

**Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης**  
**Σχολή Τεχνολογικών εφαρμογών**  
*Τμήμα Εφαρμοσμένης Πληροφορικής & Πολυμέσων*



**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Ασύρματα δίκτυα υπολογιστών που κάνουν χρήση του  
πρωτοκόλλου IEEE 802.11

**Σωτήριος Λεβέντης**

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Ευάγγελος Πάλλης

**Ηράκλειο Οκτώβριος 2006**

## **Ευχαριστίες**

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες στον υπεύθυνο και επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας Καθηγητή Δρ. Ευάγγελο Πάλλη του τμήματος Εφαρμοσμένης Πληροφορικής και πολυμέσων του ΑΤΕΙ Κρήτης και συνεργαζόμενο ερευνητή του Ινστιτούτου Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών στο ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος και επιστημονικό συνεργάτη του Κέντρου Τεχνολογικής Έρευνας στο Ηράκλειο, τόσο για την διάθεση του και το ενδιαφέρον του όσο και για την ουσιαστική βοήθεια που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, με την επίβλεψη και την υποστήριξη του κατά το σχεδιασμό και την διεξαγωγή των πειραματικών μετρήσεων και προσομοιώσεων που ολοκληρώνουν αυτή την εργασία, καθώς και για την συνεχή καθοδήγηση και ενθάρρυνσή του μέχρι την περάτωσή της.

Ευχαριστήσω, επίσης, το προσωπικό του εργαστηρίου Έρευνας και Ανάπτυξης Τηλεπικοινωνιακών Συστημάτων του τμήματος Εφαρμοσμένης Πληροφορικής και Πολυμέσων του ΑΤΕΙ Κρήτης, για την παραχώρηση του απαραίτητου (για την ολοκλήρωση της εργασίας αυτής) εξοπλισμού και λογισμικού, καθώς και για την διαρκή ανταλλαγή επικοινωνητικών γνώσεων.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στους γονείς μου για την αμέριστη ηθική και οικονομική συμπαράσταση που μου πρόσφεραν κατά την διάρκεια της φοίτησής μου στο ΑΤΕΙ Κρήτης .

## Περιεχόμενα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....	1
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ .....	3
ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ .....	5
ΛΙΣΤΑ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ .....	6
ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	9
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 .....</b>	<b>11</b>
ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΤΟΠΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ .....	11
1.1 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ .....	12
1.2 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ .....	12
1.3 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ .....	13
1.3.1 Παρεμβολή λόγω πολλαπλών διαδρομών .....	13
1.3.2 Path loss .....	14
1.3.3 Παρεμβολές ραδιοσημάτων .....	14
1.3.4 Διαχείριση ενέργειας .....	15
1.3.5 Ασυμβατότητα συστημάτων .....	15
1.3.6 Ασφάλεια δικτύου .....	15
1.3.7 Προστασία της υγείας των χρηστών .....	16
1.3.8 Το πρόβλημα του κρυμμένου κόμβου .....	16
1.4 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ WLAN .....	17
1.4.1 IEEE 802.11 .....	17
1.4.2 HiperLAN .....	17
1.4.3 OpenAir .....	18
1.4.4 HomeRF SWAP .....	18
1.4.5 Bluetooth .....	18
1.5 ΔΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΝΟΣ WLAN .....	18
1.5.1 Συσκευές χρηστών (End-user devices) .....	18
1.5.2 Λογισμικό δικτύου (Network Software) .....	19
1.5.3 Ασύρματες κάρτες δικτύου (Wireless NICs) .....	19
1.5.4 Ασύρματες Τοπικές Γέφυρες (Wireless Local Bridges) .....	19
1.5.5 Κεραίες (Antennas) .....	20
1.5.5.1 Πολυκατευθυντικές κεραίες .....	20
1.5.5.2 Μονοκατευθυντικές κεραίες .....	21
1.6 ΑΛΛΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ .....	22
1.6.1 Ασύρματα Point-to-Point δίκτυα .....	22
1.6.2 Ασύρματα Point-to-Multipoint δίκτυα .....	23
1.6.3 Η τεχνολογία LMDS .....	24
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 .....</b>	<b>28</b>
ΤΟ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ IEEE 802.11 .....	28
2.1 Η ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ ΤΟΥ 802.11 .....	29
2.1.1 BSS .....	29
2.1.2 IBSS .....	29
2.1.3 ESS .....	30
2.2 Η ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΟΥ 802.11 .....	31
2.2.1 Το υποστρώμα MAC του 802.11 .....	32
2.2.2 Τα φυσικά επίπεδα του 802.11 .....	32
2.2.3 Υπηρεσίες του 802.11 .....	32
2.2.3.1 Station Services .....	32
2.2.3.2 Distribution System Services .....	33
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 .....</b>	<b>35</b>
ΤΟ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑ MAC ΤΟΥ IEEE 802.11 .....	35
3.1 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΤΟΥ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ MAC .....	35
3.2 ΠΡΟΣΒΑΣΗ ΣΤΟ ΑΣΥΡΜΑΤΟ ΜΕΣΟ .....	35
3.3 ΧΡΟΝΙΚΑ ΔΙΑΣΤΗΜΑΤΑ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ .....	36
3.4 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ DCF .....	37
3.4.1 Μηχανισμός ανίχνευσης φέροντος .....	37
3.4.2 Λειτουργία του DCF με τη μέθοδο CSMA/CA .....	38
3.4.3 Διαδικασία επαλήθευσης από το υποστρώμα MAC .....	39
3.4.4 Διαδικασία υποχώρησης .....	40
3.4.5 Λειτουργία του DCF με την χρήση RTS/CTS .....	42

3.5 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ PCF.....	43
3.6 ΔΟΜΗ ΤΟΥ MAC ΠΛΑΙΣΙΟΥ.....	45
3.6.1 Κατηγορίες πλαισίων.....	45
3.6.2 Η τεχνική του τεμαχισμού.....	46
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....</b>	<b>48</b>
<b>ΤΟ ΦΥΣΙΚΟ ΣΤΡΩΜΑ ΤΟΥ 802.11.....</b>	<b>48</b>
4.1 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ.....	48
4.2 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΤΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ( <i>Physical Layer Operations</i> ).....	49
4.2.1 Ανίχνευση φέροντος.....	49
4.2.2 Λειτουργία μετάδοσης.....	49
4.2.3 Λειτουργία λήψης.....	49
4.3 ΤΟ ΦΥΣΙΚΟ ΣΤΡΩΜΑ ΤΟΥ 802.11 ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΤΟΥ SPREAD SPECTRUM.....	50
4.3.1 Το υποστρώμα PMD FHSS.....	50
4.3.1.1 Η λειτουργία της μεταπήδησης συχνότητας.....	51
4.3.1.2 Η λειτουργία διαμόρφωσης συχνότητας FHSS.....	51
4.3.2 Το υποστρώμα PMD DSSS.....	53
4.3.2.1 Η λειτουργία του DSSS.....	53
4.3.2.2 Η λειτουργία διαμόρφωσης συχνότητας DSSS.....	54
4.4 ΤΟ ΦΥΣΙΚΟ ΣΤΡΩΜΑ ΤΟΥ 802.11 ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΥΠΕΡΥΘΡΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ( <i>Infrared-IR</i> ).....	55
4.4.1 Το υποστρώμα IR PMD.....	55
4.4.2 Η λειτουργία διαμόρφωσης PPM.....	56
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....</b>	<b>58</b>
<b>ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΝΟΣ ΑΣΥΡΜΑΤΟΥ AD-HOC ΔΙΚΤΥΟΥ ΠΟΥ ΚΑΝΕΙ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ IEEE 802.11.....</b>	<b>58</b>
5.1 Ανάλυση του μοντέλου προσομοίωσης.....	58
5.2 Παράμετροι που μοντελοποιήθηκαν κατά την προσομοίωση.....	59
5.2.1 Αίτηση αρχείου (File Request).....	59
5.2.2 Ομάδα χρηστών του ασύρματου δικτύου (Group of wireless users).....	60
5.2.3 Ασύρματο Τοπικό Δίκτυο (Wireless LAN).....	60
5.2.4 Παροχέας Υπηρεσίας (Multimedia Server).....	62
5.2.5 Απάντηση του Server στις αιτήσεις των χρηστών (Server Reply).....	62
5.3 Προσομοίωση χωρίς μοντελοποίηση λαθών.....	62
5.3.1 Σενάριο Πρώτο.....	62
5.3.2 Σενάριο Δεύτερο.....	66
5.3.3 Σενάριο Τρίτο.....	69
5.3.4 Σενάριο Τέταρτο.....	72
5.3.5 Σενάριο Πέμπτο.....	75
5.4 Προσομοίωση με μοντελοποίηση των λαθών.....	78
5.4.1 Πρώτο Σενάριο.....	79
5.4.2 Σενάριο Δεύτερο.....	83
5.4.3 Σενάριο Τρίτο.....	87
5.5 Συμπεράσματα.....	90
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>93</b>
Αναφορές.....	93
Σχετική Βιβλιογραφία.....	93
Δικτυακές πηγές.....	94

## Λίστα Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Το 802.11 καθορίζει τη λειτουργία των WLAN μέσω των επιπέδων MAC και PHY. ...	28
Σχήμα 2.2: Σχηματική αναπαράσταση δύο BSS. ....	29
Σχήμα 2.3: Ένα ad-hoc δίκτυο. ....	30
Σχήμα 2.4: Η σύνδεση των BSSs με το DS γίνεται με την βοήθεια των AP. ....	30
Σχήμα 2.5: Διασύνδεση ενός ασύρματου δικτύου με 3 BSSs. ....	31
Σχήμα 3.1: Η αρχιτεκτονική του επιπέδου MAC του 802.11. ....	35
Σχήμα 3.2: Τα 3 κυριότερα IFS που χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό των διάφορων πλαισίων που μετακινούνται μέσα στο 802.11 δίκτυο. ....	36
Σχήμα 3.3: Σχηματική αναπαράσταση του βασικού μηχανισμού πρόσβασης DCF. ....	38
Σχήμα 3.4: Διάγραμμα ροής της λειτουργίας DCF σύμφωνα με τον αλγόριθμο CSMA/CA. ....	39
Σχήμα 3.5: Σχηματική αναπαράσταση της τεχνικής της θετικής επαλήθευσης. ....	40
Σχήμα 3.6: Η διαδικασία της υποχώρησης στην περίπτωση που 5 σταθμοί θέλουν να μεταδώσουν. Ο Α έχει μεταδώσει επιτυχώς το πλαίσιο του και αρχικοποιεί το CW. Ο Β μετά από ένα DIFS ανιχνεύει το μέσο ελεύθερο αλλά δεν μεταδίδει καθώς ο μετρητής υποχώρησης δεν έχει φτάσει στο 0 (κάτι που συμβαίνει με τον C). ....	41
Σχήμα 3.7: Η εκθετική αύξηση του CW μετά από ανεπιτυχείς μεταδόσεις. ....	42
Σχήμα 3.8: Λειτουργία DCF με αποστολή και λήψη πακέτων RTS και CTS. ....	43
Σχήμα 3.9: Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας του PCF, όπου το $D_i$ αναπαριστά το polling του σταθμού $i$ και το $U_i$ αναπαριστά την μετάδοση δεδομένων από τον σταθμό $i$ . ....	44
Σχήμα 3.10: Μετά το polling του σταθμού 3 (ο οποίος δεν έχει πακέτα προς μετάδοση) σειρά έχει ο σταθμός 4, ο οποίος μεταδίδει τα δεδομένα που θέλει ( $U_4$ ). Το πακέτο $CF_{end}$ που αποστέλλεται από τον PC δηλώνει το τέλος της CFP. ....	44
Σχήμα 3.11: Διαδοχική λειτουργία των μεθόδων PCF και DCF. ....	45
Σχήμα 3.12: Η γενική δομή ενός MAC πλαισίου. ....	45
Σχήμα 3.13: Τεμαχισμός ενός MSDU σε μικρότερα πακέτα. ....	46
Σχήμα 3.14: Διαδικασία αποστολής ενός πλαισίου με την μέθοδο του τεμαχισμού. ....	47
Σχήμα 4.1: Η αρχιτεκτονική του υποστρώματος MAC και του φυσικού στρώματος όπως αυτή καθορίζεται από το 802.11. ....	48
Σχήμα 4.2: Η εξάπλωση του σήματος στην περιοχή των συχνοτήτων με τη χρήση της τεχνικής Spread Spectrum. ....	50
Σχήμα 4.3: Ακολουθία μεταπήδησης συχνότητας σε συνάρτηση με το χρόνο. ....	51
Σχήμα 4.4: Η διαμόρφωση GFSK χρησιμοποιεί 2 δυνατές συχνότητες για κάθε hop ώστε να δηλώνει αν ένα bit δεδομένων είναι 1 ή 0. ....	52
Σχήμα 4.5: Σχηματική αναπαράσταση ενός DSSS πομπού. ....	53
Σχήμα 4.6: Αναπαράσταση ενός bit από μια ακολουθία θετικών και αρνητικών μονάδων (1). ....	54
Σχήμα 4.7: Μετάδοση δεδομένων με χρήση της τεχνικής DBPSK. ....	55
Σχήμα 4.8: Η μετάδοση των σημάτων με χρήση υπέρυθρης ακτινοβολίας γίνεται μέσω ανακλάσεων στην οροφή του χώρου στον οποίο είναι εγκατεστημένο το ασύρματο δίκτυο. ....	56
Σχήμα 4.9: Κάνοντας χρήση της διαμόρφωσης 4-PPM, η σειρά δεδομένων 1011 θα μεταδοθεί αρχικά με τον 'παλμό' (1000) ο οποίος αντιστοιχεί στην ομάδα bits (11) και στη συνέχεια με τον 'παλμό' (0100) που αντιστοιχεί στην ομάδα bits (10). ....	57
Σχήμα 5.1: Το σχηματικό μοντέλο του προγράμματος, που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του ad-hoc δικτύου. ....	58

## Λίστα Συντομογραφιών

**ACK** - Acknowledgement  
**AP** - Access Point  
**ATM** - Asynchronous Transfer Mode  
**BBS** - Basic Service Set  
**BPSK** - Binary Phase Shift Keying  
**BS** - Base Station  
**CCA** - Clear Channel Assessment  
**CDMA** - Code Division Multiple Access  
**CFP** - Contention Free Period  
**CMN** - Central Main Node  
**CRC** - Cyclic Redundancy Code  
**CSMA/CA** - Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance  
**CTS** - Clear to Send  
**CW** - Contention Window  
**dB** - decibel  
**DBPSK** - Differential Binary Phase Shift Keying  
**DCF** - Distributed Coordination Function  
**DECT** - Digital Enhance Cordless Telecommunication  
**DIFS** - DCF InterFrame Space  
**DQPSK** - Differential Quadrature Phase Shift Keying  
**DS** - Distributed System  
**DSM** - Distributed System Medium  
**DSSS** - Direct Sequence Spread Spectrum  
**ED** - Energy Detection  
**EIFS** - Extended InterFrame Space  
**ESS** - Extended Service Set  
**ETSI** - European Telecommunications Standards Institute  
**FCC** - Federal Communications Commission  
**FCS** - Frame Check Sequence  
**FDD** - Frequency Division Multiplexing  
**FDMA** - Frequency Division Multiple Access  
**FH** - Frequency Hopping  
**FHSS** - Frequency Hopping Spread Spectrum  
**FSK** - Frequency Shift Keying  
**FSK** - Frequency Shift Keying  
**GFSK** - Gaussian FSK  
**IBSS** - Independent BSS  
**IEEE** - Institute of Electrical and Electronic Engineers  
**IFS** - Inter Frame Space  
**IP** - Internet Protocol

**IR** - Infra Red  
**ISA** - Industry Standard Architecture  
**ISM** - Instrumentation, Scientific, and Medical  
**LLC** - Logical Link Control  
**LMDS** - Local Multipoint Distribution Service  
**LOS** - Line of Sight  
**MAC** - Medium Access Control  
**MB** - Mega Byte  
**Mbps** - Mega bits per second  
**MMDS** - Multichannel Multipoint Distribution Service  
**MMPDU** – MAC Management Protocol Data Unit  
**MSDU** - MAC Service Data Unit  
**NAV** - Network Allocation Vector  
**NDIS** - Network Driver Interface Specification  
**NOS** - Network Operating System  
**ODI** - Open Datalink Interface  
**OFDM** - Orthogonal Frequency Division Multiplexing  
**OSI** - Open Systems Interconnect  
**PAR** - Project Authorization Request  
**PCF** - Point Coordination Function  
**PCMCIA** - Personal Computer Memory Card International Association  
**PDA** - Personal Digital Assistant  
**PDS** - Packet Driver Specification  
**PHY** - Physical layer  
**PIFS** - PCF InterFrame Space  
**PLCP** - Physical Layer Convergence Procedure  
**PLM** - Physical Layer Management  
**PMD** - Physical Medium Dependent  
**PN** - Pseudo-Noise  
**PPDU** - PLCP Protocol Data Unit  
**PPM** - Pulse Position Modulation  
**PSK** - Phase Shift Keying  
**RF** - Radio Frequency  
**RSI** - Radio Signal Interference  
**RTS** - Request to Send  
**SA** - Station Adapter  
**SAP** - Service Access Point  
**SIFS** - Short InterFrame Space  
**SNR** - Signal to Noise ratio  
**STA** - Station  
**SWAP** - Shared Wireless Access Protocol

**TDD** - Time Division Multiplexing

**TDMA** - Time Division Multiple Access

**TDMA** - Time Division Multiple Access

**WEP** - Wired Equivalent Privacy

**WLAN** - Wireless Local Area Network

**WLL** - Wireless Local Loop

**WM** - Wireless Medium

**WMAN** - Wireless Metropolitan Area Network

**WPAN** - Wireless Personal Area Network

**WWAN** - Wireless Wide Area Network



## **ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Η ραγδαία εξάπλωση του παγκόσμιου διαδικτύου (Internet) και των πολυμεσικών εφαρμογών που στηρίζονται σε αυτό, καθώς και η συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις των χρηστών για αδιάλειπτη πρόσβαση σε τέτοιες υπηρεσίες/εφαρμογές, από οποιοδήποτε σημείο και οποιαδήποτε ώρα της ημέρας αποτέλεσαν τους βασικούς παράγοντες δημιουργίας των *ασύρματων δικτύων υπολογιστών*. Τα ασύρματα δίκτυα υπολογιστών, όπως και τα κλασικά ενσύρματα δίκτυα, απαιτούν την χρήση αξιόπιστων πρωτοκόλλων μεταφοράς δεδομένων, τα οποία θα εξασφαλίζουν την ασφαλή μετάδοση των δεδομένων (data) μεταξύ των χρηστών (error-free transmission/reception), θα παρέχουν ασφάλεια από οποιαδήποτε ενέργεια παραβίασης (security), θα δίνουν την δυνατότητα ταχείας πρόσβασης και μεταφοράς δεδομένων (broadband access), και τέλος θα επιτρέπουν την διασύνδεση των ασύρματων δικτύων με αυτά που κάνουν χρήση ενσύρματων τεχνολογιών (interoperability and technology convergence).

Αυτή η διπλωματική εργασία μελετά τις βασικές αρχές λειτουργίας των ασύρματων δικτύων υπολογιστών, εξετάζει τις κυριότερες τεχνικές υλοποίησής τους, περιγράφει τα βασικότερα πρωτόκολλα επικοινωνίας, και αναλύει σε βάθος το πρότυπο IEEE 802.11, το οποίο βρίσκει σήμερα ευρεία εμπορική και τεχνολογική εφαρμογή σε ασύρματα τοπικά δίκτυα υπολογιστών (*Wireless Local Area Network – WLAN*).

Σε αυτά τα πλαίσια, η δομή της διπλωματικής εργασίας είναι η ακόλουθη:

**Το κεφάλαιο 1** παρουσιάζει τις βασικές αρχές λειτουργίας των ασύρματων δικτύων, και αναλύει τα κύρια χαρακτηριστικά των πιο σημαντικών τεχνολογιών και πρωτοκόλλων που χρησιμοποιούνται σήμερα για την υλοποίησή τους. Παρουσιάζει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα κάθε μιας από αυτές τις τεχνολογίες σε σχέση με τον ωφέλιμο ρυθμό μετάδοσης, την ακτίνα κάλυψης, την χωρητικότητα και τις συνθήκες πρόσβασης, και κάνει αναφορά στους τρόπους υλοποίησης και τα βασικά δομικά στοιχεία αυτών των τεχνολογιών.

**Το κεφάλαιο 2** παρουσιάζει το πρότυπο IEEE 802.11, και περιγράφει τις αρχιτεκτονικές υλοποίησης ασύρματων δικτύων υπολογιστών που κάνουν χρήση αυτού του πρωτοκόλλου επικοινωνίας.

**Το κεφάλαιο 3** αναλύει σε βάθος το υπόστρωμα πρόσβασης (MAC) του IEEE 802.11, και αναλύει τον μηχανισμό πολλαπλής πρόσβασης (multiple access mechanism) που χρησιμοποιείται.

**Το κεφάλαιο 4** παρουσιάζει αναλυτικά το Φυσικό Επίπεδο του πρωτοκόλλου IEEE 802.11, παρουσιάζοντας τις τεχνικές διάχυτου φάσματος (Spread Spectrum) με μεταπήδηση συχνότητας (Frequency Hopping) και άμεσης ακολουθίας (Direct Sequence). Τέλος παρουσιάζει τις τεχνικές μετάδοσης δεδομένων από δίκτυα που βασίζονται στο IEEE 802.11 με χρήση υπέρυθρης ακτινοβολίας.

Στηριζόμενο στις βασικές αρχές λειτουργίας του IEEE 802.11 και στις αρχιτεκτονικές υλοποίησής τέτοιων ασύρματων τοπικών δικτύων υπολογιστών, **το κεφάλαιο 5** παρουσιάζει μια σειρά πειραμάτων εξομοίωσης, που σχεδιάστηκαν και έγιναν με στόχο την αξιολόγηση της αποδοτικότητας του πρωτοκόλλου IEEE 802.11, ιδιαίτερα σε συνθήκες πολλαπλής πρόσβασης χρηστών. Αναλυτικότερα, εξετάζονται οι παράμετροι του πρωτοκόλλου IEEE 802.11 που χρησιμοποιούνται στο PHY και στο MAC, και πώς αυτοί επηρεάζουν την ταχύτητα μετάδοσης και την δίκαιη κατανομή των δικτυακών πόρων μεταξύ των χρηστών του δικτύου. Στα πειράματα αυτά γίνεται χρήση του πρωτοκόλλου μεταφοράς IP (Internet Protocol) για την

μεταφορά δεδομένων τόσο πάνω από το TCP όσο και από το UDP πρωτόκολλο μετάδοσης.

**Τέλος το κεφάλαιο 5** συνοψίζει αυτή την διπλωματική, αξιολογώντας τα αποτελέσματα των εργαστηριακών μετρήσεων/εξομοιώσεων.

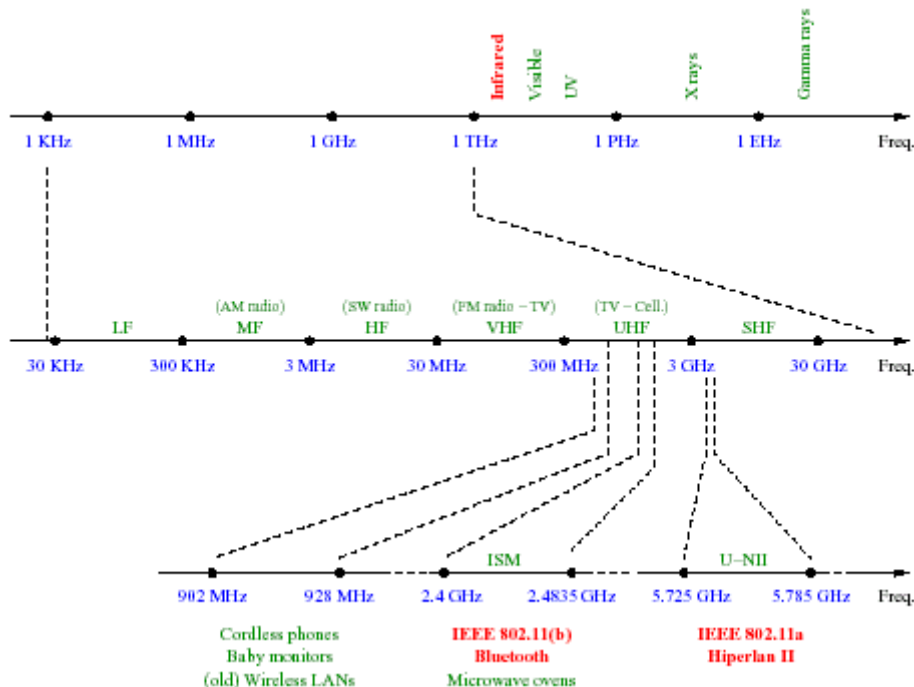
# **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1**

## **ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΤΟΠΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ**

Ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο (**WLAN**: Wireless Local Area Network) είναι ένα σύστημα επικοινωνίας, το οποίο καθιστά δυνατή την διασύνδεση (και μεταφορά δεδομένων) - μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων - κινητών ή ακίνητων χρηστών. Η συνηθισμένη ακτίνα δράσης ενός τέτοιου δικτύου εκτείνεται σε αρκετά μέτρα, η οποία είναι ικανή να διασυνδέσει από τους ορόφους μιας εταιρίας μέχρι τα κτίρια μιας πανεπιστημιούπολης. Όπως θα δούμε στη συνέχεια η σύνδεση ενός ασύρματου τοπικού δικτύου με ένα αντίστοιχο ενσύρματο μπορεί να αυξήσει σημαντικά την ακτίνα δράσης του ασύρματου δικτύου.

Η πρώτη προσπάθεια για τη σύνδεση των τεχνολογιών δικτύου με την επικοινωνία μέσω ραδιοκυμάτων ξεκίνησε το 1971 με την υλοποίηση ενός project του πανεπιστήμιου της Hawaii, το οποίο ονομάστηκε ALOHANET. Το ALOHANET ήταν ένα σύστημα όπου απομακρυσμένοι υπολογιστές επικοινωνούσαν μεταξύ τους μέσω ενός κεντρικού υπολογιστή χωρίς την χρησιμοποίηση των συμβατικών τηλεφωνικών καλωδίων, αλλά με τη βοήθεια ραδιοκυμάτων.

Το 1985, στην Αμερική, ο οργανισμός **FCC** (Federal Communications Commission) – ο οποίος καθορίζει το εύρος συχνοτήτων που θα χρησιμοποιείται για κάθε τηλεπικοινωνιακή εφαρμογή - εξουσιοδότησε την κοινή χρήση του φάσματος συχνοτήτων **ISM** (Instrumentation, Scientific, and Medical) στο οποίο στηρίχθηκε η μελλοντική κατασκευή όλων των τεχνολογιών WLAN.



**Σχήμα 1.1: Οι συχνότητες λειτουργίας των WLAN ξεκινάνε λίγο μετά τις συχνότητες λειτουργίας των κινητών τηλεφώνων και κυμαίνονται από 902MHz έως 5.85GHz.**

Για την κατασκευή ενός WLAN σε μία χώρα, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η νόμιμη χρήση των συχνοτήτων αυτών από τους αντίστοιχους οργανισμούς της συγκεκριμένης χώρας.

Στα τέλη του 1980, το IEEE ξεκίνησε την ανάπτυξη του πρώτου Standard για WLANs, το οποίο ολοκληρώθηκε τελικά το 1977 και είναι γνωστό ως IEEE 802.11. Όπως θα δούμε παρακάτω, την προσπάθεια αυτή ακολούθησαν και άλλοι οργανισμοί ώστε να επιτύχουν την καλύτερη δυνατή απόδοση των ασύρματων τοπικών δικτύων.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου, αναλύουμε περισσότερο διεξοδικά τα κυριότερα θέματα που σχετίζονται με τα WLAN.

## 1.1 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

Μερικά από τα κυριότερα πλεονεκτήματα των ασύρματων τοπικών δικτύων είναι τα εξής:

**Κινητικότητα (mobility):** Τα WLAN μπορούν να παρέχουν τη δυνατότητα στους χρήστες για πρόσβαση σε πληροφορίες ενώ βρίσκονται σε κίνηση. Αυτή η ευχέρεια στην κίνηση υποστηρίζει την παραγωγικότητα και τις ευκαιρίες για εξυπηρέτηση οι οποίες δεν είναι δυνατές με ενσύρματα δίκτυα. Οι εφαρμογές που στηρίζονται στην κινητικότητα κατά τη χρήση συσκευών σε ένα WLAN συμπεριλαμβάνουν και αυτές που στηρίζονται στην πρόσβαση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο-τα οποία είναι συνήθως αποθηκευμένα σε βάσεις δεδομένων.

Μία τέτοια εφαρμογή συναντάμε στους αγώνες ταχύτητας. Τα αυτοκίνητα έχουν σύνθετα συστήματα επεξεργασίας που παρακολουθούν και ελέγχουν τα διάφορα όργανα που βρίσκονται στο αυτοκίνητο. Όταν το αυτοκίνητο περνάει μπροστά από τη βάση της ομάδας στα pit, οι πληροφορίες αυτές φορτώνονται στον κεντρικό υπολογιστή, καθιστώντας ικανή μια ανάλυση σε πραγματικό χρόνο της επίδοσης του αυτοκινήτου.

**Ταχύτητα και ευελιξία εγκατάστασης:** Η εγκατάσταση ενός WLAN εξαλείφει την ανάγκη της χρήσης των καλωδίων η οποία απαιτεί συνήθως κόπο και χρόνο, ενώ η ασύρματη τεχνολογία επιτρέπει τη διασύνδεση δικτύων η οποία υπό άλλες συνθήκες θα ήταν αδύνατη.

**Μειωμένο κόστος κτήσης:** Ενώ η αρχική επένδυση που απαιτείται για τον εξοπλισμό με ένα WLAN μπορεί σε μερικές περιπτώσεις να είναι υψηλότερη από το αντίστοιχο κόστος για μια ενσύρματη σύνδεση, το συνολικό κόστος λειτουργίας μπορεί να είναι σημαντικά χαμηλότερο, καθώς τα μακροπρόθεσμα κέρδη είναι πολύ μεγαλύτερα σε δυναμικά περιβάλλοντα όπου απαιτούνται πολύ συχνές μετακινήσεις και αλλαγές.

**Συμβατότητα:** Τα WLAN μπορούν να μεταβληθούν σε μια ποικιλία από τύπους για να ικανοποιήσουν τις ανάγκες συγκεκριμένων εγκαταστάσεων και εφαρμογών. Οι διαμορφώσεις αλλάζουν εύκολα και επεκτείνονται από μικρά δίκτυα κατάλληλα για έναν μικρό αριθμό χρηστών μέχρι πλήρως ανεπτυγμένα δίκτυα που καλύπτουν εκατοντάδες χρήστες.

## 1.2 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Ανάλογα με τους χώρους στους οποίους μπορούμε να δούμε οφέλη από τη χρήση των WLAN συμπεριλαμβάνονται και οι παρακάτω:

**Επιχειρήσεις:** Με ένα WLAN οι εργαζόμενοι μπορούν να εκμεταλλευθούν το κινητό δίκτυο για e-mail, πρόσβαση σε αρχεία και αναζήτηση στο Internet,

ανεξάρτητα από την περιοχή που βρίσκεται το γραφείο, αλλά και από το αν βρίσκονται στο γραφείο ή όχι.

**Εκπαίδευση:** Με τη χρήση WLAN από τα ακαδημαϊκά ινστιτούτα οι φοιτητές μπορούν να έχουν πρόσβαση μέσω laptops στο πανεπιστημιακό δίκτυο ενώ γίνεται πιο προσιτή και εφαρμόσιμη η τηλε-εκπαίδευση.

**Υγεία:** Με τη χρήση ασύρματων φορητών υπολογιστών για την επεξεργασία σε πραγματικό χρόνο, οι εργαζόμενοι στον τομέα υγείας αυξάνουν την παραγωγικότητά τους και την ποιότητα φροντίδας των ασθενών, καθώς εξαλείφονται προβλήματα όπως οι καθυστερήσεις και η γραφειοκρατία.

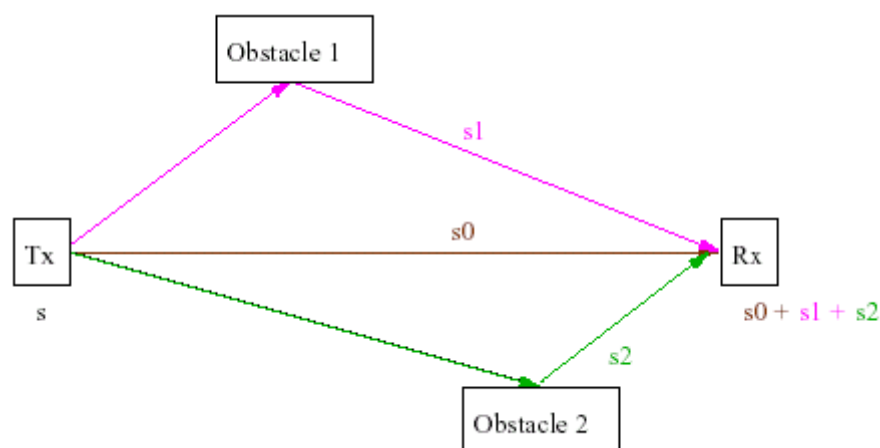
**Επενδύσεις:** Με ένα φορητό υπολογιστή ο οποίος συνδέεται με ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο, οι επενδυτές μπορούν να δεχθούν πληροφορίες για τις τιμές από μια βάση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, βελτιώνοντας έτσι την ταχύτητα και την ποιότητα των συναλλαγών.

### 1.3 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

Η χρήση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (ραδιοκυμάτων και υπέρυθρης ακτινοβολίας) για την μετάδοση των σημάτων κάνουν τα WLAN ευπαθή σε πολλά φαινόμενα παρεμβολής (**interference**) τα οποία αλλοιώνουν σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό την επικοινωνία των ασύρματων χρηστών. Τα κυριότερα από αυτά τα προβλήματα αναφέρονται στη συνέχεια.

#### 1.3.1 Παρεμβολή λόγω πολλαπλών διαδρομών

Όπως φαίνεται και στο επόμενο σχήμα τα μεταδιδόμενα σήματα μπορούν να συνδυαστούν με τα ανακλώμενα από διάφορες επιφάνειες ή εμπόδια με αποτέλεσμα την φθορά ή καταστροφή του σήματος που ανιχνεύεται από τον δέκτη. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως ‘παρεμβολή λόγω πολλαπλών διαδρομών’ ή ‘πολύοδη διάδοση’ (**multipath propagation**). Ο συνολικός χρόνος καθυστέρησης μεταξύ των ανακλώμενων σημάτων σε σχέση με το αρχικό σήμα (primary signal) αναφέρεται ως **delay spread**.



**Σχήμα 1.2:** Το φαινόμενο της ‘παρεμβολής λόγω πολλαπλών διαδρομών’ μπορεί να μειώσει αισθητά την ποιότητα του λαμβανόμενου σήματος στον δέκτη.

Οι κατασκευαστές συσκευών για ασύρματα τοπικά δίκτυα ασχολούνται συνεχώς με την επεξεργασία διαφόρων τεχνικών για τον περιορισμό των προβλημάτων που

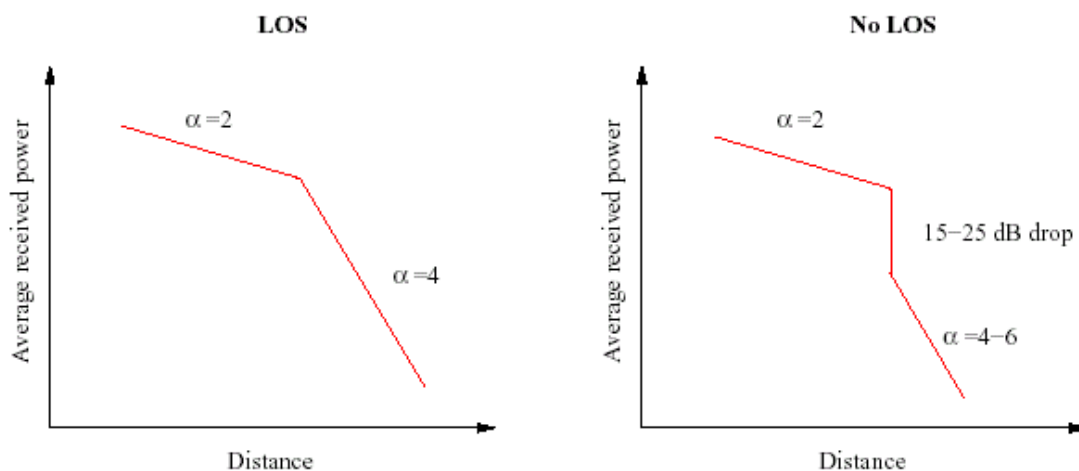
προέρχονται από το συγκεκριμένο φαινόμενο, ενώ ανάμεσα στις άλλες μεθόδους που χρησιμοποιούνται είναι και οι equalization και antenna diversity.

### 1.3.2 Path loss

Το φαινόμενο του ‘path loss’ μεταξύ πομπού και δέκτη είναι ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τον σχεδιασμό ενός WLAN. Τα αναμενόμενα επίπεδα του path loss, τα οποία βασίζονται στην απόσταση μεταξύ του πομπού και του δέκτη, παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες για τον καθορισμό των επιπέδων στην ισχύ της εκπομπής, στην ευαισθησία του δέκτη και στον λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR). Το πραγματικό path loss εξαρτάται από τη συχνότητα μετάδοσης και αυξάνει εκθετικά με την αύξηση της απόστασης μεταξύ του πομπού και του δέκτη. Για τυπικές εφαρμογές σε κλειστούς χώρους, το path loss αυξάνεται περίπου 20 dB ανά 100 πόδια.

Το path loss ισοδυναμεί, ουσιαστικά, με τον λόγο της ισχύος του δέκτη προς την ισχύ του πομπού. Για μία δεδομένη ισχύ μετάδοσης (από τον πομπό), ένα μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη του επιπέδου της ισχύος στον δέκτη. Το πιο απλό μοντέλο που χρησιμοποιείται, συνήθως, είναι αυτό που στηρίζεται στην εξής εκθετική σχέση: Η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος είναι ανάλογη με την ισχύ του μεταδιδόμενου σήματος και αντιστρόφως ανάλογη με το τετράγωνο της συχνότητας μετάδοσης και την απόσταση πομπού-δέκτη υψωμένη στην δύναμη ενός παράγοντα  $\alpha$ , ο οποίος κυμαίνεται ανάμεσα στις τιμές 2 (για ελεύθερους χώρους) και 8 (για χώρους με πολλά εμπόδια).

Οι απώλειες από το φαινόμενο αυτό εξαρτώνται άμεσα από την ύπαρξη ή μη οπτικής επαφής (LOS: Line Of Sight) ανάμεσα στον πομπό και στον δέκτη και αποδίδονται παραστατικά στο επόμενο σχήμα.



**Σχήμα 1.3: Η έλλειψη οπτικής επαφής μειώνει περισσότερο απότομα την ισχύ λήψης ενός ραδιοκύματος.**

### 1.3.3 Παρεμβολές ραδιοσημάτων

Η διαδικασία της εκπομπής και λήψης ραδιοσημάτων και σημάτων laser μέσω του αέρα καθιστά τα ασύρματα συστήματα ευπαθή από τον θόρυβο της ατμόσφαιρας και από τις μεταδόσεις άλλων συστημάτων που λειτουργούν στην ίδια μπάνα συχνότητων και λειτουργούν στον ίδιο φυσικό χώρο. Οι παρεμβολές από ραδιοσήματα (Radio Signal Interference) χωρίζονται σε:

1. Εσωτερικές (inward): Οι παρεμβολές αυτές προέρχονται από τις μεταδόσεις συστημάτων που χρησιμοποιούν τις ίδιες συχνότητες με αυτές ενός WLAN με το οποίο βρίσκονται στην ίδια περιοχή. Για παράδειγμα, πολλές συσκευές WLAN λειτουργούν στην περιοχή των 2.4 GHz, στην οποία λειτουργούν και οι φούρνοι μικροκυμάτων με αποτέλεσμα η μία συσκευή να παρεμβάλλεται στην άλλη, γεγονός που οδηγεί σε καθυστερήσεις και σφάλματα στην μετάδοση.

2. Εξωτερικές (outward): Οι παρεμβολές αυτού του είδους προκύπτουν όταν το σήμα ενός ασύρματου δικτύου διακόπτει την μετάδοση ενός άλλου γειτονικού ασύρματου συστήματος, όπως είναι ένα WLAN. Οι παρεμβολές αυτές είναι σπάνιες καθώς τα προϊόντα των WLAN λειτουργούν, συνήθως, με ιδιαίτερα χαμηλή ισχύ (της τάξεως των μερικών mW).

Ένα μέρος των παρεμβολών προκύπτει, ακριβώς, από το γεγονός ότι τα προϊόντα που αποτελούν ένα WLAN λειτουργούν σε συχνότητες που δεν απαιτούν άδεια από τον FCC. Η αποφυγή και η μείωση τέτοιων παρεμβολών εναπόκειται στους κατασκευαστές των ασύρματων προϊόντων.

### **1.3.4 Διαχείριση ενέργειας**

Οι περισσότερες WLAN συσκευές από την πλευρά του χρήστη λειτουργούν με μπαταρίες που έχουν καθορισμένη διάρκεια ζωής. Η χρήση τους σε αυτές τις τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές μειώνουν την αυτονομία τους. Έτσι οι περισσότεροι χρήστες δε θα ήταν ευχαριστημένοι αν ήταν υποχρεωμένοι να φορτίζουν συχνά τις μπαταρίες των συσκευών τους, ενώ υπάρχουν και περιπτώσεις που είναι σχεδόν αδύνατη η φόρτιση του υπολογιστή. Για τον λόγο αυτό θα πρέπει να γίνει επιλογή προϊόντων που να κάνουν σωστή διαχείριση ενέργειας (power management support), ώστε να μεγιστοποιείται η αυτονομία των μπαταριών και να ελαχιστοποιείται η αντικατάστασή τους.

