένα κατά τη διάρκεια αυτού. Αν όμως έρθουν φρέσκα video πακέτα κατά τη διάρκεια ενός CFP τότε ο προγραμματισμός που έχει ήδη γίνει διαταράσσεται. Είναι πιθανό το AP να ξαναμεταδώσει προς σταθμούς οι οποίοι είναι σε Awake - Receive mode και μόλις έλαβαν ένα μεγάλο MSDU, παραμελώντας μικρότερα MSDUs τα οποία όμως περιμένουν για αρκετό χρονικό διάστημα. Είναι επίσης πολύ πιθανό να έρθουν φρέσκα πακέτα ενώ το σύστημα δεν έχει τίποτα προς μετάδοση και όλοι οι σταθμοί βρίσκονται σε Sleep mode. Τότε σε κανέναν σταθμό δε μεταδίδονται πακέτα και τα δεδομένα μένουν αποθηκευμένα στο AP μέχρι το επόμενο CFP, επιβαρυνόμενα έτσι με σημαντική καθυστέρηση.

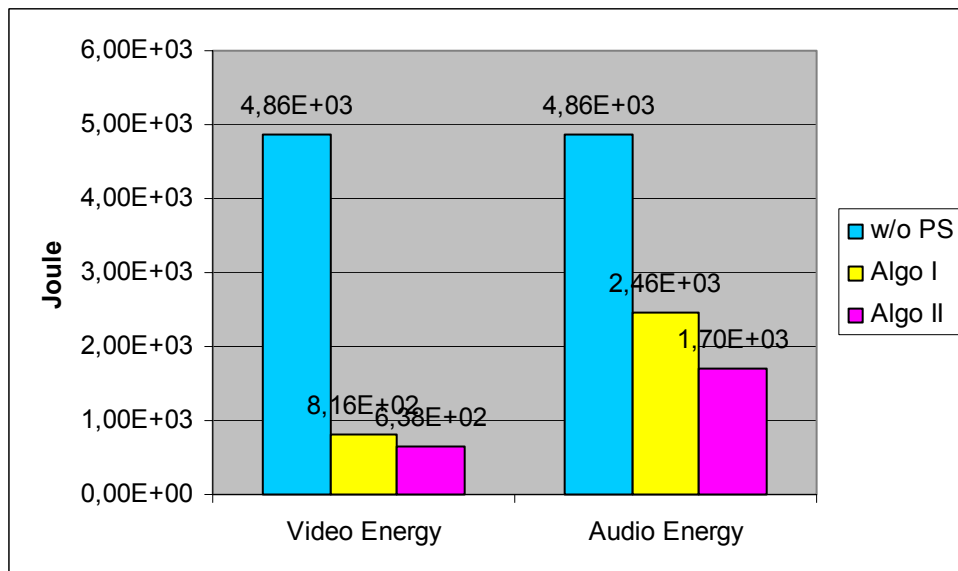
8.2 Αποτελέσματα για την Εξοικονόμηση Ενέργειας

