

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
«Πρωτόκολλα Ασύρματων Προσωπικών, Τοπικών &
Μητροπολιτικών Δικτύων»



Του φοιτητή
Τσαμουρίδη Δημητρίου
Αρ. Μητρώου: 103643

Επιβλέπον
Βίτσας Βασίλειος
Καθηγητής

Μάιος 2023

Τίτλος Π.Ε.: «**Πρωτόκολλα Ασύρματων Προσωπικών, Τοπικών & Μητροπολιτικών Δικτύων**»

Κωδικός Δ.Ε.: **22312**

Ονοματεπώνυμο φοιτητή: **Τσαμουρίδης Δημήτριος**

Ονοματεπώνυμο εισηγητή: **Βίτσας Βασίλειος**

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε.: **30/10/2022**

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε.: **25/05/2023**

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως διπλωματική εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Τσαμουρίδη Δημητρίου που την εκτόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

«Στους γονείς μου»

Πρόλογος

Ένας από τους λόγους που επέλεξα να ασχοληθώ με τα ασύρματα δίκτυα για την εκπόνηση της Π.Ε. μου, είναι το γεγονός ότι θεωρώ μεγάλη πρόκληση την εμβάθυνση στις τεχνολογίες αυτών, καθώς, στις μέρες μας, η χρήση των ασύρματων δικτύων καταλαμβάνει ένα εξαιρετικά μεγάλο ποσοστό όσον αφορά τις επικοινωνίες. Επίσης, ένας ακόμη λόγος είναι το ότι ένα αντικείμενο στην επαγγελματική μου απασχόληση είναι τα δίκτυα υπολογιστών. Επομένως, η συγκεκριμένη Π.Ε. συνέβαλε τα μέγιστα στην διάνοιξη των οριζόντων μου και με βοήθησε στην κατανόηση των τεχνολογιών που αφορούν τα ασύρματα δίκτυα και στην προσωπική μου εξέλιξη.

Περίληψη

Τα πρωτόκολλα Ασύρματου Προσωπικού, Τοπικού και Μητροπολιτικού δικτύου (WPAN, WLAN και WMAN) είναι μια ομάδα πρωτοκόλλων επικοινωνίας που έχουν σχεδιαστεί για ασύρματα δίκτυα.

Τα πρωτόκολλα Ασύρματου Προσωπικού δικτύου (WPAN) χρησιμοποιούνται για επικοινωνία μεταξύ συσκευών σε πολύ μικρή εμβέλεια, συνήθως εντός λίγων μέτρων. Παραδείγματα τέτοιων πρωτοκόλλων είναι το Bluetooth και το Zigbee.

Τα πρωτόκολλα Ασύρματου Τοπικού δικτύου χρησιμοποιούνται για επικοινωνία σε τοπικό επίπεδο, όπως ένα γραφείο ή ένα σπίτι, χρησιμοποιώντας ραδιοκύματα. Ένα παράδειγμα τέτοιων πρωτοκόλλων είναι το Wi-Fi.

Τα πρωτόκολλα Ασύρματου Μητροπολιτικού δικτύου έχουν σχεδιαστεί για επικοινωνία μεταξύ δικτύων σε μια μητροπολιτική περιοχή, όπως μια πόλη, χρησιμοποιώντας ραδιοκύματα ή οπτική ίνα. Παραδείγματα τέτοιων πρωτοκόλλων είναι το WiMAX και το LTE.

Κάθε ασύρματο πρωτόκολλο έχει το δικό του σύνολο προτύπων που καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο οι συσκευές επικοινωνούν μεταξύ τους. Αυτά τα πρότυπα αφορούν τον ρυθμό μεταφοράς δεδομένων, το εύρος συχνοτήτων, την ισχύ μετάδοσης, τη διόρθωση σφαλμάτων, την ασφάλεια και τη διαχείριση του δικτύου. Η επιλογή του πρωτοκόλλου εξαρτάται από τις ειδικές απαιτήσεις του ασύρματου δικτύου, όπως το εύρος μέσα στο οποίο πρέπει να πραγματοποιηθεί η επικοινωνία, ο αριθμός των συσκευών του δικτύου και ο τύπος των δεδομένων που μεταδίδονται.

Τα πρωτόκολλα Ασύρματου Προσωπικού, Τοπικού και Μητροπολιτικού δικτύου γίνονται ολοένα και πιο δημοφιλή λόγω της ευελιξίας, της επεκτασιμότητας και της οικονομικής τους αποδοτικότητας. Η κατανόηση της λειτουργίας των διαφορετικών πρωτοκόλλων είναι ζωτικής σημασίας για το σχεδιασμό και τη διαχείριση δικτύων με σκοπό την αποτελεσματική ασύρματη επικοινωνία.

«Wireless Personal, Local & Metropolitan Area Network Protocols»

Tsamouridis Dimitrios

Abstract

Wireless Personal, Local and Metropolitan Area Network (WPAN, WLAN and MAN) Protocols are a group of communication protocols designed for wireless networks.

Wireless Personal Area Network protocols are used for communication between devices in a very short range, typically within a few meters. Examples of such protocols include Bluetooth and Zigbee.

Wireless Local Area Network protocols are used for communication within a local area, such as an office or a home, using radio waves. One example of such protocols is Wi-Fi.

Wireless Metropolitan Area Network protocols are designed for communication between networks in a metropolitan area, such as a city, using radio waves or optical fiber. Examples of WMAN protocols include WiMAX and LTE.

Each wireless protocol has its own set of standards that define how devices communicate with each other. These standards cover areas such as data transfer rate, frequency range, transmission power, error correction, security and network management. The choice of protocol depends on the specific requirements of the wireless network, such as the distance over which communication needs to take place, the number of devices on the network and the type of data being transmitted.

Wireless Personal, Local and Metropolitan Area networks are becoming increasingly popular due to their flexibility, scalability and cost-effectiveness. Understanding the different wireless protocols and their capabilities is critical for designing and managing effective wireless communication networks.

Ευχαριστίες

Πρωταρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου η οποία μου παρείχε αμέριστη στήριξη όλα αυτά τα χρόνια, ώστε να προσπεράσω κάθε εμπόδιο και να πετύχω τον στόχο μου. Επίσης, θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον καθηγητή μου, κ. Βίτσα Βασίλειο, ο οποίος από την πρώτη στιγμή έδειξε κατανόηση και θέληση ώστε να αναλάβει την επίβλεψη της προσπάθειάς μου για την εκπόνηση της συγκεκριμένης Π.Ε.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	iv
Περίληψη.....	v
Abstract	vi
Ευχαριστίες	vii
Περιεχόμενα	viii
Κατάλογος Εικόνων	x
Κατάλογος Πινάκων.....	xi
Συντομογραφίες.....	xii
Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή.....	1
1.1 Τι είναι τα ασύρματα δίκτυα;	1
1.2 Ιστορική αναδρομή.....	1
1.3 Εξάπλωση ασύρματων δικτύων	2
1.4 Χρησιμότητα ασύρματων δικτύων.....	3
1.5 Κατηγορίες ασύρματων δικτύων.....	3
1.6 Πρωτόκολλα ασύρματων δικτύων	4
1.7 Σύγκριση ασύρματων & ενσύρματων τοπικών δικτύων	5
Κεφάλαιο 2ο: Φυσικό επίπεδο	6
2.1 Ραδιοκύματα & υπέρυθρη μετάδοση	6
2.1.1 Φάσμα υπερύθρων.....	6
2.1.2 Φάσμα ραδιοκυμάτων	7
2.2 Τεχνικές μετάδοσης σήματος.....	9
2.2.1 Διασπορά φάσματος με εναλλαγή συχνοτήτων (FHSS)	11
2.2.2 Διασπορά φάσματος με άμεση ακολουθία (DSSS).....	13
2.2.3 Ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (OFDM).....	14
Κεφάλαιο 3ο: Πρότυπα ασύρματων δικτύων	16
3.1 Πρότυπο HomeRF	16
3.2 Πρωτόκολλα IEEE 802.11	17
3.2.1 IEEE 802.11b	19
3.2.2 IEEE 802.11a.....	20
3.2.3 IEEE 802.11g	21
3.2.4 IEEE802.11n	21
3.2.5 IEEE802.11ac.....	22

3.2.6	IEEE802.11ax.....	23
3.3	HIPERLAN	25
3.3.1	HIPERLAN 1	26
3.3.2	HIPERLAN 2	29
Κεφάλαιο 4ο:	Ασύρματα τοπικά δίκτυα.....	32
4.1	Επίπεδο ζεύξης (σύνδεσης) δεδομένων.....	32
4.2	Πρόσβαση στο μέσο.....	33
4.3	Αλγόριθμος DCF.....	34
4.4	Αλγόριθμος PCF.....	37
4.5	Αλγόριθμοι RTS & CTS	39
4.6	Σύγκριση πρωτοκόλλων πρόσβασης CSMA/CA & CSMA/CD.....	40
Κεφάλαιο 5ο:	Ασύρματα προσωπικά δίκτυα	44
5.1	Δίκτυα WPAN.....	44
5.2	Bluetooth	44
5.2.1	Επισκόπηση πρωτοκόλλου.....	45
5.2.2	Λειτουργία Bluetooth	47
5.2.3	Διαχείριση ενέργειας και ασφάλεια.....	49
5.3	IrDA	50
5.3.1	Επισκόπηση πρωτοκόλλων	51
5.3.2	Υποχρεωτικά πρωτόκολλα.....	52
5.3.3	Προαιρετικά πρωτόκολλα	54
5.3.4	Ασφάλεια.....	55
Κεφάλαιο 6ο:	Ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα.....	56
6.1	Δίκτυα WMAN.....	56
6.2	WiMAX.....	56
6.2.1	Αρχιτεκτονική δομή δικτύων WMAN-WiMAX.....	57
6.2.2	Τυποποίηση WiMAX.....	58
6.2.3	Κύρια χαρακτηριστικά WiMAX 802.16e	60
6.2.4	Αρχιτεκτονική πρωτοκόλλου WiMAX	62
6.2.5	Ποιότητα QoS και ασφάλεια	63
6.2.6	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της τεχνολογίας WiMAX.....	64
Κεφάλαιο 7ο:	Συμπεράσματα.....	66
	BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	68

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2.1: Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα συχνοτήτων [11]	6
Εικόνα 2.2: Βασική φιλοσοφία τεχνικής SS [24].....	10
Εικόνα 2.3: Αποτέλεσμα τεχνικής SS [24].....	10
Εικόνα 2.4: Μπλοκ διάγραμμα λειτουργίας πομπού FHSS [24].....	11
Εικόνα 2.5: Μπλοκ διάγραμμα λειτουργίας δέκτη FHSS [24]	12
Εικόνα 2.6: Μπλοκ διάγραμμα λειτουργίας πομπού DSSS [26].....	13
Εικόνα 2.7: Μπλοκ διάγραμμα λειτουργίας δέκτη DSSS [26]	13
Εικόνα 2.8: Μπλοκ διάγραμμα λειτουργίας πομπού OFDM [33].....	15
Εικόνα 2.9: Μπλοκ διάγραμμα λειτουργίας δέκτη OFDM [33].....	15
Εικόνα 3.1: Είδη συσκευών δικτύου HomeRF [38].....	16
Εικόνα 3.2: Εξελικτική πορεία των προτύπων IEEE 802.11 [40].....	18
Εικόνα 3.3: Κατανομή πόρων στις τεχνικές διαμόρφωσης OFDM και OFDMA [43]	24
Εικόνα 3.4: Σύνοψη προτύπων οικογένειας HIPERLAN [46].....	26
Εικόνα 3.5: Το μοντέλο αναφοράς του προτύπου HIPERLAN 1 [48]	26
Εικόνα 3.6: Αλγόριθμος προσαρμογής ορίου [48].....	27
Εικόνα 3.7: Λειτουργία του μηχανισμού EY-NPMA στο πρότυπο HIPERLAN 1 [50].....	28
Εικόνα 3.8: Το μοντέλο αναφοράς του προτύπου HIPERLAN 2 [51]	29
Εικόνα 4.1: Το επίπεδο ζεύξης (σύνδεσης) δεδομένων [53].....	32
Εικόνα 4.2: Αρχιτεκτονική δομή επιπέδου MAC [55].....	33
Εικόνα 4.3: Μορφές πλαισίων επιπέδου MAC (α) δεδομένων MPDU, (β) ACK [57].....	34
Εικόνα 4.4: Μετάδοση MPDU χωρίς RTS/CTS [60]	35
Εικόνα 4.5: Σχέση μεταξύ των χρονικών διαστημάτων IFS [61].....	35
Εικόνα 4.6: Βασική λειτουργία αλγόριθμου DCF [62].....	36
Εικόνα 4.7: Συνύπαρξη αλγορίθμων PCF και DCF [59]	37
Εικόνα 4.8: Διαδικασία μετάδοσης με χρήση αλγόριθμου PCF [59].....	38
Εικόνα 4.9: Πρόβλημα κρυφού κόμβου [64]	39
Εικόνα 4.10: Μετάδοση MPDU με RTS/CTS [66].....	40
Εικόνα 4.11: Μηχανισμός λειτουργίας πρωτοκόλλου CSMA/CD [68].....	41
Εικόνα 4.12: Μηχανισμός λειτουργίας πρωτοκόλλου CSMA/CA [68].....	42
Εικόνα 5.1: Στοιβα πρωτοκόλλων βασικού προτύπου Bluetooth [71].....	45
Εικόνα 5.2: Τοπολογία Bluetooth [71].....	47
Εικόνα 5.3: Διεύθυνση MAC 48bit των συσκευών Bluetooth [75]	47
Εικόνα 5.4: Διαδικασία σύνδεσης συσκευών Bluetooth [76]	48
Εικόνα 5.5: Διαδικασίες σύνδεσης (α) pairing, (β) bonding [77]	49
Εικόνα 5.6: Στοιβα πρωτοκόλλων IrDA [83].....	51
Εικόνα 5.7: Ροή λειτουργίας επιπέδου IrLAP [84]	53
Εικόνα 6.1: Παράδειγμα δικτύου WMAN-WiMAX [89]	58
Εικόνα 6.2: Ενοποιημένη αρχιτεκτονική δικτύου WiMAX σταθερής-κινητής πρόσβασης βασισμένο σε μοντέλο υπηρεσίας IP [99]	61
Εικόνα 6.3: Αρχιτεκτονική πρωτοκόλλου WiMAX [89].....	63

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3.1: Εξέλιξη πρωτοκόλλων IEEE 802.11 [43].....	19
Πίνακας 3.2: Τεχνικές διαμόρφωσης IEEE 802.11a και αντίστοιχοι θεωρητικοί ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων, για εύρος ζώνης καναλιού 20MHz [43].....	20
Πίνακας 3.3: Τεχνικές διαμόρφωσης IEEE 802.11n και αντίστοιχοι θεωρητικοί ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων, για εύρος ζώνης καναλιού 40MHz [43]	22
Πίνακας 3.4: Σύγκριση προτύπων IEEE 802.11ac και IEEE 802.11ax [43].....	24
Πίνακας 6.1: Σύγκριση χαρακτηριστικών βασικότερων εκδόσεων της οικογένειας προτύπων WIMAX [98]	60