### **1.3.5 Ασυμβατότητα συστημάτων**

Στην κατασκευή ενός WLAN θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η ασυμβατότητα (interoperability) μεταξύ προϊόντων διαφορετικών κατασκευαστών, διαφορετικά το δίκτυο δε θα λειτουργεί σωστά. Οι λόγοι ασυμβατότητας είναι οι εξής:

- Διαφορετική τεχνολογία: Ένα σύστημα που χρησιμοποιεί την τεχνολογία διαμόρφωσης Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS) δε θα επικοινωνεί με ένα άλλο που βασίζεται στην τεχνολογία διαμόρφωσης Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS).
- Χρήση διαφορετικού φάσματος συχνοτήτων: Η επικοινωνία μεταξύ συσκευών που λειτουργούν σε διαφορετικές συχνότητες δεν είναι δυνατή ακόμα και αν χρησιμοποιείται η ίδια τεχνολογία.
- Διαφορετική υλοποίηση: Ακόμα και να χρησιμοποιείται η ίδια τεχνολογία και το ίδιο φάσμα συχνοτήτων μπορεί να μην είναι δυνατή η επικοινωνία λόγω διαφορετικών παραμέτρων υλοποίησης από κάθε κατασκευαστή.

### **1.3.6 Ασφάλεια δικτύου**

Η λειτουργία ενός ασύρματου δικτύου αντιστοιχεί στα χαμηλότερα επίπεδα της αρχιτεκτονικής ενός δικτύου και δεν εμπεριέχει άλλες λειτουργίες όπως εγκατάσταση σύνδεσης από άκρο σε άκρο ή άλλες υπηρεσίες (π.χ. login) που προσφέρουν τα ανώτερα στρώματα. Για τον λόγο αυτό το μόνο θέμα που σχετίζεται με την ασφάλεια

και απασχολεί τα ασύρματα δίκτυα έχει να κάνει με θέματα ασφαλείας των χαμηλότερων στρωμάτων, όπως η κρυπτογράφηση (**encryption**) των δεδομένων.

Για τον λόγο αυτό, έχουν υλοποιηθεί διάφορες τεχνικές κωδικοποίησης οι οποίες καθιστούν εξαιρετικά δύσκολη την λήψη της μεταδιδόμενης πληροφορίας από κάποιον χρήστη πέραν του προοριζόμενου.

Τέτοιες τεχνικές είναι οι τεχνικές εξάπλωσης φάσματος (spread spectrum) που θα αναφερθούν με λεπτομέρεια σε επόμενο κεφάλαιο, ενώ εάν ο χρήστης απαιτεί περισσότερη ασφάλεια κατά τη μετάδοση των δεδομένων, το IEEE 802.11 Standard (το πιο διαδεδομένο ίσως πρωτόκολλο για WLAN στην περιοχή των 2.4 GHz), καθορίζει τη χρήση της κωδικοποίησης **WEP** (Wired Equivalent Privacy). Η κωδικοποίηση αυτή χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο 'RSA Data Security Inc. RC4 encryption' για την κρυπτογράφηση των εκπεμπόμενων σημάτων.

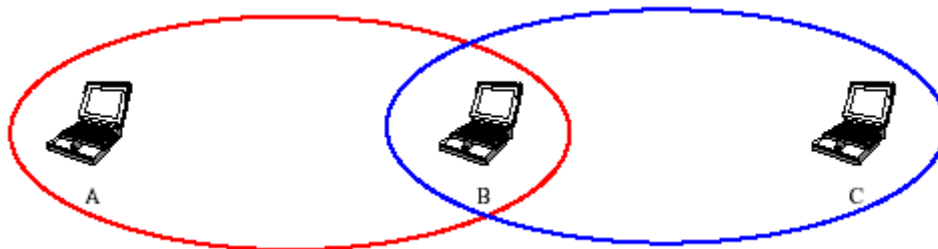
### 1.3.7 Προστασία της υγείας των χρηστών

Το θέμα της προστασίας (safety) του χρήστη δεν έχει σημασία για τα ενσύρματα δίκτυα σε αντίθεση με τα ασύρματα. Τα ασύρματα LAN που χρησιμοποιούν την τεχνική μετάδοσης με υπέρυθρες ακτίνες, θα πρέπει να περιορίσουν την ισχύ του εκπεμπόμενου σήματος στο ανώτερο όριο των 2 Watts, για να αποφευχθούν ανεπιθύμητα οφθαλμολογικά προβλήματα.

Η ισχύς του εκπεμπόμενου σήματος από ένα πομπό ραδιοσυχνοτήτων (**RF**: Radio Frequency) των WLAN είναι πολύ μικρότερη (συνήθως μεταξύ 50 και 100 mWatt) από αυτή που εκπέμπει ένα κοινό κινητό τηλέφωνο (600 mWatt – 3 Watt). Έτσι καθώς η ισχύς των RF σημάτων μειώνεται με την αύξηση της απόστασης από τον πομπό, ελαχιστοποιείται ακόμα περισσότερο η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που δέχονται οι χρήστες που βρίσκονται στην περιοχή των ασύρματων δικτύων.

### 1.3.8 Το πρόβλημα του κρυμμένου κόμβου

Ένας συνηθισμένος περιορισμός στην απόδοση των WLAN είναι το πρόβλημα που προκύπτει από την περιορισμένη ακτίνα δράσης των ραδιοκυμάτων και είναι γνωστό ως 'hidden node problem'. Το φαινόμενο αυτό προκύπτει όταν στο σύστημα υπάρχει ένας σταθμός που δεν μπορεί να ανιχνεύσει την μετάδοση ενός άλλου σταθμού ώστε να αναγνωρίσει ότι το μέσο χρησιμοποιείται. Στο επόμενο σχήμα, ο σταθμός A θέλει να μεταδώσει στον σταθμό B, όμως δεν μπορεί να ανιχνεύσει ότι και ο σταθμός C θέλει να μεταδώσει, με αποτέλεσμα να προκύψει σύγκρουση.



**Σχήμα 1.4:** Ο σταθμός A δεν μπορεί να ανιχνεύσει την μετάδοση του σταθμού C, με αποτέλεσμα αν αποφασίσουν και οι δύο να μεταδώσουν προς τον B να προκύψει μία σύγκρουση.



## 1.4 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ WLAN

Για την υλοποίηση ενός ασύρματου τοπικού δικτύου μπορεί να επιλεγθεί ένα από τα πολλά Standards που οι διάφοροι οργανισμοί και εταιρίες έχουν δημιουργήσει τα τελευταία χρόνια. Στη συνέχεια αναφέρουμε τα κυριότερα.

### 1.4.1 IEEE 802.11

Τον Ιούνιο του 1977 η IEEE οριστικοποίησε το πρώτο της Standard για WLANs. Το 802.11 Standard καθορίζει ως συχνότητα λειτουργίας τα 2.4 GHz και υποστηρίζει ρυθμούς δεδομένων της τάξεως των 1 Mbps και 2 Mbps. Για την ασύρματη μεταφορά δεδομένων καθορίζονται οι λειτουργίες και οι υπηρεσίες ενός υποστρώματος MAC και τριών διαφορετικών φυσικών στρωμάτων. Το υποστρώμα MAC έχει 2 τρόπους λειτουργίας:

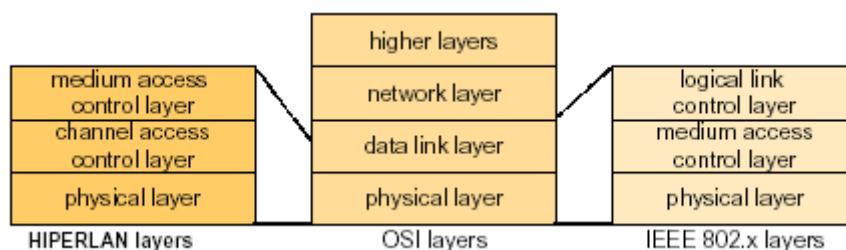
- Μία κατανεμημένη (distributed) λειτουργία (CSMA/CA)
- Μια συντονισμένη (coordinated) λειτουργία (polling mode)

Στα τέλη του 1999 η IEEE κοινοποίησε δύο νέα συμπληρωματικά Standards για WLANs, τα 802.11a και 802.11b:

- Το 802.11a έχει καθοριστεί έτσι ώστε να υποστηρίζει ρυθμούς δεδομένων έως και 54 Mbps με χρήση της τεχνικής διαμόρφωσης **OFDM** (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) στην μάντα των 5 GHz.
- Το 802.11b είναι ουσιαστικά μια προέκταση του αρχικού 802.11 καθώς χρησιμοποιεί ως διαμόρφωση την τεχνική DSSS και λειτουργεί στα 2.4 GHz. Η διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι μπορεί να υποστηρίζει ρυθμούς δεδομένων έως και 11 Mbps.

### 1.4.2 HiperLAN

Το HiperLAN καθιερώθηκε το 1996 από την ETSI (European Telecommunications Standards Institute). Η πρώτη έκδοση του Standard είναι το HiperLAN I. Το Standard αυτό λειτουργεί στην μάντα από 5.1 έως 5.3 GHz, ενώ ο ρυθμός σηματοδότησης φτάνει τα 24 Mbps. Το πρωτόκολλο χρησιμοποιεί μια παραλλαγή του CSMA/CA η οποία στηρίζεται στο χρόνο ζωής του πακέτου, την προτεραιότητα των πακέτων και τις αναμεταδόσεις στο επίπεδο MAC. Στο επόμενο σχήμα δίνεται η συσχέτιση των διάφορων στρωμάτων όπως αυτά καθορίζονται από τα δύο κυριότερα Standards (HiperLAN και 802.11x) με την αρχιτεκτονική OSI.



**Σχήμα 1.5: Σχηματική σύγκριση των στρωμάτων των Standards HiperLAN και 802.11 με τα στρώματα της αρχιτεκτονικής OSI.**

Η ETSI έχει καθορίσει και ένα νέο πρωτόκολλο που ονομάζεται HiperLAN II και λειτουργεί και αυτό στα 5 GHz (5.4 έως 5.7 GHz). Το HiperLAN II στηρίζεται στην τεχνική διαμόρφωσης OFDM (Orthogonal Frequency Digital Multiplexing), ενώ υποστηρίζει διάφορους ρυθμούς μετάδοσης (6, 9, 12, 18, 27, 36 και έναν εναλλακτικό

ρυθμό των 54 Mbps). Το HiperLan II είναι ουσιαστικά ένα σύστημα ασύρματου ATM, ενώ το πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται στο υποστρώμα MAC στηρίζεται σε μια διαφοροποιημένη λειτουργία της τεχνικής TDMA.

### **1.4.3 OpenAir**

Το OpenAir είναι ένα Standard που αναπτύχθηκε από την εταιρία Proxim. Είναι προγενέστερο του 802.11 και χρησιμοποιεί την τεχνική του Frequency Hopping επιτυγχάνοντας ρυθμούς δεδομένων 0.8 και 1.6 Mbps (χρησιμοποιώντας τεχνικές διαμόρφωσης 2FSK και 4FSK, αντίστοιχα). Το πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται στο υποστρώμα MAC είναι το CSMA/CA με MAC επαναμεταδόσεις και στηρίζεται στην ανταλλαγή RTS/CTS πακέτων.

### **1.4.4 HomeRF SWAP**

Η HomeRF είναι μια ομάδα από μεγάλες εταιρίες που δημιουργήθηκε για να προωθήσει την χρήση των WLAN στο σπίτι και στα γραφεία. Η ομάδα αυτή έχει αναπτύξει ένα νέο πρωτόκολλο για τον σκοπό αυτό, το οποίο ονομάζεται **SWAP** (Shared Wireless Access Protocol).

Το SWAP χρησιμοποιεί στο υποστρώμα MAC ένα νέο πρωτόκολλο, το οποίο συνδυάζει χαρακτηριστικά και λειτουργίες από το DECT (ένα Standard της ETSI για ψηφιακά ασύρματα τηλέφωνα) και το 802.11. Η συχνότητα λειτουργίας είναι τα 2.4 GHz, ενώ στο φυσικό στρώμα χρησιμοποιείται η τεχνική FHSS, υποστηρίζοντας ρυθμούς δεδομένων της τάξης των 1 Mbps και 2 Mbps.

### **1.4.5 Bluetooth**

Το Bluetooth αποτελεί μια προδιαγραφή που εκδόθηκε από το Bluetooth Special Interest Group (SIG) με την ενίσχυση μερικών από τις μεγαλύτερες εταιρίες όπως οι Ericsson, IBM, Intel, Microsoft κ.ά. Το Bluetooth δεν αποτελεί ένα πρωτόκολλο για WLAN, αλλά βρίσκει εφαρμογές στα ασύρματα προσωπικά δίκτυα **WPANs** (Wireless Personal Area Networks), που αποτελούν μικρότερα σε έκταση δίκτυα από τα WLANs, με ακτίνα δράσης έως 10 μέτρα. Το Bluetooth λειτουργεί στα 2.4 GHz, χρησιμοποιεί ως τεχνική διαμόρφωσης την FHSS και φτάνει σε ρυθμούς δεδομένων ως το 1 Mbps.

## **1.5 ΔΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΝΟΣ WLAN**

Ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο αποτελείται από διάφορα στοιχεία (components) που βοηθούν στην σωστή μετάδοση, λήψη και επεξεργασία του σήματος από τον χρήστη. Στα στοιχεία αυτά συμπεριλαμβάνονται τόσο το κατάλληλο λογισμικό (software) όσο και το ανάλογο υλικό εξοπλισμού (hardware). Οι κατηγορίες των στοιχείων αυτών αναφέρονται στη συνέχεια.

### **1.5.1 Συσκευές χρηστών (End-user devices)**

Όπως με κάθε σύστημα, έτσι και στα WLANs πρέπει να υπάρχει ένας τρόπος διασύνδεσης των διαφόρων εφαρμογών και υπηρεσιών με τους χρήστες. Είτε το δίκτυο είναι ασύρματο ή ενσύρματο, μία συσκευή αποτελεί τη διασύνδεση μεταξύ του χρήστη και του δικτύου. Τέτοιες συσκευές που χρησιμοποιούνται σε ασύρματα δίκτυα είναι και οι επόμενες:

- Laptop computers
- Palmtop computers
- Handheld PCs and printers
- Personal Digital Assistants (PDAs)
- Handheld printers and scanners

### **1.5.2 Λογισμικό δικτύου (Network Software)**

Ένα ασύρματο δίκτυο είναι δομημένο με το κατάλληλο λογισμικό που βρίσκεται σε διάφορα μέρη του δικτύου. Ένα σύστημα διαχείρισης δικτύου (**NOS**: Network Operating System), όπως είναι για παράδειγμα το Microsoft NT Server, παρέχει διαφόρων ειδών υπηρεσίες, όπως μεταφορά δεδομένων, εκτύπωση κ.ά. Πολλά τέτοια συστήματα στηρίζονται στην ύπαρξη ενός server, στον οποίο βρίσκονται οι βασικές συσκευές λογισμικού και οι βάσεις δεδομένων στις οποίες έχουν πρόσβαση οι διάφορες συσκευές τις οποίες ελέγχει ο χρήστης. Οι τελευταίες 'τρέχουν' το δικό τους λογισμικό (client software), το οποίο κατευθύνει τις εντολές του χρήστη στον server.

### **1.5.3 Ασύρματες κάρτες δικτύου (Wireless NICs)**

Η ασύρματη κάρτα δικτύου (Wireless Network Interface Card) χρησιμοποιείται για την μετάδοση του ψηφιακού σήματος ενός υπολογιστή μέσω του ασύρματου μέσου σε έναν άλλο υπολογιστή. Στην διαδικασία αυτή συμπεριλαμβάνεται η διαμόρφωση και η ενίσχυση του σήματος.

Οι ασύρματες κάρτες δικτύου συνδέονται με τη συσκευή του χρήστη μέσω ενός διαύλου υπολογιστή όπως είναι οι ISA (Industry Standard Architecture) και PCMCIA (Personal Computer Memory Card International Association). Μερικές εταιρίες παράγουν κάρτες οι οποίες συνδέονται με τον υπολογιστή μέσω μιας RS-232 σειριακής ή παράλληλης θύρας.

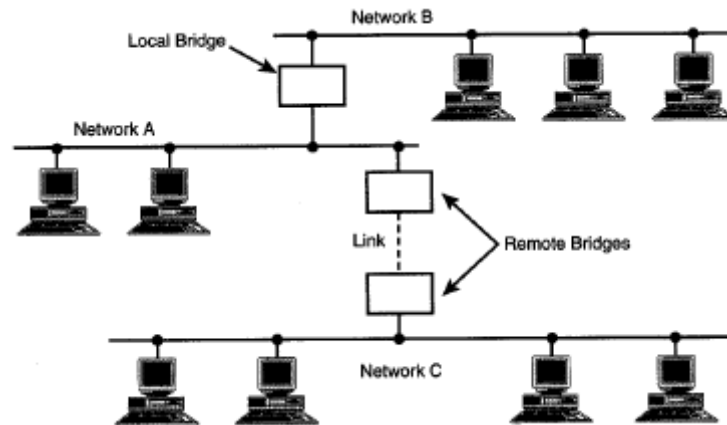
Η διασύνδεση της ασύρματης κάρτας με την συσκευή του χρήστη συμπεριλαμβάνει και έναν οδηγό λογισμικού (software driver) που συνδέει το λογισμικό του NOC στην κάρτα. Τα κυριότερα Standards για τους παραπάνω οδηγούς είναι τα εξής:

- NDIS (Network Driver Interface Specification)
- ODI (Open Datalink Interface)
- PDS (Packet Driver Specification)

### **1.5.4 Ασύρματες Τοπικές Γέφυρες (Wireless Local Bridges)**

Οι γέφυρες δικτύων αποτελούν ένα σημαντικό μέρος της τοπολογίας ενός δικτύου καθώς συνδέουν πολλά LANs μεταξύ τους στο επίπεδο του υποστρώματος MAC, με αποτέλεσμα την διαμόρφωση ενός εκτενέστερου και πιο λειτουργικού δικτύου. Οι γέφυρες χωρίζονται σε δύο είδη (τα οποία παρουσιάζονται και στο επόμενο σχήμα):

- Local bridges: Συνδέουν τοπικά δίκτυα που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση.
- Remote bridges: Συνδέουν δίκτυα που χωρίζονται από αποστάσεις μεγαλύτερες από αυτές που μπορούν να υποστηρίξουν τα πρωτόκολλα των τοπικών δικτύων.



**Σχήμα 1.6: Διασύνδεση δικτύων με local και remote γέφυρες.**

Στην ορολογία των ασύρματων δικτύων οι γέφυρες αναφέρονται ως **APs** (Access Points), τα οποία είναι συσκευές απαραίτητες για τη διασύνδεση ενός WLAN με ένα ενσύρματο δίκτυο, αλλά και τη διασύνδεση πολλών WLAN μεταξύ τους.

### 1.5.5 Κεραίες (Antennas)

Η κεραία εκπέμπει το διαμορφωμένο σήμα μέσω του αέρα ώστε αυτό να φτάσει στον προορισμό του. Γενικά, οι κεραίες διακρίνονται σε πολλά είδη και μεγέθη και χαρακτηρίζονται από τις παρακάτω παραμέτρους:

- Μοντέλο διάδοσης (propagation pattern)
- Ευαισθησία (Gain)
- Ισχύς μετάδοσης (Transmit power)
- Εύρος ζώνης (Bandwidth)

Το μοντέλο διάδοσης μιας κεραίας καθορίζει την περιοχή κάλυψης (coverage area) της κεραίας. Για την μετάδοση του σήματος στα WLAN χρησιμοποιούνται κυρίως δύο είδη κεραίων:

- Μια πολυκατευθυντική (**omnidirectional**) κεραία, η οποία διοχετεύει την ισχύ της προς κάθε κατεύθυνση.
- Μια μονοκατευθυντική (**directional**) κεραία, η οποία συγκεντρώνει το μεγαλύτερο μέρος της ισχύος της σε μία μόνο κατεύθυνση.

#### 1.5.5.1 Πολυκατευθυντικές κεραίες

Οι κεραίες αυτές μπορεί να έχουν κάθετη ή οριζόντια πόλωση και είναι ιδανικές για την κάλυψη τετραγωνικών ή περίπου τετραγωνικών και κυρίως εσωτερικών χώρων. Τα συνηθέστερα είδη πολυκατευθυντικών κεραίων που χρησιμοποιούνται είναι:

- Place antenna
- Ceiling mount dipole antenna
- Rubber duck dipole antenna
- Short rubber duck dipole antenna
- Spectrum24 Sandra "D" antenna



**Σχήμα 1.7: Πολυκατευθυντικές ‘spread spectrum’ κεραίες: (α) οριζόντιας πόλωσης, (β) κάθετης πόλωσης**

Οι πολυκατευθυντικές κεραίες χρησιμοποιούνται σε εσωτερικούς δικτυακούς χώρους και οι περισσότερες εγκαθίστανται με ευκολία σε τοίχους και οροφές. Μπορεί να χρησιμοποιούνται δύο κεραίες σε κάθε AP για τη βελτιστοποίηση της κάλυψης (η οποία είναι της μορφής doughnut-shaped). Επίσης τέτοιου είδους κεραίες χρησιμοποιούνται για point to multipoint εφαρμογές καθώς και για εφαρμογές όπου υπάρχει ανάγκη κινητικότητας με τη θέση των σταθμών εργασίας να μεταβάλλεται συνεχώς. Η πόλωση της κεραίας πρέπει να είναι του ίδιου τύπου τόσο στην πλευρά του πομπού όσο και σε αυτή του δέκτη. Στις περισσότερες εφαρμογές χρησιμοποιούνται κεραίες κάθετης πόλωσης.

#### 1.5.5.2 Μονοκατευθυντικές κεραίες

Η κάλυψη με αυτό το είδος κεραίας γίνεται σε κωνικό σχήμα παρόμοιο με αυτό της δέσμης φωτός που εξέρχεται από έναν φακό. Η κατευθυντικότητα της κεραίας καθορίζεται από τη γωνία και το εύρος της δέσμης ακτινοβολίας (**beam width**). Τυπικές γωνίες αρχίζουν από 10° (μεγάλη κατευθυντικότητα) έως 90° (πολύ μικρή κατευθυντικότητα). Τέτοιου είδους κεραίες χρησιμοποιούνται για μακρύτερους αλλά στενότερους χώρους και σε εφαρμογές point-to-point. Τα συνηθέστερα είδη των μονοκατευθυντικών κεραιών που χρησιμοποιούνται είναι:

- Yagi antenna (30° beam)
- Patch antenna (70° beam)
- Panel antenna (22° beam)



(α)



(β)

**Σχήμα 1.8: Μονοκατευθυντικές spread spectrum κεραίες (α) 22° beam width (β) 7,5° beam width**

Αναφερόμενοι γενικά στις κεραίες, ένα μέγεθος που σχετίζεται με τη δυνατότητα κάλυψης είναι η ευαισθησία της κεραίας (**antenna gain**) και μετράται με τιμές decibel (db). Όσο μεγαλύτερη είναι η ευαισθησία, τόσο μεγαλύτερη είναι η ισχύς του σήματος και επομένως η κάλυψη γίνεται σε μεγαλύτερο βαθμό. Για βήμα αύξησης 1

db της ευαισθησίας της κεραίας, η κάλυψη αυξάνει κατά 2.5%. Ειδικά για εξωτερικούς χώρους χωρίς εμπόδια, αύξηση της ευαισθησίας κατά 1 db επιφέρει αύξηση στην κάλυψη κατά 5%. Τα αποτελέσματα αυτά μπορούν να διαφέρουν ανάλογα με τον τύπο του χώρου και τα φυσικά εμπόδια που υπάρχουν σ' αυτόν.

Η σωστή τοποθέτηση και ο κατάλληλος προσανατολισμός της κεραίας σε ένα δικτυακό χώρο συμβάλλει στην αύξηση της κάλυψης και στη βελτιστοποίηση της απόδοσης του ασύρματου συστήματος. Γενικά, οι κεραίες θα πρέπει να τοποθετούνται σε ψηλά σημεία και σε περιοχές που δεν υπάρχουν φυσικά εμπόδια (όσο αυτό βέβαια είναι εφικτό). Μέγιστη απόδοση έχουμε στην περίπτωση που ο πομπός και ο δέκτης βρίσκονται στο ίδιο ύψος και υπάρχει οπτική επαφή ανάμεσά τους.

Ο συνδυασμός της ισχύος μετάδοσης και της ευαισθησίας μιας κεραίας καθορίζει την απόσταση που μπορεί να μεταδοθεί το σήμα. Για μεταδόσεις σε μεγάλη απόσταση απαιτείται υψηλή τιμή ισχύος και μοντέλα κατευθυντικής μετάδοσης (directive radiation patterns), ενώ οι μεταδόσεις σε μικρές αποστάσεις γίνονται εφικτές με λιγότερη ισχύ και ευαισθησία. Γενικά, στα ασύρματα δίκτυα η ισχύς μετάδοσης είναι σχετικά χαμηλή, συνήθως κάτω από 1 Watt.

Ανάλογα με τις εφαρμογές τις οποίες υποστηρίζει ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο οι κεραίες μπορούν να χωριστούν σε 3 είδη:

- **Snap-on antenna:** Η κεραία αυτή συνδέεται κατευθείαν στην ασύρματη κάρτα και είναι ιδανική για εφαρμογές που απαιτούν συνεχή κίνηση.
- **Dipole antenna:** Η κεραία αυτή συνδέεται με την ασύρματη κάρτα μέσω ενός μικρού καλωδίου και χρησιμοποιείται κυρίως από μεταφερόμενους (portable) σταθμούς, οι οποίοι μπορούν να κινούνται αλλά για να λειτουργήσουν πρέπει να βρίσκονται σε σταθερό σημείο.
- **High-gain antenna:** Αυτό το είδος κεραίας προσαρτάται σε έναν τοίχο ή υψηλό μέρος ενός κτιρίου με τη βοήθεια ενός μεγάλου καλωδίου. Η κεραία αυτή είναι ιδανική για APs και σταθερούς σταθμούς.

## 1.6 ΑΛΛΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

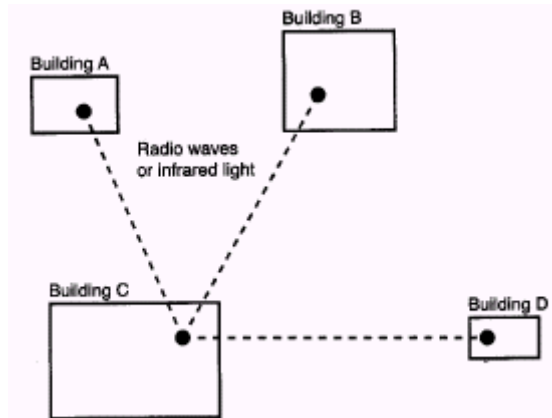
Οι ασύρματες τεχνολογίες μπορούν να χωρισθούν σε διάφορες κατηγορίες, σύμφωνα με κριτήρια όπως:

- Το πρωτόκολλο που χρησιμοποιούν (ATM, IP ή άλλο)
- Το είδος σύνδεσης (point-to-point ή point-to-multipoint)
- Το φάσμα συχνοτήτων στο οποίο λειτουργούν

Έτσι, ανάλογα με το είδος σύνδεσης υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες, οι οποίες αναπτύσσονται ξεχωριστά.

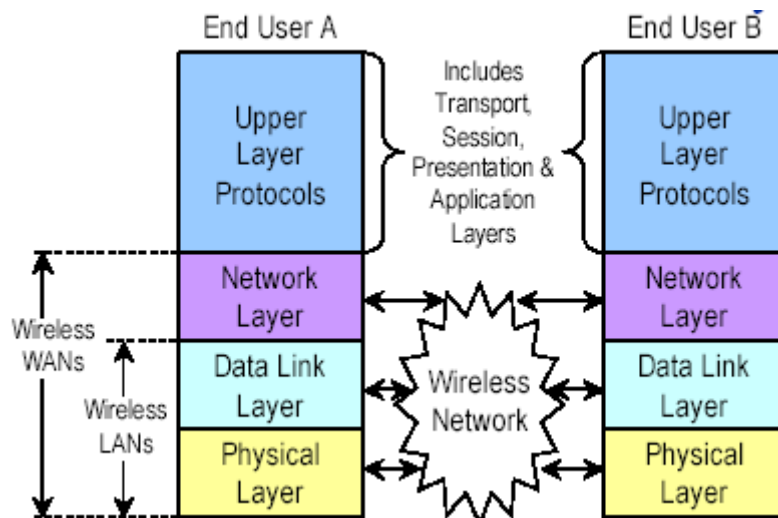
### 1.6.1 Ασύρματα Point-to-Point δίκτυα

Ο κυριότερος εκπρόσωπος των ασύρματων δικτύων με σύνδεση από σημείο-σε-σημείο (point-to-point) είναι τα ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα **WMANs** (Wireless Metropolitan Area Networks), τα οποία χρησιμοποιούν τεχνολογίες που ομοιάζουν πολύ με αυτές των WLAN. Η σύνδεση που χρησιμοποιείται συνήθως φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



**Σχήμα 1.9:** Η σύνδεση από σημείο σε σημείο μπορεί να συνδέσει πολλά απομακρυσμένα κτίρια μεταξύ τους.

Χρησιμοποιώντας κατευθυντικές κεραιές και τεχνικές διαμόρφωσης όπως η ‘spread spectrum’, τα δίκτυα αυτά μπορούν να υποστηρίξουν μετάδοση σε αποστάσεις μέχρι και 30 miles, απόσταση πάντως που μειώνεται αισθητά από διάφορους παράγοντες όπως οι καθυστερήσεις μετάδοσης και τα διάφορα εμπόδια και παρεμβολές. Ο ρυθμός μετάδοσης για τα WMAN μπορεί να φτάσει τα 11 Mbps για ζευξίες των 2-3 miles. Η κυριότερη διαφορά μεταξύ τόσο των WMAN όσο και των WWAN (Wireless Wide Area Network, τα οποία εκτείνονται σε ακτίνα εκατοντάδων χιλιομέτρων) με τα WLAN έγκειται στο γεγονός ότι η λειτουργία των τελευταίων λαμβάνει χώρα στα δύο κατώτερα στρώματα του επιπέδου OSI (σχήμα 1.10), σε αντίθεση με τα δύο προηγούμενα, η λειτουργία των οποίων στηρίζεται επιπλέον και στο στρώμα δικτύου.



**Σχήμα 1.10:** Η λειτουργία των WLAN εναπόκειται στα δύο κατώτερα στρώματα του επιπέδου OSI, ενώ στα WMAN, WWAN συμμετέχει και το στρώμα δικτύου.

### 1.6.2 Ασύρματα Point-to-Multipoint δίκτυα

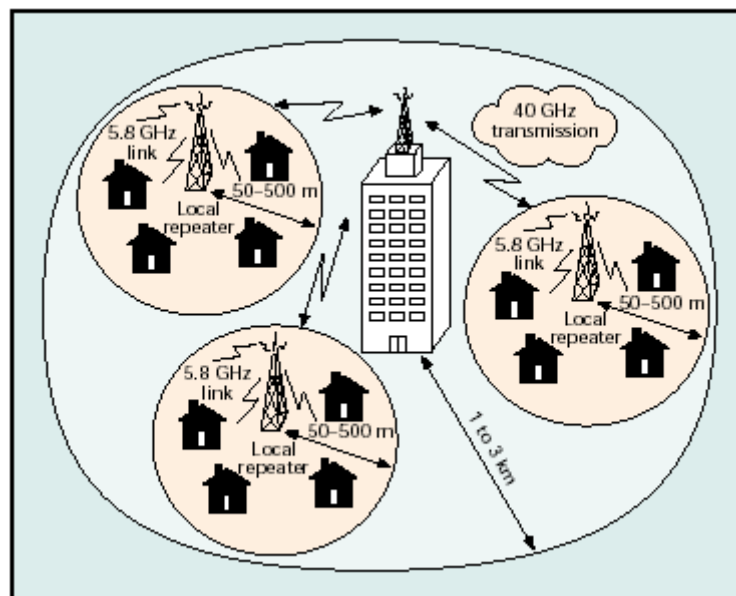
Τα δίκτυα αυτά στηρίζονται στην διασύνδεση ασύρματων (κινητών ή μη) χρηστών με μια σταθερή περιοχή στην οποία βρίσκεται ο παροχέας των υπηρεσιών (Service Provider), τις οποίες μοιράζονται οι ασύρματοι χρήστες. Δύο από τις πλέον αναπτυσσόμενες τεχνολογίες τέτοιου είδους ασύρματων δικτύων είναι και οι:

- **MMDS** (Multichannel Multipoint Distribution Service), η οποία λειτουργεί στην περιοχή συχνοτήτων 2.1-2.7 GHz, ενώ μπορεί να υποστηρίξει ρυθμό δεδομένων έως και 10 Mbps σε ακτίνα 35 miles.
- **LMDS** (Local Multipoint Distribution Service), η οποία λειτουργεί σε διάφορες συχνότητες (από 24 μέχρι 40 GHz), ενώ μπορεί να υποστηρίξει ρυθμούς μέχρι και 155 Mbps σε ακτίνα λειτουργίας των 2 miles.

Καθώς η τεχνολογία LMDS δείχνει να εφαρμόζεται ολοένα και περισσότερο στα ασύρματα δίκτυα ευρείας περιοχής, ενώ μέρος της υποστήριξής της μπορεί να υλοποιηθεί με την χρήση ασύρματων δικτύων που στηρίζονται 802.11, αποφασίσαμε να την μοντελοποιήσουμε και να την προσομοιάσουμε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

### 1.6.3 Η τεχνολογία LMDS

Η τεχνολογία LMDS (Local Multipoint Distribution System) είναι ένα ασύρματο σύστημα επικοινωνίας ευρείας ζώνης point-to-multipoint (σχήμα 1.11) και ανήκει σε μία κατηγορία ασύρματων τεχνολογιών που καλείται WLL (Wireless Local Loop) και λειτουργεί σε συχνότητες μεγαλύτερες των 20 GHz. Η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιείται για την παροχή ψηφιακών αμφίδρομων υπηρεσιών όπως μετάδοση δεδομένων, φωνής, video και Internet.



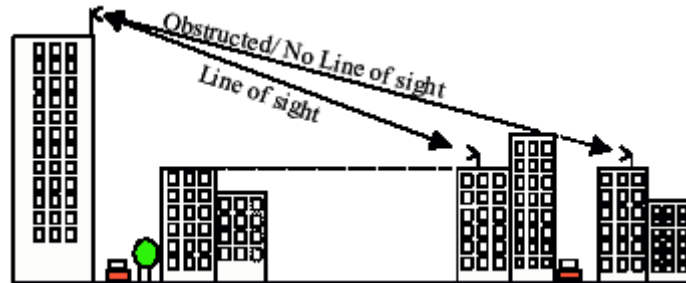
Σχήμα 1.11: Τυπική αρχιτεκτονική της τεχνολογίας LMDS.

Τα δίκτυα LMDS (η τοπολογία των οποίων φαίνεται στο παραπάνω σχήμα) μοιάζουν πολύ με τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας όσον αφορά την τοπολογία, αλλά έχουν δύο σημαντικές διαφορές:

- Η τεχνολογία LMDS λειτουργεί σε πολύ υψηλές συχνότητες. Στην Ευρώπη η ζώνη συχνοτήτων στην οποία λειτουργεί το LMDS είναι μεταξύ 24 και 26 GHz, ενώ στις ΗΠΑ έχει δοθεί άδεια για λειτουργία και στα 38 GHz. Εξαιτίας των πολύ υψηλών συχνοτήτων τα σήματα μπορούν να μεταδοθούν μόνο σε μικρές αποστάσεις, οι οποίες συνήθως δεν ξεπερνάνε τα 3 Km. Επίσης, απαιτείται η ύπαρξη οπτικής επαφής (Line Of Sight) μεταξύ πομπού και δέκτη (όπως φαίνεται στο σχήμα 1.12), κάνοντας την τεχνολογία ευπαθή για τις κινητές εφαρμογές.



- Η τεχνολογία LMDS χρησιμοποιεί μεγάλα ποσά εύρους ζώνης. Σε σύγκριση με τα κυψελωτά (cellular) δίκτυα που συνήθως χρησιμοποιούν 25 με 30 MHz, τα δίκτυα LMDS μπορούν να χρησιμοποιήσουν περισσότερα από 1000 MHz, επιτρέποντας την μεταφορά τεράστιας ποσότητας πληροφορίας.



**Σχήμα 1.12: Η τεχνολογία LMDS απαιτεί την ύπαρξη οπτικής επαφής μεταξύ πομπού και δέκτη.**

Το βασικό δομικό στοιχείο μιας τέτοιας αρχιτεκτονικής είναι το κελί (cell) το οποίο φαίνεται στο σχήμα 1.13 και στο οποίο λαμβάνει χώρα η ασύρματη επικοινωνία. Κάθε κελί στο σύστημα έχει έναν σταθμό βάσης (AP: Access Point) ή hub, ο οποίος αναφέρεται και ως central hub και βρίσκεται στο CMN (Central Main Node). Σε κάθε κελί υπάρχουν από λίγες έως πολλές απομακρυσμένες μονάδες (remote units) οι οποίες αντιπροσωπεύουν ουσιαστικά τους χρήστες. Η επικοινωνία και η διαχείριση των μονάδων αυτών γίνεται με τη βοήθεια του AP, η σύνδεση με τον οποίο γίνεται με την βοήθεια ενός SA (Station Adapter). Αξίζει να αναφέρουμε πως στο AP μπορεί να συνδεθεί και ένα ενσύρματο δίκτυο μέσω μιας ασύρματης γέφυρας (WB: Wireless Bridge).

Ένα σύστημα πολλαπλής προσπέλασης απαιτείται για να ρυθμίζει την επικοινωνία των απομακρυσμένων χρηστών με το AP. Κάποια τυπικά συστήματα που χρησιμοποιούνται για τον σκοπό αυτό είναι οι τεχνικές:

- FDMA (Frequency Division Multiple Access)
- TDMA (Time Division Multiple Access)
- CDMA (Code Division Multiple Access)

Το ασύρματο κανάλι μοιράζεται μεταξύ της απερχόμενης (upstream) και εισερχόμενης (downstream) στο CMN κίνησης, καθιστώντας έτσι αναγκαίο ένα 'duplexing scheme'. Οι τυπικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τον σκοπό αυτό είναι οι:

- TDD (Time Division Multiplexing)
- FDD (Frequency Division Multiplexing)

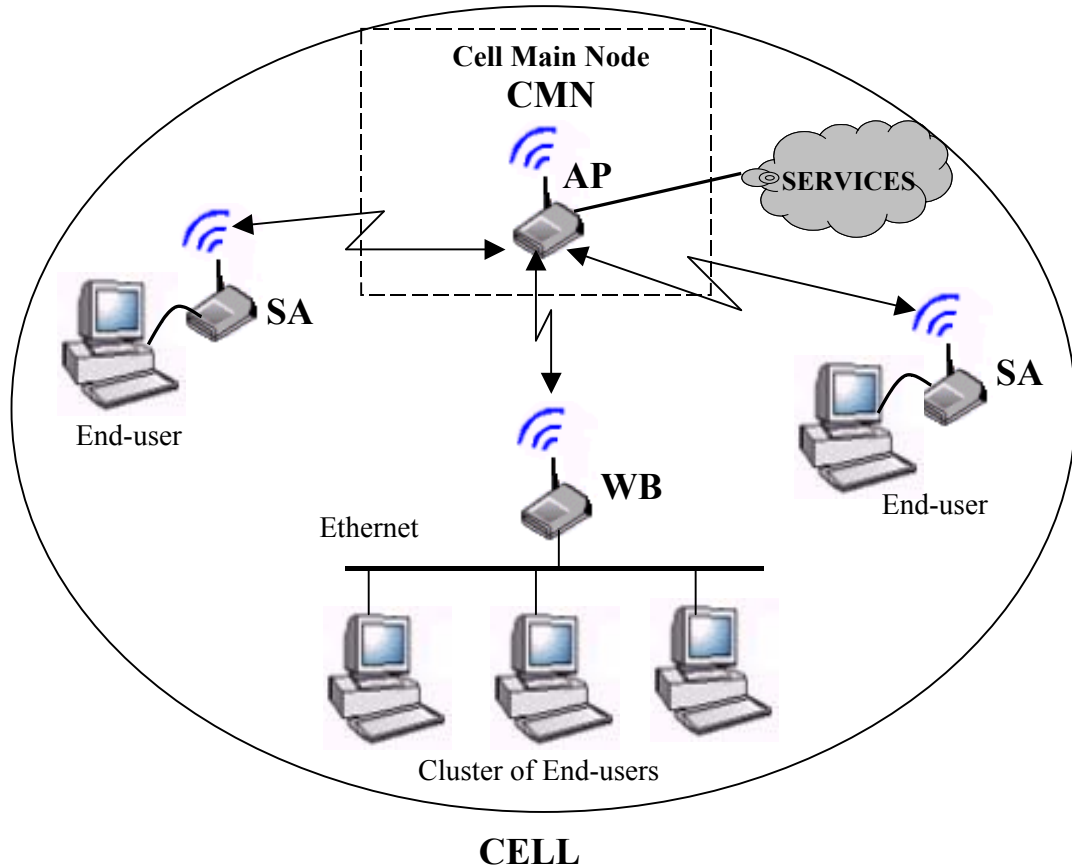
Είναι, επίσης, ενδιαφέρον να αναφέρουμε πως το ακρωνύμιο προκύπτει από τις παρακάτω λέξεις:

**L** (local): Δηλώνει την περιοχή κάλυψης ενός κελιού. Η συνήθης έκταση ενός κελιού είναι 12-15 χιλιόμετρα.

**M** (multipoint): Δηλώνει ότι τα σήματα μεταδίδονται με μία point-to-multipoint μέθοδο από το AP προς τους διάφορους χρήστες. Το ασύρματο κανάλι επιστροφής από τον συνδρομητή στον σταθμό βάσης είναι μια point-to-point μετάδοση.