8.2.1 Η Μετρική System Gain

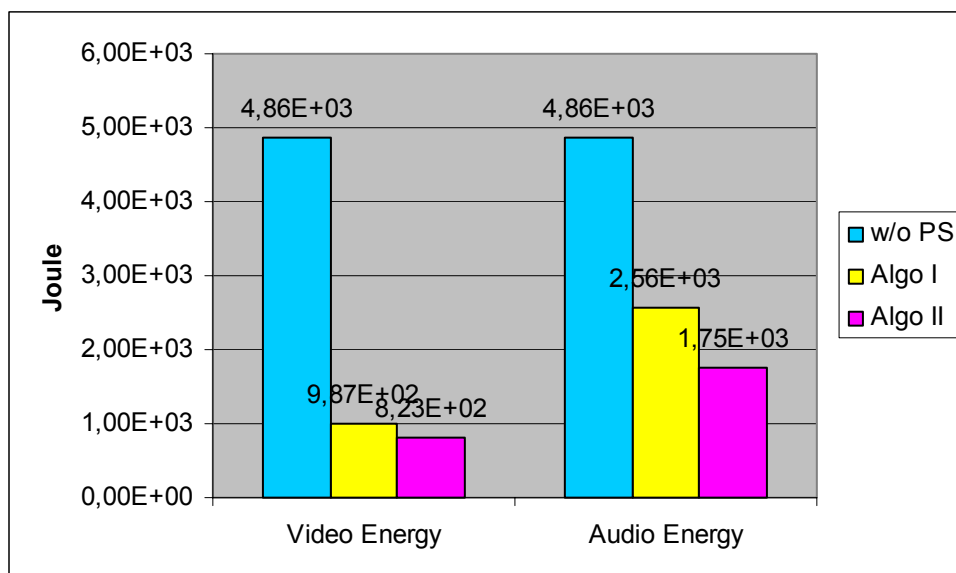
Οι μετρική που μπορεί να μας δώσει συμπεράσματα για την απόδοση του κάθε αλγορίθμου ως προς τη διαχείριση της ενέργειας είναι το System Gain, το οποίο λαβαίνει υπόψη του ολόκληρο το σύστημα. Αξίζει ωστόσο να δούμε και μερικά γραφήματα που συγκρίνουν την κατανάλωση ενέργειας από τις δύο εφαρμογές στο σύστημα για τους δύο αλγορίθμους. Παραθέτουμε τα γραφήματα για τα ζεύγη χρηστών στα οποία και οι δύο αλγόριθμοι κρατούσαν το σύστημα εντός απαιτήσεων QoS [Γραφ. 43-46].



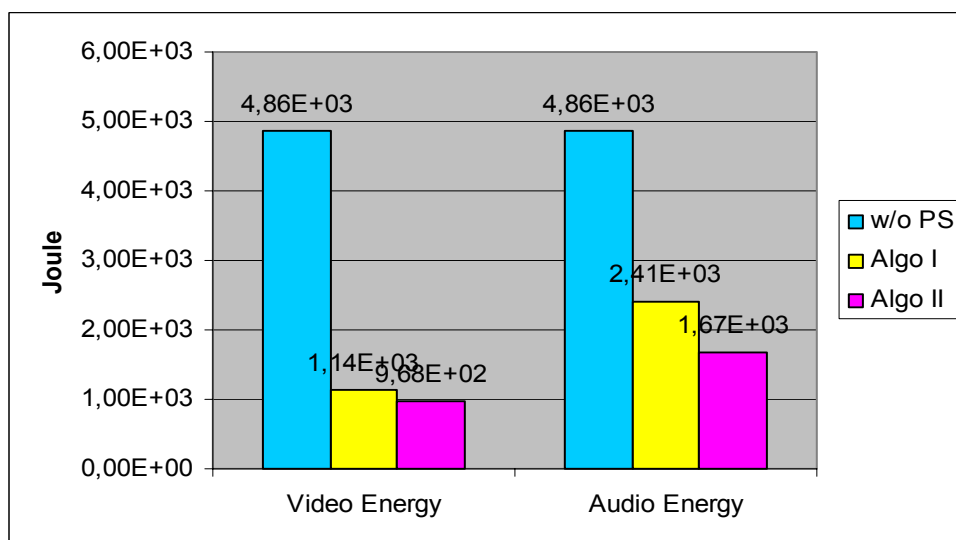
Γράφημα 43 : Κατανάλωση Ενέργειας για το ζεύγος (0,94)



Γράφημα 44 : Κατανάλωση Ενέργειας για το ζεύγος (3,82)



Γράφημα 45 : Κατανάλωση Ενέργειας για το ζεύγος (6,71)



Γράφημα 46 : Κατανάλωση Ενέργειας για το ζεύγος (9,53)