Συντομογραφίες

3DES	Triple Data Encryption Standard
AAA	Authentication, Authorization & Accounting
ACF	Association Control Function
ACL	Asynchronous Connection-less
AES	Advanced Encryption Standard
AMPS	Advanced Mobile Phone System
AP	Access Point
ASN	Access Service Network
ASN-GW	ASN Gateway
ATM	Asynchronous Transfer Mode
BCCH	Broadband Control CHannel
BEB	Binary Exponential Back-off
BER	Bit Error Rate
BLE	Bluetooth Low Energy
BPSK	Binary Phase Shift Keying
BR	Basic Rate
BRAN	Broadband Radio Access Network
BS	Base Stations
BSS	Basic Service Set
BWA	Broadband Wireless Access
CAC	Channel Access and Control
CCA	Clear Channel Assessment
CCK	Complementary Code Keying
CEPT	Conference of European Postal and Telecommunications Administrations
CF	Contention Free
CFP	Contention Free Period
CFPR	CFP Repetition interval
CL	Convergence Layer
CP	Contention Period
CP	Control Point
CPE	Customer Premise Equipment

CRC	Cyclic Redundancy Check
CRN	Cognitive Radio Network
CSMA	Carrier Sense Multiple Access
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance
CSMA/CD	Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection
CSN	Connectivity Service Network
CTS	Clear To Send
CW	Contention Window
DCC	DLC Connection Control
DCF	Distributed Coordination Function
DECT	Digital Enhanced Cordless Telephone
DIFS	DCF IFS
DLC	Data Link Control
DLL	Data Link Layer
DL-MAC	Down Link MAC
DOCSIS	Data over Cable Service Interface Specifications
DPSK	Differential Phase Shift Keying
DQPSK	Differential Quaternary Phase Shift Keying
DSL	Digital Subscriber Line
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
EAP	Extensible Authentication Protocol
EC	Error Control
EDR	Enhanced Data Rate
ETSI	European Telecommunications Standardization Institute
EY-NPMA	Elimination-Yield Non-Preemptive Multiple Access
FCC	Federal Communications Commission
FCCH	Frame Control Channel
FCH	Frame Control Header
FCS	Frame Check Sequence
FDM	Frequency Division Multiplexing
FFT	Fast Fourier Transform
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
FIR	Fast Infrared

FSO	Free Space Optics
GFSK	Gaussian Frequency Shift Keying
Giga-IR	Giga-Infrared
GMSK	Gaussian Minimum Shift Keying
HBR	High Bit Rate
HCI	Host Controller Interface
HIPERLAN	High Performance Radio Local Area Network
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
H-NSP	Home Network Service Provider
IAP	Information Access Protocol
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
IFS	Inter-Frame Space
IoT	Internet of Things
IR	Infrared
IrCOMM	Infrared Communication
IrDA	Infrared Data Association
IrLAN	Infrared LAN
IrLAP	Infrared Link Access Protocol
IrLMP	Infrared Link Management Protocol
IrOBEX	Infrared Object Exchange
ISI	Inter Symbol Interference
ISM	Industrial, Scientific, and Medical
L2CAP	Logical Link Control and Adaptation Protocol
LAN	Local Access Network
LBR	Low Bit Rate
LBT	Listen Before Talk
LCH	Long Channel
LED	Light Emitting Diode
LLC	Logic Link Control
LMDS	Local Multipoint Distributed Service
LM-IAS	Link Management Information Access Service
LM-MUX	Link Management MULTipleXing

LoS	Line of Sight
MAC	Medium Access Control
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
MIR	Mid-Infrared
MPDU	MAC Protocol Data Unit
MMDS	Multi-Channel Multipoint Distributed Service
MMR	Mobile Multi-hop Relay
MS	Mobile Stations
MSDU	MAC Service Data Unit
MTS	Mobile Telephone Service
MU-MIMO	Multi User MIMO
NAV	Network Allocation Vector
NDN	Normal Disconnect Mode
NFC	Near Field Communication
NRM	Normal Response Mode
OBEX	Object Exchange
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OSI	Open Systems Interconnection
OTA	Over-The-Air
OUI	Organization Unique Identifier
PC	Point Coordinator
PCF	Point Coordination Function
PDU	Protocol Data Unit
PHY	Physical layer
PIFS	PCF IFS
PLCP	Physical Layer Convergence Protocol
PMR	Private Mobile Radio
PPP	Point-to-Point Protocol
PSTN	Public Switched Telephone Network
QAM	Quadrature amplitude modulation
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RAND	Random number

RCH	Random access CHannels
RF	Radio Frequency
RFCOMM	RF Communication
RFID	Radio Frequency Identification
RLC	Radio Link Control
RPR	Resilient Packet Ring
RRC	Radio Resource Control
RTS	Request To Send
SC	Single-Carrier
SCH	Short CHannel
SCO	Synchronous Connection Oriented
SDP	Service Discovery Protocol
SDU	Service Data Unit
SF	Spreading Factor
SIG	Special Interest Group
SIFS	Short IFS
SIR	Serial Infrared
SLN	Signal Level Number
SNMP	Set Normal Response command Mode
S-OFDMA	Scalable OFDMA
SONET/SDH	Synchronous Optical Network/Synchronous Digital Hierarchy
SS	Spread Spectrum
SS	Subscriber Stations
SWAP-CA	Shared Wireless Access Protocol - Cordless Access
TCP	Transmission Control Protocol
TCS	Telephony Control Specification
TDD	Time Division Duplex
TDM	Time Division Multiplexing
TDMA	Time Division Multiple Access
UFIR	Ultra-Fast Infrared
UL-MAC	Up Link MAC
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UWV	Ultra Wide Band

VFIR	Very Fast Infrared
WAP	Wireless Application Protocol
WDM	Wavelength Division multiplexing
WECA	Wireless Ethernet Compatibility Alliance
WiMAX	Wireless Interoperable Metropolitan Area Exchange
WLAN	Wireless Local Area Network
WLL	Wireless Local Loop
WMAN	Wireless Metropolitan Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network
WSN	Wireless Sensor Network
WWAN	Wireless Wide Area Network
XOR	Exclusive OR

Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή

1.1 Τι είναι τα ασύρματα δίκτυα;

Τα ασύρματα δίκτυα είναι δίκτυα υπολογιστών που χρησιμοποιούν ασύρματες συνδέσεις, αντί για φυσικά καλώδια, για τη μετάδοση δεδομένων μεταξύ συσκευών. Τα ασύρματα δίκτυα χρησιμοποιούν ραδιοκύματα, υπέρυθρα σήματα ή δορυφορική μετάδοση για να επιτευχθεί η σύνδεση συσκευών όπως υπολογιστές, smartphones, tablets κ.ά. [1].

1.2 Ιστορική αναδρομή

Ο πρώτος τρόπος ασύρματης μετάδοσης δεδομένων που παρατηρήθηκε ήταν τα ραδιοκύματα, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να επιτευχθεί η μετάδοση μηνυμάτων σε μικρές αποστάσεις. Το συγκεκριμένο εγχείρημα δομήθηκε από τον Ιταλό εφευρέτη και ηλεκτρολόγο μηχανικό Guglielmo Marconi, ο οποίος ανέπτυξε το πρώτο ασύρματο τηλεγραφικό σύστημα [2]. Στη συνέχεια, τη δεκαετία 1940, παρουσιάστηκαν τα πρώτα κινητά ραδιοφωνικά συστήματα, τα οποία χρησιμοποιούνταν για στρατιωτικούς σκοπούς και δημόσια ασφάλεια, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου. Ήταν αρκετά εξελιγμένα για την εποχή τους αφού χρησιμοποιούσαν προηγμένα ηλεκτρονικά κυκλώματα, συμπεριλαμβανομένων των πρώτων τρανζίστορς. Επίσης, ένα από τα πρώτα εμπορικά κινητά ραδιοφωνικά συστήματα ήταν το Private Mobile Radio (PMR), το οποίο αναπτύχθηκε από τη Motorola το 1947 [3].

Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας 1950, έκαναν την εμφάνισή τους τα πρώτα κινητά ραδιοφωνικά συστήματα που χρησιμοποιήθηκαν κυρίως για κυβερνητικούς οργανισμούς και επιχειρήσεις. Αυτά τα συστήματα υποστήριζαν την αμφίδρομη επικοινωνία και ήταν αρκετά ακριβά. Την ίδια περίοδο, παρουσιάστηκαν τα πρώτα κινητά ραδιοφωνικά συστήματα για προσωπική χρήση. Ένα από τα πρώτα προσωπικά κινητά ραδιοφωνικά συστήματα ήταν το Mobile Telephone Service (MTS) που λανσαρίστηκε από την Bell Labs το 1947. Το σύστημα MTS χρησιμοποιούσε τεχνολογία push-to-talk και η διαθεσιμότητά του ήταν περιορισμένη σε λίγες πόλεις [4].

Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1960, παρουσιάστηκαν τα πρώτα δημόσια κινητά ραδιοφωνικά συστήματα. Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούσαν αμφίδρομη τεχνολογία ραδιοκυμάτων και χρησιμοποιούνταν, κυρίως, από υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης, όπως η αστυνομία και η πυροσβεστική. Ένα από τα πρώτα δημόσια συστήματα κινητής τηλεφωνίας ήταν το Advanced Mobile Phone System (AMPS), το οποίο εισήχθη από την Bell Labs το 1969 και αποτέλεσε το πρώτο κυψελοειδές σύστημα των ΗΠΑ [5].

Στη δεκαετία του 1970, παρουσιάστηκαν τα πρώτα κυψελοειδή κινητά ραδιοφωνικά συστήματα. Αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούσαν ένα δίκτυο κυψελών για να παρέχουν κάλυψη σε μια μεγάλη γεωγραφική περιοχή. Το πρώτο κυψελοειδές κινητό ραδιοσύστημα αναπτύχθηκε από την Bell Labs το 1973 και ήταν γνωστό ως "DynaTAC". Το σύστημα αυτό ήταν ακριβό και ογκώδες και χρησιμοποιήθηκε από πλούσια άτομα και στελέχη επιχειρήσεων [4].

Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1980, τα κυψελοειδή δίκτυα έγιναν περισσότερο προσιτά και διαδεδομένα. Η εισαγωγή των δικτύων κινητής τηλεφωνίας πρώτης γενιάς (1G) επέτρεψε στα κινητά τηλέφωνα να γίνουν πιο προσιτά στο ευρύ κοινό. Αυτά τα δίκτυα, ήταν αναλογικά συστήματα και παρείχαν βασική φωνητική επικοινωνία [6].

Στη δεκαετία του 1990, παρουσιάστηκαν τα κυβελοειδή δίκτυα δεύτερης γενιάς (2G), τα οποία ήταν ψηφιακά συστήματα που παρείχαν βελτιωμένη ποιότητα φωνής και προσέθεταν νέες δυνατότητες, όπως η ανταλλαγή μηνυμάτων κειμένου. Επίσης, τα δίκτυα 2G επέτρεψαν την ανάπτυξη μικρότερων και πιο προσιτών κινητών τηλεφώνων [6].

Η τρίτη γενιά δικτύων κινητής τηλεφωνίας (3G) παρουσιάστηκε στις αρχές της δεκαετίας του 2000. Μαζί της έφερε ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων που ήταν πολύ μεγαλύτερες από αυτές της προηγούμενης γενιάς. Τα δίκτυα 3G έδωσαν τη δυνατότητα στους χρήστες να περιηγούνται στο Διαδίκτυο, να στέλνουν email και να πραγματοποιούν βιντεοκλήσεις από τις φορητές συσκευές τους [6].

Τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας τέταρτης γενιάς (4G), παρουσιάστηκαν στις αρχές της δεκαετίας του 2010. Παρείχαν μεγαλύτερες ταχύτητες λήψης και μεταφόρτωσης από τα δίκτυα 3G και επέτρεψαν τη χρήση εφαρμογών υψηλού εύρους ζώνης, όπως ροή βίντεο και μουσικής. Με τα δίκτυα 4G, οι άνθρωποι μπορούσαν να κάνουν λήψη μεγάλων αρχείων και να μεταδίδουν βίντεο υψηλής ποιότητας στις κινητές συσκευές τους [6].

Τέλος, η πέμπτη γενιά δικτύων κινητής τηλεφωνίας παρουσιάστηκε το 2019. Τα δίκτυα 5G σημαντικά μεγαλύτερες ταχύτητες λήψης και μεταφόρτωσης από τα δίκτυα 4G, καθώς και χαμηλότερο latency (ο χρόνος που απαιτείται για τη μεταφορά δεδομένων από τη μία συσκευή στην άλλη). Τα δίκτυα 5G δίνουν τη δυνατότητα στους ανθρώπους να απολαμβάνουν ακόμη περισσότερες εφαρμογές που απαιτούν υψηλό bandwidth, όπως η επαυξημένη και εικονική πραγματικότητα. Ακόμη, έχουν τη δυνατότητα να υποστηρίζουν συσκευές Internet of Things (IoT) σε μεγαλύτερη κλίμακα. Η ανάπτυξη των δικτύων 5G βρίσκεται σε εξέλιξη [6].

Όσον αφορά την ιστορική εξέλιξη του Wi-Fi, μιας από τις κυριότερες τεχνολογίες ασύρματης δικτύωσης, παρατηρούνται οι εξής ημερομηνίες-ορόσημα [7]:

- **1991:** Ιδρύεται η Wireless Ethernet Compatibility Alliance (WECA), με στόχο την ανάπτυξη ενός κοινού προτύπου για ασύρματη δικτύωση.
- **1997:** Κυκλοφορεί η πρώτη έκδοση του προτύπου 802.11 από το Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρολόγων Μηχανικών (Institute of Electrical and Electronics Engineers - IEEE), ορίζοντας τα φυσικά επίπεδα και τα επίπεδα ζεύξης δεδομένων της ασύρματης δικτύωσης.
- **1999:** Η ονομασία “Wi-Fi” καθιερώνεται ως γενικός όρος για προϊόντα ασύρματης δικτύωσης τα οποία συμμορφώνονται με το πρότυπο 802.11.
- **2002:** Κυκλοφορεί το πρότυπο 802.11a, το οποίο προσφέρει μεγαλύτερες ταχύτητες και λιγότερες παρεμβολές αλλά έχει μικρότερη εμβέλεια από το 802.11b.
- **2003:** Κυκλοφορεί το πρότυπο 802.11g, το οποίο προσφέρει υψηλότερες ταχύτητες από το 802.11b, διατηρώντας, παράλληλα, τη συμβατότητα με τα προηγούμενα.
- **2007:** Κυκλοφορεί το πρότυπο 802.11n, το οποίο προσφέρει μεγαλύτερες ταχύτητες, καλύτερη εμβέλεια και μεγαλύτερο εύρος ζώνης από τα προηγούμενα πρότυπα.
- **2013:** Κυκλοφορεί το πρότυπο 802.11ac, το οποίο προσφέρει ακόμη μεγαλύτερες ταχύτητες και μεγαλύτερο εύρος ζώνης από το πρότυπο 802.11n.
- **2019:** Κυκλοφορεί το πρότυπο 802.11ax, γνωστό και ως Wi-Fi 6, προσφέροντας ακόμη μεγαλύτερες ταχύτητες και πιο αποτελεσματική χρήση του εύρους ζώνης από τα προηγούμενα πρότυπα.

1.3 Εξάπλωση ασύρματων δικτύων

Τα τελευταία χρόνια, τα ασύρματα δίκτυα έχουν εξαπλωθεί γρήγορα σε όλο τον κόσμο, λόγω της προόδου της τεχνολογίας και της, ολοένα, αυξανόμενης ζήτησης για ασύρματη συνδεσιμότητα.