**D** (distribution): Αναφέρεται στην κατανομή (distribution) των σημάτων η οποία μπορεί να αποτελείται από ταυτόχρονη μετάδοση φωνής, δεδομένων, Internet και video.

**S** (service): Δηλώνει την φύση της υπηρεσίας που προσφέρει ο διαχειριστής στον συνδρομητή η οποία υλοποιείται μέσω της συνδρομής του τελευταίου.



**Σχήμα 1.13: Σχηματική αναπαράσταση ενός cell.**

Ένα εκτεταμένο δίκτυο που χρησιμοποιεί την τεχνολογία LMDS μπορεί να περιέχει περισσότερα από ένα κελιά, τα APs των οποίων μπορούν να συνδέονται μεταξύ τους με συνδέσεις point-to-point. Κάθε κελί μπορεί να έχει όλα τα χαρακτηριστικά που περιγράφονται παραπάνω. Σύμφωνα με αυτή την αρχιτεκτονική του LMDS, ο service provider συνδέεται στα CMN κάθε κελιού, χρησιμοποιώντας point-to-point RF ζεύξεις, ενώ κάθε CMN επικοινωνεί με τους σχετιζόμενους χρήστες μέσω point-to-multipoint RF ζεύξεων.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από την χρήση της τεχνολογίας LMDS αναφέρονται παρακάτω:

- Αυξημένη απόδοση και χωρητικότητα. Σε μικρές αποστάσεις το LMDS μπορεί να υποστηρίξει ρυθμούς δεδομένων μεγαλύτερους του 1 Gbps, κάνοντας έτσι ικανή την ταυτόχρονη μετάδοση δεδομένων, video και φωνής μέσα από το ίδιο κανάλι.
- Ευκολία και ευελιξία εγκατάστασης. Από τη στιγμή που θα εγκατασταθούν τα απαραίτητα στοιχεία στον server provider το περαιτέρω κόστος και η εγκατάσταση των APs διαφοροποιείται ανάλογα με τον αριθμό των χρηστών-

συνδρομητών. Με τον τρόπο αυτό δεν επιβαρύνεται ο παροχέας των υπηρεσιών με επιπρόσθετο κόστος από την πρόωμη εγκατάσταση ανεκμετάλλευτων συσκευών.

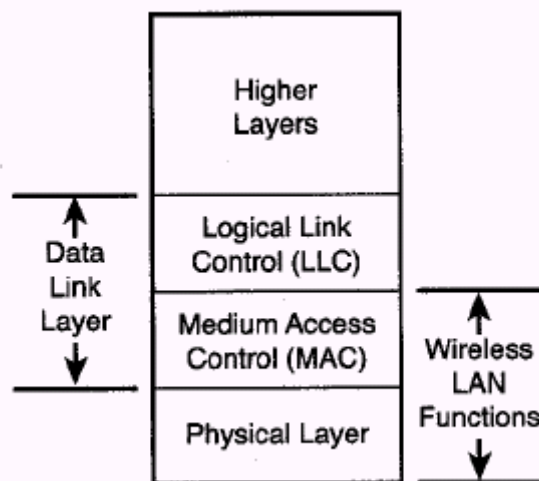
- Αποδοτικότητα στη χρησιμοποίηση του εύρους ζώνης. Όταν ένας συνδρομητής δεν χρησιμοποιεί το δίκτυο, η χωρητικότητα που του 'αντιστοιχεί' παρέχεται σε έναν άλλον χρήστη κάνοντας το συνολικό δίκτυο περισσότερο αποδοτικό και ευέλικτο.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΤΟ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ IEEE 802.11

Το IEEE 802.11 Standard αποτελεί το πιο βασικό και αναγνωρισμένο Standard για WLAN, στις βασικές λειτουργίες του οποίου στηρίζονται τα τρέχοντα πρωτόκολλα του IEEE (802.11a και 802.11b) για ασύρματα τοπικά δίκτυα. Σύμφωνα με την αρχική διατύπωση του **PAR** (Project Authorization Request) για το 802.11 ‘...ο σκοπός του προτεινόμενου Standard είναι η ανάπτυξη μιας προδιαγραφής (specification) για την ασύρματη διασύνδεση σταθερών, φορητών (portable) και κινητών (moving) σταθμών μέσα σε μια τοπική περιοχή’.

Το τελικό Standard, που δημοσιεύθηκε το Νοέμβριο του 1997, καθορίζει την λειτουργία πρωτοκόλλων ικανών να υποστηρίξουν την από αέρος διαδίκτυωση μιας τοπικής περιοχής. Όπως με άλλα Standards της οικογένειας IEEE 802 (όπως τα 802.3 και 802.5) η κύρια υπηρεσία του 802.11 είναι η μεταφορά των MSDU (MAC Service Data Unit) μεταξύ ομοτίμων στρωμάτων ζεύξης δεδομένων. Οι λειτουργίες και οι υπηρεσίες που καθορίζονται από το 802.11 αφορούν τα επίπεδα MAC και PHY, όπως φαίνεται και στο επόμενο σχήμα.



**Σχήμα 2.1: Το 802.11 καθορίζει τη λειτουργία των WLAN μέσω των επιπέδων MAC και PHY.**

Το 802.11 λαμβάνει υπόψη του και τις επόμενες σημαντικές διαφορές ανάμεσα στα ενσύρματα και ασύρματα LAN:

- **Διαχείριση ενέργειας:** Οι συσκευές που μπορούν να χρησιμοποιήσουν ένα δίκτυο 802.11 μπορεί να είναι είτε φορητές (**portable**, οι οποίες μπορούν να μετακινούνται, αλλά για να λειτουργήσουν πρέπει να βρίσκονται σε σταθερό σημείο) είτε κινητές (**mobile**, οι οποίες μπορούν να λειτουργούν ενώ είναι σε κίνηση). Και οι δύο αυτοί τύποι συσκευών απαιτούν την χρήση μπαταριών για την υποστήριξη των διάφορων ηλεκτρονικών στοιχείων, ενώ η χρήση των ασύρματων καρτών δικτύου εξαντλεί πιο γρήγορα τις μπαταρίες του υπολογιστή. Για τον λόγο αυτό, το 802.11 καθορίζει διάφορες λειτουργίες ελέγχου της ισχύος οι οποίες υλοποιούνται στο επίπεδο MAC.

- **Εύρος ζώνης:** Το 802.11 εφαρμόζει διάφορες μεθόδους για να πετύχει τον υψηλότερο δυνατό ρυθμό δεδομένων στην μπάντα συχνοτήτων ISM.
- **Ασφάλεια:** Τα ασύρματα δίκτυα μεταδίδουν τα σήματα σε πολύ μεγαλύτερες περιοχές (όσον αφορά την κατεύθυνση του σήματος) από αυτές από αυτές που καλύπτει ένα καλώδιο ή μια οπτική ίνα. Για την υψηλότερη ασφάλεια το 802.11 κάνει χρήση των πρωτοκόλλων που αναφέρονται στο 802.10, το οποίο σχετίζεται με μηχανισμούς ασφάλειας στα 802.x δίκτυα.
- **Διευθυνσιοδότηση:** Η τοπολογία ενός ασύρματου δικτύου είναι δυναμική. Για τον λόγο αυτό η διεύθυνση προορισμού δεν ανταποκρίνεται πάντα στην ίδια φυσική θέση του προορισμού. Το πρόβλημα της δρομολόγησης πακέτων μεταξύ κινητών σταθμών μπορεί να λυθεί με τη χρήση διάφορων πρωτοκόλλων, το πιο γνωστό από τα οποία είναι το **MobileIP** που βασίζεται στο πρωτόκολλο μεταφοράς TCP/IP.

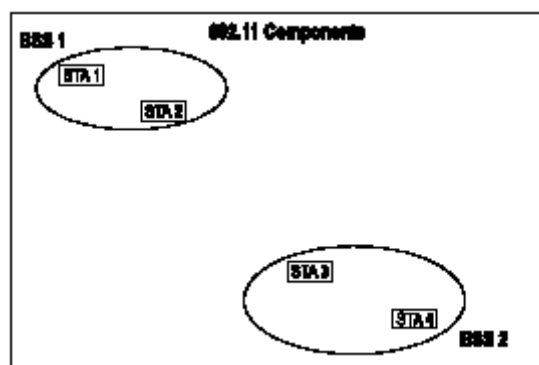
## 2.1 Η ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ ΤΟΥ 802.11

Η τοπολογία του 802.11 αποτελείται από στοιχεία που αλληλεπιδρούν ώστε να παρέχουν ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο που να παρέχει τη δυνατότητα μετακίνησης των σταθμών η οποία να μην γίνεται αντιληπτή από τα ανώτερα στρώματα, όπως το LLC (Logical Link Control). Ένας σταθμός (**station**) είναι κάθε συσκευή η οποία εμπεριέχει τις λειτουργίες του 802.11 (δηλαδή το επίπεδο MAC, το φυσικό στρώμα και μια διασύνδεση (interface) με το ασύρματο μέσο).

Οι λειτουργίες του 802.11 ενυπάρχουν (reside) σε μια ασύρματη κάρτα δικτύου **NIC** (Network Interface Card), το λογισμικό διασύνδεσης που οδηγεί την κάρτα NIC και τον σταθμό βάσης ή **AP** (Access Point).

### 2.1.1 BSS

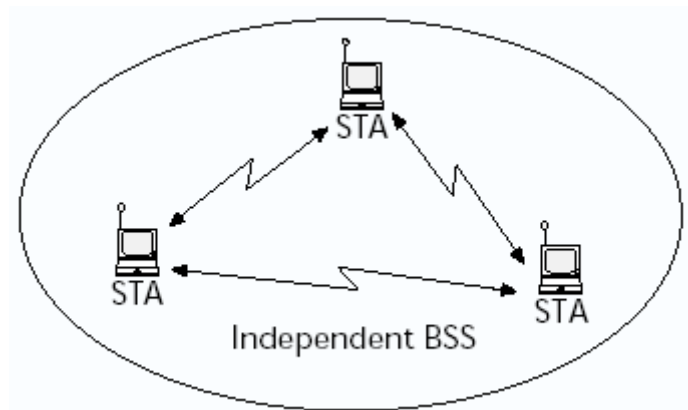
Το βασικό δομικό στοιχείο ενός IEEE 802.11 LAN είναι το **BSS** (Basic Service Set). Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται 2 BSS, το καθένα από τα οποία έχει 2 σταθμούς (STA) οι οποίοι είναι μέλη του BSS. Αν ένας σταθμός μετακινηθεί έξω από το BSS στο οποίο ανήκει δεν μπορεί πλέον να επικοινωνεί άμεσα με τα άλλα μέλη του συγκεκριμένου BSS.



Σχήμα 2.2: Σχηματική αναπαράσταση δύο BSS.

### 2.1.2 IBSS

Ο πιο βασικός τύπος ενός 802.11 LAN είναι το **IBSS** (Independent BSS), όπου δύο ή περισσότεροι σταθμοί μπορούν να επικοινωνούν απευθείας μεταξύ τους. Στο παραπάνω σχήμα φαίνονται δύο IBSS ή όπως αλλιώς ονομάζονται ad-hoc δίκτυα.

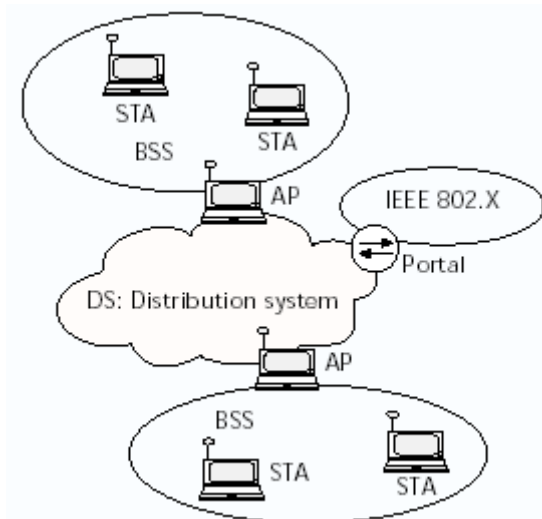


**Σχήμα 2.3: Ένα ad-hoc δίκτυο**

### 2.1.3 ESS

Όταν οι ανάγκες της διαδίκτυωσης ξεπερνούν τα όρια του IBSS, το 802.11 καθορίζει τη δομή ενός πιο σύνθετου τοπικού δικτύου που ονομάζεται **ESS** (Extended Service Set) και στο οποίο είναι δυνατή η διασύνδεση και η επικοινωνία πολλών BSS μεταξύ τους. Το στοιχείο που χρησιμοποιείται για την διασύνδεση των BSS ονομάζεται **DS** (Distributed System). Το 802.11 κάνει διαχωρισμό μεταξύ του Ασύρματου Μέσου WM (Wireless Medium) από το DSM (Distributed System Medium).

Η πρόσβαση στο DS γίνεται με την βοήθεια ενός σταθμού που καλείται **AP** (Access Point) και ο οποίος παρέχει ουσιαστικά τη διασύνδεση των σταθμών που βρίσκονται σε διάφορα BSS στο DS. Η διασύνδεση αυτή φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



**Σχήμα 2.4: Η σύνδεση των BSSs με το DS γίνεται με την βοήθεια των AP.**

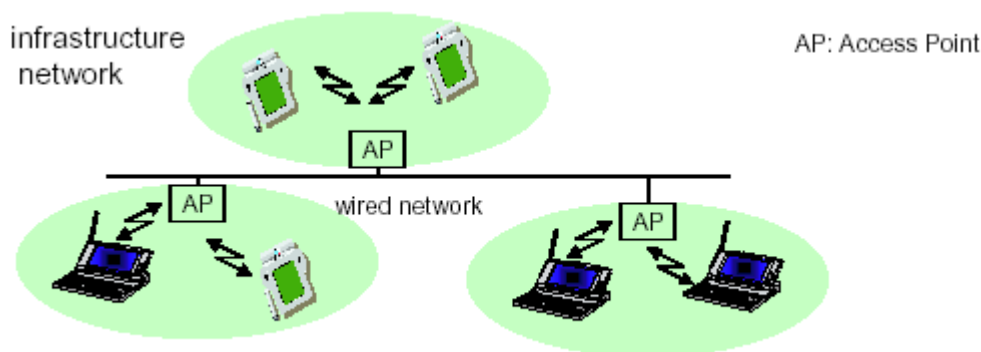
Τα δεδομένα μετακινούνται μεταξύ ενός BSS και του DS μόνο μέσω του AP, ενώ το DS υποστηρίζει τους τύπους κίνησης του 802.11 παρέχοντας υπηρεσίες ικανές να ελέγχουν την αντιστοίχιση (mapping) της διεύθυνσης στον προορισμό για κάθε σταθμό που μετακινείται.

Η κεντρική ιδέα της συγκεκριμένης τοπολογίας, είναι ότι ένα δίκτυο ESS εμφανίζεται το ίδιο σε ένα επίπεδο LLC όπως και ένα δίκτυο IBSS. Οι σταθμοί μέσα στο ίδιο ESS μπορούν να μετακινούνται από ένα BSS σε ένα άλλο διαφανώς ως προς

το LLC. Τα ESS δίκτυα αναφέρονται και ως **infrastructure** δίκτυα, αν και τα τελευταία αποδίδουν συνήθως την τοπολογία όπου ένα BSS συνδέεται μέσω ενός AP σε ένα ενσύρματο δίκτυο.

Το Standard του 802.11 δεν περιορίζει τη σύνθεση του DS. Για τον λόγο αυτό μπορεί να είναι συμβατό με άλλα δίκτυα που είτε ανήκουν είτε όχι στην οικογένεια 802. Για την ενοποίηση της αρχιτεκτονικής του 802.11 με ένα παραδοσιακό ενσύρματο τοπικό δίκτυο χρησιμοποιείται ένα επιπλέον στοιχείο γνωστό ως πύλη (**portal**).

Η πύλη είναι το λογικό σημείο μέσω του οποίου τα MSDUs από ένα τοπικό δίκτυο διαφορετικό του 802.11 εισέρχονται στο DS του 802.11. Στην περίπτωση που το DS αποτελείται από τύπους δικτύων της οικογένειας 802 (όπως τα 802.3 και 802.5) η πύλη και το AP αποτελούν το ίδιο στοιχείο. Στο επόμενο σχήμα απεικονίζεται η διασύνδεση πολλών BSSs σε ένα ενσύρματο δίκτυο.



**Σχήμα 2.5: Διασύνδεση ενός ενσύρματου δικτύου με 3 BSSs.**

Το 802.11 αναγνωρίζει τους παρακάτω τύπους κίνησης:

- Απουσία μετακίνησης: Ο τύπος αυτός αναφέρεται σε σταθμούς που δεν μετακινούνται και σε αυτούς που μετακινούνται μέσα σε ένα τοπικό BSS.
- BSS μετακίνηση: Ο τύπος αυτός αναφέρεται σε σταθμούς που μετακινούνται από ένα BSS σε ένα άλλο BSS μέσα στο ίδιο ESS.
- ESS μετακίνηση: Αυτός ο τύπος μετακίνησης αναφέρεται σε σταθμούς που μετακινούνται από ένα BSS σε ένα άλλο BSS το οποίο ανήκει σε διαφορετικό ESS.

Αξίζει να αναφέρουμε ότι το 802.11 ενώ υποστηρίζει ξεκάθαρα τους δύο πρώτους τύπους μετακίνησης, δεν εγγυάται την διατήρηση της σύνδεσης κατά την μετακίνηση σε διαφορετικό ESS.

## 2.2 Η ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΟΥ 802.11

Ενώ η τοπολογία καθορίζει τα αναγκαία μέσα για τη φυσική διασύνδεση του ασύρματου δικτύου, η αρχιτεκτονική καθορίζει τον τρόπο λειτουργίας του δικτύου. Έτσι, η αρχιτεκτονική του 802.11 η οποία εφαρμόζεται σε κάθε σταθμό, αποτελείται από ένα υποστρώμα MAC και 3 διαφορετικά φυσικά στρώματα PHY, τα οποία χρησιμοποιούν διαφορετικές τεχνικές διαμόρφωσης του εκπεμπόμενου σήματος.

### 2.2.1 Το υποστρώμα MAC του 802.11

Σκοπός του επιπέδου MAC είναι να παρέχει λειτουργίες ελέγχου πρόσβασης (στις οποίες συμπεριλαμβάνονται η διευθυνσιοδότηση, ο έλεγχος της σωστής σειράς των πλαισίων κ.ά.) στο μοιραζόμενο φυσικό κανάλι, όπως αυτό καθορίζεται από το Standard. Οι λειτουργίες του επιπέδου MAC αναλύονται λεπτομερώς στο επόμενο κεφάλαιο.

### 2.2.2 Τα φυσικά επίπεδα του 802.11

Το 802.11 καθορίζει διάφορα φυσικά στρώματα, καθώς γίνονται διαθέσιμες νέες τεχνολογίες. Έτσι, ενώ το αρχικό Standard υποστήριζε ρυθμούς μετάδοσης έως 2 Mbps, τα τρέχοντα Standard της οικογένειας 802.11 καθορίζουν φυσικά στρώματα με ρυθμούς μετάδοσης μέχρι και 54 Mbps, χρησιμοποιώντας κατάλληλες τεχνικές διαμόρφωσης. Τα τρία φυσικά επίπεδα του 802.11 θα αναπτυχθούν περισσότερο διεξοδικά σε επόμενο κεφάλαιο.

### 2.2.3 Υπηρεσίες του 802.11

Το 802.11 καθορίζει τις υπηρεσίες που παρέχουν τις απαιτούμενες λειτουργίες για την αποστολή των MSDU ανάμεσα σε δύο ομότιμα στρώματα LLC. Αυτές οι υπηρεσίες, που υλοποιεί το στρώμα MAC, χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- Station Services: Σε αυτές περιλαμβάνονται οι Authentication, Deauthentication και Privacy.
- Distribution System Services: Σε αυτές περιλαμβάνονται οι Association, Disassociation, Distribution, Integration και Reassociation.

#### 2.2.3.1 Station Services

Το 802.11 καθορίζει υπηρεσίες για την παροχή λειτουργιών μεταξύ των σταθμών. Για την παροχή αυτών των λειτουργιών οι σταθμοί πρέπει να στείλουν και να λάβουν MSDUs και να καθορίσουν επαρκή επίπεδα ασφάλειας. Οι υπηρεσίες αυτές αναφέρονται στη συνέχεια.

#### **Authentication**

Κάθε σταθμός, είτε είναι μέρος ενός IBSS ή ενός ESS δικτύου, πρέπει να χρησιμοποιήσει την υπηρεσία της 'επικύρωσης' (authentication) πριν την εγκατάσταση μιας σύνδεσης (η οποία στο 802.11 αναφέρεται ως 'σύνδεση' ή association) με έναν άλλον σταθμό με τον οποίο θέλει να επικοινωνήσει. Οι σταθμοί που εκτελούν την υπηρεσία της authentication στέλνουν ένα 'unicast management authentication' πλαίσιο στον αντίστοιχο σταθμό.

Το 802.11 καθορίζει τις ακόλουθες δύο υπηρεσίες επικύρωσης:

- Επικύρωση ανοικτού συστήματος (open system authentication): Αυτή είναι η προκαθορισμένη μέθοδος επικύρωσης του 802.11. Σύμφωνα με αυτή, ο σταθμός που θέλει να χρησιμοποιήσει την υπηρεσία στέλνει ένα πλαίσιο ελέγχου με την ταυτότητα του αποστολέα και ο σταθμός που το λαμβάνει στέλνει ως απάντηση ένα πλαίσιο με το οποίο αναγνωρίζει ή όχι την ταυτότητα του αποστολέα.
- Shared key authentication: Αυτός ο τύπος επικύρωσης προϋποθέτει ότι όλοι οι σταθμοί έχουν λάβει μέσω ενός καναλιού (ανεξάρτητου από το 802.11 δίκτυο) ένα μυστικό κλειδί, με τη χρήση του οποίου λαμβάνει χώρα η



επικύρωση. Για την χρήση αυτής της μεθόδου εφαρμόζεται ο αλγόριθμος **WEP** (Wired Equivalent Privacy).

### **De-authentication**

Όταν ένας σταθμός θέλει να αποσυνδεθεί (disassociate) από έναν άλλον σταθμό χρησιμοποιεί την υπηρεσία που καλείται 'deauthentication'. Η υπηρεσία αυτή είναι μια ειδοποίηση και δεν μπορεί να απορριφθεί από έναν σταθμό που λαμβάνει το ανάλογο πλαίσιο ελέγχου το οποίο ενημερώνει για την επικείμενη αποσύνδεση του σταθμού-αποστολέα.

### **Privacy**

Η υπηρεσία αυτή εφαρμόζεται σε όλα τα πλαίσια δεδομένων και σε μερικά πλαίσια ελέγχου επικύρωσης και βασίζεται στον αλγόριθμο WEP. Ο αλγόριθμος αυτός κρυπτογραφεί τα μηνύματα (με την χρήση του αλγορίθμου κρυπτογράφησης RC4) που στέλνονται δια μέσου του ασύρματου δικτύου. Αξίζει να αναφέρουμε ότι όλες οι 'επικεφαλίδες' (headers) των πλαισίων του φυσικού στρώματος δεν κρυπτογραφούνται, ώστε όλοι οι σταθμοί να μπορούν να κάνουν λήψη των πληροφοριών ελέγχου για την σωστή διαχείριση του δικτύου.

### 2.2.3.2 Distribution System Services

Οι υπηρεσίες του DS, όπως καθορίζονται από το 802.11, παρέχει λειτουργίες δια μέσου του DS. Οι υπηρεσίες για την σωστή μεταφορά των MSDUs μέσω των DS είναι οι εξής:

#### **Association**

Κάθε σταθμός πρέπει αρχικά να θέσει σε λειτουργία την υπηρεσία της σύνδεσης (association) με ένα AP πριν στείλει οποιαδήποτε πληροφορία μέσω του DS. Η σύνδεση αυτή αντιστοιχίζει έναν σταθμό στο DS μέσω ενός AP. Κάθε σταθμός μπορεί να συνδεθεί με ένα μόνο AP, ενώ ένα AP μπορεί να συνδεθεί με περισσότερους του ενός σταθμούς.

#### **Disassociation**

Η υπηρεσία αυτή τερματίζει μια υπάρχουσα σύνδεση. Οι σταθμοί πρέπει να αποσυνδέονται όταν εγκαταλείπουν ένα δίκτυο και τα AP όταν χρειάζονται συντήρηση.

#### **Distribution**

Ένας σταθμός χρησιμοποιεί την υπηρεσία αυτή κάθε φορά που θέλει να στείλει MAC πλαίσια δια μέσου του DS. Το 802.11 δεν καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο το DS διανέμει τα δεδομένα. Η μόνη πληροφορία που δίνει η υπηρεσία στο DS είναι ο καθορισμός του BSS για το οποίο προορίζεται το πλαίσιο.

#### **Integration**

Η υπηρεσία της ενοποίησης (integration) κάνει εφικτή την διανομή των MAC πλαισίων μέσω μιας πύλης (portal) μεταξύ ενός DS και ενός LAN που δεν ανήκει στην οικογένεια 802.11.

#### **Re-association**

Η υπηρεσία αυτή της επανασύνδεσης (reassociation) καθιστά ικανό ένα σταθμό να αλλάζει την τρέχουσα κατάσταση σύνδεσης από ένα AP σε ένα άλλο. Με τον τρόπο αυτό υποστηρίζεται η μετάβαση μεταξύ διαφορετικών BSS.

Το 802.11 υποστηρίζει, μεταξύ των άλλων υπηρεσιών, την περιαγωγή (**roaming**) ενός σταθμού μεταξύ πολλών APs, τα οποία χρησιμοποιούν το ίδιο ή διαφορετικό κανάλι. Για την υποστήριξη της λειτουργίας αυτής, κάθε AP μεταδίδει σε

συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα (συνήθως κάθε 100 ms) ένα σήμα (που καλείται beacon signal) και το οποίο ενημερώνει τον κάθε σταθμό για την τρέχουσα ισχύ της σύνδεσής του με το ανάλογο AP. Αν ο σταθμός ανιχνεύσει ένα ασθενές σήμα, μπορεί να εφαρμόσει την υπηρεσία της επανασύνδεσης, ώστε να συνδεθεί με ένα AP που να εκπέμπει ένα ισχυρότερο σήμα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΤΟ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑ MAC ΤΟΥ IEEE 802.11

#### 3.1 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΤΟΥ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ MAC

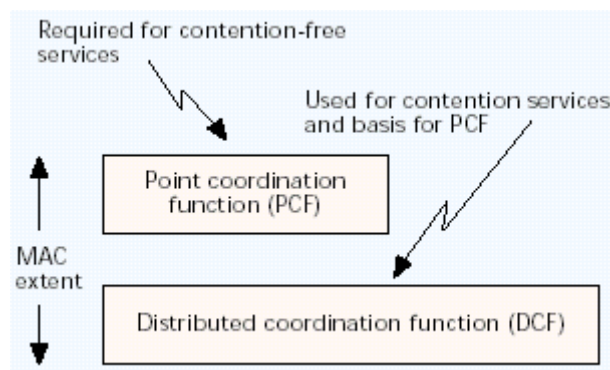
Κάθε σταθμός και AP σε ένα 802.11 WLAN υλοποιεί τις υπηρεσίες του υποστρώματος MAC η οποία παρέχει την δυνατότητα στις ομότιμες (peer) LLC οντότητες (entities) να ανταλλάσσουν MSDUs (MAC Service Data Units) μεταξύ των MAC SAPs (Service Access Points). Το υπόστρωμα MAC παρέχει 3 κύριες λειτουργίες:

- Πρόσβαση στο ασύρματο μέσο
- Προσχώρηση (joining) σε ένα δίκτυο
- Παροχή των λειτουργιών ‘authentication’ και ‘privacy’

#### 3.2 ΠΡΟΣΒΑΣΗ ΣΤΟ ΑΣΥΡΜΑΤΟ ΜΕΣΟ

Πριν ξεκινήσει η μετάδοση ενός πλαισίου, ένας σταθμός πρέπει πρώτα να επιτύχει την πρόσβαση στο μέσο. Για να το επιτύχει αυτό υπάρχουν δύο μέθοδοι, όπως καθορίζονται από την αρχιτεκτονική του Standard (σχήμα 3.1):

- **DCF** (Distributed Coordination Function): Το 802.11 καθορίζει τις επόμενες δύο κατηγορίες DCF:
  - **DCF CSMA/CA**: Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου αυτής αυτού βασίζεται στον ανταγωνισμό και για την πρόσβαση στο μέσο χρησιμοποιείται η τεχνική CSMA/CA (Carrier-Sense Multiple Access with Collision Avoidance)
  - **DCF RTS/CTS**: Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου αυτής στηρίζεται στην πρόσβαση στο μέσο με την βοήθεια πακέτων ‘αίτησης’ (RTS) και ‘άδειας’ (CTS) χρήσης του μέσου
- **PCF** (Point Coordination Function): Το πρωτόκολλο αυτό στηρίζεται στην πρόσβαση στο μέσο χωρίς ανταγωνισμό (χρήσιμο για infrastructure δίκτυα), ενώ κύριο ρόλο παίζει ένας ελεγκτής ο οποίος καλείται **PC** (Point Coordinator) και βρίσκεται στα APs.

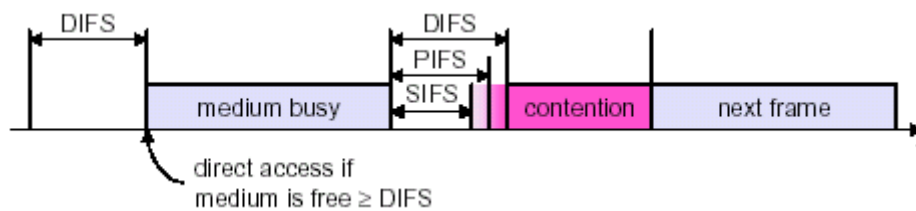


Σχήμα 3.1: Η αρχιτεκτονική του επιπέδου MAC του 802.11.

### 3.3 ΧΡΟΝΙΚΑ ΔΙΑΣΤΗΜΑΤΑ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ

Το IEEE 802.11 καθορίζει την ύπαρξη χρονικών διαστημάτων για την μεσολάβηση μεταξύ των διαφόρων λειτουργιών αποστολής και λήψης πλαισίων ενός σταθμού. Το χρονικό διάστημα μεταξύ των πλαισίων (frames) καλείται **IFS** (Inter Frame Space). Τα 4 διαφορετικά IFSs που χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν τα επίπεδα προτεραιότητας για την πρόσβαση στο ασύρματο μέσο φαίνονται στο επόμενο σχήμα. Η αναφορά γίνεται ξεκινώντας από αυτό με την μικρότερη διάρκεια:

- SIFS**: Short InterFrame Space
- PIFS**: PCF InterFrame Space
- DIFS**: DCF InterFrame Space
- EIFS**: Extended InterFrame Space



**Σχήμα 3.2: Τα 3 κυριότερα IFS που χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό των διάφορων πλαισίων που μετακινούνται μέσα στο 802.11 δίκτυο.**

Τα διαφορετικά αυτά χρονικά διαστήματα πρέπει να είναι ανεξάρτητα από το ρυθμό bit ενός σταθμού, ενώ τα ίδια διαστήματα πρέπει να παραμένουν αμετάβλητα, σύμφωνα με τιμές που καθορίζονται από το φυσικό στρώμα. Στη συνέχεια αναλύουμε τις περιπτώσεις στις οποίες χρησιμοποιείται το κάθε IFS (η χρήση τους θα φανεί καλύτερα στις επόμενες παραγράφους):

- **SIFS**: Χρησιμοποιείται για τα ACK πλαίσια, τα CTS πλαίσια, το δεύτερο ή ένα διαδοχικό MPDU ενός 'fragment burst' και από έναν σταθμό που αποκρίνεται σε κάθε διαλογή (polling) μέσω του PCF. Το SIFS χρησιμοποιείται από έναν σταθμό όταν αυτός έχει καταλάβει το μέσο και χρειάζεται να το κρατήσει για την διάρκεια της μετάδοσης ενός πλαισίου. Έχοντας τη μικρότερη διάρκεια, εμποδίζει τους άλλους σταθμούς που θέλουν να μεταδώσουν, καθώς αυτοί πρέπει να περιμένουν για μεγαλύτερο διάστημα μέχρι να ανιχνεύσουν ότι το μέσο είναι ελεύθερο. Έτσι, δίνεται η δυνατότητα στον σταθμό που ήδη μεταδίδει να ολοκληρώσει τη διαδικασία μετάδοσης των πλαισίων που έχει προς μετάδοση.
- **PIFS**: Το PIFS μπορεί να χρησιμοποιηθεί από έναν σταθμό μόνο κατά τη λειτουργία του PCF για να κερδίσει την πρόσβαση στο μέσο, κατά την έναρξη του CFP. Ο υπολογισμός του γίνεται με βάση τον τύπο:

$$\mathbf{PIFS = SIFSTime + SlotTime}$$

- **DIFS**: Το DIFS μπορεί να χρησιμοποιείται από σταθμούς που λειτουργούν με DCF για την μετάδοση πλαισίων δεδομένων (MPDUs) και πλαισίων διαχείρισης (MMPDUs). Ο υπολογισμός του γίνεται με βάση τον τύπο:

$$\mathbf{DIFS = SIFSTime + 2 \times SlotTime}$$

- **EIFS**: Το EIFS μπορεί να χρησιμοποιείται από σταθμούς που λειτουργούν με DCF, όποτε το φυσικό στρώμα υποδείξει στο MAC ότι η μετάδοση ενός πλαισίου είχε ξεκινήσει αλλά δεν κατέληξε στην σωστή παραλαβή ενός ολόκληρου MAC πλαισίου με τη σωστή τιμή FCS (Frame Check Sequence, το οποίο είναι ένα πεδίο στο πλαίσιο MAC που χρησιμοποιείται για έλεγχο λαθών με τη βοήθεια του αλγορίθμου CRC). Ο υπολογισμός του προκύπτει από τα SIFS, DIFS και τον χρόνο που χρειάζεται για να μεταδοθεί ένα ACK πλαίσιο ελέγχου με ρυθμό 1 Mbps, σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\text{EIFS} = \text{SIFSTime} + (8 \times \text{ACKSize}) + \text{PreambleLength} + \text{PLCPHeaderLength} + \text{DIFS}$$

Οι τιμές που δίνονται από το Standard, ανάλογα με το φυσικό επίπεδο που χρησιμοποιείται, φαίνονται στον επόμενο πίνακα.

**Πίνακας 3.1**

Interframe Space	DSSS	FHSS	DFIR
<b>SIFS</b>	10 μs	28 μs	7 μs
<b>PIFS</b>	30 μs	78 μs	15 μs
<b>DFIS</b>	50 μs	128 μs	23 μs
<b>Slot time</b>	20 μs	50 μs	8 μs

### 3.4 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ DCF

Στην παράγραφο αυτή θα αναπτύξουμε τις δύο μεθόδους πρόσβασης DCF που καθορίζονται από το 802.11 Standard, δίνοντας ιδιαίτερη σημασία στην μέθοδο με χρήση της τεχνικής CSMA/CA, καθώς ήταν αυτή που χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις που έλαβαν χώρα στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

#### 3.4.1 Μηχανισμός ανίχνευσης φέροντος

Ένας συνδυασμός φυσικού και εικονικού μηχανισμού ανίχνευσης φέροντος ενεργοποιεί τη συνιστώσα ‘MAC coordination’ για να καθορίσει αν το μέσο είναι απασχολημένο ή αδρανές. Κάθε φυσικό στρώμα που καθορίζεται από το 802.11 παρέχει έναν συγκεκριμένο τρόπο ανίχνευσης του μέσου. Το αποτέλεσμα από την εκτίμηση του φυσικού καναλιού στέλνεται από την ‘PHY coordination’ στην ‘MAC coordination’ ως μέρος της πληροφορίας για τον καθορισμό της κατάστασης του μέσου.

Η ‘MAC coordination’ εκτελεί τον εικονικό μηχανισμό ανίχνευσης φέροντος που στηρίζεται στις πληροφορίες κράτησης που υπάρχουν στο πεδίο ‘Duration’ σε όλα τα πλαίσια RTS και CTS. Η πληροφορία αυτή ανακοινώνει σε όλους τους σταθμούς αν ένας σταθμός πρόκειται να χρησιμοποιήσει το μέσο. Η ‘MAC coordination’ ελέγχει τα πεδία ‘Duration’ σε όλα τα MAC πλαίσια και τοποθετεί την πληροφορία αυτή στο NAV (Network Allocation Vector) κάθε σταθμού αν η τιμή είναι μεγαλύτερη από την τρέχουσα NAV που έχει ο σταθμός. Ο NAV λειτουργεί ως ένας μετρητής, ξεκινώντας

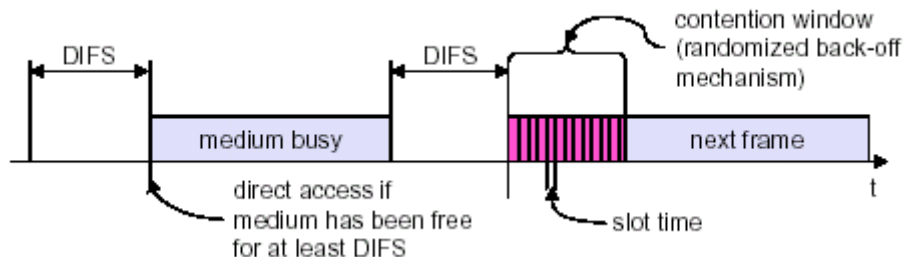
με μια τιμή ίση με την τιμή που υπήρχε στο πεδίο 'Duration' του τελευταίου πλαισίου που ανιχνεύθηκε στο μέσο και μετρώντας αντίστροφα προς το 0.

Η ανίχνευση του φυσικού στρώματος και η λειτουργία του NAV παρέχουν ικανές πληροφορίες στο υποστρώμα MAC για να αποφασίσει την κατάσταση του καναλιού. Για παράδειγμα, το φυσικό στρώμα μπορεί να έχει ανιχνεύσει ότι δεν υπάρχουν τρέχουσες μεταδόσεις στο μέσο, παρ' όλα η τιμή στο NAV μπορεί να δηλώνει ότι μία μετάδοση που έλαβε χώρα αποτρέπει όλες τις μεταδόσεις για ένα καθορισμένο χρονικό διάστημα. Στην περίπτωση αυτή το MAC θα αναβάλλει όλες τις μεταδόσεις μέχρι να εκπνεύσει η περίοδος που καθορίζεται στο πεδίο 'Duration'.

### 3.4.2 Λειτουργία του DCF με τη μέθοδο CSMA/CA

Ο βασικός μηχανισμός πρόσβασης καλείται DCF και ουσιαστικά είναι ένας μηχανισμός CSMA/CA (σχήμα 3.3). Ένα πρωτόκολλο CSMA λειτουργεί, γενικά, ως εξής: Ένας σταθμός που θέλει να μεταδώσει, αρχικά, ανιχνεύει το μέσο. Αν το μέσο είναι κατειλημμένο τότε ο σταθμός αναβάλλει την μετάδοση για αργότερα. Αν το μέσο ανιχνευθεί ελεύθερο τότε ο σταθμός επιτρέπεται να μεταδώσει. Πιο συγκεκριμένα η σειρά που ακολουθείται κατά την λειτουργία του CSMA/CA είναι η εξής:

1. Ένας σταθμός που θέλει να μεταδώσει ανιχνεύει αρχικά το μέσο για να διαπιστώσει αν ένας άλλος σταθμός μεταδίδει. Αν το μέσο είναι:
  - κατειλημμένο, αναβάλλει την μετάδοση μέχρι το τέλος της τρέχουσας μετάδοσης. Μετά την αναβολή (deferral) ή πριν προσπαθήσει να μεταδώσει αμέσως μετά από μια επιτυχή μετάδοση, ο σταθμός πρέπει να επιλέξει ένα τυχαίο διάστημα οπισθοχώρησης (backoff) πριν ξαναπροσπαθήσει να μεταδώσει.
  - ελεύθερο για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (το οποίο είναι ίσο με DIFS) τότε επιτρέπεται στον σταθμό να μεταδώσει.
2. Ο σταθμός λήψης ελέγχει το CRC του ληφθέντος πακέτου και στέλνει ένα πακέτο επαλήθευσης (ACK). Η λήψη του πακέτου επαλήθευσης δηλώνει στον πομπό ότι δεν συνέβη σύγκρουση. Αν ο αποστολέας δεν λάβει το πακέτο επαλήθευσης ξαναστέλνει το τεμάχιο μέχρι να λάβει την επαλήθευση. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για ένα συγκεκριμένο αριθμό επαναμεταδόσεων.

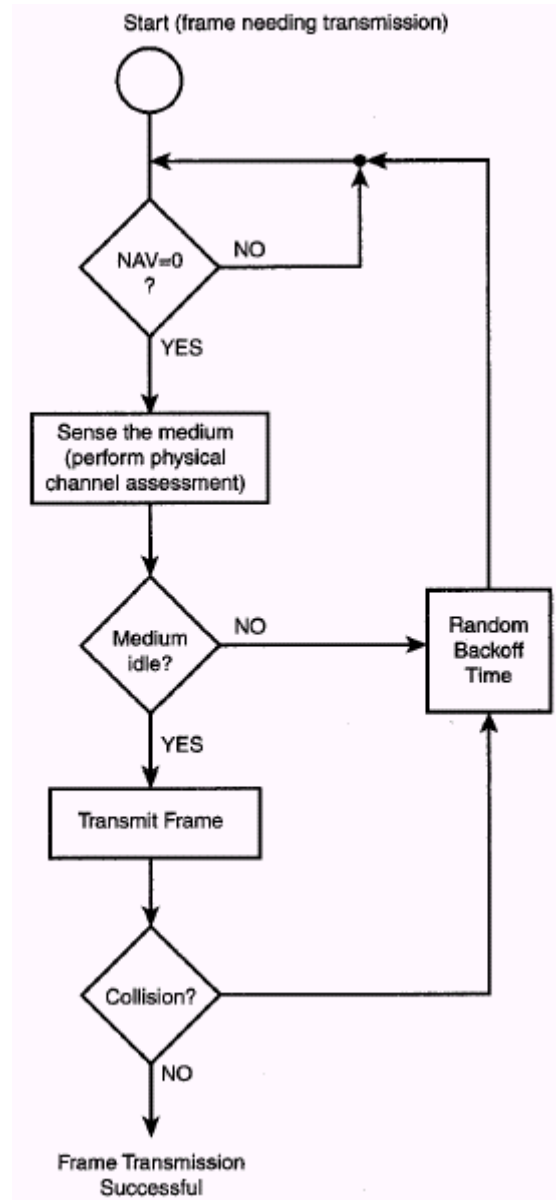


**Σχήμα 3.3: Σχηματική αναπαράσταση του βασικού μηχανισμού πρόσβασης DCF.**

Οι τυχόν συγκρούσεις που θα συμβούν πρέπει να ανιχνευθούν από το επίπεδο MAC ώστε η επαναμετάδοση των πακέτων να γίνει από το επίπεδο αυτό και όχι από κάποιο ανώτερο, γεγονός το οποίο θα προκαλούσε σημαντική καθυστέρηση.