8.2.2 Συμπεράσματα

Όπως βλέπουμε ο Αλγόριθμος II πάντα καταφέρνει να εξοικονομήσει περισσότερη ενέργεια από τον Αλγόριθμο I. Συγκρίνοντας και το System Gain στον Πίνακα 8 έχουμε:

Αλγόριθμος I			Αλγόριθμος II		
Pairs of Users		System Gain	Pairs of Users		System Gain
Video	Audio	%G	Video	Audio	%G
0	94	49,03%	0	94	64,72%
1	89	51,84%	1	89	66,53%
3	82	50,50%	3	82	65,86%
6	71	49,92%	6	71	65,40%
9	53	54,28%	9	53	67,81%
12	38	56,61%	12	35	72,50%

Πίνακας 8 : % PS-Gains των Αλγορίθμων I και II

Τέλος ορίζουμε το % κέρδος του Αλγορίθμου II ως προς τον Αλγόριθμο I $\%G_{21}$ για το σύστημα ως

$$\%G_{21} = (1 - \text{“Energy Consumed using Algorithm II in System”} / \text{“Energy Consumed using Algorithm I in System”}) \cdot (100\%).$$

Το $\%G_{21}$ προφανώς ορίζεται για τα κοινά ζεύγη χρηστών των δύο αλγορίθμων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 9.

Pairs of Users		%Gain of Algo II over Algo I
Video	Audio	$\%G_{21}$
0	94	30,78
1	89	30,49
3	82	31,03
6	71	30,91
9	53	29,59

Πίνακας 9 : % Κέρδος του Αλγορίθμου II ως προς τον Αλγόριθμο I

Από τα παραπάνω αποτελέσματα είναι φανερό ότι ο Αλγόριθμος II υπερέχει πάντα του Αλγορίθμου I γύρω στο 30%.

8.3 Τελική Σύγκριση των δύο Μηχανισμών

8.3.1 Το Trade-Off μεταξύ της Χωρητικότητας και της Εξοικονόμησης Ενέργειας

Από τα παραπάνω αποτελέσματα είναι εμφανές ότι έχουμε ένα trade-off μεταξύ της χωρητικότητας του συστήματος και της ενέργειας που εξοικονομούμε. Αυτό οφείλεται στην απρόβλεπτη συμπεριφορά του VBR video streaming. Όταν σχεδιάζουμε ένα τέτοιο σύστημα, θα πρέπει να λάβουμε υπόψη μας τι ποσοστό της κίνησης θα είναι VBR και πόσους VBR video χρήστες μας ενδιαφέρει να εξυπηρετούμε. Αν η VBR κίνηση δεν είναι μεγάλη ή όταν δε μας ενδιαφέρει να εξυπηρετούμε περισσότερους από 10 VBR video χρήστες, τότε θα πρέπει να εξοικονομήσουμε όση ενέργεια μπορούμε παρατείνοντας το χρόνο ζωής των μπαταριών των τερματικών των χρηστών. Αν θέλουμε όμως να παρέχουμε υπηρεσίες με VBR κίνηση σε πολλούς χρήστες τότε μας ενδιαφέρει πρωτίστως η χωρητικότητα. Όμως, ακόμα και τότε, αν βρισκόμαστε σε περιβάλλον όπου η επαναφόρτιση των μπαταριών κι η συνεχής τροφοδοσία των τερματικών αποτελεί πρόβλημα, τότε η εξοικονόμηση ενέργειας αποκτά προτεραιότητα κι αξίζει να θυσιαστεί ένα μέρος της επιτυγχανόμενης χωρητικότητας του δικτύου για λόγους εξοικονόμησης ενέργειας στα τερματικά των χρηστών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ

9.1 Συμπεράσματα

9.1.1 Quality of Service και Εξοικονόμηση Ενέργειας

Από τα αποτελέσματα αυτής της εργασίας γίνεται φανερό ότι μπορούμε με κατάλληλο χρονοπρογραμματισμό να εξοικονομήσουμε σημαντικές ποσότητες ενέργειας, χωρίς σημαντική μείωση της προσφερόμενης QoS. Συνοψίζοντας είδαμε πολύ θετικά αποτελέσματα για το CBR audio streaming, μολονότι η εφαρμογή είχε μικρότερη προτεραιότητα από το VBR video streaming. Κατά συνέπεια, εφαρμογές που μπορούν να υλοποιηθούν με χαρακτηριστικά CBR μπορούν να εξοικονομήσουν σημαντική ενέργεια από το δίκτυο. Αρκεί να αναπτυχθούν οι κατάλληλοι αλγόριθμοι χρονοπρογραμματισμού με προδιαγραφές για εξοικονόμηση ενέργειας και ικανοποιητικού QoS. Προφανώς η λύση θα είναι υποβέλτιστη για κάθε παράμετρο ξεχωριστά αλλά θα μπορούσαμε πιθανά να εντάξουμε την εξοικονόμηση ενέργειας ως τμήμα της QoS για τα μελλοντικά ασύρματα δίκτυα.

Όπως έχουμε πει ο χρόνος ζωής της μπαταρίας αποτελεί μία σημαντική παράμετρο για τα τερματικά των συνδρομητών των ασύρματων δικτύων. Μειώνοντας την κατανάλωση ενέργειας πετυχαίνουμε την παράταση της ζωής των μπαταριών των τερματικών συσκευών. Στα εμπορικά δίκτυα της κινητής τηλεφωνίας και των ασυρμάτων δικτύων η διάρκεια της μπαταρίας αποτελεί μία σημαντική παράμετρο για την ικανοποίηση των χρηστών από τις προσφερόμενες υπηρεσίες, αφού οι χρήστες θέλουν να είναι ανεξάρτητοι από τις σταθερές πηγές ηλεκτρικής ενέργειας για όσο το δυνατό μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.

9.2 Μελλοντικές Επεκτάσεις

9.2.1 Ως προς τις Εφαρμογές

Η πολύ καλή απόδοση των δύο αλγορίθμων χρονοπρογραμματισμού που χρησιμοποιήσαμε μας ενθαρρύνει στην εφαρμογή παρόμοιων αλγορίθμων και σε άλλες εφαρμογές. Η χρυσή τομή μεταξύ της εξοικονόμησης ενέργειας και των χρονικών καθυστερήσεων για τις διάφορες εφαρμογές μπορεί να βρεθεί ευκολότερα για τις εφαρμογές που είναι σχετικά ελαστικές ως προς τις καθυστερήσεις και η κίνηση τους δεν είναι bursty. Τέτοιοι αλγόριθμοι θα ήταν πολύ χρήσιμοι για την περίπτωση μετάδοσης data, προερχόμενων από εφαρμογές όπως το www, το ftp και το mail. Από την άλλη η μελέτη τέτοιων αλγορίθμων για real time εφαρμογές - όπως telephony (VoIP), video conference και multiplayer games - αποτελεί σίγουρα μία πρόκληση αλλά είναι δύσκολη η υλοποίηση τους λόγω της ευαισθησίας των εφαρμογών στις καθυστερήσεις.

Στη συγκεκριμένη εργασία είδαμε το trade-off μεταξύ της εξοικονόμησης ενέργειας και της χωρητικότητας στον Αλγόριθμο II. Υπάρχει ωστόσο μία αλλαγή που θα μπορούσε να γίνει στον Αλγόριθμο II και να βελτιώσει τη χωρητικότητά του. Εφόσον το AP ξέρει ότι σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές (κάθε 40 ή 20 msec) περιμένει φρέσκα πακέτα από τις εφαρμογές μπορεί να κρατήσει σε Awake mode όλους ή έστω μερικούς από τους σταθμούς που θα λάβουν νέα πακέτα κατά τη διάρκεια ενός CFP, αν υπολογίσει ότι θα μπορέσουν να μεταδοθούν μερικά από τα φρέσκα MSDUs πριν τελειώσει το CFP. Η αλλαγή αυτή μας οδηγεί ουσιαστικά σε έναν τρίτο αλγόριθμο, ο οποίος βελτιώνει τη χωρητικότητα του συστήματος αλλά αυξάνει τη συνολική καταναλισκόμενη ενέργεια.