Κάποιοι από τους βασικούς παράγοντες οι οποίοι έχουν συμβάλει τα μέγιστα στην εξάπλωση των ασύρματων δικτύων είναι οι εξής [8]:

- **Αυξανόμενη προσβασιμότητα:** Τα ασύρματα δίκτυα έχουν γίνει πιο προσιτά στους χρήστες χάρη στα διάφορα Wi-Fi Hot Spots, τα οποία προσφέρονται από διάφορες επιχειρήσεις και οργανισμούς, όπως αεροδρόμια, καφετέριες, ξενοδοχεία κ.ά.
- **Φορητές συσκευές:** Η μεγάλη εξάπλωση των φορητών συσκευών, όπως smartphones, tablets κ.ά., έχει αυξήσει σημαντικά τη ζήτηση για ασύρματη συνδεσιμότητα. Οι χρήστες επιδιώκουν να βρίσκονται σε σύνδεση οποιαδήποτε ώρα, σε οποιοδήποτε μέρος και αν βρεθούν.
- **Internet of Things (IoT):** Ο αυξανόμενος αριθμός των συσκευών IoT, όπως οι έξυπνες οικιακές συσκευές με την τεχνολογία που διαθέτουν, οδήγησε στην εξάπλωση των ασύρματων δικτύων. Οι έξυπνες συσκευές χρησιμοποιούν ασύρματη συνδεσιμότητα με άλλες συσκευές και το Διαδίκτυο.
- **Γρήγορη εξέλιξη της τεχνολογίας:** Η αλματώδης εξέλιξη της τεχνολογίας (5G και Wi-Fi 6) έχει κάνει τα ασύρματα δίκτυα ταχύτερα, πιο αξιόπιστα και πιο αποτελεσματικά.
- **Οικονομική αποδοτικότητα:** Η χρήση των ασύρματων δικτύων, στις περισσότερες περιπτώσεις, είναι πιο οικονομική από αυτή των ενσύρματων, καθώς απαιτεί λιγότερη φυσική υποδομή. Λόγω αυτού, τα ασύρματα δίκτυα αποτελούν μία ελκυστική επιλογή, ξεκινώντας από έναν απλό οικιακό χρήστη έως μια μεγάλη πολυεθνική επιχείρηση.

Η εξάπλωση των ασύρματων δικτύων έχει αλλάξει κατά έναν πολύ μεγάλο βαθμό τον τρόπο της καθημερινής διαβίωσης των ανθρώπων. Όσο συνεχίζεται η εξέλιξη της τεχνολογίας, τόσο τα ασύρματα δίκτυα θα διαδίδονται ανά τον κόσμο.

1.4 Χρησιμότητα ασύρματων δικτύων

Τα ασύρματα δίκτυα είναι εξαιρετικά χρήσιμα, καθώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν ακόμη και όταν ένας χρήστης βρίσκεται σε κίνηση και έχουν καθορίσει σαφώς τον τρόπο επικοινωνίας και απόκτησης πρόσβασης στις διάφορες πληροφορίες. Έχουν συντελέσει στην παγκόσμια συνδεσιμότητα, καθώς επιτρέπουν στους χρήστες να συνδεθούν με άλλους σε όλο τον κόσμο, ανεξάρτητα από το που βρίσκεται ο καθένας τη δεδομένη χρονική στιγμή. Αυτό διευκόλυνε την επικοινωνία και τη συνεργασία σε παγκόσμια κλίμακα και βοήθησε στην προώθηση των διαφόρων καινοτομιών και της οικονομικής ανάπτυξης. Επίσης, όπως έχει ήδη αναφερθεί, η χρησιμότητα των ασύρματων δικτύων έχει συντελέσει στην ανάπτυξη των δικτύων IoT.

1.5 Κατηγορίες ασύρματων δικτύων

Υπάρχουν αρκετές κατηγορίες ασύρματων δικτύων, καθεμία από τις οποίες διαθέτει τα δικά της χαρακτηριστικά και εφαρμογές. Παρακάτω, θα αναφερθούν κάποιες από τις κυριότερες κατηγορίες ασύρματων δικτύων [7], [8].

- **Ασύρματα Προσωπικά Δίκτυα (Wireless Personal Area Networks - WPANs):** Τα ασύρματα προσωπικά δίκτυα έχουν σχεδιαστεί για χρήση από ένα άτομο και, συνήθως, καλύπτουν περιοχή περίπου 10 μέτρων. Τέτοια δίκτυα είναι τα Bluetooth και οι υπέρυθρες (IR), τα οποία χρησιμοποιούνται κυρίως από φορητές συσκευές
- **Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα (Wireless Local Area Networks - WLANs):** Τα ασύρματα τοπικά δίκτυα έχουν σχεδιαστεί για να παρέχουν ασύρματη συνδεσιμότητα σε μια τοπική περιοχή, που συνήθως καλύπτει μια περιοχή μερικών εκατοντάδων μέτρων. Ένα τέτοιο δίκτυο είναι το Wi-Fi, το οποίο χρησιμοποιείται, κυρίως, σε σπίτια, γραφεία και δημόσιους χώρους, για την παροχή ασύρματης πρόσβασης στο Διαδίκτυο
- **Ασύρματα Μητροπολιτικά Δίκτυα (Wireless Metropolitan Area Networks - WMANs):** Τα ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα καλύπτουν μια μεγαλύτερη γεωγραφική περιοχή από τα

ασύρματα τοπικά δίκτυα και εκτείνονται, συνήθως, σε αρκετά χιλιόμετρα, όπως μέσα σε μία πόλη. Χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση πολλαπλών ασύρματων τοπικών δικτύων

- **Ασύρματα Δίκτυα Ευρείας Περιοχής (Wireless Wide Area Networks - WWANs):** Τα δίκτυα ευρείας περιοχής είναι ασύρματα δίκτυα τα οποία έχουν σχεδιαστεί ώστε να καλύπτουν μια μεγάλη γεωγραφική περιοχή, όπως μια χώρα ή μια ήπειρο. Ένα παράδειγμα τέτοιων δικτύων είναι τα δορυφορικά δίκτυα
- **Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (Wireless Sensor Networks - WSNs):** Αυτός ο τύπος ασύρματου δικτύου αποτελείται από μεγάλο αριθμό μικρών συσκευών χαμηλής κατανάλωσης ρεύματος, οι οποίες ονομάζονται αισθητήρες. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση και τη συλλογή δεδομένων περιβαλλοντικού χαρακτήρα, όπως θερμοκρασία, υγρασία και επίπεδα φωτισμού. Η χρήση τους λαμβάνει χώρα, συχνότερα, όσον αφορά βιομηχανικές, γεωργικές ή περιβαλλοντικές εφαρμογές
- **Γνωστικά Ραδιοδίκτυα (Cognitive Radio Networks - CRNs):** Σε αυτή την κατηγορία ανήκει η τεχνολογία η οποία χρησιμοποιεί ραδιοεπικοινωνία, η οποία είναι καθοριζόμενη από λογισμικό και μπορεί να προσαρμοστεί δυναμικά στο ασύρματο περιβάλλον, αλλάζοντας τη συχνότητα ή οποιαδήποτε άλλη παράμετρο. Τα γνωστικά ραδιοδίκτυα χρησιμοποιούνται -και αυτά- σε επικοινωνίες που έχουν στρατιωτικό χαρακτήρα ή σε επικοινωνίες έκτακτης ανάγκης, αφού μπορούν να παρέχουν πιο ισχυρή και αξιόπιστη σύνδεση κάτω από δύσκολες συνθήκες

1.6 Πρωτόκολλα ασύρματων δικτύων

Τα πρωτόκολλα ασύρματων δικτύων είναι σύνολα κανόνων και προτύπων που καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο οι διάφορες συσκευές επικοινωνούν μεταξύ τους, μέσω ενός ασύρματου δικτύου. Με αυτά τα πρωτόκολλα διασφαλίζεται η απρόσκοπτη συνεργασία και επικοινωνία μεταξύ διαφορετικών συσκευών. Επίσης, ορίζουν τη μορφή και τη δομή των πακέτων δεδομένων που αποστέλλονται μεταξύ των συσκευών, καθώς και τις διαδικασίες που ορίζουν την έναρξη και τον τερματισμό της επικοινωνίας μεταξύ αυτών.

Ακολουθούν μερικά από τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται συνήθως στα ασύρματα δίκτυα [9]:

- **Wi-Fi (IEEE 802.11):** Το Wi-Fi είναι το πιο κοινό πρωτόκολλο ασύρματων δικτύων και χρησιμοποιείται στα τοπικά δίκτυα και για πρόσβαση στο διαδίκτυο. Λειτουργεί στις ζώνες συχνοτήτων 2.4 και 5 GHz.
- **Bluetooth:** Το Bluetooth χρησιμοποιείται για επικοινωνία μικρής εμβέλειας μεταξύ συσκευών, συνήθως εντός 10 μέτρων.
- **Infrared (IR):** Αυτό το πρωτόκολλο χρησιμοποιεί υπέρυθρη ακτινοβολία για επικοινωνία μεταξύ συσκευών εντός λίγων μέτρων. Χρησιμοποιείται από τηλεχειριστήρια τηλεοράσεων, κινητά τηλέφωνα κ.ά.
- **Zigbee (IEEE 802.15.4):** Πρόκειται για ένα πρωτόκολλο ασύρματων δικτύων χαμηλής κατανάλωσης, το οποίο χρησιμοποιείται για αυτοματισμούς και βιομηχανικές εφαρμογές. Λειτουργεί στις ζώνες συχνοτήτων 2.4 GHz, 868 και 915 MHz.
- **Z-Wave:** Το Z-Wave χρησιμοποιείται για αυτοματισμούς και έχει σχεδιαστεί ώστε να λειτουργεί με συσκευές χαμηλής κατανάλωσης, όπως το Zigbee. Λειτουργεί στη ζώνη συχνοτήτων 908.42 MHz.
- **LoRaWAN:** Πρόκειται για ένα πρωτόκολλο ασύρματων δικτύων μεγάλης εμβέλειας και χαμηλής κατανάλωσης και χρησιμοποιείται για εφαρμογές Internet of Things (IoT). Λειτουργεί στις ζώνες συχνοτήτων 433, 868 και 915 MHz.
- **Κυψελοειδή δίκτυα (cellular):** Πρόκειται για τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας τα οποία παρέχουν ασύρματη σύνδεση κινητών συσκευών. Χρησιμοποιούνται για τηλεφωνικές κλήσεις και πρόσβαση στο Διαδίκτυο. Τα πιο συνηθισμένα είναι τα GSM, CDMA, LTE, 4G και 5G.
- **NFC (Near Field Communication):** Είναι ένα πρωτόκολλο ασύρματων δικτύων το οποίο χρησιμοποιείται για ανέπαφη επικοινωνία μεταξύ συσκευών εντός πολύ μικρής εμβέλειας. Λειτουργεί στη ζώνη συχνοτήτων 13.56 MHz

- **WiMAX (IEEE 802.16):** Το WiMAX έχει σχεδιαστεί για την παροχή υψηλής ταχύτητας πρόσβασης στο Διαδίκτυο, σε μεγάλες αποστάσεις. Λειτουργεί στις ζώνες συχνοτήτων μεταξύ 2 και 11 GHz.
- **RFID (Radio Frequency Identification):** Πρόκειται για ένα πρωτόκολλο ασύρματων δικτύων που χρησιμοποιεί ραδιοκύματα για τον εντοπισμό και την παρακολούθηση αντικειμένων ή ανθρώπων. Χρησιμοποιείται από εταιρείες για την παρακολούθηση αποθεμάτων, συστήματα ελέγχου πρόσβασης κ.ά.

1.7 Σύγκριση ασύρματων & ενσύρματων τοπικών δικτύων

Τα ασύρματα και ενσύρματα τοπικά δίκτυα διαφέρουν σε διάφορους τομείς όπως είναι η ταχύτητα, η αξιοπιστία, η ασφάλεια, το κόστος και η ευκολία στην εγκατάστασή τους [10].

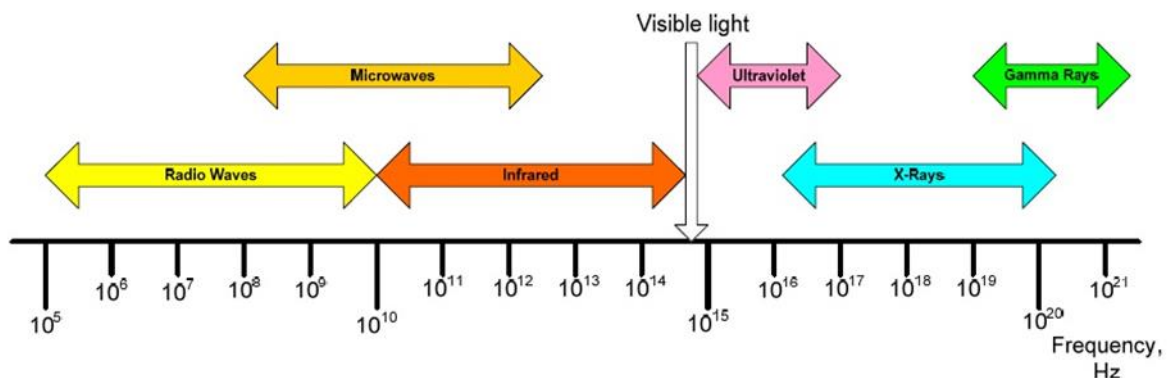
- **Ταχύτητα:** Τα ενσύρματα τοπικά δίκτυα παρέχουν, συνήθως, ταχύτερους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων από αυτούς των ασύρματων, ιδιαίτερα στις περιπτώσεις μεταφοράς μεγάλων αρχείων ή ροής βίντεο. Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι τα ενσύρματα τοπικά δίκτυα χρησιμοποιούν φυσικά καλώδια για τη μεταφορά δεδομένων, ενώ τα ασύρματα βασίζονται στην επικοινωνία μέσω ραδιοκυμάτων τα οποία μπορούν να επηρεαστούν από παρεμβολές, την απόσταση και την ισχύ του σήματος.
- **Αξιοπιστία:** Γενικότερα, τα ενσύρματα τοπικά δίκτυα είναι πιο αξιόπιστα από τα ασύρματα, καθώς δεν επηρεάζονται από παρεμβολές ή συμφόρηση από άλλες ασύρματες συσκευές ή δίκτυα. Επίσης, τα ενσύρματα τοπικά δίκτυα παρέχουν σταθερή απόδοση, αφού η ταχύτητα και η ποιότητα της σύνδεσης δεν επηρεάζονται από την απόσταση ή την ισχύ του σήματος.
- **Ασφάλεια:** Τα ενσύρματα τοπικά δίκτυα θεωρούνται πιο ασφαλή από τα ασύρματα, καθώς είναι πιο δύσκολο να παραβιαστούν ή να υποκλαπούν. Μπορούν να ασφαλιστούν με φυσικά μέσα ελέγχου πρόσβασης, όπως κλειδαριές και κάμερες παρακολούθησης, αλλά και με τεχνολογίες κρυπτογράφησης που προστατεύουν τα δεδομένα όσο αυτά μεταδίδονται μέσω του δικτύου. Από την άλλη πλευρά, τα ασύρματα τοπικά δίκτυα είναι ευάλωτα σε υποκλοπή, παραβίαση και μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση, ιδιαίτερα στην περίπτωση που δεν είναι σωστά ασφαλισμένα.
- **Κόστος:** Τα ασύρματα τοπικά δίκτυα είναι φθηνότερα στην εγκατάσταση από τα ενσύρματα, καθώς δεν απαιτούν φυσική καλωδίωση και μπορούν να εγκατασταθούν και να ρυθμιστούν πιο εύκολα. Ωστόσο, το κόστος των ασύρματων τοπικών δικτύων ενδέχεται να είναι υψηλότερο μακροπρόθεσμα λόγω της συχνής συντήρησης, των αναβαθμίσεων και της ανησυχίας για την ασφάλειά τους.
- **Ευκολία εγκατάστασης:** Τα ασύρματα τοπικά δίκτυα είναι πιο εύκολα στην εγκατάστασή τους από τα ενσύρματα, καθώς δεν απαιτούν φυσική καλωδίωση και μπορούν να εγκατασταθούν και να ρυθμιστούν πιο γρήγορα. Επίσης, τα ασύρματα τοπικά δίκτυα είναι πιο ευέλικτα, αφού οι χρήστες μπορούν να έχουν πρόσβαση στο δίκτυο από οπουδήποτε εντός της περιοχής κάλυψης, ενώ τα ενσύρματα απαιτούν τη φυσική σύνδεση των χρηστών σε μια θύρα δικτύου.