Σε σταθμούς που χρησιμοποιούν στο φυσικό στρώμα την τεχνική της μεταπήδησης συχνότητας (FH: Frequency Hopping), ο έλεγχος του καναλιού χάνεται στο όριο του

‘dwell time’ και ο σταθμός πρέπει να ανταγωνιστεί για το κανάλι με το τέλος του παραπάνω διαστήματος. Είναι, επίσης, απαραίτητο οι σταθμοί που χρησιμοποιούν FH να έχουν ολοκληρώσει την μετάδοση ενός ολόκληρου MPDU και του αντίστοιχου ACK (αν απαιτείται) πριν το όριο του ‘dwell time’.



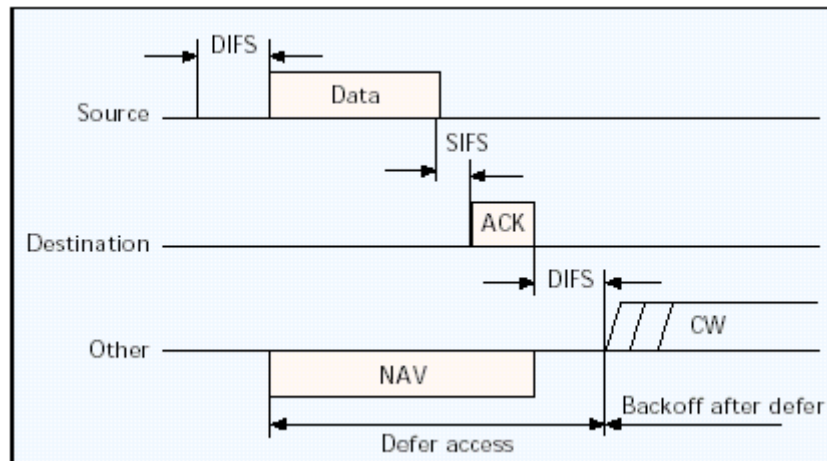
**Σχήμα 3.4: Διάγραμμα ροής της λειτουργίας DCF σύμφωνα με τον αλγόριθμο CSMA/CA.**

### 3.4.3 Διαδικασία επαλήθευσης από το υποστρώμα MAC

Ένας σταθμός πρέπει να απαντήσει με μια επαλήθευση αν το CRC του ληφθέντος πλαισίου είναι σωστό. Αυτή η τεχνική είναι γνωστή ως ‘θετική επαλήθευση’. Η μη λήψη ενός αναμενόμενου ACK πλαισίου είναι ένδειξη λάθους για τον σταθμό μετάδοσης. Παρ’ όλα αυτά, ο σταθμός λήψης μπορεί να έχει λάβει σωστά το πλαίσιο και το λάθος να έχει συμβεί στην λήψη του ACK, γεγονός που δεν μπορεί να διακρίνει ο σταθμός που ξεκίνησε την ανταλλαγή του πλαισίου.

Ύστερα από μια επιτυχή λήψη ενός πλαισίου που χρειάζεται επαλήθευση, η μετάδοση του ACK πλαισίου θα ξεκινήσει ύστερα από μια περίοδο SIFS (ώστε να μην υπάρχει ανταγωνισμός) χωρίς να υπολογίζεται αν το μέσο είναι κατειλημμένο ή ελεύθερο.

Ένας σταθμός πρέπει να περιμένει για ένα χρονικό διάστημα το οποίο αναφέρεται ως 'ACKTimeout' χωρίς να έχει γίνει λήψη ενός ACK πλαισίου πριν προχωρήσει στο συμπέρασμα πως η μετάδοση του MPDU απέτυχε. Στο επόμενο σχήμα φαίνεται η λειτουργία της θετικής επαλήθευσης.



Σχήμα 3.5: Σχηματική αναπαράσταση της τεχνικής της θετικής επαλήθευσης.

### 3.4.4 Διαδικασία υποχώρησης

Αν το μέσο είναι κατειλημμένο, ο σταθμός πρέπει να αναβάλλει (defer) τη μετάδοση μέχρι το μέσο να γίνει ελεύθερο:

- για χρονική περίοδο ίση με DIFS, όταν το τελευταίο πλαίσιο που ανιχνεύθηκε στο μέσο λήφθηκε σωστά
- για διάστημα ίσο με EIFS, όταν το τελευταίο πλαίσιο που ανιχνεύθηκε στο μέσο δεν λήφθηκε σωστά

Μετά τα παραπάνω διαστήματα ο σταθμός θα δημιουργήσει μια τυχαία περίοδο υποχώρησης (**backoff**) για έναν επιπρόσθετο χρόνο (ο οποίος χωρίζεται σε σχισμές) πριν την μετάδοση, εκτός αν ο μετρητής υποχώρησης (backoff timer) περιέχει ήδη μια μη-μηδενική τιμή οπότε και η επιλογή του τυχαίου αριθμού δεν λαμβάνει χώρα. Αυτή η διαδικασία ελαχιστοποιεί τις συγκρούσεις κατά την διάρκεια του ανταγωνισμού (contention) μεταξύ πολλών σταθμών οι οποίοι ανέβαλλαν μία διαδικασία. Ο χρόνος υποχώρησης (που θα αποτελέσει την αρχική τιμή του μετρητή υποχώρησης) επιλέγεται με βάση τον τύπο:

$$\text{Backoff Time} = \text{Random} \times \text{SlotTime}$$

όπου Random είναι ένας ψευδοτυχαίος αριθμός που επιλέγεται από μία ομοιόμορφη κατανομή στο διάστημα  $[0, CW]$ . Το CW αντιπροσωπεύει το παράθυρο ανταγωνισμού και η λειτουργία του αναφέρεται στη συνέχεια.

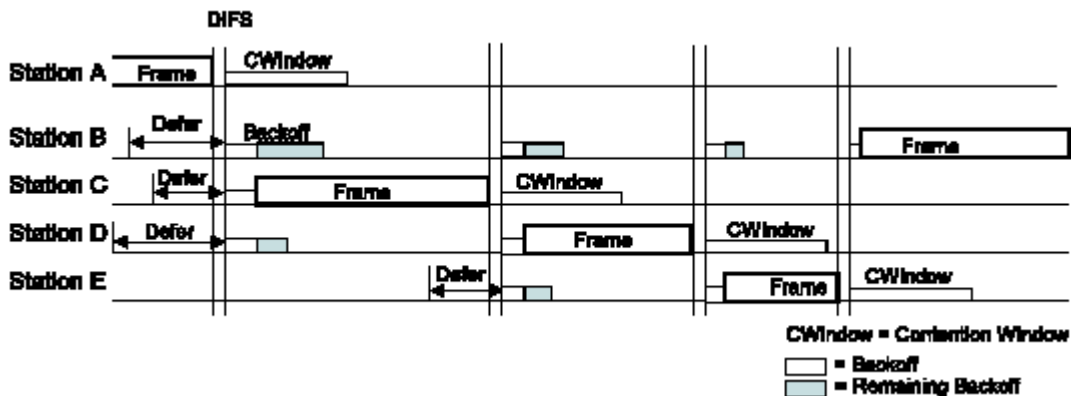


Ένας σταθμός που εκτελεί την διαδικασία υποχώρησης θα χρησιμοποιήσει τον μηχανισμό ανίχνευσης φέροντος (carrier sense) κατά τη διάρκεια κάθε σχισμής υποχώρησης (backoff slot). Αν δεν σημειωθεί καμία κίνηση στο μέσο κατά την περίοδο μιας συγκεκριμένης σχισμής υποχώρησης, τότε κατά την διαδικασία της υποχώρησης μειώνεται ο χρόνος υποχώρησης κατά SlotTime.

Αν το μέσο διαπιστωθεί ότι είναι απασχολημένο σε κάθε στιγμή κατά τη διάρκεια μιας σχισμής υποχώρησης τότε η διαδικασία της υποχώρησης εγκαταλείπεται, δηλαδή ο μετρητής υποχώρησης δεν μειώνεται για τη σχισμή αυτή. Η μετάδοση μπορεί να ξεκινήσει όταν ο μετρητής υποχώρησης φτάσει το 0.

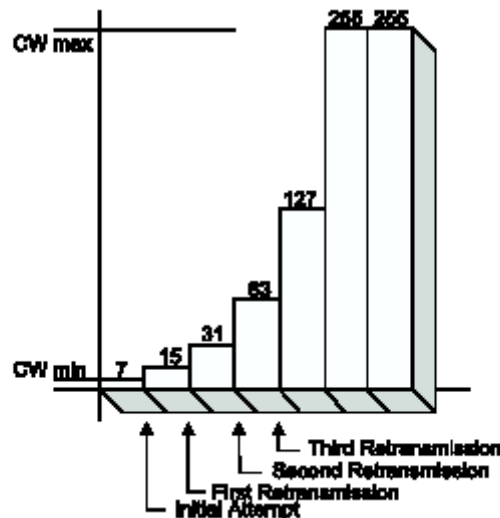
Στην περίπτωση επιτυχώς επαληθευμένων μεταδόσεων η διαδικασία της υποχώρησης ξεκινάει με το τέλος του ληφθέντος ACK πλαισίου. Στην περίπτωση ανεπιτυχών μεταδόσεων που απαιτούν επαλήθευση η διαδικασία της υποχώρησης ξεκινάει με το τέλος του χρόνου εκπνοής (**timeout interval**) του ληφθέντος ACK. Αν η μετάδοση είναι επιτυχής η τιμή του CW επιστρέφει στην τιμή  $CW_{min}$  πριν επιλεγθεί το νέο τυχαίο διάστημα υποχώρησης.

Το αποτέλεσμα της διαδικασίας υποχώρησης είναι ότι όταν πολλοί σταθμοί αναβάλλουν την μετάδοση και μπαίνουν στη διαδικασία της τυχαίας υποχώρησης, τότε ο σταθμός που επιλέγει το μικρότερο διάστημα υποχώρησης χρησιμοποιώντας την τυχαία συνάρτηση θα κερδίσει τον ανταγωνισμό.



**Σχήμα 3.6:** Η διαδικασία της υποχώρησης στην περίπτωση που 5 σταθμοί θέλουν να μεταδώσουν. Ο Α έχει μεταδώσει επιτυχώς το πλαίσιο του και αρχικοποιεί το CW. Ο Β μετά από ένα DIFS ανιχνεύει το μέσο ελεύθερο αλλά δεν μεταδίδει καθώς ο μετρητής υποχώρησης δεν έχει φτάσει στο 0 (κάτι που συμβαίνει με τον C).

Το Παράθυρο Ανταγωνισμού CW (Contention Window) παίρνει αρχικά μία αρχική τιμή ίση με  $CW_{min}$ . Το CW θα πάρει την επόμενη τιμή κάθε φορά που μία ανεπιτυχής προσπάθεια για μετάδοση ενός MPDU γίνει η αιτία να αυξηθεί ο μετρητής επανάληψης (retry counter) του σταθμού, μέχρι το CW να φτάσει την τιμή  $CW_{max}$ . Από τη στιγμή που φτάσει την τιμή  $CW_{max}$ , το CW θα παραμείνει εκεί μέχρι να γίνει reset. Η συνηθέστερη περίπτωση στην οποία το CW θα γίνει reset στην τιμή  $CW_{min}$  είναι ύστερα από κάθε επιτυχή μετάδοση ενός MSDU ή MMPDU. Η εκθετική αύξηση του CW δίνεται στο επόμενο σχήμα.



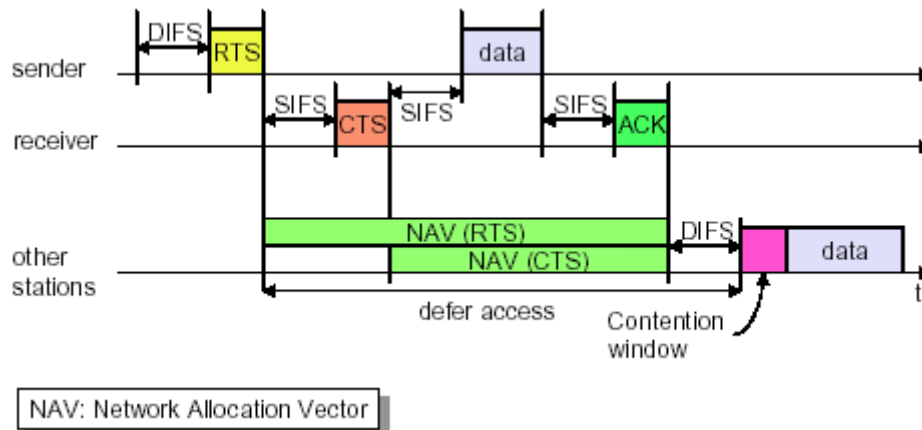
**Σχήμα 3.7:** Η εκθετική αύξηση του CW μετά από ανεπιτυχείς μεταδόσεις.

Το προηγούμενο σχήμα δίνει τις διαδοχικές τιμές του CW μετά από αναμεταδόσεις ενός σταθμού. Ο λόγος που το CW αυξάνεται εκθετικά είναι για να ελαχιστοποιηθούν οι συγκρούσεις και να μεγιστοποιηθεί το throughput τόσο για χαμηλή όσο και υψηλή χρησιμοποίηση του καναλιού. Για χαμηλή χρησιμοποίηση, οι σταθμοί δεν χρειάζεται να περιμένουν για μεγάλο χρονικό διάστημα πριν μεταδώσουν ένα πλαίσιο. Μετά την πρώτη ή την δεύτερη προσπάθεια, ένας σταθμός θα καταφέρει να μεταδώσει επιτυχώς μέσα σε ένα μικρό χρονικό διάστημα. Αν, όμως, η χρησιμοποίηση του δικτύου είναι υψηλή το πρωτόκολλο θα αναγκάσει τους σταθμούς να αναμένουν για μεγαλύτερες χρονικές περιόδους για να μειώσουν την πιθανότητα ταυτόχρονης μετάδοσης από 2 ή περισσότερους σταθμούς. Για υψηλή χρησιμοποίηση, η τιμή του CW αυξάνεται σε ιδιαίτερα υψηλές τιμές.

### 3.4.5 Λειτουργία του DCF με την χρήση RTS/CTS

Στην περίπτωση αυτή σημαντικό ρόλο παίζει ο εικονικός μηχανισμός ανίχνευσης που παρέχεται από το υποστρώμα MAC. Η διαδικασία για την αποστολή πακέτων με την συγκεκριμένη μέθοδο φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, ενώ η σειρά που ακολουθείται είναι η εξής:

1. Ο σταθμός που θέλει να στείλει δεδομένα στέλνει αρχικά ένα πακέτο RTS (Request To Send) με τις παραμέτρους κράτησης (reservation) του μέσου, αφού πρώτα περιμένει για ένα DIFS. Η κράτηση καθορίζει το χρονικό διάστημα που χρειάζεται για την αποστολή των δεδομένων.
2. Ο σταθμός λήψης επαληθεύει-αφού πρώτα περιμένει για ένα SIFS-μέσω ενός πακέτου CTS (Clear To Send) ότι είναι έτοιμος να κάνει λήψη των δεδομένων.
3. Ο σταθμός αποστολής μπορεί τώρα να στείλει άμεσα τα δεδομένα τα οποία θα επιβεβαιωθούν μέσω ACK.
4. Οι άλλοι σταθμοί αποθηκεύουν τις αλλαγές στις κρατήσεις του στρώματος που διανέμονται μέσω των RTS και CTS.



**Σχήμα 3.8: Λειτουργία DCF με αποστολή και λήψη πακέτων RTS και CTS.**

Η ‘MAC coordination’ εκτελεί την εικονική ανίχνευση φέροντος η οποία βασίζεται στην κρατημένη πληροφορία που βρίσκεται στο πεδίο διάρκειας (Duration) όλων των πλαισίων. Η πληροφορία αυτή αναγγέλλει (σε όλους τους σταθμούς) την επικείμενη χρησιμοποίηση του μέσου από έναν σταθμό. Η ‘MAC coordination’ ελέγχει το πεδίο διάρκειας σε όλα τα MAC πλαίσια και τοποθετεί την πληροφορία αυτή στον NAV (Network Allocation Vector) του σταθμού εάν η τιμή είναι μεγαλύτερη από την τρέχουσα τιμή του NAV.

Ο NAV λειτουργεί ως ένας χρονομετρητής, ξεκινώντας με μια τιμή ίση με αυτή του πεδίου διάρκειας (Duration Field) του τελευταίου πλαισίου που μεταδόθηκε και ανιχνεύθηκε στο μέσο και μετρώντας αντίστροφα προς το 0. Από την στιγμή που ο NAV φτάσει το 0 (κάτι που δηλώνει ότι το μέσο δεν είναι κατειλημμένο), ο σταθμός είναι έτοιμος να μεταδώσει αν και εφόσον η ‘PHY coordination’ υποδεικνύει ότι το κανάλι είναι ελεύθερο.

Ο NAV υποστηρίζει μια πρόβλεψη για την μελλοντική κίνηση στο δίκτυο η οποία βασίζεται στην πληροφορία διάρκειας που ανακοινώνεται στα RTS/CTS πλαίσια πριν από την ανταλλαγή των δεδομένων. Η πληροφορία της διάρκειας είναι επίσης διαθέσιμη στις MAC επικεφαλίδες (headers) όλων των πλαισίων που στέλνονται κατά τη διάρκεια του CP (εκτός των PS-Poll Control frames).

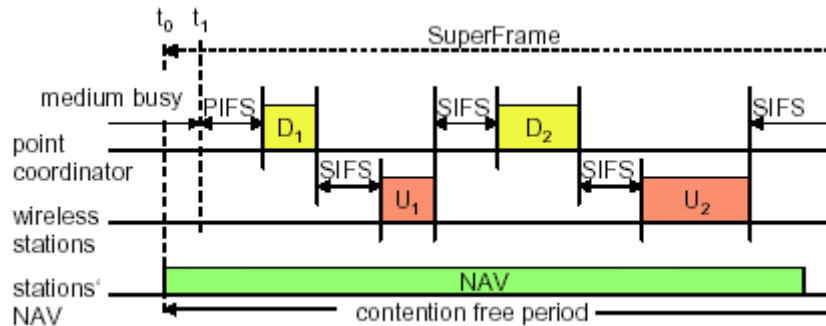
### 3.5 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ PCF

Η εναλλακτική μέθοδος PCF χρησιμοποιείται μόνο σε ‘infrastructure’ δίκτυα. Η μέθοδος αυτή κάνει χρήση ενός ελεγκτή που καλείται **PC** (Point Coordinator), ο οποίος λειτουργεί στο AP ενός BSS και καθορίζει ποιος σταθμός έχει την άδεια για να μεταδώσει την τρέχουσα χρονική στιγμή. Η λειτουργία είναι ουσιαστικά αυτή της διαλογής (polling), με το PC να παίζει το ρόλο του ‘polling master’.

Το PCF χρησιμοποιεί τον εικονικό μηχανισμό ανίχνευσης φέροντος υποβοηθούμενο από ένα μηχανισμό ελέγχου προτεραιότητας. Ο PCF διανέμει τις απαραίτητες πληροφορίες μέσω των πλαισίων διαχείρισης ‘Beacon’ για να κερδίσει τον έλεγχο του μέσου θέτοντας σε λειτουργία το Network Allocation Vector (NAV). Συγκεκριμένα, ο PC ανιχνεύει το μέσο στην αρχή κάθε περιόδου **CFP** (Contention Free Period). Αν το μέσο είναι ελεύθερο για διάστημα ίσο με PIFS, το PC στέλνει ένα πλαίσιο Beacon, ώστε οι σταθμοί να ενημερώσουν τα NAV για την διάρκεια της CFP.

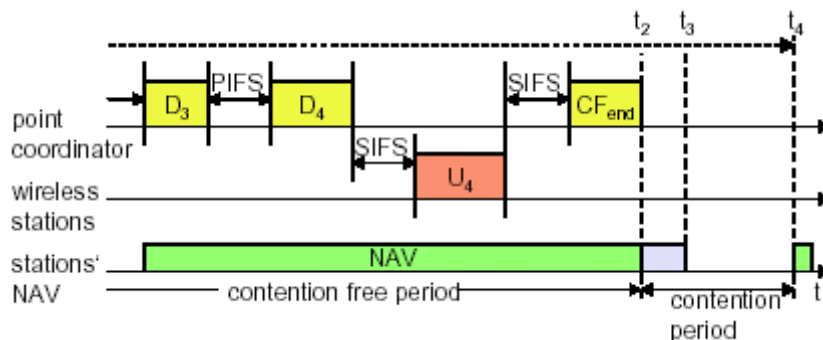
Επιπρόσθετα, όλες οι μεταδόσεις πλαισίων κάτω από τη λειτουργία του PCF μπορούν να χρησιμοποιούν ένα IFS το οποίο έχει μικρότερη διάρκεια από το

αντίστοιχο IFS που χρησιμοποιείται με τη DCF. Αυτό σημαίνει ότι η κίνηση που στηρίζεται στη χρήση της PCF έχει προτεραιότητα στον έλεγχο του μέσου για σταθμούς που βρίσκονται σε άλληλοκαλυπτόμενα (overlapping) BSSs και κάνουν χρήση της DCF.



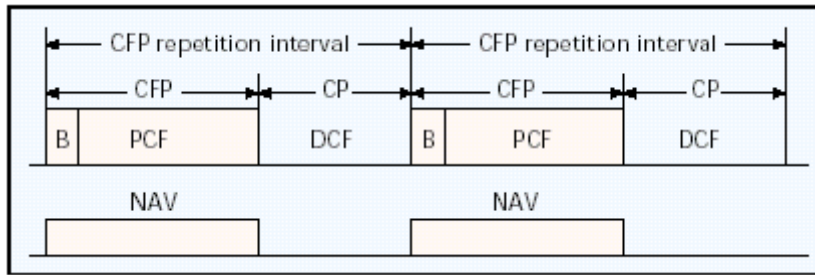
**Σχήμα 3.9: Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας του PCF, όπου το  $D_i$  αναπαριστά το rolling του σταθμού  $i$  και το  $U_i$  αναπαριστά την μετάδοση δεδομένων από τον σταθμό  $i$ .**

Στο παράδειγμα του επόμενου σχήματος ο σταθμός 3 δεν έχει δεδομένα προς αποστολή. Έτσι, αφού περάσει ένα χρονικό διάστημα ίσο με PIFS, ο σταθμός 4 ο οποίος ελέγχει τώρα το μέσο μπορεί να μεταδώσει.



**Σχήμα 3.10: Μετά το rolling του σταθμού 3 (ο οποίος δεν έχει πακέτα προς μετάδοση) σειρά έχει ο σταθμός 4, ο οποίος μεταδίδει τα δεδομένα που θέλει ( $U_4$ ). Το πακέτο  $CF_{end}$  που αποστέλλεται από τον PC δηλώνει το τέλος της CFP.**

Αξίζει να σημειώσουμε πως οι δύο τεχνικές που καθορίζονται από το Standard μπορούν να συνυπάρξουν μέσα στο ίδιο BSS. Όταν ένα PC λειτουργεί σε ένα BSS, οι 2 μέθοδοι πρόσβασης εναλλάσσονται, με την Contention Free Period (CFP) να ακολουθείται από μία Contention Period (CP), όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 3.11: Διαδοχική λειτουργία των μεθόδων PCF και DCF.

### 3.6 ΔΟΜΗ ΤΟΥ MAC ΠΛΑΙΣΙΟΥ

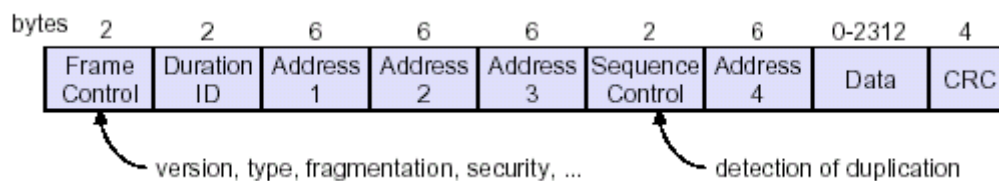
Το υποστρώμα MAC του 802.11 καθορίζει τον σχηματισμό διαφόρων πλαισίων. Ο σχηματισμός αυτών των πλαισίων εξαρτάται από τη λειτουργία για την οποία προορίζονται, ενώ όπως θα δούμε στην επόμενη παράγραφο υποστηρίζεται και η δημιουργία μικρότερου μεγέθους πλαισίων σύμφωνα με μια τεχνική που καλείται τεμαχισμός.

#### 3.6.1 Κατηγορίες πλαισίων

Για την μεταφορά των MSDUs μεταξύ ομοτίμων LLCs, το υποστρώμα MAC χρησιμοποιεί 3 ειδών τύπους πλαισίου, οι οποίοι αναφέρονται παρακάτω:

- **Ελέγχου (Control):** Μετά την εγκατάσταση των υπηρεσιών association και authentication μεταξύ σταθμών και APs τα πλαίσια ελέγχου είναι αυτά που θα βοηθήσουν στην σωστή παραλαβή των πλαισίων δεδομένων. Τέτοια πλαίσια είναι τα: RTS, CTS, ACK, PS Poll, CF End.
- **Διαχείρισης (Management):** Ο σκοπός των πλαισίων διαχείρισης είναι η εγκατάσταση της αρχικής επικοινωνίας μεταξύ των σταθμών και των APs. Έτσι, τα πλαίσια αυτά παρέχουν υπηρεσίες όπως οι association και authentication.
- **Δεδομένων (Data):** Ο κύριος σκοπός των πλαισίων αυτών είναι η μεταφορά πληροφορίας μεταξύ των ομοτίμων LLCs.

Στο επόμενο σχήμα φαίνεται η γενική δομή ενός MAC πλαισίου που ‘αντιστοιχεί’ σε όλα τα πλαίσια που μεταδίδουν οι σταθμοί, ανεξάρτητα από τον τύπο του πλαισίου.



Σχήμα 3.12: Η γενική δομή ενός MAC πλαισίου.

Τα πρώτα 30 bytes (όλα τα πεδία, δηλαδή, πριν αυτό των δεδομένων) αποτελούν την επικεφαλίδα (header) του MAC πλαισίου, ενώ μετά τα δεδομένα ακολουθεί ένα πεδίο το οποίο χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο CRC για έλεγχο λαθών. Πιο συγκεκριμένα τα πεδία της επικεφαλίδας είναι τα εξής:

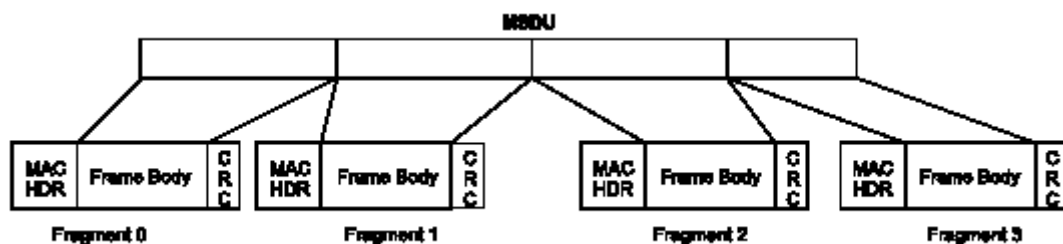
- **Frame Control:** Το πεδίο αυτό περιλαμβάνει πληροφορίες για τον τύπο του πλαισίου, για τον έλεγχο της ισχύος, για την κρυπτογράφηση κ.ά.
- **Duration ID:** Η πληροφορία στο πεδίο αυτό δηλώνει την διάρκεια του επόμενου πλαισίου προς μετάδοση.
- **Address:** Τα πεδία των διευθύνσεων παρέχουν τους διάφορους τύπους διευθύνσεων, όπως των σταθμών μετάδοσης και λήψης του πλαισίου, του BSS για το οποίο προορίζεται κ.ά.
- **Sequence Control:** Τα bytes στο πεδίο αυτό υποδεικνύουν τον αριθμό του πλαισίου ενός συγκεκριμένου MSDU.

### 3.6.2 Η τεχνική του τεμαχισμού

Η διαδικασία της διαίρεσης ενός MSDU ή ενός MMPDU σε μικρότερα MAC πλαίσια, τα MPDUs, ονομάζεται τεμαχισμός (fragmentation). Η διαδικασία αυτή γίνεται για να αυξηθεί η αξιοπιστία, μεγάλωνοντας την πιθανότητα επιτυχούς μεταφοράς ενός MSDU ή ενός MMPDU σε περιπτώσεις όπου τα χαρακτηριστικά του καναλιού περιορίζουν την αξιόπιστη μετάδοση για μεγαλύτερα πλαίσια. Η ανασυγκρότηση των MPDUs σε ένα MSDU ή ένα MMPDU ονομάζεται 'defragmentation'.

Όταν γίνεται λήψη ενός MSDU ή ενός MMPDU από το LLC από το υποστρώμα διαχείρισης MAC (MLME) και το μήκος του MSDU είναι μεγαλύτερο από μια συγκεκριμένη τιμή η οποία καλείται κατώφλι τεμαχισμού (Fragmentation Threshold), τότε το MSDU χωρίζεται σε MPDUs, όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα. Κάθε τεμάχιο δεν πρέπει να υπερβαίνει σε μέγεθος το κατώφλι τεμαχισμού.

Μόνο τα MPDUs με μία και μόνο διεύθυνση αποδοχέα (unicast receiver address) επιτρέπεται να υποστούν τεμαχισμό. Τα πλαίσια εκπομπής (broadcast) και πολλαπλής διανομής (multicast) δεν επιτρέπεται να υποστούν τεμαχισμό ακόμα κι αν το μήκος τους υπερβαίνει το κατώφλι τεμαχισμού.



Σχήμα 3.13: Τεμαχισμός ενός MSDU σε μικρότερα πακέτα.

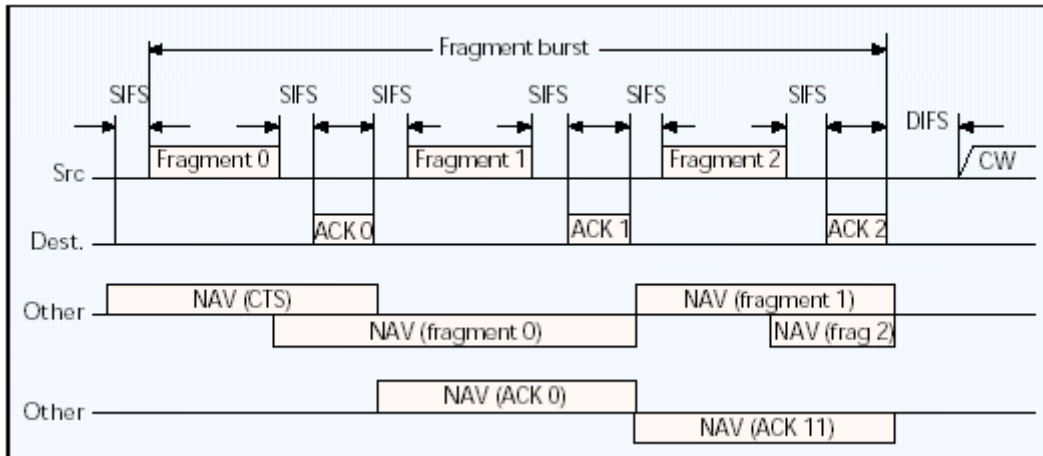
Τα MPDUs που προκύπτουν από τον τεμαχισμό ενός MSDU ή ενός MMPDU αποστέλλονται ως ανεξάρτητες μεταδόσεις και το καθένα από αυτά επαληθεύεται ξεχωριστά. Μετά τη λήψη ενός πακέτου επαλήθευσης ο σταθμός που μεταδίδει θα περιμένει για ένα χρονικό διάστημα ίσο με SIFS μέχρι να μεταδώσει το επόμενο τεμάχιο. Ένα πλαίσιο μπορεί να αποσταλεί με τη διαδικασία του τεμαχισμού χρησιμοποιώντας τόσο τον βασικό τρόπο μετάδοσης DCF όσο και τον τρόπο μετάδοσης DCF με τη χρήση των πακέτων RTS/CTS.

Από τη στιγμή που ένας σταθμός έχει ανταγωνιστεί για το κανάλι, θα συνεχίσει να στέλνει τεμάχια μέχρι να συμβεί ένα από τα παρακάτω γεγονότα:

1. Όλα τα τεμάχια ενός MSDU ή ενός MMPDU έχουν αποσταλεί.
2. Δεν έχει ληφθεί επιβεβαίωση.

3. Απαγορευθεί στο σταθμό να στείλει επιπλέον τεμάχια λόγω του ορίου του dwell time.

Στο επόμενο σχήμα φαίνεται η διαδικασία μετάδοσης ενός MSDU πολλών τεμαχίων (multiple-fragment), η οποία είναι γνωστή ως 'fragment burst'.



**Σχήμα 3.14: Διαδικασία αποστολής ενός πλαισίου με την μέθοδο του τεμαχισμού.**

Κατά τη χρησιμοποίηση της μεθόδου του τεμαχισμού ισχύουν και οι επόμενοι κανόνες:

- Αν ο σταθμός εκπομπής κάνει λήψη μιας επιβεβαίωσης αλλά δεν υπάρχει αρκετός χρόνος για να μεταδώσει το επόμενο τεμάχιο λόγω του ορίου του dwell, θα ανταγωνιστεί για το κανάλι στο επόμενο dwell time.
- Αν ο σταθμός εκπομπής δεν κάνει λήψη μιας επιβεβαίωσης, θα προσπαθήσει να αναμεταδώσει το αποτυχημένο MPDU ή ένα άλλο MPDU, αφού εκτελέσει τη διαδικασία υποχώρησης και ανταγωνισμού.
- Από τη στιγμή που ο σταθμός έχει ανταγωνιστεί για το κανάλι για να επαναμεταδώσει ένα τεμάχιο ή ένα MSDU, θα ξεκινήσει τη μετάδοση με το τελευταίο τεμάχιο που δεν επιβεβαιώθηκε.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΤΟ ΦΥΣΙΚΟ ΣΤΡΩΜΑ ΤΟΥ 802.11

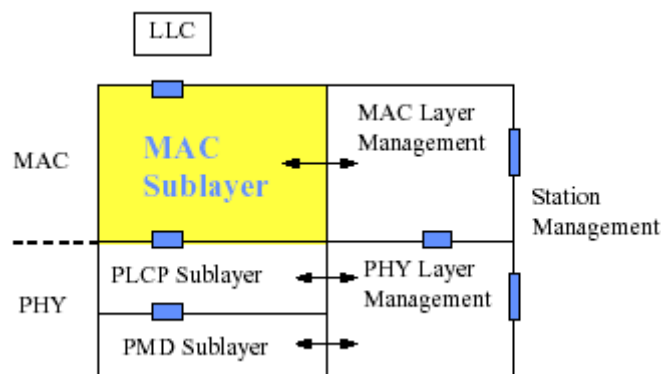
Το 802.11 Standard καθορίζει την ύπαρξη, τον τρόπο λειτουργίας και τον καθορισμό τριών διαφορετικών φυσικών στρωμάτων, τα οποία αναπτύσσονται διεξοδικά στη συνέχεια.

#### 4.1 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ

Η αρχιτεκτονική του φυσικού στρώματος αποτελείται από τα τρία επόμενα στοιχεία (components) για κάθε σταθμό:

- **PLM** (Physical Layer Management): Η συνιστώσα αυτή λειτουργεί σε συνεργασία με το υποστρώμα διαχείρισης MAC και εκτελεί λειτουργίες διαχείρισης για το φυσικό στρώμα.
- **PLCP** (Physical Layer Convergence Procedure) υποστρώμα: Το υποστρώμα MAC επικοινωνεί με το PLCP μέσω στοιχείων υπηρεσίας (service primitives) με τη βοήθεια των SAPs (Service Access Points) του φυσικού στρώματος. Όταν το υποστρώμα MAC δώσει εντολή, το PLCP ετοιμάζει τα MPDUs για μετάδοση. Το PLCP προσαρτίζει πεδία στο MPDU που περιέχουν πληροφορίες που χρειάζονται οι πομποί και οι δέκτες του φυσικού στρώματος. Το 802.11 αναφέρεται σε αυτό το σύνθετο πλαίσιο ως **PPDU** (PLCP Protocol Data Unit). Η δομή του PPDU πλαισίου παρέχεται για ασύγχρονη μεταφορά των MPDUs μεταξύ των σταθμών.
- **PMD** (Physical Medium Dependent) υποστρώμα: Κάτω από την καθοδήγηση του PLCP, το PMD παρέχει την ουσιαστική μετάδοση και λήψη των οντοτήτων του φυσικού στρώματος μέσω του ασύρματου μέσου. Για την παροχή αυτής της υπηρεσίας, το PMD διασυνδέεται άμεσα με το ασύρματο μέσο (δηλαδή τον αέρα) και παρέχει διαμόρφωση και αποδιαμόρφωση των πλαισίων που μεταδίδονται. Τα PLCP και PMD επικοινωνούν μέσω των 'primitives' για τον έλεγχο των λειτουργιών μετάδοσης και λήψης.

Η συσχέτιση των παραπάνω στοιχείων τόσο μεταξύ τους όσο και με το υποστρώμα MAC απεικονίζεται στο επόμενο σχήμα.



**Σχήμα 4.1: Η αρχιτεκτονική του υποστρώματος MAC και του φυσικού στρώματος όπως αυτή καθορίζεται από το 802.11.**



## 4.2 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΤΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ (Physical Layer Operations)

Για την εκτέλεση των λειτουργιών του υποστρώματος PLCP, το 802.11 καθορίζει την χρήση των μηχανών κατάστασης (state machines). Κάθε μηχανή κατάστασης εκτελεί μία από τις παρακάτω λειτουργίες:

- Ανίχνευση φέροντος: Η λειτουργία αυτή αφορά τον καθορισμό της κατάστασης του μέσου
- Μετάδοση: Η λειτουργία αυτή αναφέρεται στην αποστολή των διαδοχικών bytes ενός πλαισίου δεδομένων.
- Λήψη: Η λειτουργία αυτή αναφέρεται στην λήψη διαδοχικών bytes ενός πλαισίου δεδομένων.

Παρακάτω αναφέρονται εκτενέστερα αυτές οι λειτουργίες.

### 4.2.1 Ανίχνευση φέροντος

Το φυσικό επίπεδο υλοποιεί την λειτουργία της ανίχνευσης φέροντος (**carrier sense**) κατευθύνοντας το PMD να ελέγξει αν το μέσο είναι απασχολημένο ή ελεύθερο. Το PLCP εκτελεί τις παρακάτω λειτουργίες όταν ο σταθμός δεν βρίσκεται σε διαδικασία μετάδοσης ή λήψης ενός πλαισίου:

- Ανίχνευση των εισερχόμενων σημάτων: Το PLCP μέσα στον σταθμό θα ανιχνεύει διαρκώς το μέσο. Όταν το μέσο γίνει απασχολημένο, το PLCP θα διαβάσει τα πεδία 'preamble' και 'header' του πλαισίου PLCP και θα επιχειρήσει συγχρονισμό του δέκτη στον ρυθμό μετάδοσης του σήματος.
- Καθορισμός ελεύθερου καναλιού (CCA: Clear Channel Assessment): Με τη λειτουργία αυτή καθορίζεται αν το μέσο είναι απασχολημένο ή όχι. Ο πιο συνηθισμένος τρόπος λειτουργίας του CCA είναι η μέτρηση, από το PMD, της ενέργειας στο μέσο. Ο καθορισμός του μέσου προκύπτει ανάλογα με το αν η μετρούμενη τιμή ξεπερνάει ένα συγκεκριμένο όριο, το οποίο αναφέρεται ως κατώφλι ανίχνευσης ενέργειας (**ED: Energy Detection**).

### 4.2.2 Λειτουργία μετάδοσης

Το PLCP θα αλλάξει το PMD σε κατάσταση μετάδοσης μετά την λήψη του κατάλληλου 'service primitive' (PHY-TXSTART.request) από το επίπεδο MAC. Το επίπεδο MAC στέλνει τον αριθμό των bytes (0-4095) και τις οδηγίες για τον ρυθμό μετάδοσης μαζί με την παραπάνω αίτηση (request). Το PMD ανταποκρίνεται στέλνοντας το 'preamble' του πλαισίου στην κεραία μέσα σε 20 μs.

Ο πομπός στέλνει τα 'preamble' και 'header' με ρυθμό 1 Mbps. Αφού σταλεί το 'preamble' ο πομπός αλλάζει τον ρυθμό μετάδοσης σε αυτόν που καθορίζεται από το 'header'. Μετά την ολοκλήρωση της μετάδοσης, το PLCP στέλνει το κατάλληλο 'primitive' στο επίπεδο MAC, κλείνει τον πομπό και αλλάζει το κυκλωματικό (circuitry) του PMD σε κατάσταση λήψης.