9.2.2 Ως προς τα Είδη Ασύρματων Δικτύων

Οι τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας που μπορούν να εφαρμοστούν με επιτυχία σε κάποιο δίκτυο εξαρτώνται προφανώς από την ίδια τη φύση του δικτύου. Όπως προείπαμε, οι τεχνικές αυτές ξεκινούν από το επίπεδο υλικού και κυκλωμάτων και καταλήγουν στους αλγορίθμους δρομολόγησης του δικτύου. Στα Wireless LANs (IEEE802.11, HIPERLAN) μας ενδιαφέρει ένα ευρύ φάσμα υπηρεσιών, που αφορά data, speech και multimedia. Το low-power low-cost Bluetooth πάλι σχεδιάστηκε αρχικά για να εξυπηρετεί μόνο data. Τα κυψελωτά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας (Cellular Personal Networks) ξεκίνησαν επικεντρωμένα στην υπηρεσία της τηλεφωνίας αλλά στην πορεία επεκτάθηκαν και προς τα data και multimedia. Τα Ad-Hoc ασύρματα δίκτυα στοχεύουν στη μετάδοση data μεταξύ των κόμβων του δικτύου. Όμοια, τα Sensor Networks αποσκοπούν στη μετάδοση μικρών ποσοτήτων πληροφορίας (data) μεταξύ των αισθητηρίων. Τέλος, τα δορυφορικά δίκτυα (Satellite Networks) εξυπηρετούν αρκετές τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές μεταφέροντας σημαντικό όγκο πληροφορίας μεταξύ απομακρυσμένων σημείων του πλανήτη.