Συνοψίζοντας, τα ενσύρματα τοπικά δίκτυα παρέχουν ταχύτερες, πιο αξιόπιστες και ασφαλέστερες συνδέσεις από τα ασύρματα, αλλά, ταυτόχρονα, είναι πιο ακριβά και δύσκολα στην εγκατάστασή τους. Από την άλλη πλευρά, τα ασύρματα τοπικά δίκτυα είναι ευκολότερα και λιγότερο δαπανηρά στην εγκατάστασή τους, αλλά είναι πιο ευάλωτα σε παρεμβολές, συμφόρηση και απειλές όσον αφορά την ασφάλειά τους. Η επιλογή μεταξύ ασύρματου και ενσύρματου τοπικού δικτύου εξαρτάται από τις ανάγκες και απαιτήσεις του εκάστοτε οργανισμού ή χρήστη.

Κεφάλαιο 2ο: Φυσικό επίπεδο

2.1 Ραδιοκύματα & υπέρυθρη μετάδοση

Σε ένα ασύρματο δίκτυο, το φυσικό επίπεδο καθορίζει τις ηλεκτρικές, μηχανικές και διαδικαστικές προδιαγραφές μετάδοσης των δεδομένων μέσω ενός μέσου ή καναλιού επικοινωνίας [8]. Έτσι, ένα κρίσιμο ερώτημα που τίθεται από νωρίς, κατά το σχεδιασμό ενός ασύρματου δικτύου είναι το ποιο μέσο μετάδοσης θα χρησιμοποιηθεί, με βάση τη συχνότητα του φέροντος κύματος του καναλιού επικοινωνίας, καθώς υπάρχουν δύο εναλλακτικές λύσεις [11]: (α) τα κανάλια υπέρυθρων και (α) τα κανάλια ραδιοκυμάτων. Οι θέσεις που καταλαμβάνουν τα ραδιοκύματα (ραδιοσυχνότητες και μικροκύματα) και οι υπέρυθρες συχνότητες στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα φαίνονται στην εικόνα 2.1. Οι ζώνες συχνοτήτων πάνω από αυτή του ορατού φωτός χρησιμοποιούνται σπάνια σε συστήματα ασύρματης επικοινωνίας, καθώς τα εξαιρετικά υψηλής συχνότητας κύματα είναι δύσκολο να διαμορφωθούν [12].



Εικόνα 2.1: Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα συχνοτήτων [11]

2.1.1 Φάσμα υπέρυθρων

Το φάσμα υπέρυθρων (IR) είναι μια αόρατη ζώνη ακτινοβολίας που καταλαμβάνει το κάτω άκρο του ορατού ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Το υπέρυθρο φως απορροφάται από σκοτεινά αντικείμενα, ανακλάται από τα ανοιχτόχρωμα και δεν μπορεί να διεισδύσει στους τοίχους. Οι συσκευές IR που χρησιμοποιούνται σε ασύρματα δίκτυα λειτουργούν σε μήκη κύματος κοντά στα 850 με 900nm. Αυτό συμβαίνει επειδή η κατασκευή του υλικού του πομπού και του δέκτη σε αυτές τις ζώνες είναι φθηνότερη και επίσης επειδή σε αυτό το σημείο του φάσματος των IR, η εξασθένηση κατά τη μετάδοση είναι μικρότερη. Η πηγή φωτός που χρησιμοποιείται στη μετάδοση υπέρυθρων εξαρτάται από το περιβάλλον. Σε εσωτερικούς χώρους, ως πηγή χρησιμοποιείται δίοδος εκπομπής φωτός (Light Emitting Diode - LED), ενώ σε εξωτερικούς χρησιμοποιούνται λέιζερ. Οι φωτοδιόδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δέκτες και στις δύο περιπτώσεις [13].

Μία από τις βασικότερες ιδιότητες της μετάδοσης IR είναι η κατευθυντικότητα. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για επικοινωνίες από σημείο σε σημείο, αλλά όχι σε συστήματα εκπομπής (broadcast), παρά μόνο μέσω χρήσης συσκευών, όπως ένας ανακλαστήρας ή ένας επαναλήπτης. Έτσι, στα ασύρματα δίκτυα μπορούν να χρησιμοποιηθούν δύο είδη επικοινωνίας IR [14]. Το πρώτο αφορά τη χρήση κατευθυνόμενης δέσμης υπέρυθρων (direct beam), η οποία παρουσιάζει την υψηλότερη ταχύτητα μετάδοσης. Στην περίπτωση αυτή, ο δέκτης έχει ελεύθερη (χωρίς εμπόδια) οπτική επαφή με

τον δέκτη (Line-of-Sight – LoS), δημιουργώντας μια ζεύξη επικοινωνίας από σημείο σε σημείο. Το εύρος της μεταξύ τους απόστασης εξαρτάται από το βαθμό εστίασης και την εκπεμπόμενη ισχύς της δέσμης. Το δεύτερο είδος επικοινωνίας IR περιλαμβάνει τη διάχυση της εκπεμπόμενης δέσμης (diffused beam). Η διάχυση αυτή μπορεί να πραγματοποιείται μέσω χρήσης ανακλάσεων της εκπομπής στα αντικείμενα ενός χώρου (π.χ. ένα δωμάτιο), ώστε η λήψη να πραγματοποιηθεί από όλους τους δέκτες που βρίσκονται σε αυτό ή με χρήση πολυκατευθυντικών κεραιών (omnidirectional), όπου ο πομπός θα πρέπει να έχει οπτική επαφή με όλους τους δέκτες του χώρου [14].

Σε γενικές γραμμές η υπέρυθη μετάδοση θεωρείται μετάδοση μικρής εμβέλειας. Όταν χρησιμοποιείται σε εσωτερικούς χώρους, μπορεί να περιοριστεί από συμπαγή αντικείμενα, όπως πόρτες, τοίχους, έπιπλα, κλπ. Επιπλέον, το περιβάλλον φωτισμού μπορεί να επηρεάσει την ποιότητα του σήματος. Για παράδειγμα, απώλεια επικοινωνίας μπορεί να προκύψει λόγω της ύπαρξης μεγάλης ποσότητας ηλιακού φωτός ή φωτός του φόντου σε ένα περιβάλλον (π.χ. από λαμπτήρες φθορισμού). Αυτό το πρόβλημα μπορεί να λυθεί χρησιμοποιώντας υψηλή ισχύ σήματος και βέλτιστα φίλτρα εύρους ζώνης, τα οποία μπορούν να μειώσουν τα υπέρυθρα σήματα που προέρχονται από εξωτερική πηγή. Σε εξωτερικό περιβάλλον, το χιόνι, ο πάγος και η ομίχλη μπορεί να επηρεάσουν τη λειτουργία ενός συστήματος που λειτουργεί μέσω χρήσης μετάδοσης υπέρυθρων [15].

Στα πλεονεκτήματα της μετάδοσης υπέρυθρων περιλαμβάνονται [11]:

- Οι ενσωματωμένοι πομποί και δέκτες στις περισσότερες σύγχρονες φορητές συσκευές είναι σχεδιαστικά απλοί και κατασκευαστικά πολύ φθηνοί. Οι φορητοί υπολογιστές, τα κινητά τηλέφωνα, κλπ. μπορούν να υποστηρίξουν πομπούς και δέκτες πρωτοκόλλου IrDA (Infrared Data Association) με αρκετά υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων (της τάξης των δεκάδων Mbps)
- Η χρήση της μετάδοσης υπέρυθρων δεν απαιτεί έκδοση άδειας
- Η θωράκιση είναι πολύ απλή στις συσκευές IR (λόγω της περιορισμένης εμβέλειάς τους, η θωράκιση αποτελεί πολύ μικρότερο ζήτημα σε σχέση με τις συσκευές RF)
- Οι ηλεκτρικές συσκευές δεν προκαλούν παρεμβολές στη μετάδοση υπέρυθρων
- Η ασφάλεια της μετάδοσης είναι πολύ μεγαλύτερη, καθώς είναι δυνατός ο έλεγχος της κατεύθυνσης της εκπεμπόμενης δέσμης IR
- Η ταχύτητα μετάδοσης της τεχνολογίας επικοινωνίας λέιζερ μπορεί να φτάσει σε αρκετές εκατοντάδες Mbps

Στα μειονεκτήματα της μετάδοσης υπέρυθρων περιλαμβάνονται [11]:

- Η χρησιμότητα του εύρους ζώνης είναι μικρή σε σύγκριση με άλλες μεθόδους ασύρματης επικοινωνίας
- Η μετάδοση υπέρυθρων δεν μπορεί να διαπεράσει τοίχους ή άλλα εμπόδια
- Για καλή ποιότητα μετάδοσης και υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, συνήθως απαιτείται ύπαρξη επαφής LoS μεταξύ πομπού και δέκτη
- Η μετάδοση υπέρυθρων παρουσιάζει πολύ μικρότερη δυνατότητα υποστήριξης της κινητικότητας σε σύγκριση με την μετάδοση RF

2.1.2 Φάσμα ραδιοκυμάτων

Οι πιο δημοφιλείς τεχνολογίες ασύρματων δικτύων βασίζονται στη χρήση ραδιοκυμάτων και όχι υπέρυθρων. Ο βασικότερος λόγος είναι το ζήτημα της μικρής εμβέλειας που παρουσιάζει η τεχνολογία IR. Όντας χαμηλότερης συχνότητας σε σύγκριση με το IR, ένα κανάλι ραδιοκυμάτων συμπεριφέρεται εντελώς διαφορετικά. Αυτή η συμπεριφορά δεν είναι σταθερή, αλλά εξαρτάται από το εύρος συχνοτήτων που χρησιμοποιείται σε μια μετάδοση με ραδιοκύματα [11].

Η μετάδοση ραδιοκυμάτων μπορεί να διαπεράσει τους τοίχους και τα μη μεταλλικά υλικά, παρέχοντας μεγαλύτερη περιοχή κάλυψης, αλλά ταυτόχρονα μειωμένη ασφάλεια. Τα ραδιοκύματα παρουσιάζουν μεγάλη ανθεκτικότητα στις παρεμβολές από τον ατμοσφαιρικό και τον ανθρωπογενή θόρυβο, αλλά μικρότερη ανθεκτικότητα σε άλλες πηγές θορύβου, όπως κυκλώματα υψηλού ρεύματος και φούρνους μικροκυμάτων. Επίσης, η απόδοση της μετάδοσης μειώνεται από τις παρεμβολές συν-καναλιού (co-channel interference), καθώς η μπάντα των RF χαρακτηρίζεται από μεγάλο συνωστισμό. Ο προσεκτικός σχεδιασμός του συστήματος και η χρήση τεχνικών και μεθόδων διαμόρφωσης μπορεί να μειώσει σημαντικά τις επιπτώσεις παρεμβολών στις περισσότερες περιπτώσεις. Κάτι τέτοιο όμως αυξάνει το κόστος του εξοπλισμού των ασύρματων δικτύων που λειτουργούν με ραδιοκύματα έναντι αυτού που λειτουργούν με υπέρυθρες, καθώς οι εξελιγμένες τεχνικές διαμόρφωσης και μετάδοσης απαιτούν το σχεδιασμό και υλοποίηση πολύπλοκων κυκλωμάτων μετατροπής συχνότητας ή φάσης. Το κόστος αυτό μειώνεται ολοένα και περισσότερο τα τελευταία χρόνια μέσω της χρήσης των συνεχώς εξελισσόμενων μεθόδων κατασκευής των εξαρτημάτων [11].

Ανάλογα με το εύρος ζώνης που χρησιμοποιείται και τη συχνότητα της μετάδοσης, τα συστήματα ασύρματης επικοινωνίας ραδιοσυχνοτήτων χωρίζονται κυρίως σε δύο κατηγορίες [16]: (α) τα συστήματα μετάδοσης στενής ζώνης και (β) τα συστήματα μετάδοσης ευρείας ζώνης διασποράς φάσματος. Σε ένα σύστημα μετάδοσης στενής ζώνης (narrow band transmission) η εκπομπή και λήψη των δεδομένων πραγματοποιείται σε μια συγκεκριμένη ζώνη ραδιοσυχνοτήτων και οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται αποσκοπούν στη διατήρηση του μεταδιδόμενου σήματος σε όσο το δυνατόν χαμηλότερο εύρος ζώνης. Για την αποφυγή των παρεμβολών μεταξύ διαφορετικών πηγών δεδομένων, κατά τις μεταδόσεις χρησιμοποιούνται τεχνικές πολυπλεξίας, όπως η πολυπλεξία με διαίρεση συχνότητας (Frequency Division Multiplexing - FDM) και η πολυπλεξία με διαίρεση χρόνου (Time Division Multiplexing - TDM). Και οι δύο αυτές τεχνικές βασίζονται στη διαίρεση του καναλιού σε υποκανάλια, στον τομέα της συχνότητας και του χρόνου, αντίστοιχα [17].

Ακόμα όμως και με τη χρήση της τεχνικής TDM, για την επίτευξη αξιόπιστης επικοινωνίας σε περίπτωση μεταδόσεων στενής ζώνης, η συχνότητα στην οποία θα μεταδοθεί το προκύπτον πολυπλεγμένο σήμα, θα πρέπει να διέπεται από κάποιους κανονισμούς, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι περιπτώσεις παρεμβολών από άλλες πηγές. Αυτοί οι κανονισμοί, που έχουν τη μορφή αδειοδότησης χρήσης της εκάστοτε μπάντας συχνοτήτων, τέθηκαν για να μπορέσει να αντιμετωπιστεί καλύτερα το βασικό πρόβλημα του συνωστισμού που παρουσιάζει η μπάντα των ραδιοσυχνοτήτων. Η εκάστοτε αδειοδότηση χρήσης δίνεται από οργανισμούς διαχείρισης της κατανομής των ραδιοσυχνοτήτων, όπως είναι ο οργανισμός CEPT (Conference of European Postal and Telecommunications Administrations) στην Ευρωπαϊκή Ένωση και ο FCC (Federal Communications Commission) στις ΗΠΑ [18].

Οι ισχύοντες κανονισμοί για την κατανομή συχνότητας ορίζουν μια σειρά από ζώνες συχνοτήτων για μεταδόσεις στενής ζώνης σε ασύρματα δίκτυα. Από αυτές, η σημαντικότερη είναι η ζώνη των ISM (Industrial, Scientific, and Medical), η οποία αποτελεί μια μη αδειοδοτημένη ζώνη συχνοτήτων που χρησιμοποιείται από τα περισσότερα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα. Αυτή η ζώνη περιέχει τρεις περιοχές συχνοτήτων: 902 - 928MHz, 2400 - 2483,5MHz και 5725 - 5850MHz. Καθώς οι συγκεκριμένες περιοχές είναι μη αδειοδοτούμενες, για να αποφευχθεί το ζήτημα της παρεμβολής συν-καναλιού, η χρήση τους θα πρέπει να πληροί ορισμένες προδιαγραφές, οι σημαντικότερες από τις οποίες είναι η υποχρεωτική χρήση της τεχνικής διασποράς φάσματος και η χαμηλή ισχύς μετάδοσης [11].