### 4.2.3 Λειτουργία λήψης

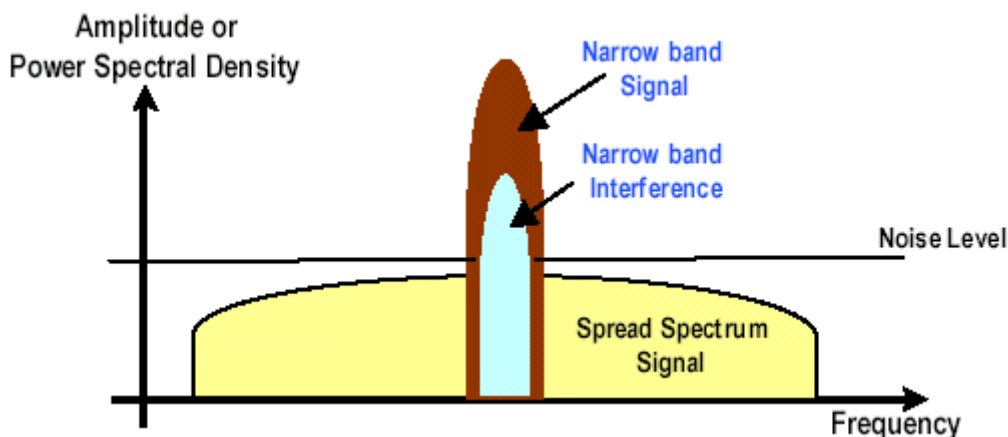
Αν ο καθορισμός του ελεύθερου καναλιού (CCA) ανακαλύψει ότι το μέσο είναι απασχολημένο και ανιχνεύσει ένα έγκυρο 'preamble' ενός εισερχόμενου πλαισίου τότε το PLCP θα ελέγξει την επικεφαλίδα (header) του πλαισίου. Το PMD θα υποδείξει ότι το μέσο είναι απασχολημένο όταν ανιχνεύσει ένα σήμα με ισχύ μεγαλύτερη από 85 dBm. Αν το PLCP καθορίσει ότι η επικεφαλίδα είναι χωρίς λάθη

θα στείλει το κατάλληλο 'primitive' (PHY-RXSTART.indicate) στο επίπεδο MAC για να ειδοποιήσει για την επικείμενη λήψη ενός πλαισίου. Μαζί με αυτήν την ειδοποίηση το PLCP στέλνει τις πληροφορίες που βρίσκει στην επικεφαλίδα του πλαισίου (όπως ο αριθμός των bytes και ο ρυθμός μετάδοσης).

Το PLCP θέτει σε λειτουργία έναν μετρητή byte βασιζόμενο στην τιμή του πεδίου 'PSDU Length Word' που βρίσκεται στην επικεφαλίδα. Με την βοήθεια του μετρητή αυτού, το PLCP γνωρίζει πότε λαμβάνει χώρα το τέλος του πλαισίου. Καθώς το PLCP λαμβάνει τα δεδομένα, στέλνει τα bytes του PSDU στο επίπεδο MAC με τα κατάλληλα primitives.

### 4.3 ΤΟ ΦΥΣΙΚΟ ΣΤΡΩΜΑ ΤΟΥ 802.11 ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΤΟΥ SPREAD SPECTRUM

Το 802.11 καθορίζει δύο διαφορετικά φυσικά στρώματα τα οποία στηρίζονται στην τεχνική διαμόρφωσης που καλείται 'εξάπλωση φάσματος' (SS: Spread Spectrum). Η τεχνική αυτή 'εξαπλώνει' την ισχύ του σήματος σε μια ευρεία μάντα συχνοτήτων, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2. Η διαδικασία αυτή κάνει το σήμα λιγότερο ευάλωτο στον θόρυβο και τις παρεμβολές από άλλες μεταδόσεις οι οποίες χρησιμοποιούν συνήθως ένα μικρό εύρος συχνοτήτων. Έτσι, η πιθανή προκύπτουσα παρεμβολή με το εξαπλωμένο σήμα θα οδηγήσει σε λιγότερα λάθη κατά την αποδιαμόρφωση του σήματος από τον δέκτη.



Σχήμα 4.2: Η εξάπλωση του σήματος στην περιοχή των συχνοτήτων με τη χρήση της τεχνικής Spread Spectrum.

#### 4.3.1 Το υποστρώμα PMD FHSS

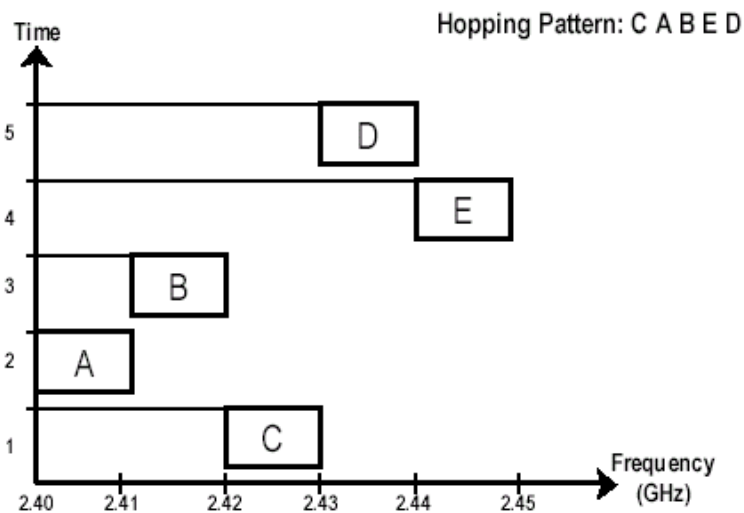
Το υποστρώμα PMD (Physical Medium Dependent) εκτελεί την πραγματική μετάδοση και λήψη των PPDU's υπό την καθοδήγηση του PLCP. Για να εκτελέσει αυτήν την λειτουργία το FHSS PMD συνδέεται απευθείας με το ασύρματο μέσο (δηλαδή τον αέρα) και παρέχει την διαμόρφωση και αποδιαμόρφωση των πλαισίων που μεταδίδονται μέσω της τεχνικής FHSS.

Το PMD μεταφράζει την δυαδική αναπαράσταση των PPDU's σε ένα ραδιοσήμα ικανό για μετάδοση. Το FHSS PMD εκτελεί αυτές τις λειτουργίες μέσω της λειτουργίας μεταπήδησης συχνότητας (frequency hopping) και της τεχνικής διαμόρφωσης που ονομάζεται FSK (Frequency Shift Keying). Η επόμενη παράγραφος εξηγεί το FHSS PMD.

#### 4.3.1.1 Η λειτουργία της μεταπήδησης συχνότητας

Το 802.11 καθορίζει έναν αριθμό καναλιών (79 για την Β. Αμερική και για τις περισσότερες χώρες της Ευρώπης) που ισοκατανέμονται στην μπάντα ISM στην συχνότητα των 2.4 GHz. Κάθε κανάλι έχει εύρος 1 MHz, κατά συνέπεια η κεντρική συχνότητα λειτουργίας (όσον αφορά τις ΗΠΑ) για το πρώτο κανάλι είναι τα 2.402 GHz, για το δεύτερο τα 2.403 GHz κ.ο.κ.

Το PMD που στηρίζεται στο FHSS μεταδίδει τα δεδομένα μεταπηδώντας από κανάλι σε κανάλι σύμφωνα με μια συγκεκριμένη ψευδο-τυχαία ακολουθία μεταπήδησης (hopping pattern) η οποία κατανέμει ομοιόμορφα το σήμα κατά μήκος της μπάντας συχνοτήτων. Από την στιγμή που η ακολουθία μεταπήδησης τεθεί σε ένα AP, οι σταθμοί αυτόματα συγχρονίζονται στην σωστή ακολουθία. Το 802.11 Standard καθορίζει έναν συγκεκριμένο αριθμό ακολουθιών, ώστε να αποφεύγεται η παρατεταμένη παρεμβολή μεταξύ των ακολουθιών αυτών. Μια τέτοια ακολουθία φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



**Σχήμα 4.3: Ακολουθία μεταπήδησης συχνότητας σε συνάρτηση με το χρόνο.**

Για κάθε βήμα μεταπήδησης (hop) στην ακολουθία μεταπήδησης ο πομπός μεταδίδει σε μια συγκεκριμένη κεντρική συχνότητα λειτουργίας για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα το οποίο καλείται 'dwell time'. Ο ρυθμός μεταπήδησης (hop rate) είναι ρυθμιζόμενος, παρ' όλα αυτά υπάρχει ένας ελάχιστος ρυθμός που καθορίζεται από τους αρμόδιους οργανισμούς κάθε χώρας (π.χ. στις Ηνωμένες Πολιτείες ο ελάχιστος ρυθμός είναι 2.5 hops/sec ο οποίος αντιστοιχεί σε ένα μέγιστο 'dwell time' ίσο με 400 ms). Επιπρόσθετα, η ελάχιστη απόσταση μεταπήδησης (hop distance) στην συχνότητα είναι 6 MHz για την Β. Αμερική και για το μεγαλύτερο μέρος της Ευρώπης και 5 MHz για την Ιαπωνία.

#### 4.3.1.2 Η λειτουργία διαμόρφωσης συχνότητας FHSS

Το PMD που στηρίζεται στο FHSS μεταδίδει τα δυαδικά δεδομένα με ρυθμό είτε 1Mbps είτε 2Mbps, χρησιμοποιώντας ένα συγκεκριμένο τύπο διαμόρφωσης για κάθε ρυθμό:

- 1 Mbps: 2-level GFSK
- 2 Mbps: 4-level GFSK

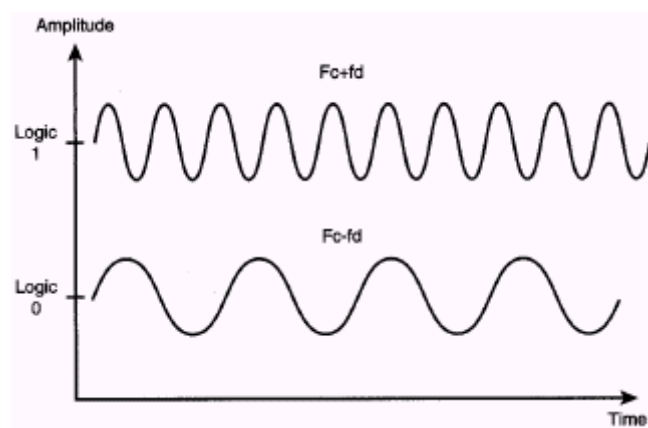
Για ρυθμό δεδομένων ίσο με 1Mbps, το PMD χρησιμοποιείται η 2-level Gaussian Frequency Shift Key (**GFSK**) διαμόρφωση, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.4. Η ιδέα του GFSK είναι να μεταβάλλει τη συχνότητα του φέροντος ώστε να αναπαριστά διαφορετικά δυαδικά σύμβολα.

Η είσοδος στον GFSK διαμορφωτή είναι 0 ή 1 όπως αυτά προέρχονται από το PLCP. Ο διαμορφωτής μεταδίδει τα δυαδικά δεδομένα μεταβάλλοντας τη συχνότητα μετάδοσης λίγο πάνω ή λίγο κάτω από την κεντρική συχνότητα λειτουργίας ( $F_c$ ) για κάθε βήμα μεταπήδησης. Για να εκτελεστεί αυτήν την λειτουργία, χρησιμοποιούνται οι παρακάτω κανόνες:

- Συχνότητα μετάδοσης:  $F_c + f_d$ , για την μετάδοση του bit 1
- Συχνότητα μετάδοσης:  $F_c - f_d$ , για την μετάδοση του bit 0

Στις παραπάνω εξισώσεις,  $F_c$  είναι η κεντρική συχνότητα λειτουργίας (operating center frequency) για το συγκεκριμένο hop και  $f_d$  είναι το μέγεθος της απόκλισης στη συχνότητα. Το 802.11 Standard εξηγεί τον τρόπο με τον οποίο υπολογίζονται οι ακριβείς τιμές για το  $f_d$ , ενώ η ονομαστική τιμή είναι 160 KHz.

Στο επόμενο σχήμα φαίνεται η αντιστοίχιση των διαφορετικών συχνοτήτων μετάδοσης στα λογικά 1 και 0.



**Σχήμα 4.4: Η διαμόρφωση GFSK χρησιμοποιεί 2 δυνατές συχνότητες για κάθε hop ώστε να δηλώνει αν ένα bit δεδομένων είναι 1 ή 0.**

Για ρυθμό δεδομένων ίσο με 2 Mbps, το PMD χρησιμοποιεί τη 4-level Gaussian Frequency Shift Key (GFSK) διαμόρφωση. Για τη λειτουργία αυτή, η είσοδος στον διαμορφωτή είναι συνδυασμός 2 bit (00, 01, 10, 11) που προέρχονται από το PLCP. Κάθε ένα από αυτά τα σύμβολα των 2 bit στέλνεται με ρυθμό 1 Mbps, κάτι που σημαίνει ότι κάθε bit στέλνεται με ρυθμό 2 Mbps. Έτσι, με την τεχνική αυτή διπλασιάζεται ο ρυθμός δεδομένων ενώ παραμένει ίδιο το baud rate, όπως αυτό ενός σήματος που μεταδίδεται με ρυθμό 1 Mbps. Ο πομπός μπορεί τώρα να μεταδώσει σε 4 πιθανές συχνότητες, κάθε μία για έναν συνδυασμό από bit. Στην περίπτωση αυτή υπάρχουν 2 διαφορετικές τιμές  $f_d$  που μεταβάλλουν τη συχνότητα μετάδοσης πάνω και κάτω από τη συχνότητα  $F_c$ .

Το 802.11 περιορίζει την μέγιστη ισχύ του πομπού στα 100 mWatts για ισοτροπικά ακτινοβολούμενη ισχύ (κάτι που σημαίνει ότι οι μετρήσεις έγιναν για κεραία χωρίς ενίσχυση). Η πραγματική ισχύς, ωστόσο, θα είναι μεγαλύτερη με τη χρήση κεραιών οι οποίες προσφέρουν μεγαλύτερη κατευθυντικότητα και άρα απολαβή ή ενίσχυση (gain).

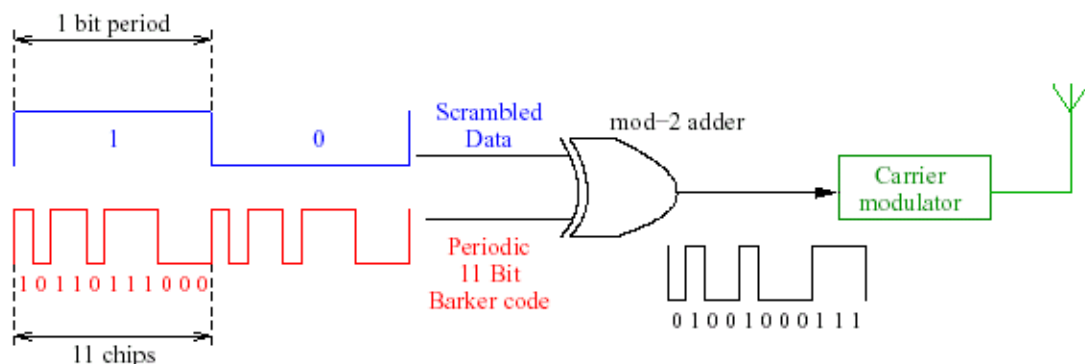
### 4.3.2 Το υποστρώμα PMD DSSS

Όπως και με τα άλλα δύο φυσικά στρώματα που καθορίζονται από το 802.11 Standard, το DSSS PMD εκτελεί την ουσιαστική μετάδοση και λήψη των PPDU's υπό την καθοδήγηση του PLCP με χρήση της τεχνικής διαμόρφωσης **DSSS** (Direct Sequence Spread Spectrum). Η λειτουργία του DSSS PMD μεταφράζει την δυαδική αναπαράσταση των PPDU's σε ένα ραδιοσήμα κατάλληλο για μετάδοση. Το φυσικό στρώμα που χρησιμοποιεί την τεχνική DSSS εκτελεί αυτήν την λειτουργία πολλαπλασιάζοντας ένα φέρον (radio frequency carrier) με ένα PN (pseudo-noise) ψηφιακό σήμα. Το προκύπτον σήμα εμφανίζεται ως θόρυβος αν σχεδιαστεί στην περιοχή των συχνοτήτων. Το μεγαλύτερο εύρος ζώνης του 'direct sequence' σήματος δίνει την δυνατότητα στην ισχύ του θορύβου να πέσει κάτω από το όριο θορύβου χωρίς να υπάρξει καθόλου απώλεια πληροφορίας.

Όπως και με το FHSS, το φυσικό στρώμα DSSS λειτουργεί στις συχνότητες από 2.4 GHz έως 2.4835 GHz. Το 802.11 καθορίζει μέχρι 14 κανάλια διαφορετικών συχνοτήτων, με το καθένα να έχει εύρος 22 MHz.

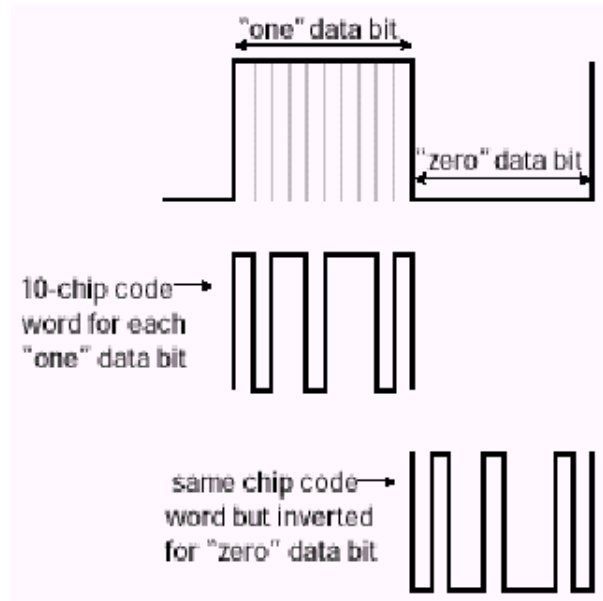
#### 4.3.2.1 Η λειτουργία του DSSS

Η κεντρική ιδέα της τεχνικής DSSS είναι, αρχικά, να εξαπλωθεί ψηφιακά το μη διαμορφωμένο PDU της βασικής ζώνης (baseband) και έπειτα να διαμορφωθούν τα εξαπλωμένα δεδομένα σε μια συγκεκριμένη συχνότητα. Το σχήμα 4.5 δείχνει τα στοιχεία που αποτελούν έναν DSSS πομπό.



**Σχήμα 4.5: Σχηματική αναπαράσταση ενός DSSS πομπού.**

Ο πομπός εξαπλώνει το PDU συνδυάζοντας το PDU ('Scrambled Data') με έναν Pseudo-Noise (PN) κώδικα (ο οποίος συχνά αναφέρεται ως chip code ή spreading sequence, ενώ στο σχήμα αναφέρεται ως 'Periodic 11 Bit Barker code') με την βοήθεια ενός modulo-2 αθροιστή (mod-2 adder). Η PN ακολουθία (PN sequence) αποτελείται από μία ακολουθία θετικών και αρνητικών '1'. Μία τέτοια ακολουθία δίνεται στο επόμενο σχήμα.



**Σχήμα 4.6: Αναπαράσταση ενός bit από μια ακολουθία θετικών και αρνητικών μονάδων (1).**

Ο κώδικας που χρησιμοποιείται στο 802.11 DSSS αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως 11-chip Barker sequence και δίνεται παρακάτω, με το bit που βρίσκεται πιο αριστερά να εφαρμόζεται πρώτο στο PPDU.

+1, -1, +1, +1, -1, +1, +1, +1, -1, -1, -1

Η έξοδος του mod-2 αθροιστή είναι ένα DSSS σήμα με υψηλότερο ρυθμό σηματοδότησης από αυτόν του αρχικού σήματος. Ένα PPDU με ρυθμό 1 Mbps στην είσοδο θα καταλήξει σε ένα εξαπλωμένο σήμα με ρυθμό 11 Mbps στην έξοδο του αθροιστή. Στη συνέχεια, ο διαμορφωτής ('Carrier modulator') μεταφράζει το σήμα της βασικής ζώνης σε ένα αναλογικό σήμα στην συχνότητα λειτουργίας της μετάδοσης του επιλεγμένου καναλιού. Αν και η 'spreading sequence' είναι η ίδια για όλους τους χρήστες, υπάρχει η ελευθερία επιλογής οποιουδήποτε καναλιού συχνότητας, ώστε να υποστηρίζεται η ταυτόχρονη μετάδοση.

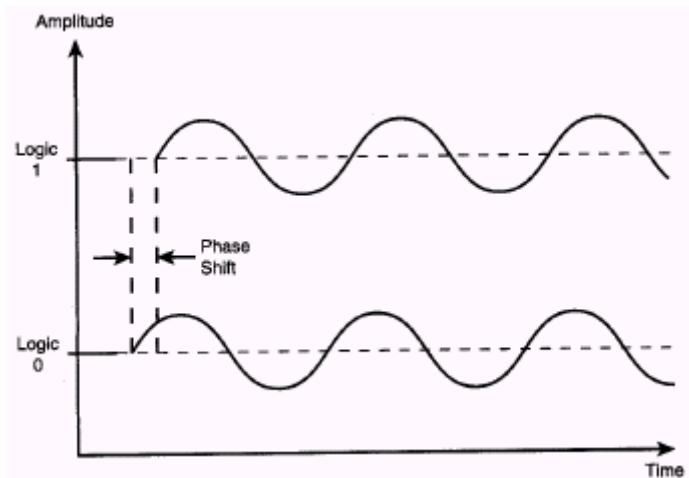
#### 4.3.2.2 Η λειτουργία διαμόρφωσης συχνότητας DSSS

Ένας διαμορφωτής διαμορφώνει το εξαπλωμένο PPDU συνδυάζοντάς το με ένα φέρον ρυθμισμένο (set) στη συχνότητα μετάδοσης. Το DSSS PMD μεταδίδει το αρχικό PPDU με ρυθμό 1 Mbps ή 2 Mbps χρησιμοποιώντας διαφορετικό τύπο διαμόρφωσης, ανάλογο με το ποιός ρυθμός έχει επιλεγθεί:

- 1 Mbps: DBPSK (Differential Binary Phase Shift Keying)
- 2 Mbps: DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying)

Η λειτουργία της τεχνικής **PSK** (Phase Shift Keying) μεταβάλλει τη φάση της συχνότητας του φέροντος ώστε να αναπαραστήσει διαφορετικά σύμβολα. Έτσι, οι αλλαγές στη φάση διατηρούν τις πληροφορίες που βρίσκονται στο σήμα. Καθώς ο θόρυβος συνήθως επηρεάζει το πλάτος του σήματος και όχι τη φάση, η χρήση του συγκεκριμένου τύπου διαμόρφωσης μειώνει τις παρεμβολές (interference). Η είσοδος στον διαμορφωτή DBPSK είναι είτε 0 είτε 1, όπως αυτά προέρχονται από το PLCP.

Το επόμενο σχήμα δείχνει πως ο διαμορφωτής μεταδίδει τα δεδομένα μεταβάλλοντας τη φάση του φέροντος.



**Σχήμα 4.7: Μετάδοση δεδομένων με χρήση της τεχνικής DBPSK.**

Στην περίπτωση του DQPSK (για ρυθμό μετάδοσης 2 Mbps), η είσοδος στον διαμορφωτή είναι ένας συνδυασμός 2 bit (00, 01, 10, 11) που προέρχονται από το PLCP. Καθένα από αυτά τα σύμβολα των 2 bit στέλνονται με ρυθμό 1 Mbps, καταλήγοντας σε ένα ρυθμό δεδομένων ίσο με 2 Mbps. Έτσι, η τεχνική αυτή διπλασιάζει το ρυθμό δεδομένων ενώ διατηρεί το ίδιο baud rate με αυτό ενός σήματος με ρυθμό 1 Mbps.

Τα επίπεδα ισχύος για μετάδοση με DSSS είναι:

1. 1000 mWatts για τις ΗΠΑ
2. 100 mWatts για την Ευρώπη
3. 10 mWatts για την Ιαπωνία

Τα επίπεδα αυτά αναμένεται να είναι υψηλότερα χρησιμοποιώντας κεραίες με μεγαλύτερη κατευθυντικότητα.

#### **4.4 ΤΟ ΦΥΣΙΚΟ ΣΤΡΩΜΑ ΤΟΥ 802.11 ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΥΠΕΡΥΘΡΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ (Infrared-IR)**

Το φυσικό επίπεδο που στηρίζεται στις υπέρυθρες ακτίνες χρησιμοποιεί μια τεχνική διαμόρφωσης που καλείται **PPM** (Pulse Position Modulation) με ρυθμούς δεδομένων 1 Mbps και 2 Mbps, οι οποίοι επιτυγχάνονται μέσω ανάκλασης των υπέρυθρων ακτίνων στην οροφή της εγκατάστασης που βρίσκεται το ασύρματο δίκτυο. Ο συγκεκριμένος τρόπος λειτουργίας δεν τυγχάνει μεγάλης υποστήριξης από τις διάφορες εταιρίες και για τον λόγο αυτό δεν θα τον αναπτύξουμε πολύ.

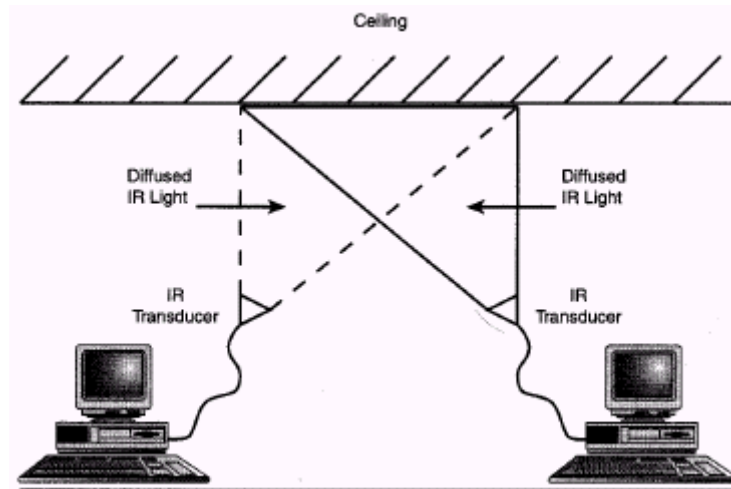
##### **4.4.1 Το υποστρώμα IR PMD**

Η λειτουργία του PMD μεταφράζει την δυαδική αναπαράσταση των PPDU's σε ένα σήμα υπέρυθρης ακτινοβολίας κατάλληλο προς μετάδοση. Το συγκεκριμένο φυσικό στρώμα λειτουργεί χρησιμοποιώντας μη-κατευθυντική μετάδοση, εξαλείφοντας την ανάγκη για LOS λειτουργία. Η μετάδοση αυτή είναι γνωστή ως 'diffused infrared'.

Εξαιτίας αυτού του τρόπου μετάδοσης (σχήμα 4.8), η λειτουργία του συγκεκριμένου φυσικού στρώματος περιορίζεται σε εσωτερικούς χώρους όπου η



ύπαρξη οροφής δίνει τη δυνατότητα ανάκλασης των σημάτων. Το τυπικό εύρος μετάδοσης είναι 10 με 20 μέτρα (ανάλογα με το ύψος της οροφής).



**Σχήμα 4.8:** Η μετάδοση των σημάτων με χρήση υπέρυθρης ακτινοβολίας γίνεται μέσω ανακλάσεων στην οροφή του χώρου στον οποίο είναι εγκατεστημένο το ασύρματο δίκτυο.

#### 4.4.2 Η λειτουργία διαμόρφωσης PPM

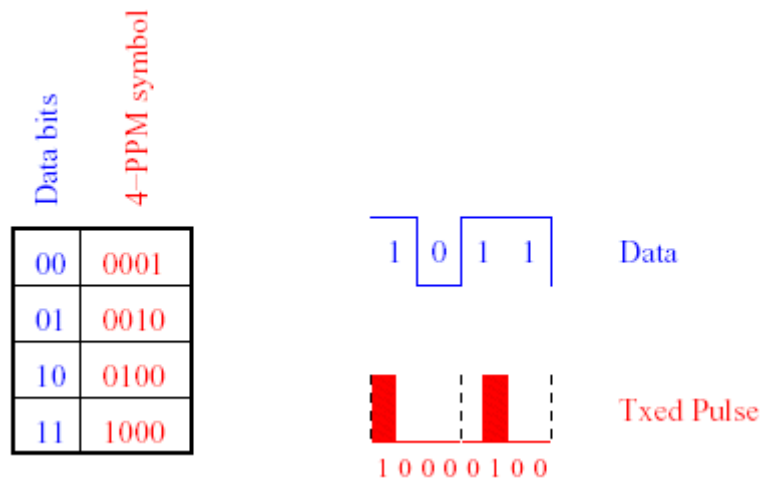
Το IR PMD μεταδίδει τα δυαδικά δεδομένα με ρυθμό 1 Mbps ή 2 Mbps χρησιμοποιώντας διαφορετικό τύπο διαμόρφωσης, ανάλογο με το ποιος ρυθμός έχει επιλεγθεί:

- 1 Mbps: 16-PPM
- 2 Mbps: 4-PPM

Η τεχνική διαμόρφωσης PPM στηρίζεται στην αλλαγή θέσης ενός παλμού για την αναπαράσταση διαφορετικών δυαδικών συμβόλων. Το bit 1 σε ένα σύμβολο 16-PPM αντιστοιχεί στη θέση ενός παλμού ο οποίος αναπαριστά μία συγκεκριμένη ομάδα από 4 PPM bits. Για παράδειγμα, η ομάδα (0110) αντιστοιχεί στο σύμβολο (0000000000001000).

Στο επόμενο σχήμα φαίνεται ο τρόπος μετάδοσης των δεδομένων με 4-PPM διαμόρφωση.





**Σχήμα 4.9:** Κάνοντας χρήση της διαμόρφωσης 4-PPM, η σειρά δεδομένων 1011 θα μεταδοθεί αρχικά με τον ‘παλμό’ (1000) ο οποίος αντιστοιχεί στην ομάδα bits (11) και στη συνέχεια με τον ‘παλμό’ (0100) που αντιστοιχεί στην ομάδα bits (10).

Το φυσικό στρώμα που χρησιμοποιεί υπέρυθρες ακτίνες μεταδίδει τα σήματα στο κοντινό ορατό φάσμα (850-950 nm) με το μέγιστο όριο ισχύος μετάδοσης να φτάνει τα 2 Watt.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5**

### **ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΝΟΣ ΑΣΥΡΜΑΤΟΥ AD-HOC ΔΙΚΤΥΟΥ ΠΟΥ ΚΑΝΕΙ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ IEEE 802.11**

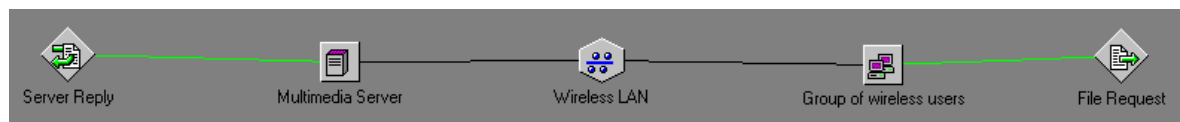
#### **5.1 Ανάλυση του μοντέλου προσομοίωσης**

Στο πρώτο αυτό μοντέλο, προσομοιώθηκε ένα ad-hoc ασύρματο δίκτυο, η λειτουργία του οποίου αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 2. Στο φυσικό στρώμα χρησιμοποιήθηκε η τεχνική FHSS, ενώ ως πρωτόκολλα στρώματος μεταφοράς χρησιμοποιήθηκαν τα TCP, UDP. Ως πρωτόκολλο πρόσβασης χρησιμοποιήθηκε η βασική μέθοδος DCF που προσδιορίζεται από το Standard 802.11 (τόσο η μέθοδος πρόσβασης με χρήση των πακέτων RTS και CTS όσο και η μέθοδος πρόσβασης PCF δεν υποστηρίζονται από το πρόγραμμα). Για την προσομοίωση του συγκεκριμένου μοντέλου κάναμε τις παρακάτω υποθέσεις:

1. Δεν μοντελοποιήθηκε το φαινόμενο ‘hidden-node’ (κάτι που ανταποκρίνεται, συνήθως, σε τοπολογίες όπου οι χρήστες δεν βρίσκονται σε κίνηση).
2. Δεν μοντελοποιήθηκε η κίνηση των χρηστών.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το δίκτυο που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση. Οι χρήστες που βρίσκονται στο ασύρματο δίκτυο (το οποίο εμφανίζεται ως ‘*Wireless LAN*’ και χρησιμοποιεί το 802.11) μοντελοποιήθηκαν ως μία ομάδα κόμβων (‘*Group of wireless users*’) και κυμαίνονται από 1 έως 30. Κάθε χρήστης στέλνει μία αίτηση για παροχή υπηρεσίας η οποία αναπαρίσταται από το ‘*File Request*’. Το μέγεθος της αίτησης καθορίστηκε να είναι 1000 bytes ώστε να χωράει σε ένα μεμονωμένο TCP/IP πλαίσιο (1460 bytes). Στις αιτήσεις αυτές ο παροχέας της υπηρεσίας, ο οποίος μοντελοποιείται με τη βοήθεια ενός κόμβου επεξεργασίας (και εμφανίζεται στο σχήμα ως ‘*Multimedia Server*’) απαντάει σε κάθε αίτηση (‘*Server Reply*’) στέλνοντας ένα αρχείο μεγέθους από 1 έως 5 MB, ανάλογα με τα σενάρια προσομοίωσης που θα αναπτύξουμε παρακάτω.

Η επιλογή του μεταβαλλόμενου αριθμού χρηστών έγινε για να δούμε με ποιο τρόπο αποκρίνεται ένα ad-hoc δίκτυο τόσο για μικρή χρησιμοποίηση (1-5 χρήστες) όσο και για μεγάλη (>15 χρήστες), ενώ το μέγεθος του αρχείου επιλέχθηκε έτσι ώστε να αντιπροσωπεύει ένα αρχείο που διακινείται συχνά μέσω του Internet (ένα μικρής διάρκειας τραγούδι ή ένα video λίγων δευτερολέπτων).



**Σχήμα 5.1: Το σχηματικό μοντέλο του προγράμματος, που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του ad-hoc δικτύου.**

Στη συνέχεια αναφέρονται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια οι παράμετροι που μοντελοποιήθηκαν για την προσομοίωση του συγκεκριμένου είδους δικτύου. Εδώ πρέπει να επισημάνουμε ότι τόσο στο παρών μοντέλο όσο και στα επόμενα ο χρόνος προσομοίωσης (‘Run Time’) ήταν σταθερός και ίσος με 3600 sec, ώστε να αντιστοιχεί σε έναν πραγματικό χρόνο ικανό για την μεταφορά περισσότερων του ενός αρχείου μεγάλου μεγέθους.

## 5.2 Παράμετροι που μοντελοποιήθηκαν κατά την προσομοίωση

Αρχικά, θα δώσουμε τις βασικές παραμέτρους και παρακάτω θα αναλύσουμε τις τιμές που δώσαμε για τις προσομοιώσεις. Οι τιμές που δίνονται στη συνέχεια αναφέρονται στην περίπτωση όπου το μοντέλο προσομοιώθηκε χωρία λάθη. Οι παράμετροι κατανέμονται με βάση τα δομικά στοιχεία της προσομοίωσης και τα πεδία που υπάρχουν στο COMNET III.

### 5.2.1 Αίτηση αρχείου (*File Request*)

#### Scheduling

Ο χρονοπρογραμματισμός των μηνυμάτων έγινε σύμφωνα με την επιλογή ‘*Iteration time*’. Οι τιμές (‘*arrival times*’) που επιλέχθηκαν δίνονται στον παρακάτω πίνακα, σύμφωνα με τις κατανομές του προγράμματος:

**Πίνακας 5.1**

	Interarrival time (ms)	First arrival	Last arrival
1	3600	Uni(0,100)	none
2	exp (600)	none	none
3	exp (300)	none	none

Οι 3 διαφορετικές επιλογές για τον χρονοπρογραμματισμό των μηνυμάτων που δίνονται στον πίνακα 7.1 στηρίζονται σε δύο γνωστές κατανομές πιθανότητας (εκθετική και ομοιόμορφη).

Το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ 2 διαδοχικών μηνυμάτων (‘*interarrival time*’) πήρε 3 διαφορετικές τιμές για τις διάφορες προσομοιώσεις που έλαβαν χώρα:

- **Shared key authentication:** Αυτός ο τύπος επικύρωσης προϋποθέτει ότι όλοι οι σταθμοί έχουν λάβει μέσω ενός καναλιού (ανεξάρτητου από το 802.11 δίκτυο) ένα μυστικό κλειδί, με τη χρήση του οποίου λαμβάνει χώρα η επικύρωση. Για την χρήση αυτής της μεθόδου εφαρμόζεται ο αλγόριθμος **WEP** (Wired Equivalent Privacy).
- **3600 sec:** Αρχικά, δώσαμε την τιμή 3600 sec ώστε κάθε χρήστης που συμμετέχει κάθε φορά στο ασύρματο τοπικό δίκτυο να δημιουργεί ένα μήνυμα σε όλη την διάρκεια της προσομοίωσης. Η δημιουργία του πρώτου μηνύματος επιλέχθηκε να προκύπτει από μία ομοιόμορφη κατανομή με ελάχιστη και μέγιστη τιμή τους αριθμούς 0 και 100 αντίστοιχα.
- **Exp(600):** Το χρονικό διάστημα ανάμεσα σε 2 διαδοχικά μηνύματα ακολουθεί εκθετική κατανομή με κύρια τιμή 600 sec (το διάστημα αυτό σε σύγκριση με τα 3600 sec της προσομοίωσης δίνει την δυνατότητα σε κάθε χρήστη να αιτηθεί παραπάνω από ένα αρχείο από τον server χωρίς παράλληλα να αυξάνει αισθητά τον φόρτο του συστήματος).
- **Exp(300):** Μειώνοντας την κύρια τιμή της εκθετικής κατανομής δημιουργίας των μηνυμάτων στα 300 sec δίνεται η δυνατότητα της δημιουργίας πολύ περισσότερων αιτήσεων από κάθε χρήστη αυξάνοντας όμως αισθητά τον φόρτο στο δίκτυο και την πιθανότητα περισσότερων συγκρούσεων.

### Messages

Το μέγεθος κάθε μηνύματος που δημιουργείται από τους χρήστες του ασύρματου τοπικού δικτύου είναι σταθερό και ίσο με 1000 bytes.

### Destinations

Ως μοναδικός προορισμός επιλέχθηκε ο Multimedia Server.

### Text

Ως επιγραφή κειμένου θέσαμε την επιλογή 'Copy message name'.

### Packets

Protocol:	TCP, UDP
Packetize:	0
Priority:	1
Routing class:	Standard
Hop limit:	65532

Όσον αφορά τις παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν για τα πρωτόκολλα μεταφοράς (TCP-IP, UDP-IP) αυτές είναι:

- TCP: Για το συγκεκριμένο πρωτόκολλο μεταφοράς τα bytes των δεδομένων είχαν σταθερό μέγεθος, το οποίο στα πλαίσια των προσομοιώσεων έλαβε τις τιμές 1000, 1460 και 2000, ενώ τόσο τα OH bytes όσο και τα bytes επιβεβαίωσης ACK είχαν σταθερή τιμή ίση με 40. Για τον έλεγχο ροής χρησιμοποιήθηκε το 'TCP/IP window' και για τον έλεγχο λαθών ο αλγόριθμος 'Fast recovery'.
- UDP: Στο συγκεκριμένο πρωτόκολλο τα OH bytes είχαν λογικά μικρότερο μέγεθος ίσο με 20 bytes (πράγμα αναμενόμενο καθώς δεν χρησιμοποιούνται bytes για έλεγχο λαθών κλπ), ενώ το μέγεθος των δεδομένων έλαβε τις τιμές 1000, 1460 και 2000 bytes. Σύμφωνα και με την θεωρία δεν υπάρχει έλεγχος λαθών και ροής και για τον λόγο αυτό δεν επιλέχθηκε η επιλογή επαναμετάδοσης των μπλοκαρισμένων πακέτων ενώ ο αριθμός των πακέτων στην επιλογή 'window packets' τέθηκε ίσος με 1.

### **5.2.2 Ομάδα χρηστών του ασύρματου δικτύου (Group of wireless users)**

Για την μοντελοποίηση της ομάδας χρηστών του ασύρματου δικτύου επιλέχθηκε ένας 'Processing Node' κόμβος. Ο αριθμός των χρηστών που βρίσκονται στο WLAN αποτέλεσε την κύρια μεταβαλλόμενη παράμετρο στις προσομοιώσεις και έλαβε τις παρακάτω τιμές: 1, 5, 10, 15, 20, 25, 30.

### **5.2.3 Ασύρματο Τοπικό Δίκτυο (Wireless LAN)**

Οι κύριες παράμετροι του πρωτοκόλλου CSMA/CA ('CSMA/CA parameters') - όπως αυτές εμφανίζονται στο περιβάλλον του προγράμματος και καθορίζονται από το Standard 802.11, πήραν τις παρακάτω σταθερές τιμές:

### Physical

Bandwidth:	2 Mbps
Propagation:	0
Fragm. error prob.:	0

Το εύρος ζώνης των 2 Mbps είναι το μεγαλύτερο εύρος ζώνης το οποίο αναφέρεται και υποστηρίζεται από το Standard (αν και διάφοροι κατασκευαστές μπορούν να υποστηρίξουν μεγαλύτερες τιμές).