Τεχνικές χρονοπρογραμματισμού θα πρόσφεραν πολλά στα Wireless LANs, στο Bluetooth και στα Cellular Personal Networks. Στα Ad-Hoc και στα Sensor Networks η απόδοση θα βελτιωνόταν πολύ αν το βάρος ριχνόταν στους αλγορίθμους δρομολόγησης. Σε όλα όμως τα δίκτυα, και ειδικά στα Sensor Networks και στα Satellite Networks που είναι αυτόνομα μετά την εγκατάστασή τους, η συνολική κατανάλωση ενέργειας εξαρτάται πολύ από τις ίδιες τις συσκευές (σε επίπεδο S/W και κυρίως H/W). Επίσης σε όλα τα δίκτυα η επιλογή του κατάλληλου σχήματος διαμόρφωσης και κωδικοποίησης, καθώς και της κεραίας – RF τμήματος του πομποδέκτη μπορεί να προσφέρει πολλά στην κατεύθυνση μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας. Τα τελευταία πρέπει να επιλέγονται προσεκτικά, αναλόγως με το περιβάλλον στο οποίο λειτουργεί το κάθε δίκτυο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. J. Kurose, K. Ross, "Computer Networking: A Top-Down Approach Featuring the Internet", 2nd Edition, Addison – Wesley, 2002.
2. B. Furht, S. Q. Smolliar, H. J. Zhang, "Video and Image Processing in Multimedia Systems", 2nd Edition, Kluwer Academic Publishers, 1996
3. J. Zyren, A. Petrick, "Tutorial on Basic Link Budget Analysis", Intersil, Application Note AN 9804.1, June 1998.
4. J. Proakis, "Digital Communications", 4th Edition, McGraw-Hill, 2001.
5. J.-P. Ebert, A. Willig, "A Gilbert-Elliott Bit Error Model and the Efficient Use in Packet Level Simulation", TKN Technical Report TKN-99-002, March 1999.
6. H. S. Wang, N. Moayeri, "Finite-State Markov Channel – A Useful Model for Radio Communication Channels", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 44, No. 1, February 1995.
7. M. Abdel-Hafez, F. Alagoz, "Wireless Networks in United Arab Emirates University Students' Life, Testbed Development", United Arab Emirates University, 2002.
8. J. R. Lorch, A. J. Smith, "Software Strategies for Portable Computer Energy Management", IEEE Personal Communications, Vol. 5, No. 3, June 1998.
9. L. E. Larson, "Radio Frequency Integrated Circuit Technology for Low-Power Wireless Communications", IEEE Personal Communications, Vol. 5, No. 3, June 1998.
10. A. Ephremides, "Energy Concerns in Wireless Networks", IEEE Wireless Communications, Vol. 9, No. 4, August 2002.
11. E. Biglieri, G. Caire, G. Taricco, "Coding and Modulation under Power Constraints", IEEE Personal Communications, Vol. 5, No. 3, June 1998.
12. S. Verdu, "Recent Results on the Capacity of Wideband Channels in the Low-Power Regime", IEEE Wireless Communications, Vol. 9, No. 4, August 2002.
13. H. Woesner, J.-P. Ebert, M. Schläger, A. Wolisz, "Power-Saving Mechanisms in Emerging Standards for Wireless LANs: The MAC Level Perspective", IEEE Personal Communications, Vol. 5, No. 3, June 1998.
14. G. Anastasi, M. Conti, E. Gregori, A. Passarella, "A Power Saving Architecture for Web Access from Mobile Computers", in Proceedings of the 2nd International IFIP-TC6 Networking Conference – Networking 2002, Pisa, Italy, May 2002, published by Springer LNCS 2345.
15. A. J. Goldsmith, S. B. Wicker, "Design Challenges for Energy-Constrained Ad Hoc Wireless Networks", IEEE Wireless Communications, Vol. 9, No. 4, August 2002.
16. W. Stark, H. Wang, A. Worthen, S. Lafortune, D. Teneketzis, "Low-Energy Wireless Communication Network Design", IEEE Wireless Communications, Vol. 9, No. 4, August 2002.
17. R. Min, M. Bhardwaj, S.-H. Cho, N. Ickes, E. Shih, A. Sinha, A. Wang, A. Chandrakasan, "Energy-Centric Enabling Technologies for Wireless Sensor Networks", IEEE Wireless Communications, Vol. 9, No. 4, August 2002.

18. ANSI/IEEE Standard 802.11, “Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications” and Extensions, 1999 Edition.
19. C. Andren, M. Webster, “CCK Modulation Delivers 11 Mbps for High Rate IEEE802.11 Extension”, Wireless Symposium/ Portable by Design, San Jose, Ca., Spring 1999.
20. C. Andren, K. Halford, M. Webster, “CCK, the new IEEE802.11 Standard for 2.4 GHz Wireless LANs”, International IC – Taipei, Conference Proceedings, 1999.
21. J. Fakatselis, “Performance Considerations for Wireless Systems at 2.4 GHz”, International IC – Taipei, Conference Proceedings, 1999.
22. “Cisco Aironet 350 Series Client Adapters, Datasheet”, Cisco Systems, Inc., 2002.
23. B. P. Crow, I. Widjaja, J. G. Kim, P. T. Sakai, “IEEE 802.11 Wireless Local Area Networks”, IEEE Communications Magazine, September 1997.
24. Bay Area Wireless Users Group: www.bawug.org.
25. R. Cáceres, V. N. Padmanabhan, “Fast and Scalable Wireless Handoffs in Support of Mobile Internet Audio”, Mobile Networks and Applications, Volume 3, Issue 4, January 1998, Kluwer Academic Publishers.
26. A. M. Law, W. D. Kelton, “Simulation Modeling and Analysis”, 2nd Edition, McGraw-Hill Inc., 1991.
27. Mpeg4 and H.263 Video Traces for Network Performance Evaluation: <http://www-tkn.ee.tu-berlin.de/research/trace/trace.html>.