Οι τρεις περιοχές της ζώνης ISM παρουσιάζουν μια σειρά από σημαντικές διαφορές [19]. Το πιο προφανές είναι το γεγονός ότι οι υψηλότερες περιοχές, όντας ευρύτερες, μπορούν να υποστηρίξουν μεταδόσεις μεγαλύτερου εύρους ζώνης και επομένως μεγαλύτερης ταχύτητας. Αντίθετα, το κόστος υλοποίησης ενός ασύρματου δικτύου είναι ανάλογο της ζώνης συχνοτήτων που χρησιμοποιεί. Έτσι, ο εξοπλισμός της περιοχής των 5,8GHz είναι πιο απαιτητικός και ακριβός, ενώ ένα ασύρματο δίκτυο της χαμηλότερης περιοχής μπορεί να υλοποιηθεί με χαμηλού κόστους συσκευές. Αντίστοιχα, τα ασύρματα δίκτυα της μεσαίας περιοχής ISM (2,4GHz) χαρακτηρίζονται από μέτριο κόστος υλοποίησης [20]. Ωστόσο, η κατάσταση αντιστρέφεται όταν λαμβάνονται υπόψη ο θόρυβος και οι παρεμβολές. Έτσι, η περιοχή των 902MHz παρουσιάζει έντονο πρόβλημα θορύβου και παρεμβολών, καθώς χαρακτηρίζεται από έντονο συνωστισμό λειτουργίας συσκευών, όπως κινητά και ασύρματα τηλέφωνα, κλπ. Η περιοχή των 2,4GHz αντιμετωπίζει λιγότερες παρεμβολές, με εξαίρεση τη χρήση των φούρνων μικροκυμάτων. Η περιοχή των 5,8GHz χαρακτηρίζεται ως η πλέον θελκτική για χρήση, καθώς στις υψηλές συχνότητες υπάρχουν λιγότερες παρεμβολές και θόρυβος [11]. Τέλος, όσον αφορά το εύρος μετάδοσης, το μεγαλύτερο εύρος μετάδοσης μπορεί να επιτευχθεί στην χαμηλότερη περιοχή συχνοτήτων. Έχει υπολογιστεί, ότι στην περιοχή των 2,4GHz το εύρος μετάδοσης είναι περίπου 5% μικρότερο από αυτό στην περιοχή των 902MHz, ενώ για την περιοχή των 5,8GHz η μείωση αυξάνεται στο 20% [21]. Ως γενικός κανόνας, μπορεί να αναφερθεί ότι οι ιδιότητες των τριών ζωνών ISM ποικίλουν μονοτονικά με τη συχνότητα. Η χαμηλότερη και η υψηλότερη περιοχή χαρακτηρίζονται από σημαντικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Η ζώνη των 2,4GHz παρουσιάζει το επιπλέον πλεονέκτημα ότι είναι η μοναδική διαθέσιμη σε όλο τον κόσμο [22].

Στα πλεονεκτήματα της μετάδοσης ραδιοκυμάτων περιλαμβάνονται [11]:

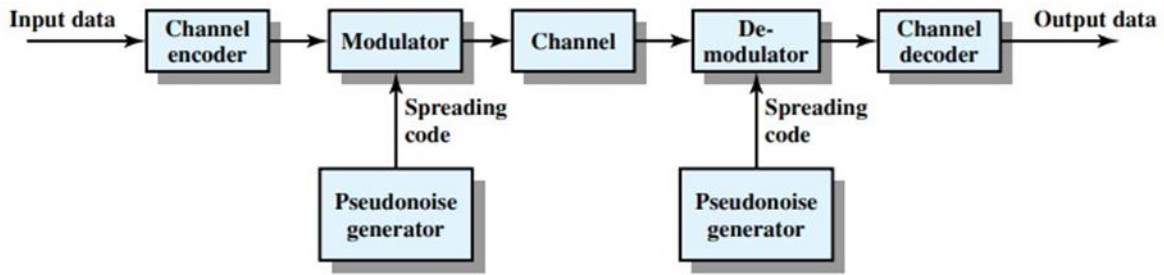
- Η εμπειρία χρήσης της μετάδοσης ραδιοκυμάτων σε δίκτυα ευρείας περιοχής (π.χ. ζεύξεις μικροκυμάτων) και κινητά τηλέφωνα είναι μακροχρόνια
- Η μετάδοση ραδιοκυμάτων μπορεί να καλύψει μεγαλύτερες περιοχές και μπορεί να διαπεράσει συμπαγή αντικείμενα, όπως πόρτες, τοίχους, έπιπλα, κλπ.
- Η μετάδοση ραδιοκυμάτων δεν απαιτεί την ύπαρξη LoS μεταξύ πομπού και δέκτη για αξιόπιστη επικοινωνία
- Τα προϊόντα που λειτουργούν στη ζώνη συχνοτήτων των ραδιοκυμάτων παρέχουν πολύ υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης από τις υπέρυθρες

Στα μειονεκτήματα της μετάδοσης ραδιοκυμάτων περιλαμβάνονται [11]:

- Η θωράκιση δεν είναι απλή
- Η μετάδοση ραδιοκυμάτων ευαίσθητων δεδομένων και δεδομένων εντολών/ελέγχου απαιτεί την εφαρμογή υψηλού επιπέδου ασφάλεια δεδομένων και ελέγχου ταυτότητας, που μεταφράζεται σε πολυπλοκότητα του συστήματος και υψηλότερο συνολικό κόστος στο σχεδιασμό/ανάπτυξη/υλοποίηση/επαλήθευση/ολοκλήρωση και λειτουργία του δικτύου
- Η μετάδοση ραδιοκυμάτων είναι επιρρεπής σε παρεμβολές, που αντιμετωπίζονται σε γενικές γραμμές με τη σωστή θωράκιση των ευαίσθητων ηλεκτρονικών συσκευών και την χρήση κατάλληλων τεχνικών καταστολής ή φιλτράρισμα σήματος σε συγκεκριμένες ζώνες ραδιοκυμάτων

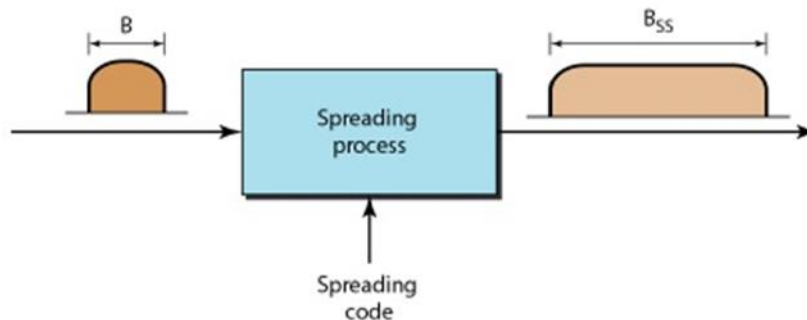
2.2 Τεχνικές μετάδοσης σήματος

Τα πιο δημοφιλή σύγχρονα ασύρματα δίκτυα χρησιμοποιούν την τεχνική διασποράς φάσματος (Spread Spectrum – SS), η οποία αρχικά είχε αναπτυχθεί για στρατιωτικές εφαρμογές. Η βασική φιλοσοφία της βασίζεται στη διασπορά των μεταδιδόμενων πληροφοριών σε ένα μεγαλύτερο εύρος ζώνης προκειμένου να αντιμετωπιστούν τα ζητήματα της υποκλοπής και της παρεμβολής [23].



Εικόνα 2.2: Βασική φιλοσοφία τεχνικής SS [24]

Σε ένα σύστημα SS, τα δεδομένα εισόδου τροφοδοτούνται σε έναν κωδικοποιητή καναλιού, ο οποίος χρησιμοποιεί ένα φέρον κύμα για να παράγει ένα αναλογικό σήμα στενής ζώνης μιας συγκεκριμένης συχνότητας (Εικ. 2.2). Αυτό το σήμα, στη συνέχεια, διαμορφώνεται ως προς τη συχνότητα από έναν διαμορφωτή, ο οποίος χρησιμοποιεί μια ακολουθία ψευδοτυχαίων αριθμών, η οποία είναι γνωστή ως ακολουθία ή κώδικας διασποράς. Η ακολουθία αυτή παράγεται από μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών, χρησιμοποιώντας μια αρχική τιμή (seed). Οι αριθμοί της ακολουθίας δεν είναι πραγματικά τυχαίοι, αφού ο αλγόριθμος της γεννήτριας είναι ντετερμινιστικός και μια δεδομένη αρχική τιμή παράγει πάντα το ίδιο σύνολο τυχαίων αριθμών. Το αποτέλεσμα αυτής της διαμόρφωσης είναι η σημαντική αύξηση του εύρους ζώνης (διασπορά του φάσματος) του εκπεμπόμενου σήματος (Εικ. 2.3). Στο άκρο λήψης, χρησιμοποιείται η ίδια ακολουθία για την αποδιαμόρφωση του σήματος διασποράς και την ανάκτηση του αρχικού αναλογικού σήματος στενής ζώνης. Το τελευταίο, φυσικά, τροφοδοτείται σε έναν αποκωδικοποιητή καναλιών για την ανάκτηση των αρχικών ψηφιακών δεδομένων [24].



Εικόνα 2.3: Αποτέλεσμα τεχνικής SS [24]

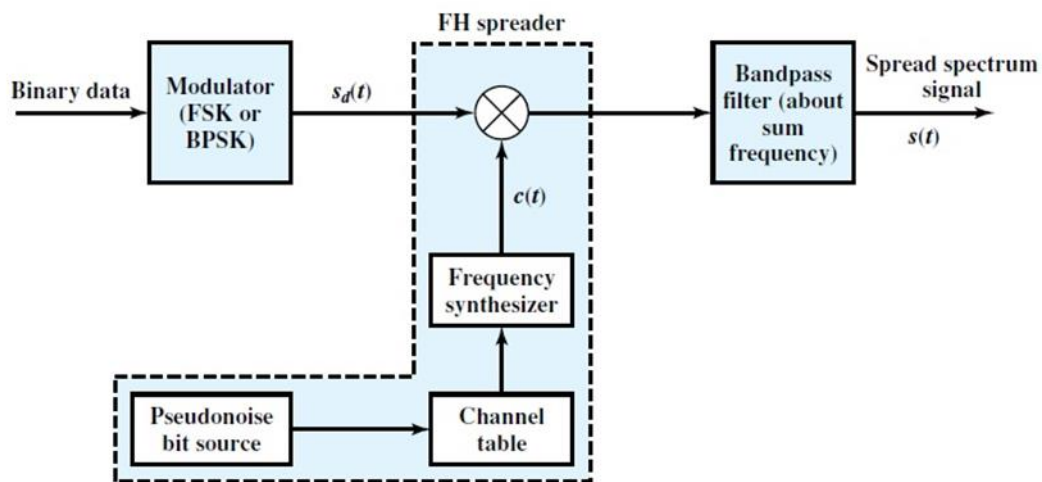
Μεταξύ των άλλων πλεονεκτημάτων της, η τεχνική διασποράς φάσματος αποδεικνύεται αρκετά επιτυχημένη στην καταπολέμηση της εξασθένησης που μπορεί να παρατηρηθεί κατά τη μετάδοση των σημάτων. Καθώς, η εξασθένηση αυτή εξαρτάται από τη συχνότητα μετάδοσης, ένα σήμα που μεταδίδεται μέσω τεχνικής SS παρουσιάζει εξασθένηση σε ένα μικρό μόνο μέρος του [24].

Τα συστήματα που χρησιμοποιούν τη διασπορά φάσματος χωρίζονται σε έξι διαφορετικούς τύπους ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο ο κώδικας διασποράς διαμορφώνει τα αρχικά δεδομένα. Από τους τύπους αυτούς, οι πλέον δημοφιλείς στα ασύρματα δίκτυα είναι οι [24]: (α) διασπορά φάσματος με εναλλαγή συχνοτήτων, (β) διασπορά φάσματος με άμεση ακολουθία και (γ) ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας.

2.2.1 Διασπορά φάσματος με εναλλαγή συχνοτήτων (FHSS)

Η τεχνική διασποράς φάσματος με εναλλαγή συχνοτήτων (Frequency Hopping Spread Spectrum - FHSS) είναι μια τεχνική μετάδοσης ραδιοκυμάτων, στην οποία το σήμα εκπέμπεται σε ένα φαινομενικά τυχαίο σύνολο καναλιών επικοινωνίας, μεταπηδώντας από συχνότητα σε συχνότητα σε σταθερά χρονικά διαστήματα. Καθώς η τεχνική αυτή αποτελεί ουσιαστικά μια παραλλαγή της βασικής τεχνικής SS, το σήμα που μεταδίδεται προέρχεται από τη διαμόρφωση της κεντρικής συχνότητας του καναλιού με το αρχικό σήμα. Η τεχνική FHSS χρησιμοποιείται για την αποφυγή παρεμβολών και υποκλοπών του μεταδιδόμενου σήματος. Οποιαδήποτε προσπάθεια υποκλοπής της μετάδοσης θα είχε ως αποτέλεσμα τη λήψη μέρους μόνο των δεδομένων (της τάξης των bit), ενώ μόνο μερικά τυχαία κομμάτια του αρχικού μηνύματος είναι δυνατόν να διαγράψουν κατά τις προσπάθειες παρεμβολής του [25].

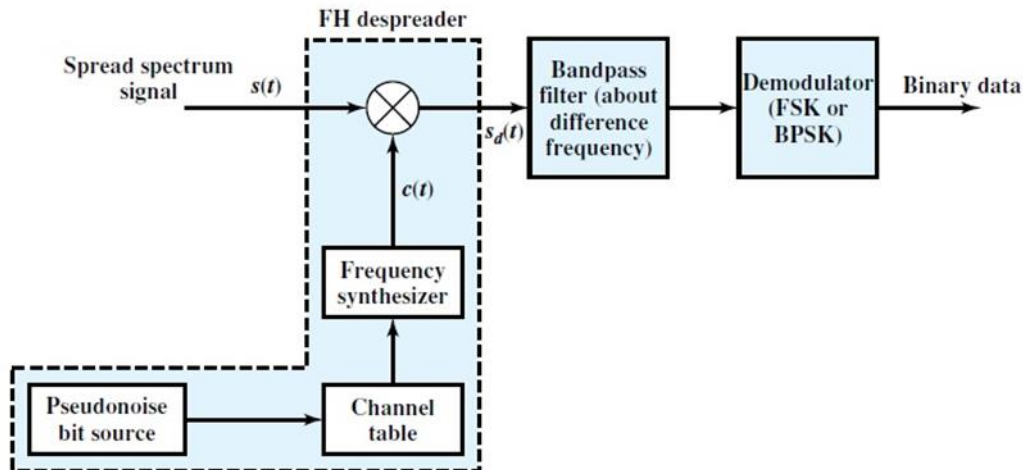
Όπως αναφέρθηκε στην ανάλυση της τεχνικής SS, η ακολουθία εναλλαγής της συχνότητας ορίζεται από την αρχική τιμή (seed) της γεννήτριας τυχαίων αριθμών. Επομένως, ο δημιουργούμενος κώδικας διασποράς θα πρέπει να είναι γνωστός τόσο στον πομπό όσο και στον δέκτη, ώστε να διατηρείται μεταξύ τους ένας συγχρονισμός μεταπήδησης συχνότητας και επομένως ορθή λήψη των μεταδιδόμενων δεδομένων. Σύμφωνα με τους κανόνες που έχουν οριστεί από τον οργανισμό FCC, ο χρόνος μεταπήδησης (εναλλαγής συχνοτήτων), που είναι γνωστός ως chip, και αφορά τον χρόνο μετάδοσης του σήματος σε κάθε κανάλι μέχρι την πραγματοποίηση της εναλλαγής συχνότητας, δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερος 0,4s σε κάθε κανάλι [8].