Framing

Frame max: 2304 bytes  
 Frame OH: 42 bytes  
 Frame threshold: 2304 bytes  
 ACK timeout: 0.2 ms  
 ACK error probab: 0  
 Frame TxLife Time: 512 ms

Όπως φαίνεται από την επιλογή 'Frame max' το μέγιστο μέγεθος πλαισίου που επιτρέπει το πρωτόκολλο του 802.11 να μεταδοθεί είναι ίσο με 2304 bytes. Με την επιλογή αυτή, κάθε αίτηση χρήστη (1000 bytes δεδομένων) μεταφέρεται αυτούσια μέσα σε ένα πλαίσιο TCP/IP ή UDP/IP (σύμφωνα με τα μεγέθη που έχουν καθορισθεί για τα συγκεκριμένα πλαίσια). Παρ' όλα αυτά, κάθε φορά που ο server θα απαντάει στις αιτήσεις των χρηστών για την μεταφορά του αρχείου των 2 MB (το μέγεθος αυτό μεταβάλλεται για τις ανάγκες κάποιων προσομοιώσεων) θα τεμαχίζει το αρχείο σε πλαίσια με μέγεθος ίσο με το μέγιστο μέγεθος πλαισίου που επιτρέπεται από το πρωτόκολλο μεταφοράς. Τα πλαίσια αυτά θα περνάνε από το υποστρώμα MAC χωρίς προβλήματα, καθώς όποιο μέγεθος δεδομένων κι αν έχει καθορισθεί για το πλαίσιο που συγκροτεί το στρώμα μεταφοράς (από 1000 έως 2000 bytes) δεν ξεπερνάει μαζί με τα bytes επιβάρυνσης τα 2304 bytes που καθορίζονται ως ανώτερο όριο από το 802.11. Όταν όλα τα πλαίσια που αποτελούν το αρχικό αρχείο των 2 MB έχουν φτάσει στον προορισμό εναπόκειται στον κόμβο-παραλήπτη να ανασυγκροτήσει το αρχικό αρχείο των 2 MB. Πρέπει να υπενθυμίσουμε, επίσης, ότι ο χρόνος εκπνοής ενός πακέτου ACK πρέπει να ικανοποιεί την παρακάτω σχέση:

$$\text{ACK Timeout} > 2 \times \text{Propagation Delay} + \text{SIFS} + \text{ACK Transmission Time}$$

CSMA/CA

Slot time: 0.05 ms  
 Short IFS: 0.028 ms  
 FH dwell time: 128 ms

Η τιμή που δόθηκε για το slot time, εκτός του ότι είναι αυτή που καθορίζεται από το Standard, πετυχαίνει την μικρότερη μέση καθυστέρηση πρόσβασης (access delay) στο επίπεδο MAC σε σύγκριση με υψηλότερες τιμές, όταν χρησιμοποιείται σε ένα 802.11 δίκτυο στο οποίο αυξάνονται οι χρήστες [1].

IEEE

Cont. window min: 7  
 Cont. window max: 255  
 Retry limit: 7

#### 5.2.4 Παροχέας Υπηρεσίας (Multimedia Server)

Για την μοντελοποίηση του Server επιλέχθηκε ένας ‘*Processing Node*’ κόμβος.

#### 5.2.5 Απάντηση του Server στις αιτήσεις των χρηστών (Server Reply)

##### Scheduling

Edit received messages: Ο προγραμματισμός των μηνυμάτων στηρίζεται αποκλειστικά στη λήψη των μηνυμάτων από τον κόμβο των ασύρματων χρηστών.

Rec message delay: 0

##### Messages

Το μέγεθος του αρχείου το οποίο ο server αποστέλλει ως απάντηση σε κάθε αίτηση από τους χρήστες του δικτύου, είχε για τις περισσότερες προσομοιώσεις την σταθερή τιμή των 2 MB, ενώ σε κάποιες περιπτώσεις (οι οποίες θα αναφερθούν παρακάτω) χρησιμοποιήθηκε ως μεταβλητή και πήρε τις παρακάτω τιμές (όλες σε MB): 1, 2, 3, 4, 5.

##### Destinations

Ο προορισμός των μηνυμάτων-απαντήσεων του server στηρίζεται στα μηνύματα που λαμβάνει. Έτσι, τα πακέτα στέλνονται αποκλειστικά στους χρήστες του WLAN.

##### Text

Ως επιγραφή κειμένου θέσαμε την επιλογή ‘Use original message’.

##### Packets

Οι επιλογές είναι ίδιες με αυτές του ‘File Request’.

Για την προσομοίωση του IBSS δικτύου επιλέχθηκαν δύο βασικά περιβάλλοντα προσομοιώσεις: ένα ιδανικό περιβάλλον με απουσία λαθών και ένα στο οποίο μοντελοποιήθηκαν διάφορες καθυστερήσεις και λάθη. Σκοπός μας ήταν, πέρα από την ανάλυση της απόδοσης του ασύρματου δικτύου για διάφορες μεταβολές των χρηστών και των πρωτοκόλλων μεταφοράς, η σύγκριση της αποδοτικότητας ανάμεσα στα δύο δικτυακά περιβάλλοντα. Στη συνέχεια, αναφέρουμε το κάθε ένα ξεχωριστά.

### 5.3 Προσομοίωση χωρίς μοντελοποίηση λαθών

Στο πρώτο μοντέλο προσομοίωσης δεν συμπεριλήφθηκε κανενός είδους λάθος ή καθυστέρηση τόσο στο ασύρματο κανάλι όσο και στους διάφορους κόμβους που συμμετείχαν στο δίκτυο. Στη συνέχεια δίνονται και αναλύονται οι γραφικές παραστάσεις των σημαντικότερων παραμέτρων του συγκεκριμένου μοντέλου.

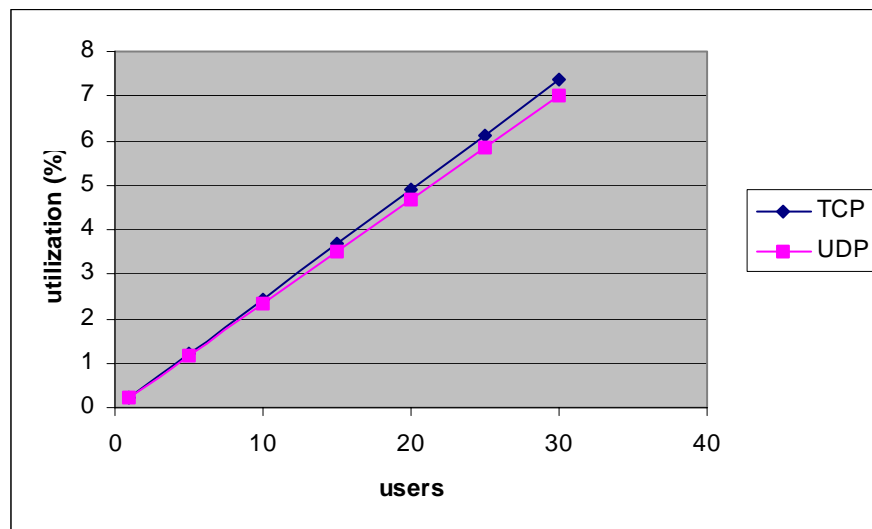
#### 5.3.1 Σενάριο Πρώτο

Στην περίπτωση αυτή κάθε κόμβος (χρήστης) επιλέχθηκε να δημιουργεί ένα μόνο μήνυμα σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Έτσι, στην επιλογή *interarrival time* δώσαμε την τιμή 3600 (όση και η διάρκεια της προσομοίωσης) ενώ για να μοντελοποιήσουμε την τυχαιότητα του χρόνου δημιουργίας του μηνύματος από τους χρήστες, η επιλογή του χρόνου δημιουργίας του μηνύματος προκύπτει από μια

ομοιόμορφη κατανομή στο διάστημα (0,100). Στην πραγματικότητα η επιλογή αυτή αντιστοιχεί στην περίπτωση όπου οι υπάλληλοι μιας εταιρείας πρέπει να συνδεθούν μέσω δικτύου στον τοπικό server της εταιρείας και να ‘κατεβάσουν’ άμεσα ένα συγκεκριμένο αρχείο. Η λέξη άμεσα προσομοιώνεται με το να θέσουμε ως ανώτερο όριο της εκθετικής κατανομής τα 100 sec, ενώ είναι λογικό οι αιτήσεις να μην δημιουργηθούν την ίδια ακριβώς χρονική στιγμή. Για το λόγο αυτό κάθε αίτηση δημιουργείται επιλέγοντας μία τυχαία χρονική στιγμή μέσα στο προκαθορισμένο διάστημα. Στη συνέχεια, δίνονται οι γραφικές παραστάσεις των κυριότερων παραμέτρων που καθορίζουν την απόδοση του δικτύου.

Σκοπός του σεναρίου αυτού ήταν να συγκριθεί η απόδοση των δύο βασικών πρωτοκόλλων μεταφοράς (TCP και UDP) κατά την μεταφορά από κάθε χρήστη του συστήματος ενός αρχείου σταθερού μεγέθους και ίσου με 2 MB. Τα πακέτα TCP και UDP είχαν και αυτά σταθερό μέγεθος ίσο με 1500 bytes μαζί με τα bytes επιβάρυνσης. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις των σημαντικότερων παραμέτρων του δικτύου.

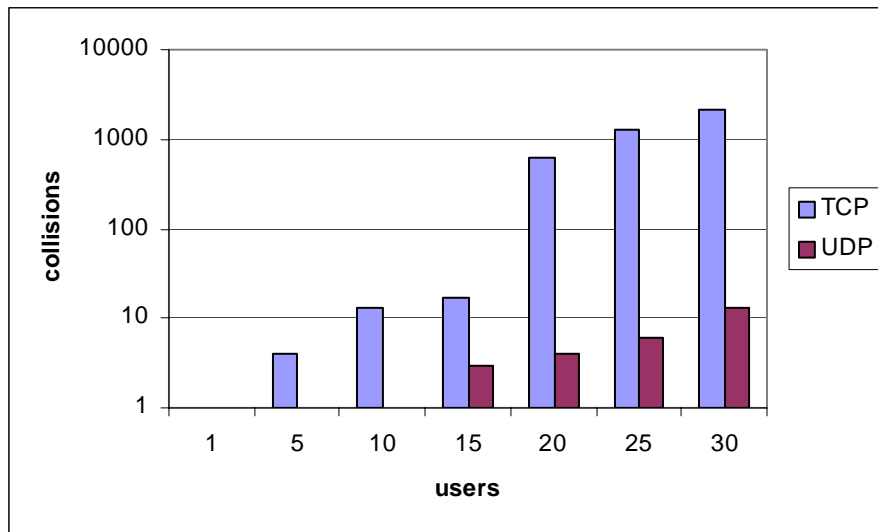
### Χρησιμοποίηση καναλιού



Ο φόρτος του καναλιού κυμάνθηκε για το TCP από 4.63 έως 139.31 Kbps, ενώ για το UDP από 4.51 έως 135.16 Kbps. Και για τα δύο πρωτόκολλα ο φόρτος είναι ιδιαίτερα μικρός σε σχέση με το ρυθμό που υποστηρίζεται από το ασύρματο κανάλι, παρ’ όλα αυτά αναμένουμε το δίκτυο να μην ανταποκρίνεται καλά, καθώς όλη η κίνηση είναι συσσωρευμένη σε ένα περιορισμένο χρονικό διάστημα (τα μηνύματα δημιουργούνται μία φορά και μέσα στα πρώτα 100 sec).

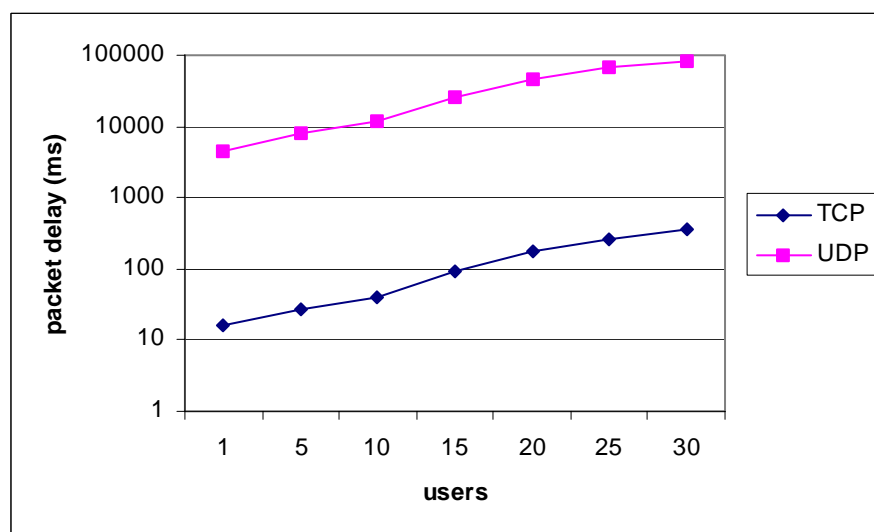
Η χρησιμοποίηση του καναλιού αυξάνεται περισσότερο με την αύξηση του φόρτου στο δίκτυο, όταν ως πρωτόκολλο μεταφοράς χρησιμοποιείται το TCP, κάτι που είναι εντελώς λογικό από τη στιγμή που με τη χρήση του συγκεκριμένου πρωτοκόλλου το κανάλι επιβαρύνεται με τα επιπρόσθετα πακέτα έναρξης και λήξης μιας σύνδεσης (*Open-Close Sequence*) καθώς και με μεγαλύτερο αριθμό overhead bytes σε σύγκριση με το πρωτόκολλο UDP.

### Αριθμός συγκρούσεων



Η αύξηση των χρηστών στο σύστημα αυξάνει την πιθανότητα σύγκρουσης, γεγονός που επιβεβαιώνεται και για τα δύο πρωτόκολλα μεταφοράς. Ειδικά, για το TCP οι συγκρούσεις αυξάνονται ιδιαίτερα στην περίπτωση που στο δίκτυο συμμετέχουν πάνω από 20 χρήστες. Ο μεγάλος αυτός αριθμός συγκρούσεων έχει ως αποτέλεσμα κατά την χρησιμοποίηση του TCP να υπάρχουν επαναμεταδόσεις πακέτων για 25 και 30 χρήστες έχουμε (3 και 4 αντίστοιχα). Αντίθετα, ο αριθμός των συγκρούσεων για το UDP είναι κατά πολύ μικρότερος λόγω της μικρότερης επιβάρυνσης που εισάγει στο δίκτυο και η οποία είναι ουσιαστικά τα 20 overhead bytes που προστίθενται στο πακέτο δεδομένων του UDP.

### Καθυστέρηση πακέτου

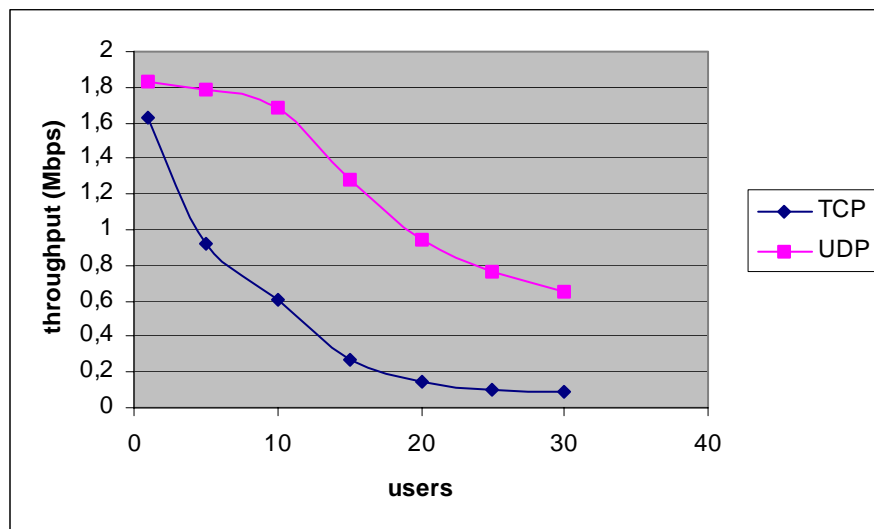


Η μέση καθυστέρηση πακέτου είναι πολύ μικρότερη κατά τη χρησιμοποίηση του TCP, καθώς σε αυτή 'συμμετέχουν' και τα πακέτα έναρξης και λήξης για κάθε



σύνδεση TCP, το μέγεθος των οποίων είναι πολύ μικρό (40 bytes) σε σύγκριση με το μέγεθος των πακέτων που περιέχουν τα δεδομένα. Παρ' όλα αυτά το συγκεκριμένο γράφημα έγινε για να συγκρίνουμε την συνολική απόκλιση των 2 πρωτοκόλλων μεταφοράς (πόσο μεγάλη είναι η διαφορά ανάμεσα στην καθυστέρηση του πακέτου από τη στιγμή που στο σύστημα υπάρχει ένας μόνο χρήστης μέχρι τη στιγμή που οι χρήστες έχουν γίνει 30). Η συγκεκριμένη απόκλιση είναι σχεδόν ίδια για τα πρωτόκολλα. Πιο συγκεκριμένα, για το TCP είναι ίση με 95,2% ενώ για το UDP είναι ίση με 94,5%, τιμές μεγάλες αλλά αναμενόμενες λόγω του περιορισμένου διαστήματος μέσα στο οποίο οι χρήστες έπρεπε να ολοκληρώσουν τις αιτήσεις τους.

### Throughput



Αρχικά, αξίζει να παρατηρήσουμε ότι για έναν χρήστη του δικτύου η ωφέλιμη ταχύτητα μεταφοράς πλησιάζει το θεωρητικό μέγιστο ρυθμό δεδομένων που μπορεί να επιτευχθεί (2 Mbps), χρησιμοποιώντας ως πρωτόκολλο μεταφοράς είτε το TCP είτε το UDP.

Όπως φαίνεται από το γράφημα, με τη χρησιμοποίηση του πρωτοκόλλου UDP, παρατηρούμε πως για ένα μικρό αλλά ικανοποιητικό αριθμό χρηστών (1-10) η ωφέλιμη ταχύτητα μεταφοράς παραμένει σε πολύ υψηλά – σχεδόν σταθερά - επίπεδα. Όταν στο σύστημα υπάρχουν περισσότεροι από 5 χρήστες η διαφορά στο throughput μεταξύ των 2 πρωτοκόλλων είναι κάτι παραπάνω από φανερό, με το UDP να προσφέρει μεγαλύτερους ρυθμούς δεδομένων.

Η απόκλιση μεταξύ μέγιστης (1 χρήστης) και ελάχιστης τιμής (30 χρήστες) throughput είναι για το TCP 94,8% και για το UDP 89,5%. Οι αποκλίσεις είναι ιδιαίτερα υψηλές καθώς υπάρχει ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα των 100 sec, μέσα στο οποίο όλοι οι χρήστες πρέπει να στείλουν τις αιτήσεις τους.

Σύμφωνα με άλλες προσομοιώσεις 802.11 δικτύων ([2], [4]) στα οποία χρησιμοποιήθηκε, όπως και εδώ, η βασική μέθοδος πρόσβασης και το μέγεθος πακέτου ήταν σταθερό (αλλά πολύ μικρότερο από αυτό των 2 MB), η επίδραση της αύξησης του αριθμού των κόμβων σε ένα τέτοιο δίκτυο είναι η μείωση του throughput μετά από μία συγκεκριμένη τιμή φόρτου, ενώ αυξανόμενου του αριθμού

των χρηστών η μείωση του throughput λαμβάνει χώρα για μικρότερο φόρτο κάθε φορά.

### 5.3.2 Σενάριο Δεύτερο

Στην περίπτωση αυτή η δημιουργία των μηνυμάτων ακολουθεί εκθετική κατανομή με κύρια τιμή 600. Έτσι, κάθε κόμβος (χρήστης) δημιουργεί περισσότερα του ενός μηνύματα κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Στο σενάριο αυτό μεταβάλλαμε και το μέγεθος του πλαισίου δεδομένων του εκάστοτε πρωτοκόλλου μεταφοράς, θέλοντας να δούμε πως τα 2 πρωτόκολλα μεταφοράς αποδίδουν για διαφορετικό μέγεθος πακέτου. Έτσι, θέσαμε στο πεδίο 'Data bytes' των πρωτοκόλλων μεταφοράς TCP και UDP τις τιμές: 1000, 1460 και 2000 bytes. Και τα τρία μεγέθη πακέτων θα περάσουν χωρίς πρόβλημα από όλα τα κατώτερα επίπεδα, καθώς η τιμή που θέσαμε ως μέγιστο μέγεθος πλαισίου (MPDU) για το MAC επίπεδο είναι ίση με 2304 bytes. Ανάλογα με το φόρτο και τις παραμέτρους λειτουργίας του δικτύου, η επιλογή μεγαλύτερου μεγέθους πλαισίων μπορεί άλλοτε να αυξήσει και άλλοτε να μειώσει την αποδοτικότητα του δικτύου.

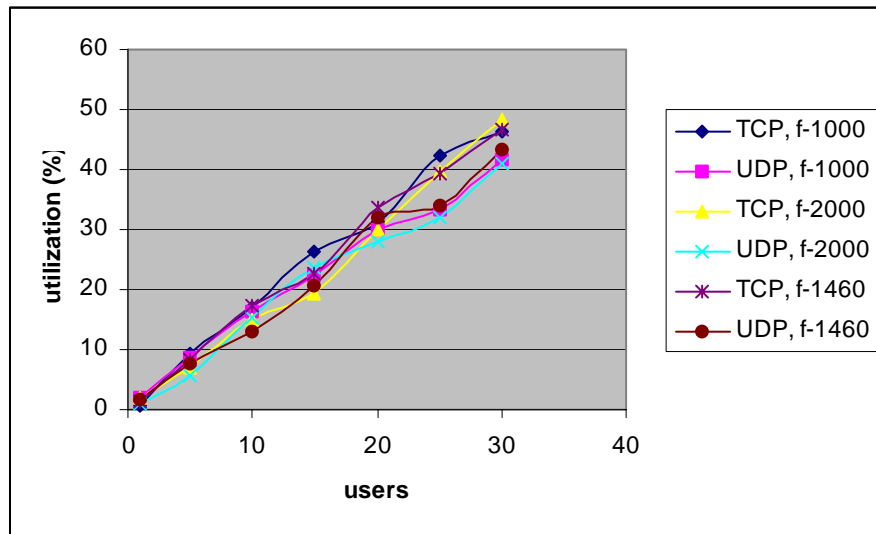
Μερικοί από τους λόγους που η χρησιμοποίηση μικρών πακέτων είναι προτιμητέα στα ασύρματα δίκτυα αναφέρονται παρακάτω:

- Λόγω του υψηλού BER που έχουν οι ασύρματες ζεύξεις η πιθανότητα να φθαρεί ένα πακέτο αυξάνεται με το μέγεθος του πακέτου.
- Σε περίπτωση φθοράς ενός πακέτου (λόγω σύγκρουσης ή θορύβου) όσο μικρότερο είναι το πακέτο τόσο μικρότερη είναι η επιβάρυνση που προκαλεί επαναμετάδοσή του.
- Κατά την χρησιμοποίηση της τεχνικής Frequency Hopping, το μέσο διακόπτεται περιοδικά για την μεταπήδηση συχνότητας (στην περίπτωσή μας κάθε 20 ms), ώστε όσο μικρότερο είναι το πακέτο τόσο μικρότερη είναι η πιθανότητα η μετάδοση να αναβληθεί μετά το 'dwell time'.

Αντίθετα, η χρησιμοποίηση πακέτων μεγάλου μεγέθους είναι χρήσιμη σε περιπτώσεις όπου υπάρχει η ανάγκη μεταφοράς μεγάλου αριθμού πληροφορίας, ενώ για περιβάλλοντα τα οποία χαρακτηρίζονται από μικρές καθυστερήσεις και ελάχιστα λάθη, είναι περισσότερο αποδοτική καθώς το ποσοστό των δεδομένων σε σχέση με την επιβάρυνση σε ένα δίκτυο αυξάνει την ωφέλιμη ταχύτητα μεταφοράς.

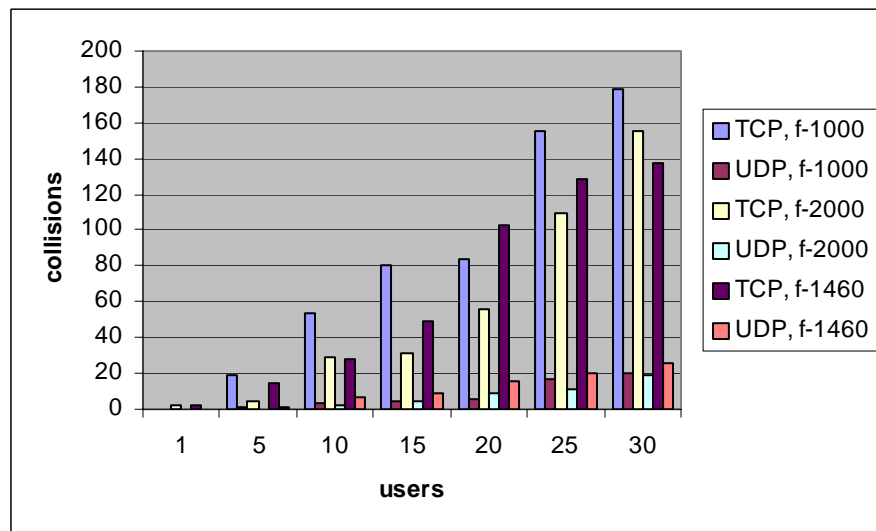
Οι γραφικές παραστάσεις των σημαντικότερων παραμέτρων του WLAN δίνονται στη συνέχεια.

### Χρησιμοποίηση καναλιού



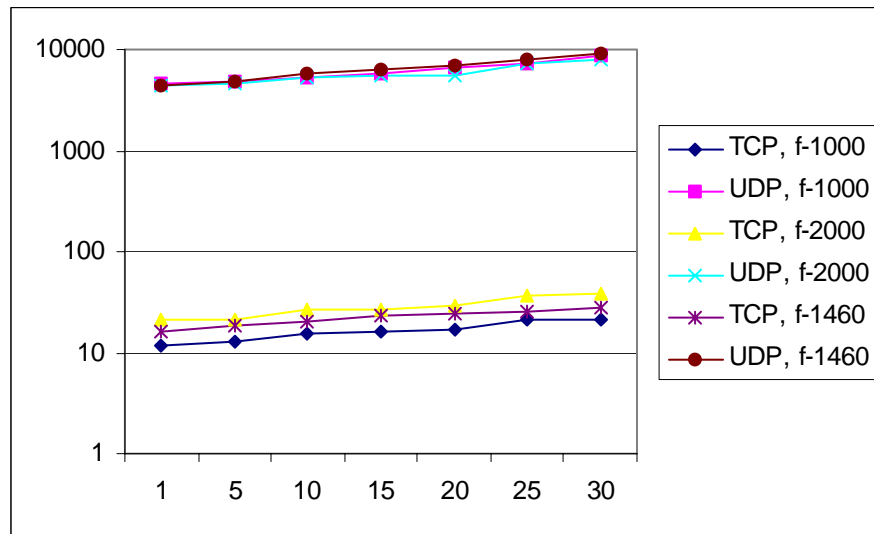
Η χρησιμοποίηση του καναλιού κυμαίνεται, γενικά, στα ίδια επίπεδα για τα διάφορα πλαίσια που χρησιμοποιήθηκαν, ενώ η μικρότερη χρησιμοποίηση του καναλιού από το UDP γίνεται περισσότερο φανερή όταν στο δίκτυο υπάρχουν 20 χρήστες και πάνω. Σε κάθε περίπτωση ο φόρτος στο δίκτυο δεν ξεπερνά το 50 %, ενώ για το TCP δεν σημειώθηκε καμία επαναμετάδοση από το στρώμα μεταφοράς.

### Αριθμός συγκρούσεων



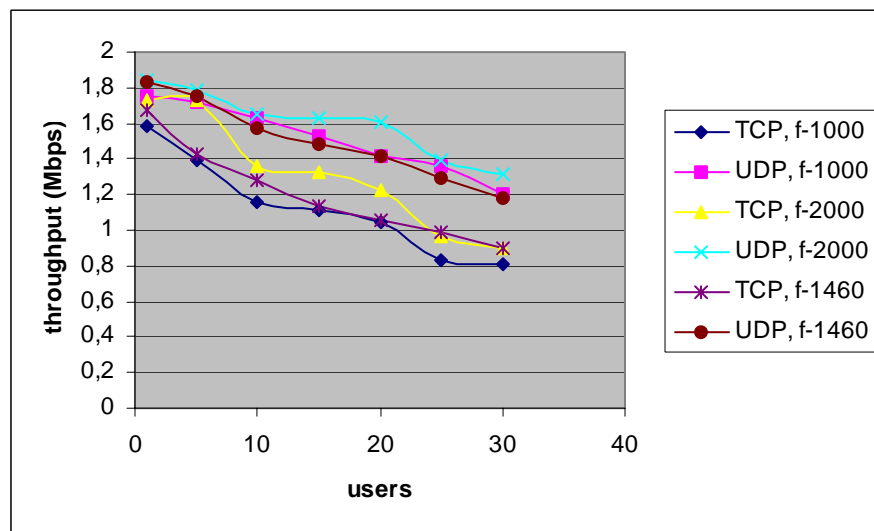
Η επιλογή μικρού μεγέθους πακέτου (1000 bytes) σημαίνει πως το σταθερό αρχείο των 2 MB θα διασπαστεί σε περισσότερα πακέτα από ότι θα χρειαζόταν για την περίπτωση που το πλαίσιο του πρωτοκόλλου μεταφοράς έχει μεγαλύτερο μέγεθος (π.χ. 2000 bytes). Έτσι, οδηγούν σε μεγαλύτερο αριθμό μεταδόσεων, με αποτέλεσμα να προκύπτουν και περισσότερες συγκρούσεις.

### Καθυστέρηση πακέτου



Από τη συγκεκριμένη γραφική παράσταση φαίνεται ότι, σε αντίθεση με το UDP όπου η μέση καθυστέρηση στη μετάδοση ενός πακέτου είναι περίπου ίση για όλα τα μεγέθη πλαισίου, όταν χρησιμοποιείται το TCP η καθυστέρηση αυξάνεται όσο αυξάνεται το μέγεθος του κάθε πλαισίου.

### Throughput



Η πρώτη διαπίστωση από το γράφημα, είναι ότι και σε αυτή την περίπτωση το UDP πετυχαίνει υψηλότερες τιμές από ότι το TCP, όσον αφορά το throughput. Ξεχωριστά για κάθε πρωτόκολλο, παρατηρούμε ότι για το UDP η αύξηση του μεγέθους του πακέτου οδηγεί σε υψηλότερες τιμές throughput, ειδικά στην περίπτωση όπου στο δίκτυο υπάρχουν περισσότεροι από 10 χρήστες. Όσον αφορά το TCP τα μεγαλύτερα σε μέγεθος πακέτα πετυχαίνουν καλύτερο throughput μέχρι και τη στιγμή που στο δίκτυο υπάρχουν 25 χρήστες. Όταν οι χρήστε ξεπερνούν τον αριθμό αυτό, η

χρήση πακέτων με ωφέλιμο φορτίο 1460 bytes φαίνεται να αποδίδει ελαφρώς το ίδιο καλά. Σε κάθε περίπτωση η χρησιμοποίηση μικρού μεγέθους πακέτου (1000 bytes) από το TCP είναι η πλέον ακατάλληλη.

Όταν έχουμε μικρό μέγεθος πλαισίου η διαδικασία ανίχνευσης του καναλιού θα χρησιμοποιηθεί περισσότερες φορές από ότι θα γινόταν με τα μεγαλύτερα πλαίσια, με αποτέλεσμα να χάνεται περισσότερος χρόνος λόγω του μεγαλύτερου αριθμού των διαστημάτων DIFS για την πρόσβαση στο κανάλι, των επιπρόσθετων πακέτων επαλήθευσης από το επίπεδο MAC και των διαστημάτων SIFS που τα ακολουθούν. Τα αποτελέσματα του throughput μας οδηγούν, επίσης, στο συμπέρασμα ότι για το συγκεκριμένο ρυθμό δημιουργίας των μηνυμάτων και παράλληλα με την απουσία λαθών, η χρησιμοποίηση μεγαλύτερου μεγέθους πλαισίου είναι, σε γενικές γραμμές, περισσότερο αποδοτική.

Όπως γίνεται φανερό, όσο αυξάνεται ο φόρτος (που στην παρούσα περίπτωση προέρχεται τόσο από την αύξηση των κόμβων όσο και από την εκθετική κατανομή δημιουργίας των μηνυμάτων) στο δίκτυο, τόσο μειώνεται το throughput. Το γεγονός αυτό έρχεται σε συμφωνία με τα αποτελέσματα ανάλογων προσομοιώσεων κατά τις οποίες προσομοιώθηκε η βασική μέθοδος πρόσβασης του 802.11 και το μέγεθος του μεταφερόμενου αρχείου ήταν είτε σταθερό [2], [3], [9] είτε μεταβλητό [5], [6] όπου η αύξηση του φόρτου οδηγεί αρχικά σε κορεσμό το throughput και στη συνέχεια σε αισθητή μείωση των τιμών του. Από το προηγούμενο γράφημα, είναι φανερό πως με τη χρησιμοποίηση ενός αισθητά μεγάλου μεγέθους μηνύματος και την δημιουργία πολλών τέτοιων μηνυμάτων έχουμε ξεπεράσει τις τιμές κορεσμού του throughput με αποτέλεσμα το τελευταίο να μειώνεται συνεχώς.

Το γεγονός, άλλωστε, ότι κατά την χρησιμοποίηση μεγαλύτερων πλαισίων πετυχαίνεται μεγαλύτερο throughput σε ένα δίκτυο 802.11 δίκτυο προκύπτει και από άλλες προσομοιώσεις [6], [7], [8], [9], στις οποίες χρησιμοποιήθηκε η βασική μέθοδος πρόσβασης DCF. Αξίζει να αναφέρουμε ότι αν και στα πλαίσια των άλλων προσομοιώσεων που αναφέρουμε, ο φόρτος ήταν αρκετά μικρότερος, τα αποτελέσματα έρχονται σε συμφωνία με αυτά της παρούσας προσομοίωσης. Από το [5], στο οποίο χρησιμοποιήθηκε η τεχνική FHSS κατά τη μοντελοποίηση του 802.11 MAC, προκύπτει, επίσης, ότι η χρησιμοποίηση σταθερού μεγέθους πακέτων (όπως στο σενάριο που προσομοιώσαμε) πετυχαίνει την μικρότερη καθυστέρηση για διάφορες τιμές throughput.

Σύμφωνα, άλλωστε, με το [9], η μείωση του μήκους του πακέτου στο μισό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του throughput όταν στο δίκτυο υπάρχει μικρός φόρτος (για περιβάλλον χωρίς λάθη), αλλά την μείωσή του όταν στο δίκτυο ο φόρτος αυξάνεται σημαντικά (λόγω των λαθών και των καθυστερήσεων). Η δική μας προσομοίωση δείχνει πως το όριο πάνω από το οποίο το μέγιστο μέγεθος πακέτου παύει να είναι και το πιο αποδοτικό είναι οι 25 χρήστες. Για 25 χρήστες και πάνω τα μικρότερα σε μέγεθος πακέτα πετυχαίνουν υψηλότερο throughput.

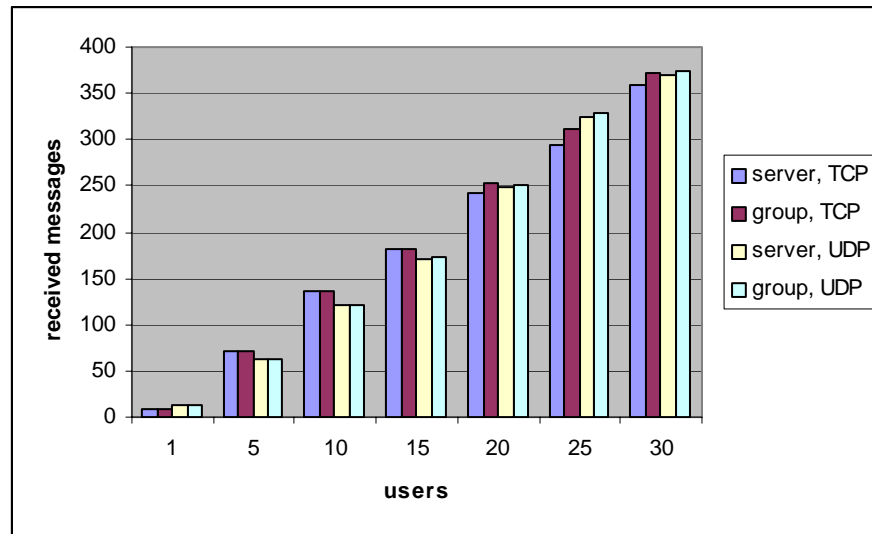
### 5.3.3 Σενάριο Τρίτο

Στην περίπτωση αυτή η δημιουργία των μηνυμάτων ακολουθεί εκθετική κατανομή με μέση τιμή 300. Μειώνοντας την κύρια τιμή της εκθετικής κατανομής δημιουργίας των μηνυμάτων από 600 σε 300, δίνεται η δυνατότητα της δημιουργίας πολύ περισσότερων αιτήσεων από κάθε χρήστη, αυξάνοντας, έτσι, αισθητά τον φόρτο στο δίκτυο. Και στην περίπτωση αυτή, το μέγεθος του αρχείου έμεινε σταθερό (ίσο με 2 MB), ενώ οι χρήστες (οι οποίοι χρησιμοποίησαν ως πρωτόκολλα μεταφοράς τα TCP και UDP) κυμάνθηκαν από 1 έως 30. Το μέγεθος του πακέτου δεδομένων που

δημιουργεί το επίπεδο μεταφοράς ήταν σταθερό και ίσο με 1500 (μαζί με τα 0H bytes).

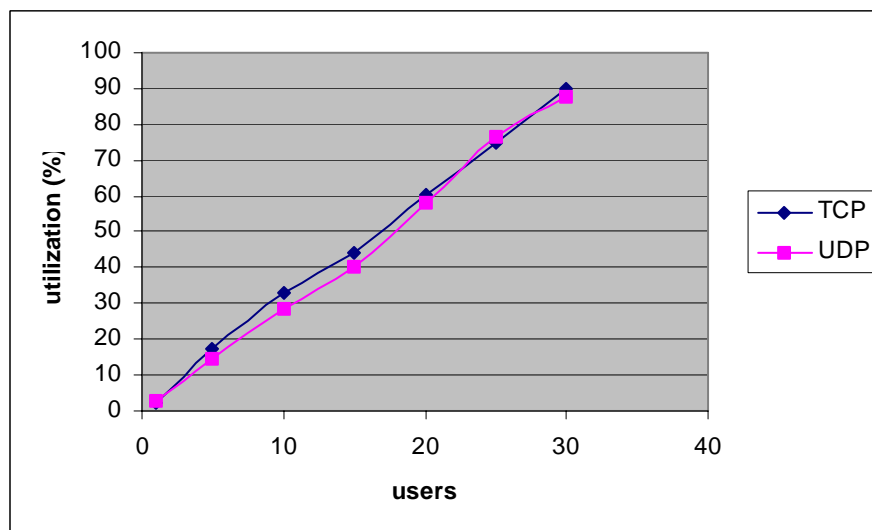
Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, κατά τη χρησιμοποίηση του TCP, παρατηρούμε ότι από 20 χρήστες και πάνω ξεκινάνε οι επαναμεταδόσεις πακέτων από το επίπεδο μεταφοράς, οι οποίες για 20, 25, 30 χρήστες είναι 1, 2, 36, αντίστοιχα. Στη συνέχεια δίνονται τα γραφήματα των παραμέτρων που επηρεάζουν κρίσιμα την απόδοση του δικτύου.

### Αριθμός ληφθέντων μηνυμάτων



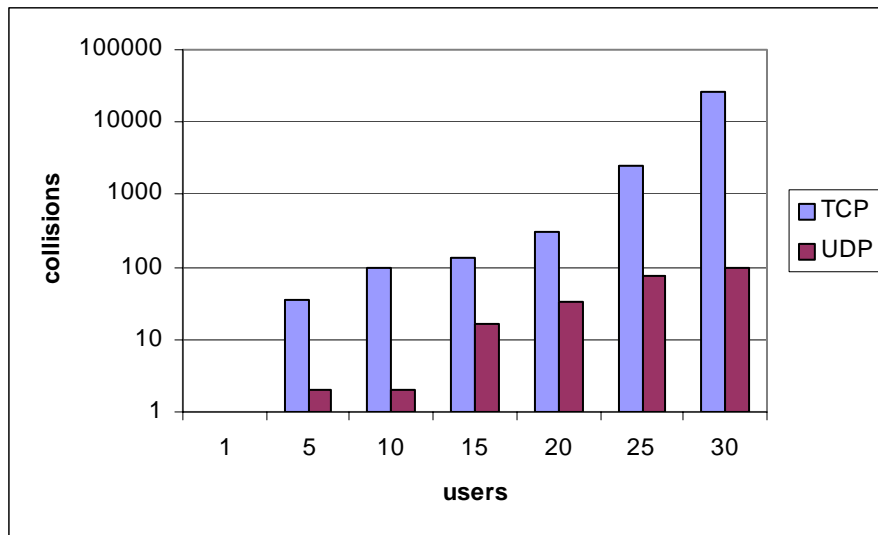
Από την παραπάνω γραφική παράσταση προκύπτει ότι για μικρότερο αριθμό χρηστών η χρησιμοποίηση του TCP οδηγεί στη λήψη περισσότερων μηνυμάτων από τους ασύρματους χρήστες, κάτι που φαίνεται να αναστρέφεται στην περίπτωση που στο σύστημα εισέρχονται περισσότεροι χρήστες.

### Χρησιμοποίηση καναλιού



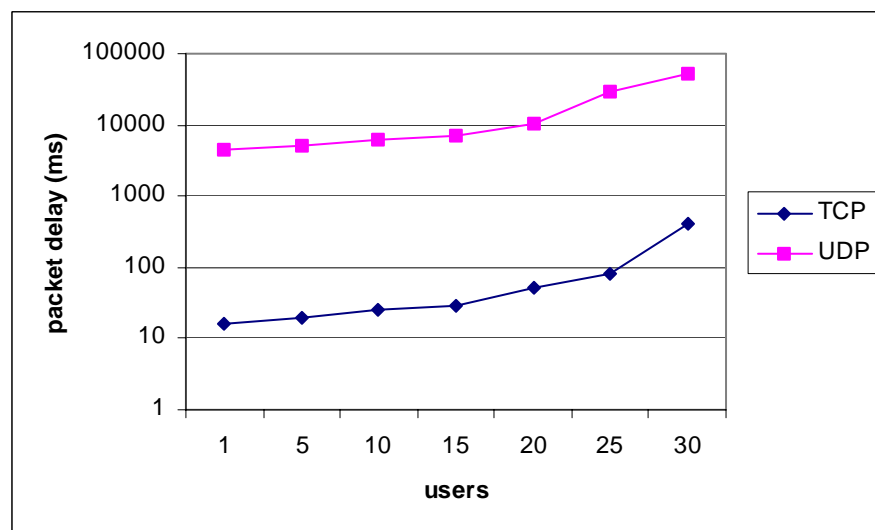
Ο φόρτος του καναλιού για το συγκεκριμένο σενάριο κυμάνθηκε σε πολύ υψηλά επίπεδα. Συγκεκριμένα, για το TCP από 41.67 Kbps έως 1704.26 Kbps, ενώ για το UDP από 54.1 Kbps έως 1689.1 Kbps. Η χρησιμοποίηση αυξάνεται με τον ίδιο γραμμικό τρόπο και για τα δύο πρωτόκολλα μεταφοράς.