Εικόνα 2.4: Μπλοκ διάγραμμα λειτουργίας πομπού FHSS [24]

Ένα βασικό χαρακτηριστικό της τεχνικής FHSS είναι ο ρυθμός εναλλαγής των συχνοτήτων, καθώς ο ρυθμός αυτός καθορίζει και τη φύση ενός συστήματος FHSS, δημιουργώντας συστήματα αργής εναλλαγής συχνότητας και συστήματα ταχείας εναλλαγής συχνότητας. Στα συστήματα αργής εναλλαγής συχνότητας, ο ρυθμός εναλλαγής είναι μεγαλύτερος από τον χρόνο μετάδοσης ενός μόνο bit του σήματος με αποτέλεσμα μέσω του ίδιου καναλιού να μεταδίδονται πολλά bit. Αντίθετα, στα συστήματα ταχείας εναλλαγής συχνότητας, ο ρυθμός εναλλαγής είναι μικρότερος του χρόνου μετάδοσης ενός bit του σήματος, με αποτέλεσμα κάθε bit να μεταδίδεται σε περισσότερες από μία συχνότητες. Με δεδομένο ότι, με βάση τους κανονισμούς του οργανισμού FCC, ο ρυθμός εναλλαγής συχνότητας είναι 20s στη ζώνη των 902MHz και 30s στις ανώτερες μπάντες ISM και καθώς ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης για ένα σύστημα FHSS είναι ίσος με το εύρος ζώνης ενός καναλιού, οι δύο ανώτερες ζώνες ISM παρουσιάζουν τον υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων [26].

Στην τεχνική FHSS, η μετάδοση των δεδομένων γίνεται με τη βοήθεια της διαμόρφωσης GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying), με το εύρος του καναλιού να περιορίζεται στο 1MHz σε ένα επίπεδο της τάξης των 20dB κάτω από το μέγιστο πλάτος του φέροντος κύματος. Αυτό το εύρος ζώνης ισχύει για ταχύτητες δεδομένων 1Mbps και 2Mbps [26]. Όπως φαίνεται στην εικόνα 2.4, όπου παρουσιάζεται το μπλοκ διάγραμμα λειτουργίας ενός πομπού FHSS, το προς μετάδοση ψηφιακό σήμα εισάγεται σε έναν διαμορφωτή GFSK ο οποίος παράγει αναλογικό σήμα γύρω από μια ορισμένη συχνότητα. Το σήμα αυτό οδηγείται σε μια μονάδα μαθηματικού μετασχηματισμού, γνωστή ως spreader. Ταυτόχρονα μια γεννήτρια (pseudorandom noise) δημιουργεί μια ακολουθία ψευδοτυχαίων αριθμών (μοτίβο), κάθε bit της οποίας αντιστοιχεί σε κάποιον δείκτη σε έναν πίνακα συχνοτήτων. Ο πίνακας συχνοτήτων χρησιμοποιεί το μοτίβο για να βρει τη συχνότητα που θα χρησιμοποιηθεί για την εκάστοτε περίοδο εναλλαγής, την οποία και περνάει σε μια μονάδα σύνθεσης συχνοτήτων (frequency synthesizer). Η συγκεκριμένη μονάδα δημιουργεί έναν φορέα σήματος, ο οποίος τελικά οδηγείται στον spreader, όπου και διαμορφώνεται από το αρχικό ψηφιακό σήμα, για τη δημιουργία του τελικού σήματος που θα εκπεμφθεί. Πριν την εκπομπή του, το σήμα αυτό φιλτράρεται από ένα φίλτρο Gaussian εύρους ζώνης [24]. Όπως φαίνεται στην εικόνα 2.5, στον δέκτη ακολουθείται η ακριβώς αντίθετη διαδικασία. Η ελάχιστη απαιτούμενη ευαισθησία του δέκτη είναι -75dBm [26].

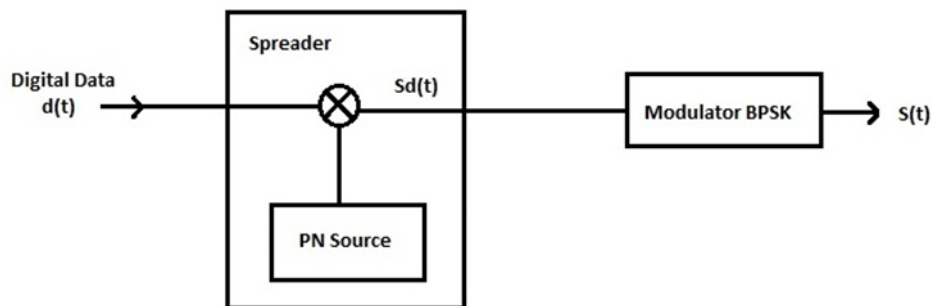


Εικόνα 2.5: Μπλοκ διάγραμμα λειτουργίας δέκτη FHSS [24]

Το μεγάλο μειονέκτημα της τεχνικής FHSS είναι ότι δεν μπορεί να υποστηρίξει ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων μεγαλύτερες των 2Mbps. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο η συγκεκριμένη τεχνική μετάδοσης θεωρείται πλέον παρωχημένη. Παρόλα αυτά, αν και η επίτευξη σημαντικά αυξημένων ταχυτήτων μετάδοσης δεδομένων έχει βασιστεί στην τεχνική DSSS, η τεχνική FHSS παρουσιάζει ορισμένα πλεονεκτήματα, τα οποία δίνουν τη δυνατότητα επικοινωνίας μεταξύ ασύρματων δικτύων που χρησιμοποιούν τεχνικές μετάδοσης FHSS και DSSS, χωρίς να υπάρχει ουσιαστικά καμία αμοιβαία παρεμβολή. Εκτός από την αποφυγή παρεμβολών και υποκλοπών του μεταδιδόμενου σήματος, ένα μεγάλο πλεονέκτημα της τεχνικής FHSS είναι η μειωμένη ενεργειακή κατανάλωση, καθώς κάθε κανάλι επικοινωνίας χρησιμοποιείται μόνο για μικρό χρονικό διάστημα. Επίσης, με την προϋπόθεση ότι τα συστήματα FHSS μπορούν να υποστηρίξουν ορθογώνιες ακολουθίες εναλλαγής συχνότητας, είναι εφικτή η ταυτόχρονη λειτουργία τους στην ίδια γεωγραφική περιοχή [26].

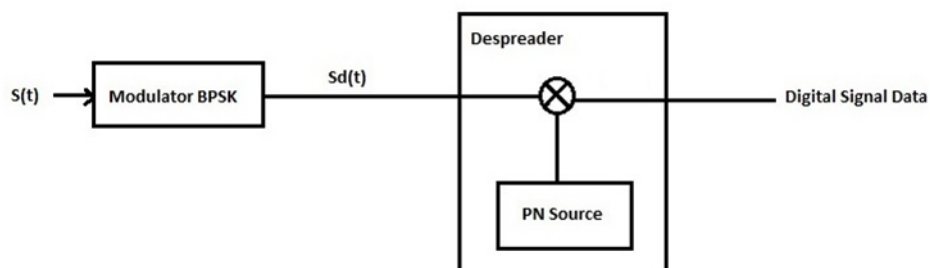
2.2.2 Διασπορά φάσματος με άμεση ακολουθία (DSSS)

Η τεχνική διασποράς φάσματος με άμεση ακολουθία (Direct Sequence Spread Spectrum - DSSS) αποτελεί μια διαφορετική διαδικασία διασποράς του φάσματος του αρχικού σήματος, σύμφωνα με την οποία κάθε bit του αρχικού σήματος αντιπροσωπεύεται από έναν αριθμό bit στο σήμα που τελικά εκπέμπεται. Αυτό μπορεί να γίνει μέσω της πραγματοποίησης ενός δυαδικού πολλαπλασιασμού (XOR) των bit του αρχικού ψηφιακού σήματος με μια ψευδοτυχαία ακολουθία bit υψηλότερου ρυθμού, γνωστή ως chipping code. Το αποτέλεσμα αυτού του πολλαπλασιασμού έχει ρυθμό ίσο με αυτόν της ακολουθίας chipping code και τροφοδοτείται σε έναν διαμορφωτή (συνήθως διαμόρφωσης BPSK), ο οποίος το μετατρέπει σε αναλογική μορφή για να μεταδοθεί (Εικ. 2.6). Στον δέκτη ακολουθεί η ακριβώς αντίθετη διαδικασία (Εικ. 2.7) [26].



Εικόνα 2.6: Μπλοκ διάγραμμα λειτουργίας πομπού DSSS [26]

Κάθε bit της ακολουθίας chipping code έχει πολύ μικρότερη διάρκεια (μεγαλύτερο εύρος ζώνης) από τα bit του αρχικού ψηφιακού σήματος. Καθώς η διαμόρφωση των δυαδικών ψηφίων του αρχικού σήματος ανακατεύει και διασπείρει τα κομμάτια των δεδομένων, το προκύπτον μέγεθος της εύρους ζώνης είναι σχεδόν πανομοιότυπο με αυτό της ακολουθίας chipping code. Όσο μικρότερη είναι η διάρκεια κάθε chip της ακολουθίας, τόσο μεγαλύτερο είναι το εύρος ζώνης του σήματος που πρόκειται να μεταδοθεί από την τεχνική DSSS. Αυτό σημαίνει ότι, η τεχνική DSSS παρουσιάζει μεγαλύτερη ανθεκτικότητα απέναντι στις παρεμβολές, καθώς το αρχικό σήμα περιπλέκεται σε μεγαλύτερο εύρος ζώνης. Από την άλλη όμως, όσο μεγαλύτερη είναι η διάρκεια κάθε chip της ακολουθίας, τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα ανάκτησης του αρχικού ψηφιακού σήματος στο δέκτη [26], [27].



Εικόνα 2.7: Μπλοκ διάγραμμα λειτουργίας δέκτη DSSS [26]

Βασικό χαρακτηριστικό της τεχνικής DSSS αποτελεί ο παράγοντας διασποράς (Spreading Factor – SF), ο οποίος ουσιαστικά αντιπροσωπεύει την αναλογία μεταξύ των ρυθμών μετάδοσης των chip της ακολουθίας chipping code και των bit των δεδομένων. Ουσιαστικά στην τεχνική DSSS, η διασπορά του αρχικού σήματος γίνεται σε μια ζώνη συχνοτήτων πλάτους ανάλογου του παράγοντα SF. Με βάση τους κανονισμούς του οργανισμού FCC, ο παράγοντας SF ενός συστήματος DSSS που λειτουργεί στις μπάντες ISM θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 10, ενώ στα σύγχρονα συστήματα DSSS οι τιμές του κυμαίνονται μεταξύ 10 και 100. Παρόλα αυτά, κατά το σχεδιασμό ενός συστήματος DSSS θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι ο πραγματικός ρυθμός μετάδοσης του σήματος διασποράς μειώνεται με την αύξηση του παράγοντα SF [8].

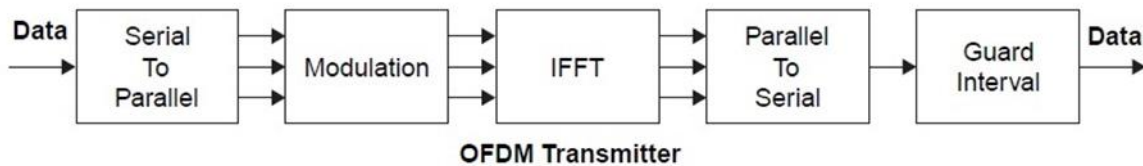
Η τεχνική DSSS παρουσιάζει το πλεονέκτημα έναντι άλλων τεχνικών μετάδοσης σήματος, της δυνατότητας εξαγωγής των σημάτων μέσα από περιβάλλοντα παρεμβολών και θορύβου στενής ζώνης, κάτι που έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των μεταδόσεων και την αύξηση της συνολικής απόδοσης του συστήματος. Ένα δεύτερο πλεονέκτημα της τεχνικής DSSS είναι η μεγαλύτερη ανθεκτικότητα στις παρεμβολές, αλλά και η ασφάλεια ως προς τις υποκλοπές, σε σύγκριση με την τεχνική FHSS, λόγω του μηχανισμού διασποράς που χρησιμοποιεί. Εάν ένα ή περισσότερα bit της ακολουθίας chipping code αλλοιωθούν κατά τη μετάδοση λόγω θορύβου, ενσωματωμένες στατιστικές τεχνικές μπορούν να βοηθήσουν στην ανάκτηση του αρχικού σήματος, χωρίς να απαιτείται αναμετάδοσή του. Σε έναν ακούσιο δέκτη, το σήμα που εκπέμπεται μέσω της τεχνικής DSSS λαμβάνεται ως θόρυβος ευρείας ζώνης χαμηλής ισχύος και απορρίπτεται από τους περισσότερους δέκτες στενής ζώνης. Επίσης, ο χρόνος μετάδοσης του σήματος στην τεχνική DSSS είναι μικρότερος σε σύγκριση με τον αντίστοιχο χρόνο της τεχνικής FHSS, αφού δεν μεσολαβεί καθυστέρηση εναλλαγής της συχνότητας. Τέλος, παρουσιάζει πολύ μεγαλύτερη προσαρμοστικότητα σε πολύ υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων σε σύγκριση με την τεχνική FHSS [24], [28].

Πάντα σε σύγκριση με την τεχνική FHSS, η τεχνική DSSS παρουσιάζει κάποια μειονεκτήματα. Το βασικό πρόβλημα της τεχνικής DSSS είναι το φαινόμενο της κοντινής-μακρινής διαδρομής (near-far effect). Το συγκεκριμένο πρόβλημα εμφανίζεται όταν πιο κοντά στο δέκτη βρίσκεται ένας πομπός που παρεμβάλλει το σήμα εκπομπής, σε σχέση με τον πομπό που το εκπέμπει. Ένα δεύτερο σοβαρό ζήτημα είναι ότι απαιτεί μεγαλύτερο εύρος ζώνης σε σύγκριση με την τεχνική FHSS. Επίσης, ο εξοπλισμός ενός συστήματος DSSS καταναλώνει περισσότερη ενέργεια για να πετύχει την ίδια ταχύτητα μετάδοσης ενός σήματος σε σχέση με ένα σύστημα FHSS, λόγω της μεγαλύτερης πολυπλοκότητας που παρουσιάζει η τεχνική DSSS έναντι της FHSS. Τέλος, επιτρέπει την ταυτόχρονη λειτουργία περιορισμένου αριθμού διαφορετικών ασύρματων δικτύων στην ίδια γεωγραφική περιοχή σε σχέση με την τεχνική FHSS, λόγω των περιορισμένων ελεύθερων διαθέσιμων καναλιών που μπορούν να μοιραστούν [24], [29].

2.2.3 Ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (OFDM)

Η ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiplexing - OFDM) είναι μία τεχνική ψηφιακής μετάδοσης που χρησιμοποιείται στην ψηφιακή διαμόρφωση για την κωδικοποίηση ψηφιακών (δυαδικών) δεδομένων σε πολλαπλές φέρουσες συχνότητες [30]. Η λειτουργία της βασίζεται στη χρήση τριών αρχών μετάδοσης [31]: (α) τον πολλαπλό ρυθμό μετάδοσης (multirate), (β) τα πολλαπλά σύμβολα μετάδοσης (multisymbol) και (γ) τις πολλαπλές φέρουσες συχνότητες μετάδοσης (multicarrier). Λειτουργώντας παρόμοια με την τεχνική πολυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας (FDM), η OFDM διανέμει τα προς μετάδοση δεδομένα σε μεγάλο αριθμό καναλιών μετάδοσης, τα οποία, παρά το γεγονός ότι παρουσιάζουν επικάλυψη φάσματος, η μεταξύ τους απόσταση είναι τόσο ακριβής που εμφανίζεται μια ορθογωνικότητα. Με τον τρόπο αυτό

επιτυγχάνεται ελαχιστοποίηση των παρεμβολών μεταξύ των καναλιών μετάδοσης, κάτι που αποτελεί και το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό της τεχνικής OFDM, καθώς η έλλειψη ορθογωνικότητας θα είχε σαν αποτέλεσμα την επικάλυψη των σημάτων που περιέχουν πληροφορίες και θα υποβάθμιζαν την ποιότητα της επικοινωνίας. Επίσης, για να αντιμετωπίσει τα ζητήματα της τεχνικής DSSS, ως προς το φαινόμενο της κοντινής-μακρινής διαδρομής, το δυσκολότερο συγχρονισμό των συστημάτων, την πολυπλοκότητα του εξοπλισμού, κλπ. η τεχνική OFDM χρησιμοποιεί εναλλαγή συχνότητας για τη διασπορά του προς μετάδοση σήματος [32].



Εικόνα 2.8: Μπλοκ διάγραμμα λειτουργίας πομπού OFDM [33]

Στο δέκτη ενός συστήματος OFDM η ακολουθία πληροφοριών εισόδου μετατρέπεται πρώτα σε παράλληλες αλληλουχίες δεδομένων και κάθε έξοδος του σειριακού/παράλληλου μετατροπέα πολλαπλασιάζεται με τον κώδικα διασποράς (Εικ. 2.8). Τα δεδομένα από όλες τις υποφέρουσες συχνότητες διαμορφώνονται σε ζώνη βάσης μέσω χρήσης μιας μονάδας αντίστροφου γρήγορου μετασχηματισμού Fourier (Inverse Fast Fourier Transform - IFFT), η έξοδος της οποίας, με τη μέθοδο της πολυπλεξίας, μετατρέπεται ξανά σε σειριακά δεδομένα. Μεταξύ των συμβόλων παρεμβάλλονται διαστήματα προστασίας, με σκοπό την ελαχιστοποίηση της διασυμβολικής παρεμβολής (Inter Symbol Interference - ISI) που προκαλείται από το φαινόμενο της εξασθένισης πολλαπλών διαδρομών (multipath fading) και τέλος το σήμα μεταδίδεται μετά από μεταγωγή συχνότητας (up-conversion) RF. Στον δέκτη, μετά την μεταγωγή συχνότητας (down-conversion), το σύνολο των υποφερουσών που λαμβάνεται και που αντιστοιχεί στα ληφθέντα δεδομένα, ανιχνεύεται πρώτα συνεκτικά με χρήση γρήγορου μετασχηματισμού Fourier (FFT) και στη συνέχεια πολλαπλασιάζεται με κέρδος για να συνδυαστεί η ενέργεια του λαμβανόμενου σήματος, που έχει διασκορπιστεί στον τομέα της συχνότητας (Εικ. 2.9) [33].



Εικόνα 2.9: Μπλοκ διάγραμμα λειτουργίας δέκτη OFDM [33]

Το κύριο πλεονέκτημα της τεχνικής OFDM έναντι των τεχνικών μετάδοσης που χρησιμοποιούν μία φέρουσα συχνότητα, είναι η ικανότητά της να αντιμετωπίζει περιπτώσεις παρεμβολών στενής ζώνης και εξασθένισης επιλεκτικής συχνότητας λόγω πολλαπλών διαδρομών, χωρίς την ανάγκη χρήσης σύνθετων φίλτρων εξισορρόπησης. Η εξισορρόπηση καναλιών απλοποιείται στην περίπτωση της τεχνικής OFDM, καθώς μπορεί να θεωρηθεί ότι μεταδίδονται πολλά σήματα στενής ζώνης αργής διαμόρφωσης, αντί για τη μετάδοση ενός σήματος ευρείας ζώνης ταχείας διαμόρφωσης. Ο χαμηλός ρυθμός συμβόλων καθιστά προσιτή τη χρήση ενός διαστήματος προστασίας μεταξύ των συμβόλων, καθιστώντας δυνατή την εξάλειψη της παρεμβολής ISI και τη βελτίωση της αναλογίας σήματος προς θόρυβο [34].

Κεφάλαιο 3ο: Πρότυπα ασύρματων δικτύων

3.1 Πρότυπο HomeRF

Το 1998, πέντε από τις σημαντικότερες εταιρείες στον χώρο των ασύρματων επικοινωνιών και της κινητής τηλεφωνίας, οι Intel, Motorola, Philips, Proxim και Siemens, ίδρυσαν την ομάδα εργασίας Home Radio Frequency Working Group. Αυτή η κοινοπραξία, η οποία τελικά περιελάμβανε περισσότερες από 100 εταιρείες, ανέπτυξε αρχικά την προδιαγραφή SWAP-CA (Shared Wireless Access Protocol - Cordless Access), παρακινούμενη από την ευρεία χρήση του Διαδικτύου στα σπίτια και την εξέλιξη των φορητών υπολογιστών. Έτσι, η προδιαγραφή αποσκοπούσε στην υποστήριξη αυξημένης κινητικότητας των φορητών υπολογιστών στα σπίτια των χρηστών, παρέχοντάς τους σύνδεση στο Διαδίκτυο, σε εκτυπωτές και σε άλλες οικιακές συσκευές. Καθώς λοιπόν, η προδιαγραφή απευθυνόταν περισσότερο στην αντιμετώπιση των απαιτήσεων της οικιακής δικτύωσης, όπως είναι η ασφάλεια πρόσβασης στο Διαδίκτυο και η ανθεκτικότητα στις παρεμβολές, το πρότυπο μετονομάστηκε σε HomeRF, με στόχο τη δημιουργία ενός οικιακού περιβάλλοντος πολυμέσων, το οποίο θα περιλαμβάνει κανάλια μετάδοσης δεδομένων και πληροφοριών τηλεφωνίας, ήχου και βίντεο, καθώς και την προοπτική υποστήριξης της τηλεμετρίας των οικιακών συστημάτων ασφαλείας και θα επέτρεπε σε υπολογιστές, περιφερειακά, ασύρματα τηλέφωνα και άλλες καταναλωτικές συσκευές να μοιράζονται δεδομένα και να επικοινωνούν φωνητικά μέσα και γύρω από το σπίτι χωρίς την επιπλοκή και το κόστος της λειτουργίας νέων καλωδίων [35], [36].

Ένα δίκτυο SWAP-CA είχε σχεδιαστεί για να μεταφέρει κίνηση φωνής και δεδομένων και να διαλειτουργεί με το δίκτυο PSTN (Public Switched Telephone Network) και το Διαδίκτυο. Ο σχεδιασμός του βασίστηκε στις τότε υπάρχουσες τεχνολογίες DECT (Digital Enhanced Cordless Telephone) και WLAN για να μπορέσει να υποστηρίξει μια νέα κατηγορία οικιακών ασύρματων υπηρεσιών, όπως οι υπηρεσίες TDMA (Time Division Multiple Access), για την παροχή διαδραστικών φωνητικών υπηρεσιών και άλλων χρονικά κρίσιμων υπηρεσιών, και CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance), για υψηλής ταχύτητας παράδοση πακέτων δεδομένων [37].



Εικόνα 3.1: Είδη συσκευών δικτύου HomeRF [38]

Η δομή ενός οικιακού συστήματος πολυμέσων που λειτουργούσε με βάση το πρότυπο HomeRF, αποτελείται από τέσσερις τύπους κόμβων (Εικ. 3.1) [36] - [38]: (α) ένα σημείο ελέγχου, (β) τερματικά φωνής, (γ) κόμβους δεδομένων και (δ) κόμβους φωνής και δεδομένων. Ένα τέτοιο δίκτυο μπορούσε να περιλαμβάνει ένα μέγιστο αριθμό 127 κόμβων, οι οποίοι θα μπορούσαν να κινηθούν εντός εμβέλειας 50 μέτρων από ένα σημείο ασύρματης πρόσβασης, χωρίς να διακοπεί η σύνδεσή τους με

αυτό. Το σημείο πρόσβασης, γνωστό ως σημείο ελέγχου (Control Point – CP), αποτελούσε την πύλη του δικτύου προς το δίκτυο PSTN και το Διαδίκτυο και ήταν επίσης υπεύθυνο για τη διαχείριση της κατανάλωσης ισχύος από τις συσκευές του δικτύου και την υποστήριξη υπηρεσιών φωνής και δεδομένων. Τα τερματικά φωνής (i-node) χρησιμοποιούσαν μόνο υπηρεσία TDMA για να επικοινωνούν με το σημείο CP. Οι κόμβοι δεδομένων (a-node) χρησιμοποιούσαν υπηρεσία CSMA/CA για να επικοινωνούν με το σημείο CP και άλλους κόμβους δεδομένων. Τέλος, οι κόμβοι φωνής και δεδομένων (s-node και sa-node) χρησιμοποιούσαν ένα συνδυασμό και των δύο υπηρεσιών για να επικοινωνούν με το σημείο SP αλλά και με τα άλλα δύο είδη κόμβων [36], [37].

Το πρότυπο υποστήριζε την τεχνική μετάδοσης FHSS, με προσαρμοστική εναλλαγή συχνότητας 50 με 100 εναλλαγών ανά δευτερόλεπτο, στη ζώνη συχνοτήτων ISM των 2,4GHz. Η πρώτη έκδοση του προτύπου παρείχε μέγιστη ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων έως 1,6Mbps, καθώς οι κανόνες που τέθηκαν από τον οργανισμό FCC περιόριζαν το εύρος ζώνης μετάδοσης του HomeRF στο 1MHz. Για το λόγο αυτό, η ομάδα εργασίας Home Radio Frequency Working Group ζήτησε από τον οργανισμό FCC την άδεια να χρησιμοποιήσει εύρη ζώνης μετάδοσης έως 5MHz, κάτι που θα επέτρεπε την αύξηση της ταχύτητας μετάδοσης σε 10Mbps. Η άδεια δόθηκε τον Αύγουστο του 2002 και η έκδοση HomeRF 2.0 ήταν γεγονός. Την ίδια εποχή όμως, το πρότυπο HomeRF ανταγωνιζόταν με άλλες τεχνολογίες ασύρματης δικτύωσης (IEEE 802.11b, Bluetooth, κλπ.) για το ποια τεχνολογία ήταν η πιο αξιόπιστη και το ποια θα μπορούσε να παρέχει τις περισσότερες υπηρεσίες στον τομέα της οικιακής δικτύωσης. Το πρότυπο δεν άντεξε αυτόν τον ανταγωνισμό και η ομάδα εργασίας Home Radio Frequency Working Group διαλύθηκε τον Ιανουάριο του 2003. Ως αποτέλεσμα, το πρότυπο HomeRF θεωρείται πλέον απαρχαιωμένο. Οι λόγοι αυτής της αποτυχίας του HomeRF είναι πολλοί, με πιο σημαντικούς [35]: (α) τα δύο χρόνια που χρειάστηκαν για τον οργανισμό FCC να εγκρίνει την άδεια χρήσης των 5MHz ως εύρος ζώνης μετάδοσης (κάτι που θα επέτρεπε στο HomeRF να συναγωνιστεί την απόδοση του IEEE802.11b), (β) η ανακοίνωση της Intel ότι τα προϊόντα επόμενης γενιάς της θα βασίζονταν στο Wi-Fi αντί στο HomeRF και (γ) η Microsoft είχε αρχίσει να συμπεριλαμβάνει την υποστήριξη του Bluetooth στα λειτουργικά της συστήματα Windows.

Τα κύρια χαρακτηριστικά του προτύπου HomeRF ήταν τα εξής [37]:

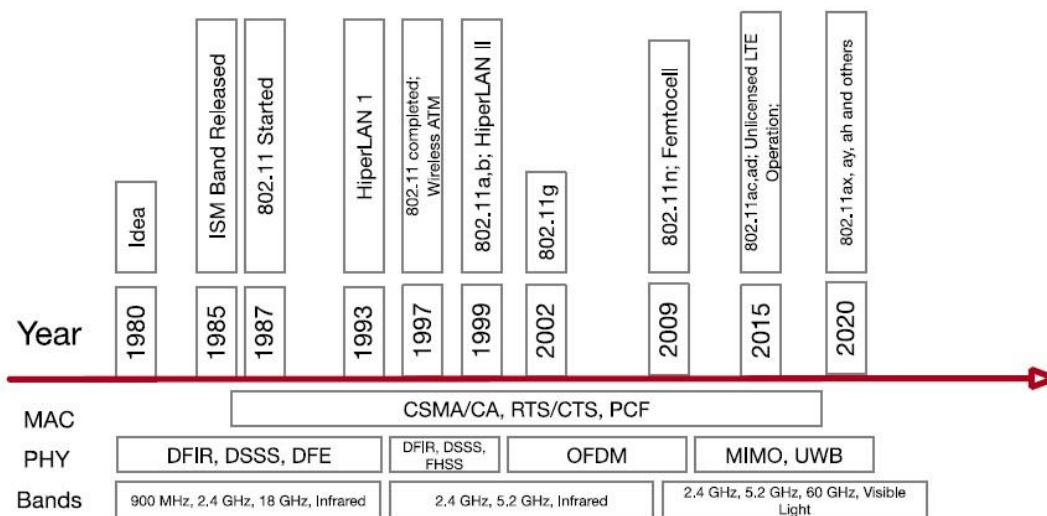
- Ρυθμός εναλλαγής συχνότητας: 50 εναλλαγές/δευτερόλεπτο
- Εύρος συχνοτήτων: ζώνη ISM 2,4GHz
- Ισχύς μετάδοσης: 100mW
- Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων: 1Mbps (με χρήση διαμόρφωσης 2FSK) και 2Mbps (με χρήση διαμόρφωσης 4FSK)
- Εμβέλεια: 50m (καλύπτει τυπικό σπίτι και αυλή)
- Υποστηριζόμενοι σταθμοί: έως 127 συσκευές ανά δίκτυο
- Φωνητικές συνδέσεις: έως 6 πλήρως αμφίδρομες συνομιλίες
- Ασφάλεια δεδομένων: αλγόριθμος κρυπτογράφησης Blowfish (πάνω από 1 τρισεκατομμύριο κωδικοί)
- Συμπίεση δεδομένων: αλγόριθμος LZRW3-A
- Αναγνωριστικό δικτύου 48-bit: επιτρέπει την ταυτόχρονη λειτουργία πολλαπλών δικτύων που βρίσκονται σε ίδια τοποθεσία

3.2 Πρωτόκολλα IEEE 802.11

Το IEEE 802.11, γνωστό και ως τεχνολογία Wi-Fi, αποτελεί μια οικογένεια προτύπων του οργανισμού IEEE, τα οποία αφορούν ένα σύνολο προδιαγραφών φυσικού επιπέδου (Physical layer – PHY) και ελέγχου πρόσβασης μέσου (Medium Access Control - MAC), έχοντας σχεδιαστεί για την υλοποίηση των επικοινωνιών στα δίκτυα WLAN που λειτουργούν στις ζώνες συχνοτήτων 2,4GHz,

3,6GHz, 5GHz και 60GHz. Η βασική έκδοση του προτύπου κυκλοφόρησε το 1997 και σε αυτά τα 25 σχεδόν χρόνια έχει να παρουσιάσει μια σειρά από λιγότερο ή περισσότερο σημαντικές τροποποιήσεις. Για να διατηρηθεί η εξέλιξη του προτύπου σχεδόν κάθε τροποποίηση περιλαμβάνει μηχανισμούς συμβατότητας με τις προηγούμενες [39].