### Αριθμός συγκρούσεων



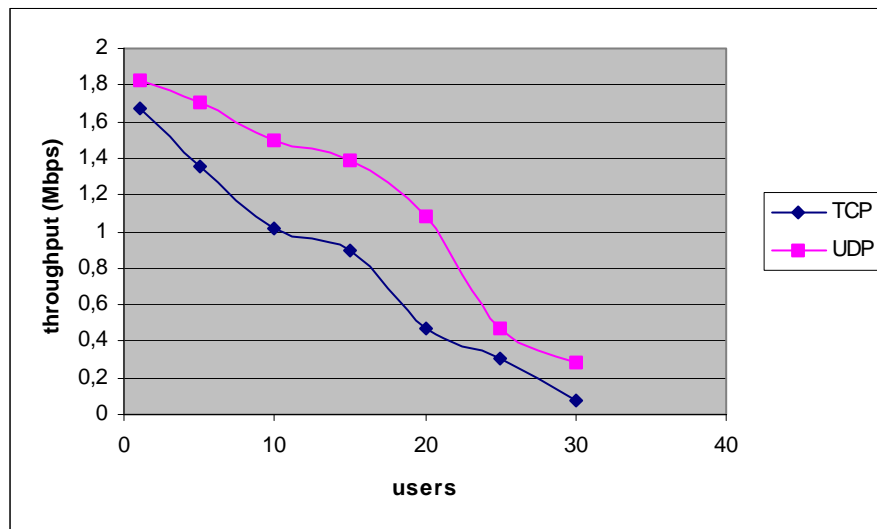
Ο μέγιστος αριθμός των συγκρούσεων έχει αυξηθεί αισθητά σε σχέση με το προηγούμενο σενάριο. Αξίζει όμως να σημειώσουμε ότι στον μεγάλο αριθμό συγκρούσεων που αφορούν το TCP συμμετέχουν και τα μικρά σε μέγεθος πακέτα (πακέτα: Open, Close, ACK), καθώς ο έλεγχος ροής (παράθυρο TCP/IP) και ο έλεγχος λαθών (fast recovery) περιορίζει τη σύγκρουση των πλαισίων δεδομένων. Αξίζει, επίσης, να παρατηρήσουμε τον μεγάλο αριθμό συγκρούσεων για το UDP, ο οποίος αναφέρεται αποκλειστικά σε πακέτα δεδομένων.

### Καθυστέρηση πακέτου



Ο μεγαλύτερος φόρτος στο δίκτυο (ο οποίος προκύπτει από την μείωση της κύριας τιμής της εκθετικής κατανομής δημιουργίας των μηνυμάτων) αυξάνει κατά πολύ τη μέση καθυστέρηση πακέτου σε σύγκριση με αυτή του προηγούμενου σεναρίου. Η απόκλιση μεταξύ μεγαλύτερης και μικρότερης τιμής για την μέση καθυστέρηση πακέτου είναι για το TCP 96,0% και για το UDP 91,4%.

### Throughput



Στην περίπτωση αυτή, ο φόρτος αυξάνεται σημαντικά με αποτέλεσμα οι τιμές του throughput να πλησιάζουν πολύ κατά την χρησιμοποίηση των δύο πρωτοκόλλων μεταφοράς, ειδικά για 25 και 30 χρήστες. Η απόκλιση είναι για το TCP 95,5% και για το UDP 84,3%. Η επιλογή του συγκεκριμένου ρυθμού δημιουργίας μηνυμάτων οδηγεί σε πολύ μικρές τιμές throughput, ειδικά όταν στο δίκτυο συμμετέχουν πάνω από 20 χρήστες.

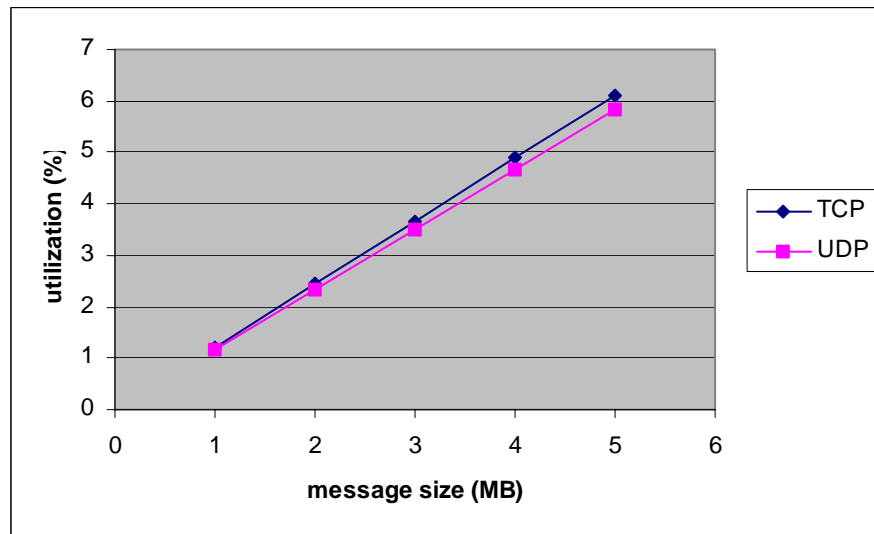
#### **5.3.4 Σενάριο Τέταρτο**

Μεγάλο ρόλο στην απόδοση που μπορεί να έχει ένα δίκτυο παίζει και το μέγεθος των πακέτων που μετακινούνται μέσα σε αυτό και διαμορφώνουν ανάλογα τον φόρτο. Έτσι, στο 4<sup>ο</sup> κατά σειρά σενάριο μεταβάλλαμε το μέγεθος του αρχείου που βρίσκεται στον server από 1 έως 5 MB, αυξάνοντάς το κάθε φορά κατά 1 MB, ενώ διατηρήσαμε σταθερό τον αριθμό των χρηστών (ίσο με 10). Επίσης, πρέπει να σημειώσουμε ότι οι χρήστες που βρίσκονται στο σύστημα αιτούνται μόνο μία φορά ο καθένας το εκάστοτε αρχείο από τον server. Σκοπός του σεναρίου αυτού ήταν να δούμε πως τα δύο πρωτόκολλα μεταφοράς (το πλαίσιο δεδομένων είχε σταθερή τιμή ίση με 1500 bytes μαζί με τα bytes επιβάρυνσης) ανταποκρίνονται στην αύξηση του μεγέθους του αρχείου μεταφοράς που οι χρήστες αιτούνται από τον server.

Στη συνέχεια δίνονται οι γραφικές παραστάσεις των κυριότερων παραμέτρων όπως αυτές προέκυψαν από την προσομοίωση.

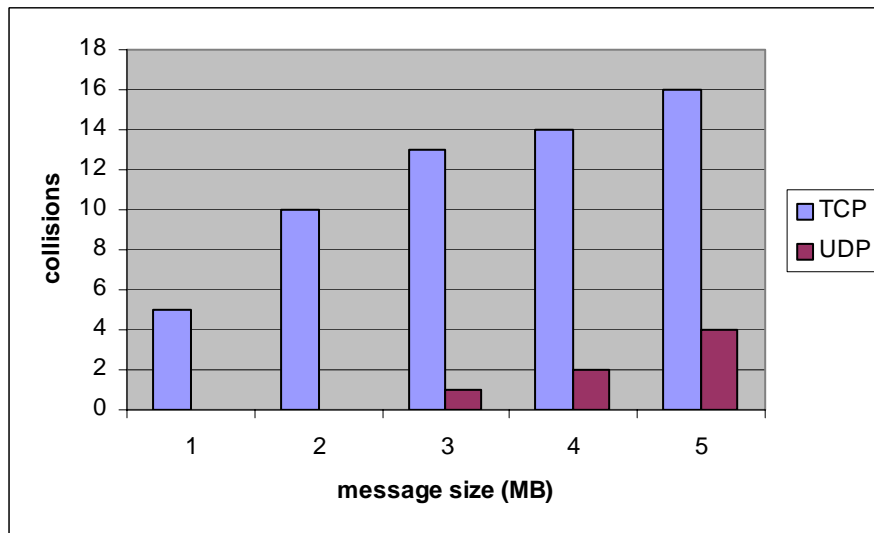


### Χρησιμοποίηση καναλιού



Ο φόρτος του καναλιού κυμάνθηκε για το TCP από 23.17 έως 115.73 Kbps, ενώ για το UDP από 22.55 έως 112.62 Kbps. Η αύξηση της χρησιμοποίησης είναι γραμμική και για τα δύο πρωτόκολλα μεταφοράς και ελαφρώς μεγαλύτερη για το TCP, γεγονός αναμενόμενο λόγω της χρησιμοποίησης από το τελευταίο πρόσθετων πακέτων (πακέτα έναρξης και τερματισμού μιας σύνδεσης και πακέτα επαλήθευσης) που επιβαρύνουν το δίκτυο.

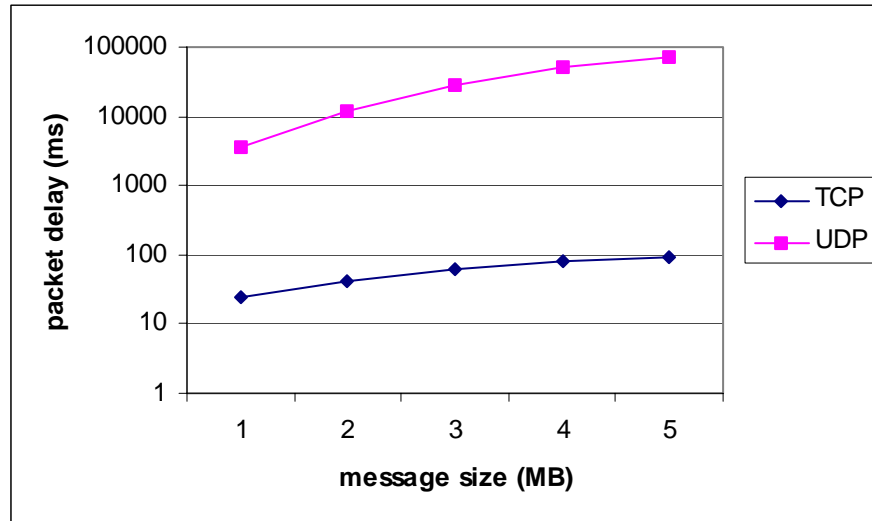
### Αριθμός συγκρούσεων



Η απουσία λαθών και η μεταφορά ενός μόνο αρχείου από κάθε χρήστη ελαχιστοποιεί την πιθανότητα συγκρούσεων, γεγονός που επαληθεύεται από την παραπάνω γραφική παράσταση. Όπως φαίνεται η επιλογή των 10 χρηστών δεν δημιουργεί σημαντικό φόρτο στο δίκτυο για οποιοδήποτε μέγεθος αρχείου, αφού

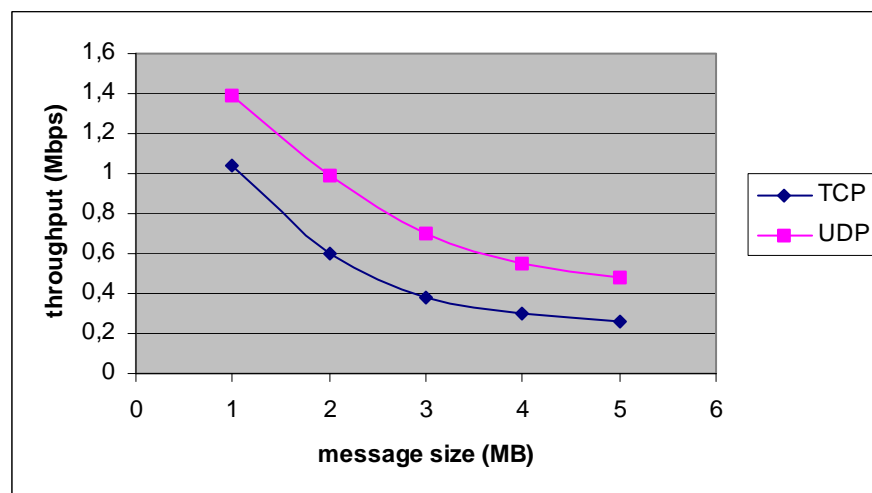
ακόμα και κατά την μεταφορά 5 MB, ο αριθμός των συγκρούσεων για το UDP ήταν μόλις 4.

### Καθυστέρηση πακέτου



Από το γράφημα γίνεται φανερό το γεγονός πως η μεταβολή του μεγέθους του αρχείου έχει μεγαλύτερη επίδραση όσον αφορά την μέση καθυστέρηση της μεταφοράς του πακέτου στο πρωτόκολλο UDP. Πιο συγκεκριμένα, όταν χρησιμοποιείται το TCP η % αύξηση της καθυστέρησης ισούται με 73,4%, ενώ όταν χρησιμοποιείται το UDP η αύξηση αυτή φτάνει το 95,0%.

### Throughput



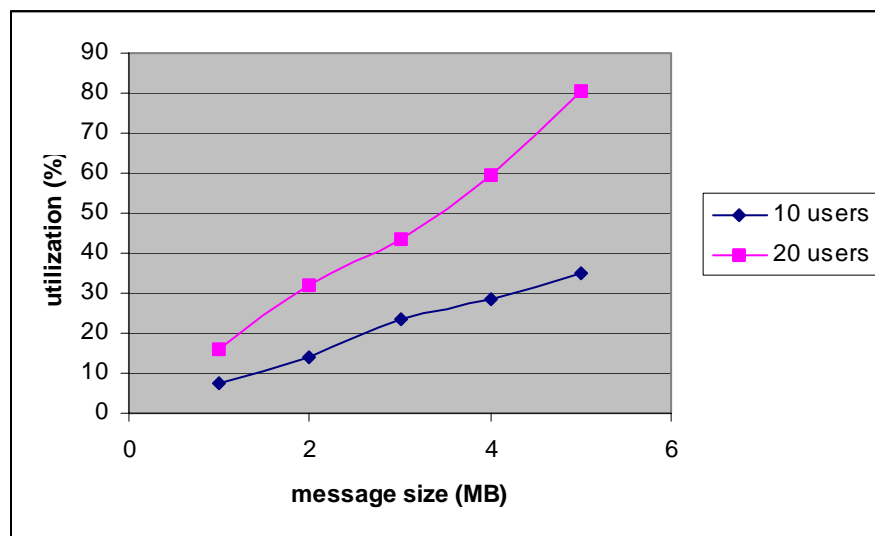
Η αύξηση του μεγέθους του αρχείου μεταφοράς οδηγεί σε σημαντική μείωση του throughput. Αν και ο χρόνος δημιουργίας από κάθε χρήστη είναι τυχαίος μέσα στο διάστημα (0,100)sec, η σταδιακή αύξηση κατά 1 MB του μεγέθους του αρχείου αυξάνει την χρησιμοποίηση του καναλιού, δημιουργεί επιπρόσθετη επιβάρυνση με

αποτέλεσμα το throughput να μειώνεται. Η απόκλιση της τιμής του throughput μεταξύ των ακραίων τιμών μεγέθους αρχείου (1 και 5 MB) είναι για το TCP 71,2% και για το UDP 65,3%.

### 5.3.5 Σενάριο Πέμπτο

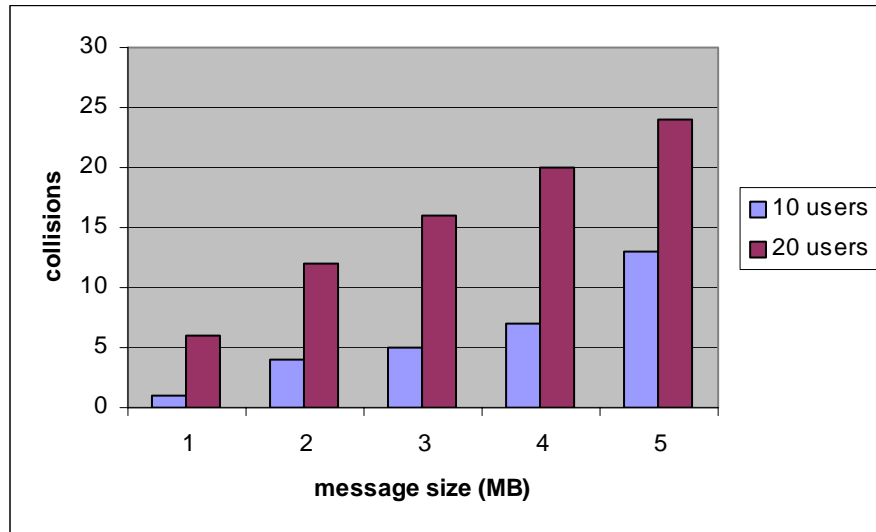
Στο σενάριο αυτό μεταβάλλουμε πάλι το μέγεθος του αρχείου όπως ακριβώς και στην προηγούμενη περίπτωση, μόνο που τώρα κάθε χρήστης που βρίσκεται στο ασύρματο δίκτυο δημιουργεί τις αιτήσεις προς τον server με μία συγκεκριμένη εκθετική κατανομή με κύρια τιμή 600 sec. Οι προσομοιώσεις έλαβαν χώρα για 2 ασύρματα δίκτυα με το καθένα να έχει σταθερό αριθμό χρηστών (10 και 20 χρήστες αντίστοιχα), ώστε να διαπιστώσουμε πως αποκρίνονται τα δύο δίκτυα όταν διπλασιάζεται ο φόρτος στο δίκτυο. Ως πρωτόκολλο μεταφοράς χρησιμοποιήθηκε μόνο το UDP, αφού σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα αποκρίνεται καλύτερα από το TCP και προσθέτει λιγότερη επιβάρυνση στο ελεύθερο από λάθη ασύρματο δίκτυο. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αναλύονται στη συνέχεια, με τη βοήθεια των γραφικών παραστάσεων. Το μεταβλητό αρχείο μεταφοράς χωρίζεται και εδώ σε τεμάχια ίσα με το μέγεθος ενός πλαισίου UDP (1480 data bytes + 20 OH bytes).

#### Χρησιμοποίηση καναλιού



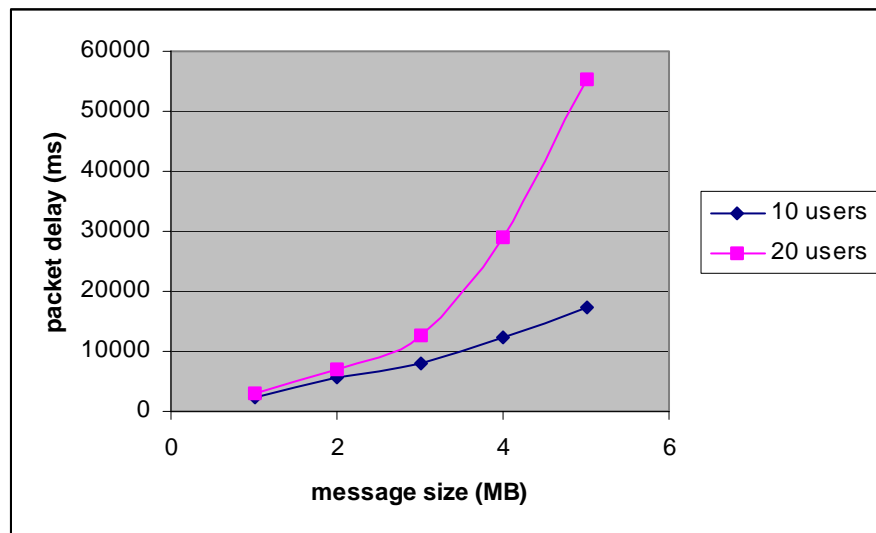
Η χρησιμοποίηση του ασύρματου καναλιού είναι εμφανώς μεγαλύτερη όταν στο δίκτυο υπάρχουν 20 κόμβοι σε σχέση με την χρησιμοποίηση όταν οι κόμβοι είναι ακριβώς οι μισοί. Ειδικά, στην περίπτωση που στο δίκτυο μεταφέρεται αρχείο 5 MB, ο φόρτος φτάνει στο 80% της χωρητικότητας του ασύρματου καναλιού.

### Αριθμός συγκρούσεων



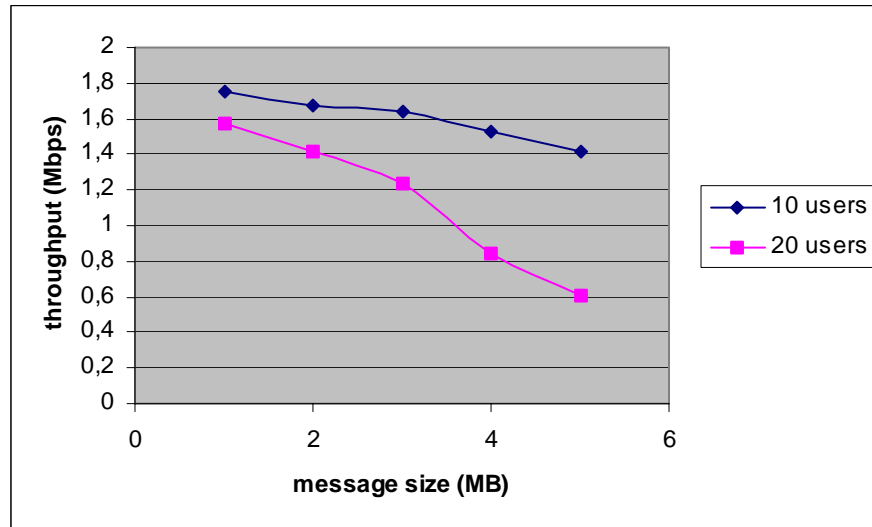
Ο αριθμός των συγκρούσεων είναι σταθερά μεγαλύτερος στην περίπτωση που το ασύρματο δίκτυο μοιράζονται 20 χρήστες. Όπως ήταν αναμενόμενο η αύξηση του μεγέθους του μεταφερόμενου αρχείου αυξάνει και τον αριθμό των συγκρούσεων.

### Καθυστέρηση πακέτου



Ενώ η αύξηση της μέσης καθυστέρησης είναι σχεδόν γραμμική για την περίπτωση των 10 χρηστών, όταν στο δίκτυο συμμετέχουν 20 χρήστες η αύξηση της καθυστέρησης είναι καθαρά εκθετική. Όπως φαίνεται και στο γράφημα η απόκλιση αρχίζει να αυξάνεται όταν το αρχείο παίρνει τιμές μεγαλύτερες από 3 MB.

## Throughput



Αυτό που αξίζει να παρατηρήσουμε από το γράφημα του throughput είναι (πέρα από την αναμενόμενη καλύτερη επίδοση στην περίπτωση που στο σύστημα υπάρχουν 10 χρήστες) είναι η διατήρηση της τιμής του throughput για μέγεθος αρχείου ίσο με 2-3 MB όταν το δίκτυο μοιράζονται 10 χρήστες.

## 5.4 Προσομοίωση με μοντελοποίηση των λαθών

Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίπτωση όπου ένα δίκτυο προσομοιώνεται με τη βοήθεια παραμέτρων που μοντελοποιούν τις καθυστερήσεις και τα λάθη που μπορούν να συμβούν σε ένα πραγματικό δίκτυο. Στο μέρος αυτό της διπλωματικής εργασίας προσομοιώθηκαν (σε περιβάλλον λαθών) μόνο κάποια αντιπροσωπευτικά σενάρια του προηγούμενου μέρους, καθώς σκοπός δεν ήταν η απόλυτη σύγκριση όλων των περιπτώσεων αλλά να διερευνηθεί πως τα λάθη και οι καθυστερήσεις επιβαρύνουν το δίκτυο για τις 3 σημαντικότερες περιπτώσεις:

- Δημιουργία ενός μηνύματος (αίτησης) από τους χρήστες
- Δημιουργία περισσότερων του ενός μηνύματος από τους χρήστες (σύμφωνα με την εκθετική κατανομή)
- Μεταβολή του μεγέθους του αρχείου που αιτείται ένας σταθερός αριθμός χρηστών.

Η κύρια παράμετρος που μας ενδιαφέρει είναι η ωφέλιμη ταχύτητα μεταφοράς. Για τον λόγο αυτό πέρα από τις συγκρίσεις των υπολοίπων παραμέτρων που προέκυψαν από τα 2 δικτυακά περιβάλλοντα (με λάθη και χωρίς λάθη) στο τέλος κάθε σεναρίου παραθέτουμε και το γράφημα της απόκλισης του throughput μεταξύ των τιμών της συγκεκριμένης παραμέτρου όταν το ασύρματο δίκτυο μοντελοποιείται με λάθη και χωρίς λάθη.

Οι τιμές των παραμέτρων στις οποίες επηρεάζονται καθυστερήσεις και λάθη δίνονται παρακάτω ανάλογα με τα δομικά στοιχεία του μοντέλου προσομοίωσης.

### 1. Αίτηση αρχείου (**File Request**)

- Packetize delay: 0.01 ms

### 2. Ομάδα χρηστών του ασύρματου δικτύου (**Group of wireless users**)

Οι τιμές των καθυστερήσεων που μοντελοποίησαν λάθη κατά την επεξεργασία των πακέτων στους κόμβους δίνονται παρακάτω:

- Additional processing/kbyte: 1 ms/kbyte
- Port delay: 0.05 ms
- Processing/cycle: 0.02 mic

### 3. Ασύρματο Τοπικό Δίκτυο (**WLAN**)

Οι τιμές των χαρακτηριστικών που μοντελοποίησαν λάθη και καθυστερήσεις του φυσικού καναλιού δίνονται παρακάτω:

- Propagation delay: 0.001 ms
- BER: 0.001 (Correctable bits: 1)
- ACK BER: 0.112

Η τιμή του BER στα ασύρματα δίκτυα είναι ‘δυναμική’ και εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους. Στο συγκεκριμένο μοντέλο θέσαμε μία σταθερή τιμή, κάτι που προσομοιάζει καλά μία τοπολογία όπου οι χρήστες δεν βρίσκονται σε κίνηση και ο λόγος S/N είναι σχεδόν σταθερός (η τιμή του BER σε ένα ασύρματο δίκτυο εξαρτάται άμεσα από την τιμή του SNR). Η τιμή που θέσαμε είναι από τις χειρότερες που μπορεί να εμφανίσει ένα ασύρματο κανάλι, παρ’όλα αυτά είναι σύμφωνη με τα όρια ενός υψηλού BER, όπως αυτά τέθηκαν σε παρόμοια σενάρια προσομοιώσεων [8], [11], [12].

Όσον αφορά το πεδίο ‘ACK Error’ ο υπολογισμός έγινε με την παρακάτω προσέγγιση. Υποθέτοντας ότι λάθη ACK παίρνεις όταν γίνει λάθος σε κάποιο bit του

ACK μηνύματος και συμβολίζοντας με  $n$  το μήκος του ACK μηνύματος σε bits και με  $p$  την πιθανότητα για λάθος σε 1 bit (δηλαδή το BER), ισχύουν τα εξής: 1 bit του ACK μεταδίδεται σωστά με πιθανότητα  $(1-p)$ . Επομένως, για ανεξάρτητα μεταξύ τους bits (μια υπόθεση που γίνεται συνήθως και υποθέτει 'σταθερές' συνθήκες BER για τη διάρκεια μετάδοσης του ACK μηνύματος) όλο το ACK μήνυμα μεταδίδεται σωστά με πιθανότητα  $(1-p)^n$ . Άρα, η πιθανότητα λάθους σε ένα ACK μήνυμα είναι:

$$\text{ACK Error Probability} = 1 - (1-p)^n$$

η οποία στην περίπτωση που ισχύει:  $n \cdot p \ll 1$ , είναι περίπου  $n \cdot p$ . Από την τελευταία προσέγγιση προκύπτει και η τιμή που θέσαμε στο πεδίο 'ACK BER' (υπενθυμίζουμε ότι το μέγεθος ενός ACK πλαισίου, όπως μεταδίδεται από το επίπεδο MAC και καθορίζεται από το 802.11, είναι ίσο με 14 bytes ή 112 bits).

Ότι αναφέρθηκε παραπάνω για τα ACK πακέτα ισχύουν και στην περίπτωση κάθε πλαισίου δεδομένων. Ο ρυθμός εμφάνισης λάθους σε ένα πακέτο αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως **PER** (Packet Error Rate). Λόγω του μεγάλου αριθμού πακέτων που διακινείται μέσω του ασύρματου δικτύου, του μεγάλου μήκους του κάθε πακέτου αλλά και της υψηλής τιμής του BER θεωρήσαμε καλύτερο να μην μοντελοποιήσουμε το PER, παρά μόνο την πιθανότητα λάθους σε ένα πακέτο ACK, καθώς σε αντίθετη περίπτωση θα υπερφορτώναμε το δίκτυο με ένα σχεδόν εξωπραγματικό αριθμό λαθών και καθυστερήσεων.

#### 4. Παροχέας Υπηρεσίας (**Multimedia Server**)

Οι τιμές στις καθυστερήσεις είναι ίδιες με αυτές που δόθηκαν στο 'Group of wireless users'.

#### 5. Απάντηση του Server στις αιτήσεις των χρηστών (**Server Reply**)

Ο χρόνος καθυστέρησης πριν αποσταλεί το αρχείο που αιτήθηκαν οι διάφοροι χρήστες ('Received message delay') επιλέχθηκε να προκύπτει από μία ομοιόμορφη κατανομή [Uniform (3,5)] με ελάχιστο χρόνο καθυστέρησης τα 3 sec και μέγιστο τα 5 sec.

Στη συνέχεια αναλύονται τα τρία σενάρια με τη βοήθεια των γραφημάτων των σημαντικότερων παραμέτρων του συγκεκριμένου μοντέλου.

#### 5.4.1 Πρώτο Σενάριο

Όπως και στο 1<sup>ο</sup> σενάριο της προηγούμενης παραγράφου (χωρίς μοντελοποίηση λαθών), έτσι και στην περίπτωση αυτή κάθε κόμβος (χρήστης) επιλέχθηκε να δημιουργεί ένα μόνο μήνυμα σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Ως πρωτόκολλα μεταφοράς χρησιμοποιήθηκαν και πάλι τα TCP και UDP (τα bytes δεδομένων των αντίστοιχων πακέτων είχαν σταθερή τιμή, ίση με 1460). Το αρχείο που αιτούνται οι χρήστες έχει σταθερό μέγεθος (2 MB) και οι χρήστες αυξάνονται σταδιακά από 1 έως 30.

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται κάποιες σημαντικές τιμές όπως αυτές προέκυψαν από τις προσομοιώσεις κατά την χρησιμοποίηση του TCP.

## Πίνακας 5.2

users	pkt creat. inter.	cong. avoid.	mes. retrans.	ACKs drop.
1	13 2	0	0	0
5	26 15	4	4	4
10	62 111	20	22	20
15	117 151	30	46	39
20	174 258	48	69	66
25	228 296	80	107	99
30	277 363	79	104	99

Οι ποσότητες που δίνονται στον πίνακα είναι οι εξής:

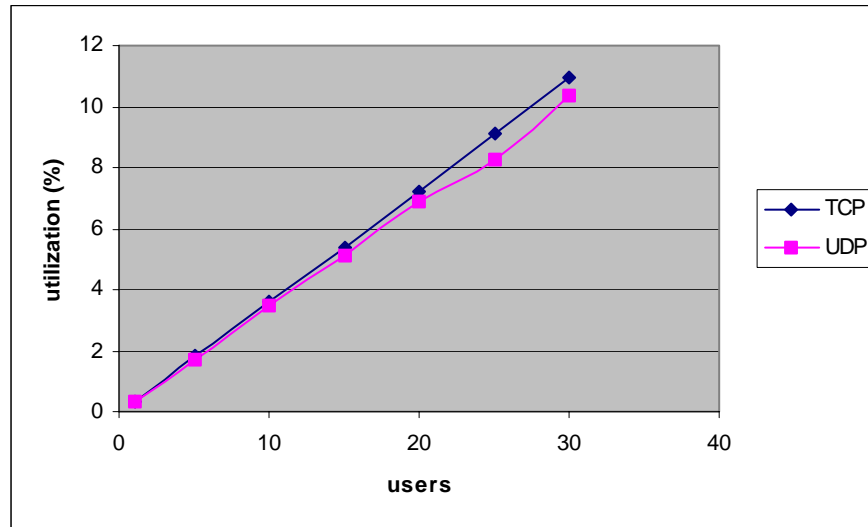
- Users: Ο αριθμός των χρηστών.
- Packet creation interval: Ο μέσος χρόνος που μεσολαβεί ανάμεσα στη δημιουργία δύο πακέτων. Ο πρώτος αριθμός αφορά το διάστημα κατά τη δημιουργία πακέτων από τον server, ενώ ο δεύτερος το διάστημα κατά τη δημιουργία πακέτων από την πλευρά των χρηστών. Ο χρόνος που δίνεται είναι σε ms.
- Congestion avoidance: Ο αριθμός των γεγονότων όπου το TCP congestion window εισέρχεται στη λειτουργία της αποφυγής συμφόρησης (congestion avoidance), κατά την οποία το παράθυρο αυξάνει γραμμικά σε σχέση με τον αλγόριθμο slow start που λειτουργούσε αρχικά.
- Packet retransmissions: Ο αριθμός των πακέτων που επαναμεταδόθηκαν.
- ACKs dropped: Ο αριθμός των πακέτων επαλήθευσης που εγκαταλείφθηκαν (dropped).

Όπως φαίνεται από τον πίνακα, η αύξηση των χρηστών και του φόρτου στο δίκτυο έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του μέσου χρόνου που μεσολαβεί μεταξύ της δημιουργίας διαδοχικών πακέτων. Έτσι, ο ρυθμός μετάδοσης των πακέτων μειώνεται με αποτέλεσμα, σύμφωνα και με τον ανάλογο τύπο του κεφαλαίου 6, να αναμένουμε μείωση του throughput.

Στη συνέχεια δίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για το συγκεκριμένο σενάριο.

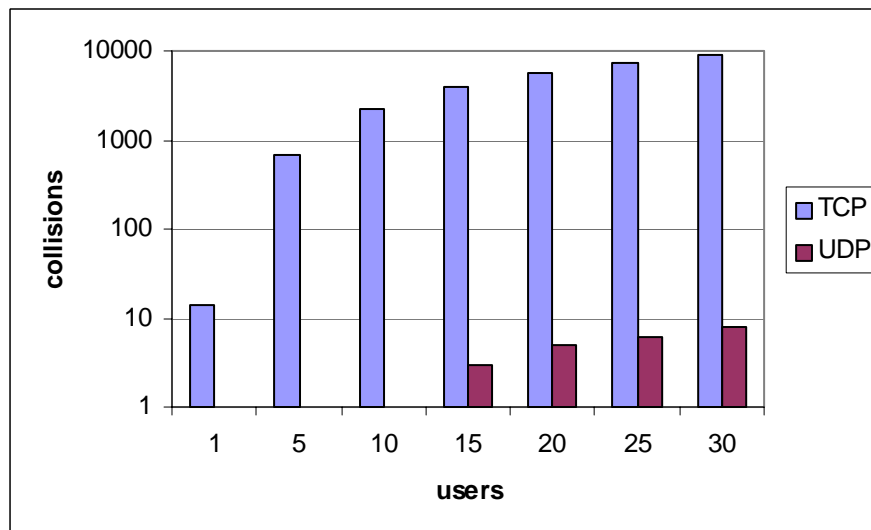


### Χρησιμοποίηση καναλιού



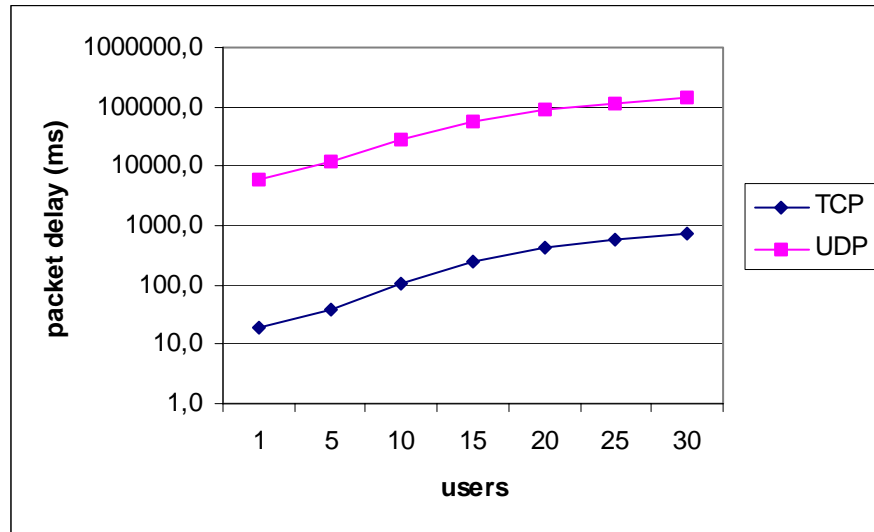
Ο φόρτος του καναλιού κυμάνθηκε για το TCP από 4.63 έως 139.78 Kbps, ενώ για το UDP από 4.51 έως 135.11 Kbps. Όπως φαίνεται και από το γράφημα η χρησιμοποίηση γίνεται μεγαλύτερη για το TCP όσο αυξάνονται οι χρήστες, κάτι που περιμέναμε λόγω της μεγαλύτερης επιβάρυνσης που εισάγεται στο δίκτυο από το συγκεκριμένο πρωτόκολλο μεταφοράς.

### Αριθμός συγκρούσεων



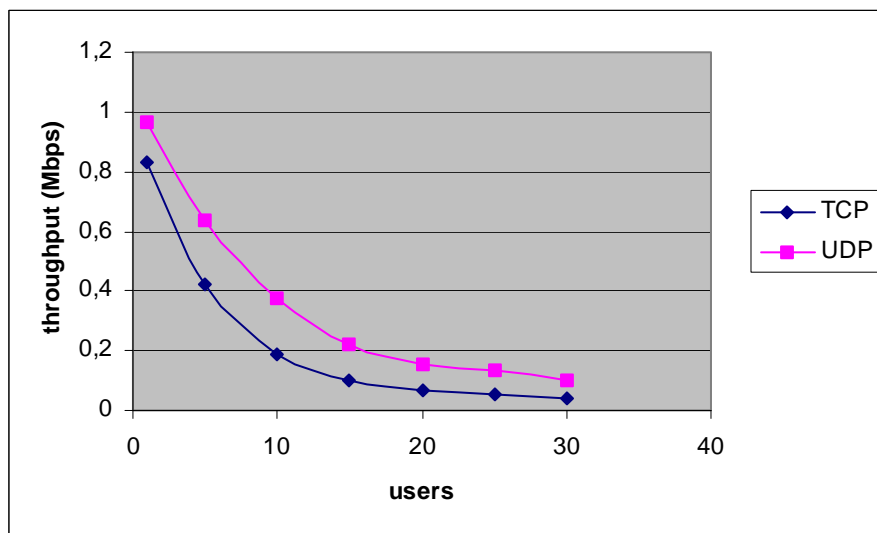
Ο αριθμός των συγκρούσεων παρουσιάζεται ιδιαίτερα μεγάλος για το TCP, γεγονός αναμενόμενο αν αναλογιστούμε ότι όλοι οι χρήστες πρέπει να δημιουργήσουν τις αιτήσεις μέσα σε ένα σύντομο χρονικό διάστημα και σε ένα περιβάλλον με λάθη και καθυστερήσεις. Οι τελευταίες δεν φαίνεται να επηρεάζουν ιδιαίτερα το UDP, καθώς οι συγκρούσεις κατά τη χρησιμοποίησή του κυμαίνονται στα ίδια χαμηλά επίπεδα με αυτά του αντίστοιχου μοντέλου χωρίς λάθη.

### Καθυστέρηση πακέτου



Το ποσοστό της τελικής αύξησης της μέσης καθυστέρησης (όπως αυτό προκύπτει από την απόκλιση μεταξύ των δύο ακραίων τιμών για 1 και 30 χρήστες) είναι σχεδόν το ίδιο και για τα δύο πρωτόκολλα μεταφοράς (συγκεκριμένα, για το TCP είναι ίση με 97,3% και για το UDP ίση με 96,1%).

### Throughput

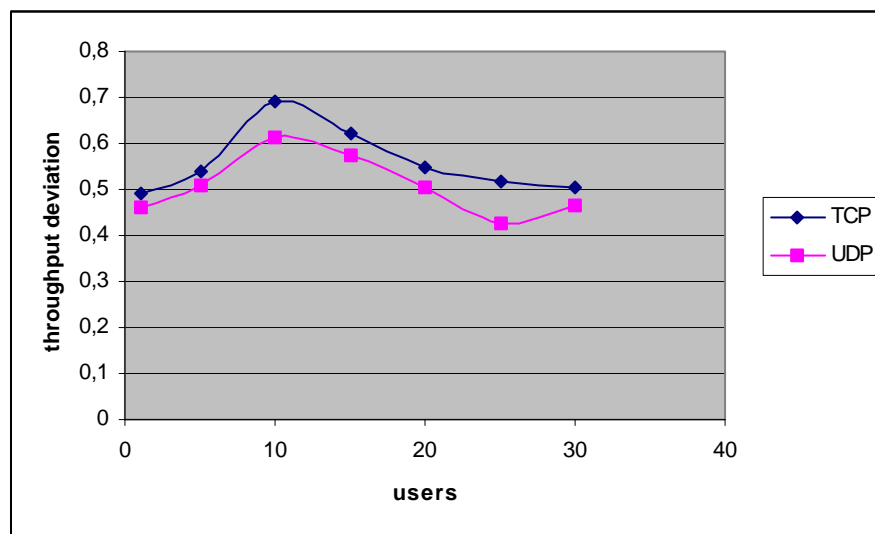


Και στην περίπτωση του throughput η % μείωση της τιμής του από τη στιγμή που στο σύστημα υπάρχει 1 μόνο χρήστης μέχρι τη στιγμή που ο αριθμός των χρηστών είναι ίσος με 30 είναι δραματική. Για το TCP ισούται με 95% και για το UDP ίση με 89,7%. Η διαφορά από τις αντίστοιχες τιμές του μοντέλου προσομοίωσης χωρίς λάθη είναι χαρακτηριστική, αφού η μέγιστη τιμή από 1.8 Mbps πέφτει κάτω 1 Mbps για το UDP, ενώ κάτι αντίστοιχο συμβαίνει και για το TCP. Είναι σημαντικό να αναφέρουμε πως το γράφημα των συγκρούσεων αναφέρεται στις συγκρούσεις που

συνέβησαν στο φυσικό κανάλι, αλλά όχι και στο επίπεδο MAC. Οι συγκρούσεις αυτές συμβάλλουν κατά πολύ στην μείωση του throughput των TCP και UDP.

Στην επόμενη γραφική παράσταση φαίνεται η απόκλιση της τιμής του throughput ανάμεσα στα δύο περιβάλλοντα που προσομοιώθηκαν (με λάθη και χωρίς λάθη). Η τιμή προέκυψε υπολογίζοντας το % ποσοστό που μειώθηκε το throughput όταν υπάρχουν λάθη σε σχέση με αυτό που μετρήθηκε όταν στο δίκτυο δεν υπήρχαν λάθη. Δηλαδή:

$$deviation = \frac{throughput(NE) - throughput(ERR)}{throughput(NE)}$$



Όπως φαίνεται από το γράφημα της απόκλισης του throughput η κατανομή της απόκλισης είναι ομοιόμορφη για τα δύο πρωτόκολλα (και σταθερά μεγαλύτερη για το TCP), γεγονός αναμενόμενο λόγω του χαμηλού φόρτου του συγκεκριμένου σεναρίου. Η μεγαλύτερη απόκλιση και για τα δύο πρωτόκολλα μεταφοράς εμφανίζεται όταν στο δίκτυο υπάρχουν 10 χρήστες, ενώ σε κάθε περίπτωση η απόκλιση του throughput όταν χρησιμοποιείται το UDP είναι μικρότερη από αυτή του TCP.

#### 5.4.2 Σενάριο Δεύτερο

Στην περίπτωση αυτή η δημιουργία μηνυμάτων ακολουθεί εκθετική κατανομή με κύρια τιμή 600, όπως και στο αντίστοιχο μοντέλο που προσομοιώθηκε σε περιβάλλον χωρίς λάθη. Τα πακέτα TCP και UDP έχουν σταθερό μέγεθος δεδομένων ίσο με 1460 bytes, ενώ το μέγεθος του αρχείου μεταφοράς παραμένει και αυτό σταθερό και ίσο με 2 MB.

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται (όπως και στον πίνακα του 1<sup>ου</sup> σεναρίου) κάποιες σημαντικές ποσότητες όπως αυτές προέκυψαν από τις προσομοιώσεις κατά την χρησιμοποίηση του TCP και όταν το εύρος ζώνης είναι 2 Mbps.

**Πίνακας 5.3**

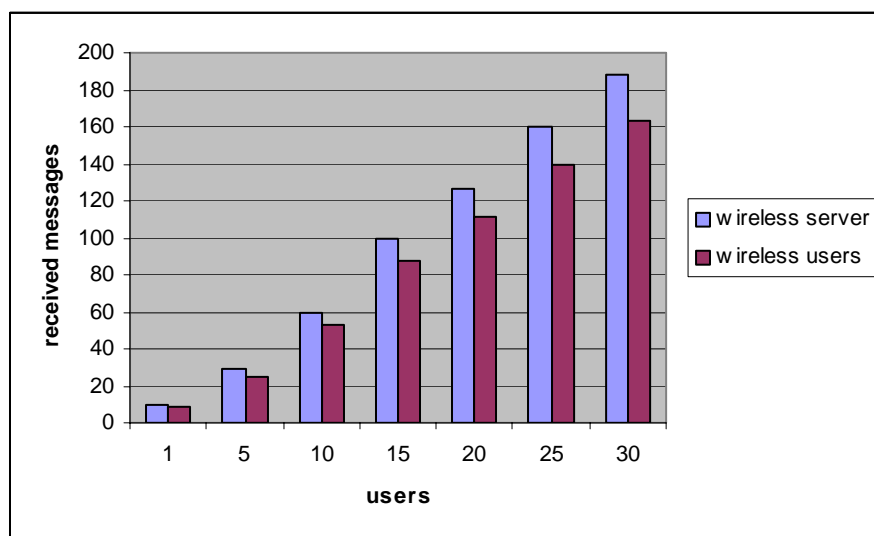
users	pkt creat. int.	cong. avoid.	mes. retrans.	ACKs drop.
1	14 7	2	2	1
5	14 3	5	6	4
10	17 6	15	15	8
15	22 18	55	57	35
20	38 50	132	146	124
25	62 116	246	301	263
30	109 249	345	495	442

Αξίζει να παρατηρήσουμε την σχεδόν εκθετική αύξηση του αριθμού των επαναμεταδιδόμενων πακέτων όσο αυξάνεται ο αριθμός των χρηστών του δικτύου. Από τις δύο τελευταίες στήλες του πίνακα 7.2 γίνεται, επίσης, φανερό πως όσο αυξάνεται ο φόρτος στο δίκτυο, χάνονται ολοένα και περισσότερα πακέτα επαλήθευσης, με αποτέλεσμα οι επαναμεταδόσεις τόσο των τελευταίων όσο και των πακέτων δεδομένων να αυξάνεται σε υπερβολικά μεγάλο βαθμό. Όλα αυτά τα χαμένα ACKs θα μπορούσαν να αποφευχθούν καθώς το ίδιο το MAC του 802.11 καθορίζει την τεχνική της θετικής επαλήθευσης.

Όσον αφορά το UDP, η επίδραση των λαθών και των καθυστερήσεων φαίνεται στον αυξανόμενο αριθμό των πακέτων που εγκαταλείπονται και τα οποία κυμαίνονται από 1 έως 33.

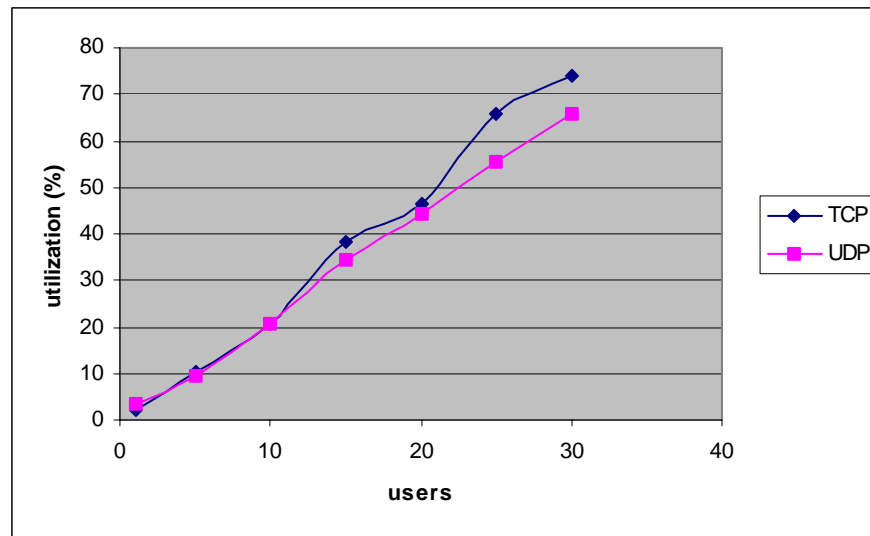
Παρακάτω δίνονται οι γραφικές παραστάσεις των κυριότερων παραμέτρων όπως αυτές προέκυψαν από τις προσομοιώσεις.

Αριθμός ληφθέντων μηνυμάτων



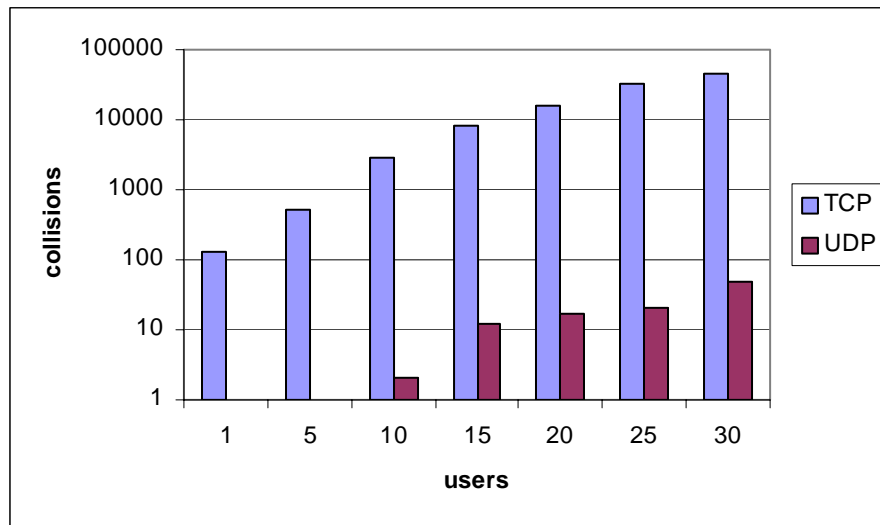
Το παραπάνω γράφημα απεικονίζει τον αριθμό των μηνυμάτων που έλαβαν, σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης, τόσο ο server όσο και οι χρήστες κατά την χρησιμοποίηση του UDP. Είναι φανερό πως η αύξηση των χρηστών στο δίκτυο οδηγεί τον κάθε ένα από τους τελευταίους στο να κάνουν λήψη ολοένα και λιγότερων αρχείων από αυτά που αιτήθηκαν. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται εκτός από τις καθυστερήσεις του δικτύου και στον αναξιόπιστο τρόπο μεταφορά του πρωτοκόλλου UDP, καθώς κατά τη χρησιμοποίηση του TCP ο μέγιστος αριθμός αιτήσεων που δεν απαντήθηκαν από τον server ήταν στη χειρότερη περίπτωση (για 30 χρήστες) ίσος με 5.

### Χρησιμοποίηση καναλιού



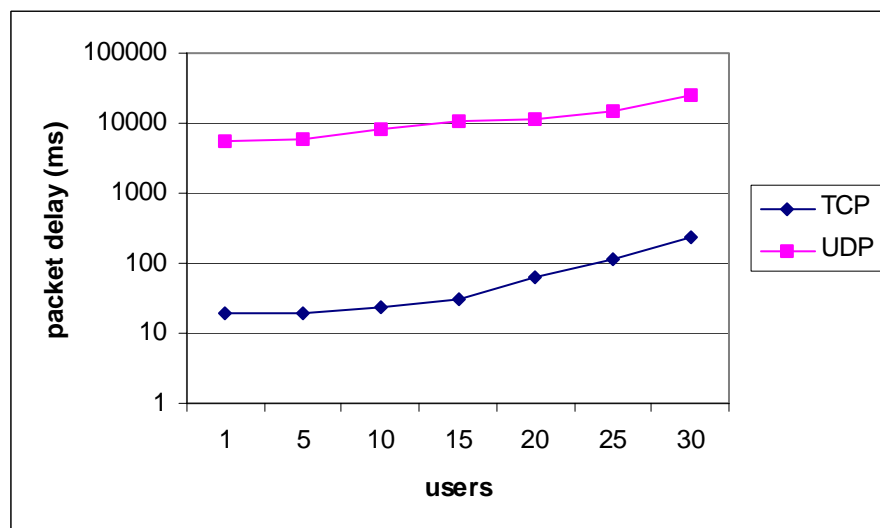
Ο φόρτος του καναλιού για 2 Mbps κυμάνθηκε για το TCP από 27.79 έως 953.77 Kbps, ενώ για το UDP από 45.07 έως 864.19 Kbps. Η χρησιμοποίηση του ασύρματου καναλιού αρχίζει να διαφοροποιείται από 10 χρήστες και πάνω.

### Αριθμός συγκρούσεων



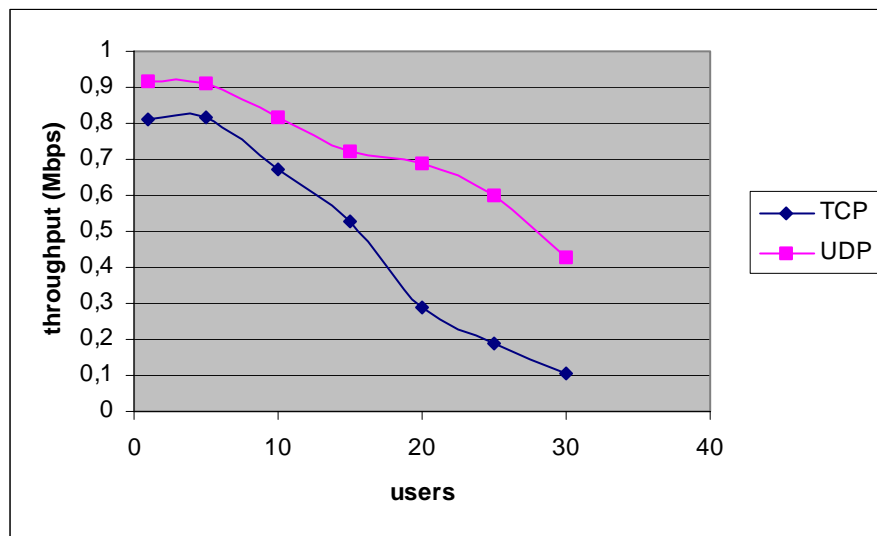
Ο αριθμός των συγκρούσεων για το TCP κυμαίνεται σε πολλαπλάσιες τιμές από τις αντίστοιχες όταν στο δίκτυο δεν υπήρχαν λάθη και καθυστερήσεις. Οι συγκρούσεις για το UDP έχουν αυξηθεί και αυτές, όχι όμως στα επίπεδα του TCP, γεγονός αναμενόμενο από τη στιγμή που συμμετέχουν μόνο τα πακέτα δεδομένων (και όχι πακέτα επαλήθευσης και έναρξης-τερματισμού σύνδεσης όπως στο TCP).

### Καθυστέρηση πακέτου



Η απόκλιση για την μέση καθυστέρηση πακέτου όταν χρησιμοποιείται το TCP φτάνει το 92,0%, ενώ όταν χρησιμοποιείται το UDP είναι ίση με 78,2%, δείχνοντας και για αυτό το σενάριο την καλύτερη απόδοση του UDP. Η μεγάλη αύξηση αυτή οφείλεται στην αύξηση των επαναμεταδόσεων από τα λάθη μετάδοσης (BER) και τις καθυστερήσεις μετάδοσης και επεξεργασίας των πακέτων.

## Throughput



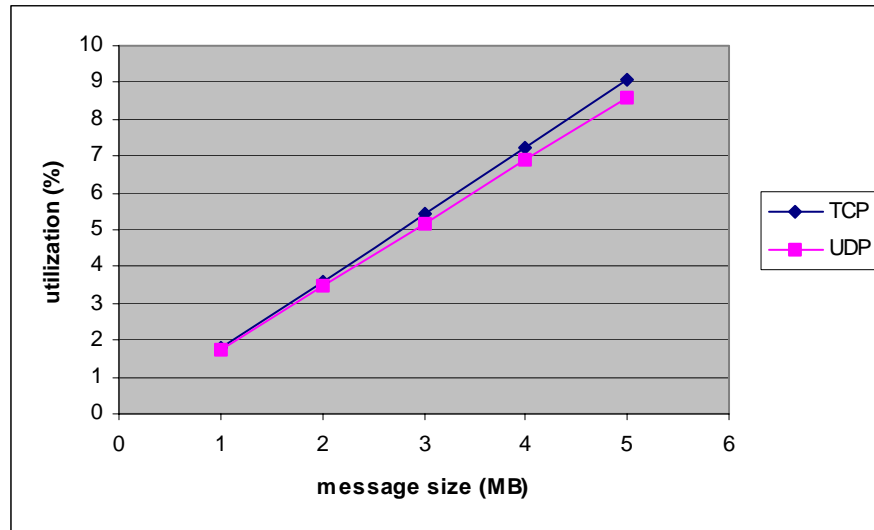
Το TCP παρουσιάζει την μεγαλύτερη απόκλιση μεταξύ 1 και 30 ασύρματων χρηστών (86,4%) σε σχέση με αυτή του UDP (53,3%). Αυτό που αξίζει να παρατηρήσουμε είναι ότι αν και η μέγιστη τιμή του throughput έχει πέσει στο ελάχιστο και για τα δύο πρωτόκολλα (σε σύγκριση με την αντίστοιχη για το σενάριο όπου δεν μοντελοποιήθηκαν λάθη), οι καθυστερήσεις επηρεάζουν στον ίδιο βαθμό το throughput μέχρι τη στιγμή που οι ασύρματοι χρήστες αυξάνονται πάνω από 5.

### 5.4.3 Σενάριο Τρίτο

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα θέλαμε να δούμε πως τα δύο πρωτόκολλα μεταφοράς αποδίδουν όταν ο αριθμός των χρηστών παραμένει σταθερός (ίσος με 10) αλλά μεταβάλλεται το μέγεθος του αρχείου το οποίο οι χρήστες αιτούνται για μία μόνο φορά κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Όπως και πριν, έτσι και εδώ το μέγεθος του αρχείου μεταβάλλεται κατά 1 MB κάθε φορά, με το μικρότερο μέγεθος που μεταφέρεται να είναι ίσο με 1 MB και το μεγαλύτερο ίσο με 5 MB. Σε κάθε περίπτωση το πλαίσιο του πρωτοκόλλου μεταφοράς αποτελείται από 1460 bytes δεδομένων.

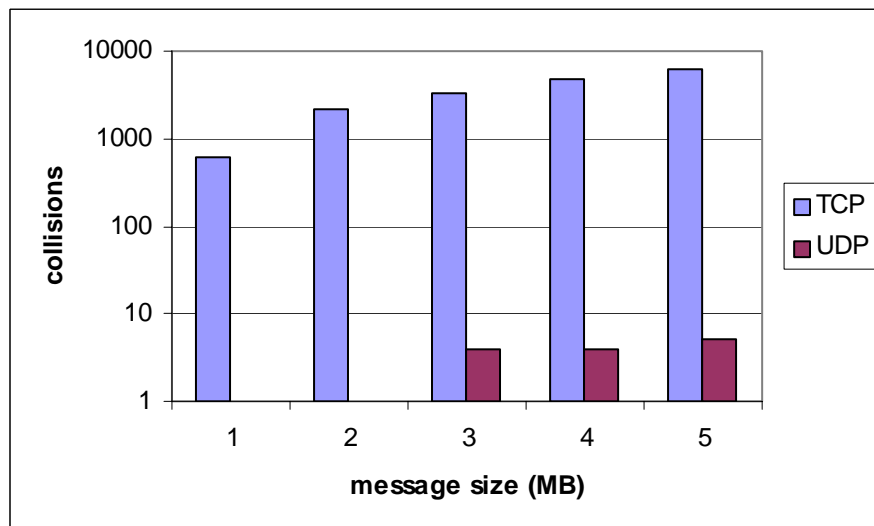
Παρακάτω φαίνονται οι γραφικές παραστάσεις των παραμέτρων βάση των οποίων αναλύουμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

### Χρησιμοποίηση καναλιού



Ο φόρτος του καναλιού κυμάνθηκε για το TCP από 23.21 έως 115.96 Kbps, ενώ για το UDP από 22.55 έως 112.94 Kbps. Η αύξηση της χρησιμοποίησης του καναλιού είναι καθαρά γραμμική και για τα δύο πρωτόκολλα μεταφοράς, με αυτό του TCP να χρησιμοποιεί το δίκτυο για ένα διάστημα ελαφρώς μεγαλύτερο από ότι το UDP.

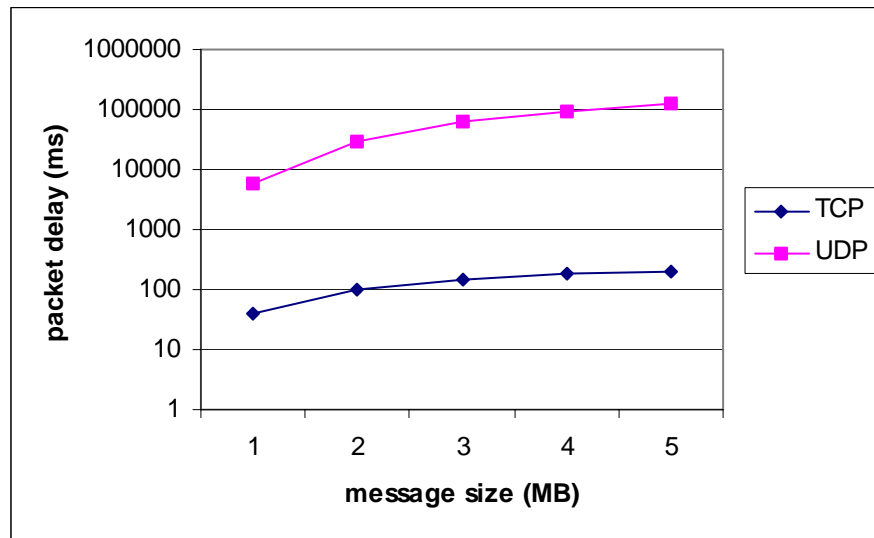
### Αριθμός συγκρούσεων



Η αύξηση του μεγέθους του αρχείου σε συνδυασμό με τον περιορισμό στον χρόνο για την δημιουργία της αίτησης από κάθε χρήστη οδήγησε το TCP σε εξαιρετικά μεγάλο αριθμό συγκρούσεων. Αντίθετα, το περιορισμένο διάστημα των 100 sec για την δημιουργία των μηνυμάτων από τους 10 χρήστες φάνηκε αρκετό στους τελευταίους, ώστε κατά τη χρησιμοποίηση του UDP να υπάρχει ένας σταθερά μικρός αριθμός συγκρούσεων.

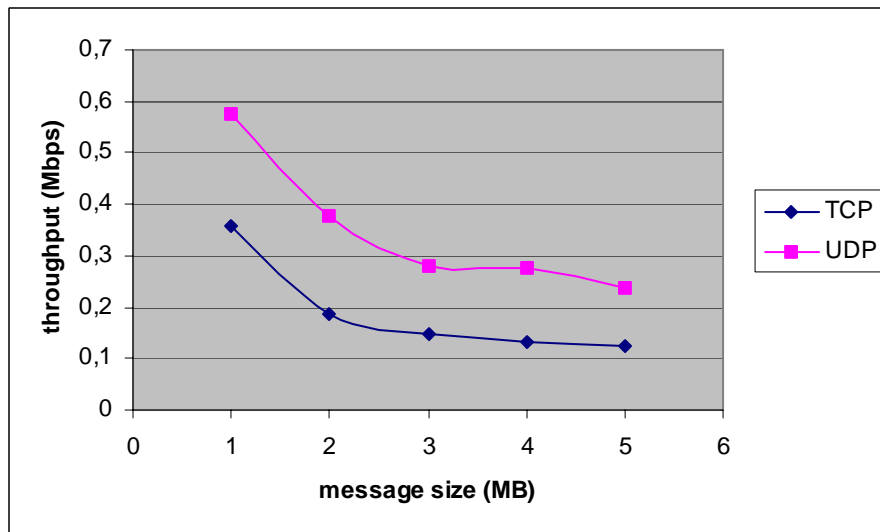


### Καθυστέρηση πακέτου



Η ανεκτικότητα του TCP στα σφάλματα φαίνεται στην συγκεκριμένη περίπτωση από το % ποσοστό που έχει αυξηθεί η τιμή της μέσης καθυστέρησης πακέτου όταν στο δίκτυο υπάρχουν 30 χρήστες σε σχέση με την καθυστέρηση που υπήρχε όταν στο δίκτυο υπήρχε μόνο ένας χρήστης. Το ποσοστό αυτής της περίπτωσης του TCP παίρνει την τιμή 79,3%, ενώ για το UDP παίρνει την τιμή 95,2%.

### Throughput



Όπως φαίνεται από την γραφική παράσταση και σε αυτή την περίπτωση το UDP επιτυγχάνει καλύτερες τιμές throughput. Και σε αυτήν την περίπτωση οι μέγιστες τιμές που επιτυγχάνονται (για μεταφορά αρχείου ίσο με 1 MB) είναι πολύ φτωχές σε σχέση με αυτές που επιτυγχάνονταν όταν η μεταφορά του αρχείου γίνονταν χωρίς λάθη και καθυστερήσεις.

## 5.5 Συμπεράσματα

Αρχικά, πρέπει να παρατηρήσουμε ότι το throughput, σύμφωνα με όλα τα παραπάνω αποτελέσματα, δεν ξεπερνάει ποτέ (παρά το ιδανικό περιβάλλον προσομοίωσης) το 90% του μέγιστου θεωρητικού ρυθμού που προσφέρεται από το κανάλι (2 Mbps). Η ύπαρξη του συγκεκριμένου ορίου οφείλεται κυρίως (όταν έχουμε ιδανικές συνθήκες και απουσιάζουν τα λάθη μετάδοσης) στους εξής λόγους:

- Τα bytes επιβάρυνσης (overhead) που προστίθενται από κάθε στρώμα (στα οποία συμπεριλαμβάνονται τα bytes των πακέτων επαλήθευσης καθώς δεν συμπεριλαμβάνουν δεδομένα)
- Τις συγκρούσεις μεταξύ των πακέτων
- Τα χρονικά διαστήματα IFS
- Τα διαστήματα υποχώρησης (backoff intervals)

Άλλη μια γενική παρατήρηση που προκύπτει από τα παραπάνω σενάρια είναι το γεγονός ότι το throughput μειώνεται όσο αυξάνεται ο φόρτος του 'ad-hoc' δικτύου. Η παρατήρηση αυτή είναι απόλυτα λογική, αφού η αύξηση του φόρτου (είτε με την αύξηση των χρηστών είτε με την αύξηση του μεγέθους του αρχείου μεταφοράς) αυξάνει τις περιόδους συναγωνισμού για το κανάλι, επιβαρύνοντας το δίκτυο με περισσότερες καθυστερήσεις (από τα επιπλέον διαστήματα IFS και τα πακέτα ACK, καθώς και την αύξηση των συγκρούσεων). Πρέπει να σημειώσουμε πως με το γεγονός της χρησιμοποίησης εξαιρετικά μεγάλου μεγέθους αρχείου έχουμε ξεπεράσει, όπως φαίνεται και από τις προσομοιώσεις, την προβλεπόμενη μέγιστη τιμή throughput. Η μείωση του throughput (μετά από το κρίσιμο σημείο που προαναφέραμε) σε σχέση με την αύξηση του φόρτου έρχεται σε συμφωνία με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από διάφορες παρόμοιες προσομοιώσεις ενός 802.11 δικτύου [2], [8].

Το UDP έχει γενικά καλύτερη απόδοση από το TCP, καθώς το τελευταίο εισάγει μεγαλύτερη καθυστέρηση στο δίκτυο. Οι κυριότεροι λόγοι που το TCP χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη καθυστέρηση είναι οι εξής:

- Η μεγαλύτερη επιβάρυνση του TCP, η οποία συμπεριλαμβάνει τα επιπρόσθετα πακέτα έναρξης και λήξης μιας σύνδεσης ('*Open-Close Sequence*') καθώς και τον μεγαλύτερο αριθμό overhead bytes σε κάθε πλαίσιο.
- Το 802.11 καθορίζει έναν μηχανισμό ελέγχου των λαθών με την επαναμετάδοση των πακέτων όταν περάσει ένας προκαθορισμένος χρόνος (ACK timeout) και ο αποστολέας δεν έχει λάβει την αναμενόμενη επαλήθευση από τον δέκτη. Όμως το TCP στέλνει και αυτό πακέτα επαλήθευσης στα πλαίσια του ελέγχου ροής ('*sliding window*') με αποτέλεσμα να εισάγεται επιπρόσθετη επιβάρυνση στο δίκτυο η οποία αυξάνει και την πιθανότητα των συγκρούσεων.
- Η χρησιμοποίηση του ολισθαίνοντος παραθύρου. Για ένα μεγάλο μέγεθος παραθύρου, μεταδίδοντας ένα λανθασμένο πλαίσιο το ακολουθούν και άλλα πλαίσια τα οποία θα μεταδοθούν με λάθος σειρά. Άλλωστε, μια επιπλέον καθυστέρηση από την χρήση του ολισθαίνοντος παραθύρου εισάγεται και από την χρήση της τεχνικής 'piggy-back'.

Η καλύτερη απόδοση του UDP είναι σύμφωνη και με τους αναλυτικούς υπολογισμούς της απόδοσης ενός 802.11 δικτύου, λόγω της μικρότερης επιβάρυνσης. Η παρατήρηση αυτή έρχεται σε συμφωνία και με πραγματικές μετρήσεις που έγιναν

στα πλαίσια της σύγκρισης της απόδοσης των δύο πρωτοκόλλων μεταφοράς [10] για ένα 802.11 WLAN με μικρό αριθμό χρηστών.

Και στην περίπτωση που μοντελοποιούνται τα λάθη η απόδοση του UDP είναι καλύτερη από το TCP και για τα 3 σενάρια που προσομοιώθηκαν. Η κυριότερη αιτία στην διαφορά απόδοσης βρίσκεται στον αριθμό των συγκρούσεων. Οι συγκρούσεις στο δίκτυο 802.11 που μοντελοποιήσαμε μπορούν να συμβούν στις παρακάτω περιπτώσεις:

- Στο επίπεδο MAC, όταν δύο ή περισσότερα πακέτα διαλέξουν το ίδιο slot time για μετάδοση.
- Στο επίπεδο PHY, όταν ένα πακέτο που στέλνεται από τον χρήστη (μπορεί να είναι το αρχικό πακέτο αίτησης ή κάποιο πακέτο επαλήθευσης) συγκρούεται με ένα πακέτο που στέλνεται από τον server (ένα πακέτο δεδομένων ή ένα πακέτο επαλήθευσης).

Η χρησιμοποίηση του TCP αυξάνει σε υπερβολικά μεγάλο βαθμό την πιθανότητα συγκρούσεων, καθώς στον ανταγωνισμό για την μετάδοση στο επίπεδο MAC θα συμμετέχουν τόσο τα πακέτα έναρξης και λήξης μιας σύνδεσης TCP όσο και τα πακέτα επαλήθευσης TCP (του στρώματος μεταφοράς). Τα ίδια πακέτα εισάγουν μεγαλύτερη καθυστέρηση στο δίκτυο αφού απαιτούνται επιπλέον διαστήματα DIFS πριν τις μεταδόσεις δεδομένων και SIFS μετά τις επιπλέον επαληθεύσεις (όσο 'αστείο' κι αν ακούγεται το MAC θα επαληθεύει μεταξύ των άλλων και τα ACK του TCP).

Ένας επιπλέον λόγος της καλύτερης απόκρισης του UDP (πέρα από αυτούς που αναφέρθηκαν στα προηγούμενα συμπεράσματα) είναι και το γεγονός ότι δεν μοντελοποιήθηκε ο ρυθμός σφάλματος πακέτου. Αν γινόταν κάτι τέτοιο είναι προφανές (σύμφωνα και με την ανάλυση που ακολουθεί) ότι το UDP θα αντιμετώπιζε μεγαλύτερη καθυστέρηση, ειδικά στην περίπτωση που ο αυξημένος αριθμός των εγκαταλειμμένων πακέτων (σε συνδυασμό με την έλλειψη ελέγχου ροής και λαθών από το συγκεκριμένο πρωτόκολλο) προκαλούσε την επαναμετάδοση από την αρχή ολόκληρου του μηνύματος του αρχείου.

Για την μείωση των συγκρούσεων έχουν γίνει διάφορες προτάσεις, μία από τις οποίες είναι και αυτή της χρησιμοποίησης της τεχνικής της εμβόλιμης επαλήθευσης (piggy-back) στο επίπεδο MAC [13]. Αυτό μπορεί να γίνει με το 'piggy-backing' των δεδομένων σε ένα πακέτο επαλήθευσης και την διαδοχική λήψη και των δύο κάτω από έλλειψη ανταγωνισμού (στην περίοδο ενός διαστήματος SIFS).

Αν και σαν πρωτόκολλο αποδείχθηκε μη-αποδοτικό, η χρησιμότητα του TCP αποδεικνύεται στην περίπτωση που το κανάλι χαρακτηρίζεται από υψηλό φόρτο και επαναμεταδόσεις πακέτων λόγω καθυστερήσεων και λαθών. Τότε, σε αρκετές περιπτώσεις ο έλεγχος λαθών από το στρώμα ζεύξης δεδομένων αποδεικνύεται ανεπαρκής. Πιο συγκεκριμένα όσον αφορά ένα 802.11 WLAN το Standard καθορίζει έναν μέγιστο αριθμό επαναμεταδόσεων για κάθε πακέτο. Όταν αυτός ο αριθμός ξεπεραστεί, το πακέτο θεωρείται χαμένο (dropped) και ο περαιτέρω έλεγχος λαθών εναπόκειται στα υψηλότερα στρώματα. Για παράδειγμα, ας θεωρήσουμε το παραπάνω μοντέλο προσομοίωσης. Ο sever αποστέλλει το μήνυμα των 2 MB σε διαδοχικά πλαίσια των 1500 bytes (όπως αυτά καθορίζονται από το πρωτόκολλο μεταφοράς). Στην περίπτωση που ένα από τα τελευταία πλαίσια χαθεί και αποτύχουν και οι 7 προσπάθειες επαναμετάδοσής του από το MAC του server, τότε αν χρησιμοποιείται το UDP το πλαίσιο δεν θα ληφθεί ποτέ και το αρχείο δεν θα παραληφθεί ποτέ ολοκληρωμένο από τον χρήστη, αλλά θα πρέπει να δημιουργηθεί

ένα νέο μήνυμα. Όμως, αν χρησιμοποιείται TCP το πλαίσιο θα επαναμεταδοθεί αυτή τη φορά με πρωτοβουλία του TCP, χωρίς να πάνε χαμένα όλα τα προηγούμενα πλαίσια και κατ' επέκταση το αρχείο.

## **BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

### **Αναφορές**

- [1] QoS Provided by the IEEE 802.11 Wireless LAN to Advanced Data Applications: a Simulation Analysis - G. Anastasi, E. De Stefano, L. Lenzini, Workshop on Nomadic Computing, Geneva (CH), April 1997
- [2] A Performance Analysis of the Basic Access IEEE 802.11 Wireless LAN MAC Protocol (CSMA/CA) - Shreyas Sadalgi, Department of Computer Science, Rutgers University, May 2000
- [3] Towards high performance modeling of the 802.11 wireless protocol – Jason Liu, David M. Nicol, L. Felipe Perrone, Michael Liljenstam, Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference.
- [4] Implementation of an IEEE 802.11 Wireless LAN Model using OPNET – Rusty O. Baldwin, Nathaniel J. Davis IV, Scott F. Midkiff, Proceedings of ‘OPNETWORK ’98’, 1998.
- [5] Performance analysis of the IEEE 802.11 MAC Protocol – Chuan Heng Foh and Moshe Zukerman - Proceedings of the European Wireless (EW) 2002 Conference, Italy.
- [6] Performance Study of Access Control in Wireless LANs: IEEE 802.11 DFWMAC and ETSI RES 10 HIPERLAN – J. Weinmiller, M. Schager, A. Festag, A. Wolisz, Mobile Networks and Applications, June 1997.
- [7] Throughput and delay analysis of IEEE 802.11 protocol – P. Chatzimisios, V. Vitsas, A. Boucouvalas, IEEE International Workshop of Networks Appliances (IWNA), 2002.
- [8] IEEE 802.11 Wireless Local Area Networks – Brian P. Crow, Indra Widjaja, Jeong Geun Kim, Prescott T. Sakai – IEEE Communications Magazine, September 1997).
- [9] Simulation of the MAC Portion of IEEE 802.11 and Bursts of Errors for Wireless Data Networks, Farhood Moslehi, MSc Thesis, Virginia Polytechnic Institute, 1997
- [10] TCP and UDP Performance over a Wireless LAN - George Xylomenos and George C. Polyzos, Proceedings of the IEEE INFOCOM 99 Conference, 1999.
- [11] J. Kim and M. Krunz. Fluid analysis of delay and packet discard performance for QoS support in wireless networks, Technical Report CENG-TR-99-119, Department of ECE, University of Arizona, August 1999.
- [12] B. Bakshi, P. Krishna, N. Vaidya, and D. Pradhan. Improving performance of TCP over wireless networks, Technical Report 96-014, Texas A & M University, May 1996.
- [13] PiggyData: Reducing CSMA/CA collisions for multimedia and TCP connections - Jean Tourrilhes

### **Σχετική Βιβλιογραφία**

- Δίκτυα Υπολογιστών – Andrew S. Tanenbaum, 3<sup>η</sup> έκδοση (μεταφρ. - Εκδ. Παπασωτηρίου)
- Δίκτυα Επικοινωνιών – Jean Warland, 1997 (μεταφρ. – Εκδ. Παπασωτηρίου)

- Ψηφιακές Επικοινωνίες – Andy Bateman, 1999 (μεταφρ - Εκδ. Τζιόλα)
- Προσομοίωση Δικτύων Υπολογιστών – Α. Πομπόρτσης, Α. Τσουλάρας - Εκδόσεις Τζιόλα, 2001
- Data and Computer Communications – William Stallings, 5<sup>th</sup> edition, 1997 (Prentice-Hall, Inc.)
- Data Networks – Dimitri Bertsekas, Robert Gallager, 2<sup>nd</sup> edition (Prentice Hall, Inc.)
- IPng and the TCP/IP Protocols – Stephen A. Thomas, 1996 (John Wiley & Sons, Inc.)
- Wireless LANs – Jim Geiger, 2<sup>nd</sup> edition, 2002 (SAMS Publishing)

### Δικτυακές πηγές

- TCP/IP Tutorial and Technical Overview (IBM RedBooks) - Adolfo Rodriguez, John Gatrell, John Karas, Roland Peschke (<http://www.ibm.com/redbooks>)
- TCP Performance in the Presence of Congestion and Corruption Losses - Andrei Gurtov, MSc Thesis, Department of Computer Science – University of Helsinki, December 2000.
- The IEEE 802.11 Standard – Imad Aad – INRIA, Planete Team, In' Tech, 21 May 2002 ([http://www-sop.inria.fr/intech/reseau\\_ss\\_fil\\_presentations/aad.pdf](http://www-sop.inria.fr/intech/reseau_ss_fil_presentations/aad.pdf))
- Broadband Wireless Access Systems - David Falconer - Broadband Communications and Wireless Systems Center ([www.sce.carleton.ca/bcws](http://www.sce.carleton.ca/bcws))
- LMDS: High bandwidth, no strings attached - Scott Beardsley, Patrick Loulou, Michael Wilshire - McKinsey & Company, Future Intelligence ([http://www.mckinsey.de/downloads/knowmatters/telecommunications/broadband\\_lmids.pdf](http://www.mckinsey.de/downloads/knowmatters/telecommunications/broadband_lmids.pdf))
- LMDS Tutorial – IEC (International Engineering Consortium), 2000 (<http://www.webproforum.com/nortel4/full.htm>)
- Wireless LANs – Sorin M. Schwartz, BreezeCOM
- Wireless LAN Access Control and Authentication - J. Vollbrecht, D. Rago, R. Moskowitz - Interlink Networks white paper ([http://www.nersd.org/~sartori/Wireless/WLAN\\_Access\\_Control.pdf](http://www.nersd.org/~sartori/Wireless/WLAN_Access_Control.pdf))
- IEEE Std. 802.11 1999 Edition: IEEE Standard for Information Technology - Telecommunications and Information Exchange between Systems - Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications (<http://standards.ieee.org>)
- IEEE Std. 802.3 2002 Edition: IEEE Standard for Information Technology - Telecommunications and information Exchange between Systems - Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirements - Part 3: Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) Access Method and Physical Layer Specifications (<http://standards.ieee.org>)
- Wireless LANs Customer Tutorial – XILINX ([http://www.xilinx.com/esp/home\\_networking/pdf\\_files/wireless\\_lans/wlan-complete.pdf](http://www.xilinx.com/esp/home_networking/pdf_files/wireless_lans/wlan-complete.pdf))

- Exploring Wireless Technologies – LINKSYS, November 2000 (<http://www.linksys.com/products/images/wirelesswp.pdf>)
- Wireless LAN Network Management white paper – Infotech (<http://www.converge-net.com/pdf/wireless-lan.pdf>)
- Guide to Wireless LAN Technologies – Intermec ([http://www.utdallas.edu/ir/wlans/whitepapers/wlan\\_wp.pdf](http://www.utdallas.edu/ir/wlans/whitepapers/wlan_wp.pdf))
- 802.11 MAC Entity Tutorial - Wim Diepstraten (Lucent Technologies), Phil Belanger (Aironet Wireless Communications), March 1996 (<http://grouper.ieee.org/groups/802/11/Tutorial/MAC.pdf>)
- [http://www.cisco.com/univercd/cc/td/doc/cisintwk/ito\\_doc/index.htm](http://www.cisco.com/univercd/cc/td/doc/cisintwk/ito_doc/index.htm)
- <http://radio-1.ee.dal.ca/~ilow/telco/lectures/dqdb/>
- [http://personal.hartfordschools.org/~stephen/library/network\\_primer/toc.html](http://personal.hartfordschools.org/~stephen/library/network_primer/toc.html)
- [http://www.samos.aegean.gr/icsd/pavlos/current\\_courses\\_\(gr\).htm](http://www.samos.aegean.gr/icsd/pavlos/current_courses_(gr).htm)
- [http://www.cisco.com/warp/public/cc/pd/rt/7200/prodlit/bba\\_pl.htm](http://www.cisco.com/warp/public/cc/pd/rt/7200/prodlit/bba_pl.htm)
- <http://www.egigether.net/Papers/WhitePaper3-16-02.pdf>