Η αρχιτεκτονική δομή του προτύπου IEEE 802.11 βασίστηκε σε αυτή των προτύπων IEEE 802 του τοπικού δικτύου (Local Access Network - LAN) και, εννοιολογικά, αποτελείται από τρία επίπεδα: (α) το επίπεδο ελέγχου λογικής σύνδεσης (Logic Link Control - LLC), (β) το επίπεδο ελέγχου πρόσβασης μέσου (MAC) και (γ) το φυσικό επίπεδο (PHY). Τα τελευταία 25 χρόνια, η εξέλιξη αυτών των επιπέδων του IEEE 802.11, έχει παρουσιάσει μια τεράστια αύξηση στη συνολική απόδοση των δικτύων Wi-Fi, παρέχοντας ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων από 2Mbps σε πολλά Gbps. Στην εικόνα 3.2 παρουσιάζεται αυτή η εξέλιξη των επιπέδων PHY και MAC των προτύπων IEEE 802.11, από το βασικό πρότυπο μέχρι σήμερα [40].



Εικόνα 3.2: Εξελικτική πορεία των προτύπων IEEE 802.11 [40]

Το βασικό πρότυπο IEEE 802.11 αναπτύχθηκε αρχικά για εφαρμογές ασύρματων δικτύων εσωτερικών χώρων. Όπως φαίνεται στην εικόνα 3.2, στο επίπεδο MAC του συγκεκριμένου προτύπου καθορίστηκε το πρωτόκολλο και η συμβατή διασύνδεση του εξοπλισμού επικοινωνίας δεδομένων σε ένα δίκτυο LAN, με βάση τη μέθοδο πρόσβασης δικτύου CSMA/CA, η οποία δίνει τη δυνατότητα ελέγχου της αδράνειας ενός καναλιού πριν ξεκινήσει η μετάδοση δεδομένων. Επίσης, στο επίπεδο PHY, στο οποίο καθορίζονται οι μέθοδοι, οι διαδικασίες και τα χαρακτηριστικά της μεταφοράς των δεδομένων μεταξύ των ασύρματων οντοτήτων ενός δικτύου WLAN, όπως η συχνότητα επικοινωνίας, οι τεχνικές διαμόρφωσης των σημάτων εκπομπής και λήψης, κλπ., καθορίστηκαν τρεις τεχνικές μετάδοσης δεδομένων [41], [42]: (α) η τεχνική FHSS (που υποστήριζε βασική ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων 1Mbps και έναν προαιρετικό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων 2Mbps), β) η τεχνική DSSS (που υποστήριζε ίδιους ρυθμούς μετάδοσης με την τεχνική FHSS) και γ) η τεχνική μετάδοσης μέσω υπερέθρων (IR) (που αν και υποστήριζε ίδιες ταχύτητες μετάδοσης με τις προηγούμενες τεχνικές, εντούτοις, το ζήτημα που παρουσιάζουν τα κύματα υπερέθρων ως προς την ικανότητά τους να διαπερνούν φυσικά εμπόδια, έδωσε ένα προβάδισμα χρήσης στις τεχνικές διαμόρφωσης μέσω ραδιοκυμάτων).

Τα χαρακτηριστικά αυτά δεν ήταν επαρκή για τη ευρεία αποδοχή του βασικού προτύπου IEEE 802.11, λόγω θεμάτων διαλειτουργικότητας, υψηλού κόστους και ανεπαρκούς απόδοσης που

παρουσίαζε. Έτσι, ο οργανισμός IEEE ξεκίνησε μια διαδικασία εξέλιξης του βασικού προτύπου, η οποία οδήγησε στη δημιουργία τροποποιήσεών του. Κάθε μία από τις τροποποιήσεις αυτές παρουσίαζε ολοένα και καλύτερα χαρακτηριστικά. Στον πίνακα 3.2 παρουσιάζονται τα διαφορετικά πρότυπα, το έτος κυκλοφορίας, οι ζώνες συχνοτήτων, το εύρος ζώνης και οι μέγιστοι θεωρητικοί ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων που επιτεύχθηκαν. Οι πραγματικοί ρυθμοί μεταφοράς δεδομένων είναι χαμηλότεροι από τους θεωρητικούς λόγω της συμβολής πολλών παραγόντων, όπως η υποβάθμιση του σήματος με την απόσταση, ο ρυθμός διαμόρφωσης, ο μηχανισμός κωδικοποίησης FEC (Forward Error Correction), το εύρος ζώνης καναλιού, η τεχνολογία MIMO (Multiple-Input Multiple-Output), τα διαστήματα προστασίας και τα ποσοστά σφάλματος. Η οικογένεια προτύπων IEEE 802.11 αποτελείται από μια σειρά τεχνικών ημι-αμφίδρομης διαμόρφωσης OTA (over-the-air) που χρησιμοποιούν το ίδιο βασικό πρωτόκολλο για ασύρματη επικοινωνία [43].

Πίνακας 3.1: Εξέλιξη πρωτοκόλλων IEEE 802.11 [43]

Πρωτόκολλα IEEE 802.11	Έτος έκδοσης	Συχνότητα λειτουργίας (GHz)	Εύρος ζώνης καναλιού (MHz)	Μέγιστη ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων
Βασικό πρότυπο IEEE 802.11	1997	2,4	22	2Mbps
IEEE 802.11b	1999	2,4	22	11Mbps
IEEE 802.11a	1999	5	20	54Mbps
IEEE 802.11g	2003	2,4	20	54Mbps
IEEE 802.11n (Wi-Fi 4)	2009	2,4 / 5	20 / 40	600Mbps
IEEE 802.11ac (Wi-Fi 5)	2013	5	20 / 40 / 80/ 160	6,8Gbps
IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6)	2019	2,5 / 5	20 / 40 / 80/ 160	9,6Gbps
IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6E)	2020	2,5 / 5 / 6	20 / 40 / 80/ 160	9,6Gbps

3.2.1 IEEE 802.11b

Το πρότυπο IEEE 802.11b παρουσίαζε μέγιστη θεωρητική ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων 11Mbps και χρησιμοποιούσε την ίδια μέθοδο πρόσβασης μέσω CSMA/CA που ορίζεται στο βασικό πρότυπο. Τα προϊόντα IEEE 802.11b εμφανίστηκαν στην αγορά στα μέσα του 1999, αφού το πρότυπο ήταν η άμεση προέκταση της τεχνικής διαμόρφωσης που ορίζεται στο βασικό πρότυπο. Η δραματική αύξηση της απόδοσης του IEEE 802.11b, με την παράλληλη σημαντική μείωση των τιμών, οδήγησε στην ταχεία αποδοχή του ως την βασική τεχνολογία επικοινωνίας των δικτύων WLAN [43].

Το IEEE 802.11b λειτουργούσε στη μη αδειοδοτημένη ζώνη συχνοτήτων ISM από 2,4 έως 2,5GHz. Η χρησιμοποιούμενη τεχνική μετάδοσης ήταν άμεση επέκταση της τεχνικής DSSS, ενώ ως τεχνική διαμόρφωσης χρησιμοποιήθηκε η CCK (Complementary Code Keying). Το πρότυπο υποστήριζε επικοινωνία σημείου με πολλαπλά σημεία (point-to-multipoint), όπου ένα σημείο πρόσβασης (Access Point –AP) του δικτύου επικοινωνεί ταυτόχρονα με πολλούς κινητούς πελάτες εντός της εμβέλειας του. Αυτή η εμβέλεια εξαρτιόταν από την ισχύ εξόδου του πομπού και την ευαισθησία του δέκτη. Αν και το εύρος ζώνης καναλιού των 22MHz του προτύπου μπορούσε να υποστηρίξει μέγιστη ταχύτητα

μετάδοσης δεδομένων 11Mbps, η ταχύτητα αυτή μπορούσε να μειωθεί στα 5,5Mbps, στα 2Mbps και στο 1Mbps (επιλογή προσαρμοστικού ρυθμού μετάδοσης) προκειμένου να μειωθεί ο ρυθμός αναμετάδοσης που προέκυψε από σφάλματα [43].

Ένα μειονέκτημα που παρουσίαζε το πρότυπο ήταν ότι τα προϊόντα που το χρησιμοποιούσαν δέχονταν παρεμβολές από άλλες ασύρματες οικιακές συσκευές που λειτουργούσαν στην ίδια ζώνη συχνοτήτων, όπως οι φούρνοι μικροκυμάτων, οι συσκευές Bluetooth, οι συσκευές παρακολούθησης βρεφών, τα ασύρματα τηλέφωνα καθώς και κάποιος εξοπλισμός ραδιοερασιτεχνών, με αποτέλεσμα τη μείωση των ρυθμών μεταφοράς δεδομένων [43].

3.2.2 IEEE 802.11a

Το πρότυπο IEEE 802.11a χρησιμοποιούσε το ίδιο πρωτόκολλο επιπέδου ζεύξης δεδομένων (Data Link Layer protocol – DLL protocol) και την ίδια μορφή πλαισίου (frame format) με το βασικό πρότυπο, αλλά λειτουργούσε στη συχνότητα των 5GHz. Το πρότυπο παρουσίαζε μέγιστη θεωρητική ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων της τάξης των 54Mbps, αλλά σε πρακτικά σενάρια χρήσης, η μέγιστη επιτεύξιμη απόδοση ήταν τάξης των 25Mbps. Άλλοι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων που υποστήριζε ήταν τα 6Mbps, 9Mbps, 12Mbps, 18Mbps, 24Mbps, 36Mbps και 48Mbps [43].

Ως τεχνική μετάδοσης δεδομένων χρησιμοποιήθηκε η OFDM, στην οποία το σύνολο των υποφερουσών ήταν 52, από τις οποίες οι 48 ήταν για μεταφορά δεδομένων και οι 4 για μεταφορά σημάτων ελέγχου και συγχρονισμού. Η μεταξύ τους απόσταση ήταν 312,5kHz, ενώ η λειτουργία τους βασιζόταν σε τεχνικές διαμόρφωσης BPSK, QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) και QAM (Quadrature amplitude modulation) (16QAM ή 64QAM). Το εύρος ζώνης του καναλιού ήταν 20MHz, από τα οποία τα 16,6MHz ήταν κατελημμένα. Στον πίνακα 3.2 παρουσιάζονται οι διαφορετικές τεχνικές διαμόρφωσης που υποστηρίζονταν από το IEEE 802.11a και οι αντίστοιχοι θεωρητικοί ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων, για εύρος ζώνης καναλιού 20MHz. Η διάρκεια συμβόλου OFDM ήταν 4μsec, στην οποία συμπεριλαμβανόταν ένα διάστημα προστασίας 0,8μsec. Τα πλεονεκτήματα της χρήσης της τεχνικής διάδοσης του OFDM περιελάμβαναν μείωση των φαινομένων της εξασθένισης πολλαπλών διαδρομών στη λήψη και αυξημένη φασματική απόδοση [43].

Πίνακας 3.2: Τεχνικές διαμόρφωσης IEEE 802.11a και αντίστοιχοι θεωρητικοί ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων, για εύρος ζώνης καναλιού 20MHz [43]

Τεχνική διαμόρφωσης	Ρυθμός κωδικοποίησης	Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων (Mbps)
BPSK	1/2	6
BPSK	3/4	9
QPSK	1/2	12
QPSK	3/4	18
16QAM	1/2	24
16QAM	3/4	36
64QAM	2/3	48
64QAM	3/4	54

Παρόλο που τα πρωτόκολλα IEEE 802.11a και IEEE 802.11b κυκλοφόρησαν την ίδια χρονιά, δεν υπήρχε μεταξύ τους διαλειτουργικότητα λόγω της λειτουργίας τους σε διαφορετικές μη

αδειοδοτημένες ζώνες συχνοτήτων ISM. Η ζώνη των 5GHz έδινε στο IEEE 802.11a ένα πλεονέκτημα όσον αφορά τους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων, καθώς η μπάντα των 2,4GHz παρουσιάζει έναν μεγαλύτερο συνωστισμό λόγω της κατάληψης φασμάτων από άλλες συσκευές. Ωστόσο, αυτή η υψηλή συχνότητα λειτουργίας δημιούργησε παράλληλα και ένα μειονέκτημα στο πρότυπο. Η εμβέλεια λειτουργίας των συσκευών που χρησιμοποιούν το IEEE 802.11a ήταν μικρότερη από εκείνη των 802.11b. Η λύση ήταν η χρήση κεραιών με μεγαλύτερη απολαβή, οι οποίες είχαν τη δυνατότητα να αυξήσουν λίγο την εμβέλεια. Ωστόσο, η χρήση τους περιορίστηκε σε μεγάλο βαθμό σε δρομολογητές που αναπτύσσονταν σε μεγάλους οργανισμούς, λόγω της υψηλής τιμής τους. Το συγκεκριμένο ζήτημα, αλλά και το υψηλό κόστος, η μικρή εμβέλεια και η ασυμβατότητα με τα προϊόντα IEEE 802.11b, ήταν οι βασικότερες αιτίες για τις οποίες το πρότυπο IEEE 802.11a δεν είχε μεγάλη αποδοχή [43].

3.2.3 IEEE 802.11g

Η επικύρωση της διαθεσιμότητας του προτύπου IEEE 802.11g έγινε τον Ιούνιο του 2003. Λειτουργώντας στη ζώνη ISM των 2,4GHz και χρησιμοποιώντας την τεχνική μετάδοσης OFDM, το IEEE 802.11g συνδύασε τα καλύτερα χαρακτηριστικά των τροποποιήσεων IEEE 802.11b και IEEE 802.11a, με σκοπό την αύξηση του ενδιαφέροντος των κατασκευαστών να επενδύσουν σε μια συσκευή που θα μπορεί να υποστηρίξει το συγκεκριμένο πρωτόκολλο ασύρματης επικοινωνίας. Το εν λόγω πρότυπο Wi-Fi υποστήριζε μέγιστη θεωρητική ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων 54Mbps (όπως το IEEE 802.11b), αλλά σε πρακτικά σενάρια χρήσης, η μέγιστη επιτεύξιμη απόδοση ήταν τάξης των 22Mbps καθώς παρουσίαζε μικρή ανθεκτικότητα στις παρεμβολές που προέρχονταν από τη λειτουργία του στην ζώνη των 2,4GHz. Τα προϊόντα IEEE 802.11g ήταν συμβατά με τα IEEE 802.11b (δηλαδή οι συσκευές IEEE 802.11b μπορούσαν να συνδεθούν σε ένα σημείο πρόσβασης IEEE 802.11g, με τους περιορισμούς από τις δυνατότητες της συσκευής που υποστήριζε το παλαιότερο πρωτόκολλο) [43].

Το πρότυπο IEEE 802.11g υιοθετήθηκε γρήγορα από τους κατασκευαστές, ήδη από τον Ιανουάριο του 2003, πολύ πριν από την επίσημη επικύρωσή του, λόγω της επιθυμίας τους για υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, αλλά και για μείωση του κόστους παραγωγής. Μέχρι το καλοκαίρι του 2003, τα περισσότερα dual-band IEEE 802.11a/b προϊόντα έγιναν dual-band / tri-mode, υποστηρίζοντας τα πρότυπα a και b/g με μόνο μία κάρτα κινητού προσαρμογέα ή σημείου πρόσβασης. Μεγάλες προσπάθειες έγιναν στο να μπορούν τα b και g να λειτουργούν καλά μαζί. Ωστόσο, σε ένα δίκτυο IEEE 802.11g, η δραστηριότητα μιας συσκευής IEEE 802.11b μπορούσε να μειώσει το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων του συνολικού δικτύου IEEE 802.11g, λόγω των παρεμβολών που δημιουργούνται από τη λειτουργία της στη ίδια ζώνη συχνοτήτων των 2,4GHz [1].

3.2.4 IEEE802.11n

Η σχεδίαση του προτύπου IEEE 802.11n ξεκίνησε τον Ιανουάριο του 2004 και ολοκληρώθηκε το 2008, ενώ η επίσημη δημοσίευσή του έγινε το 2009. Με το IEEE 802.11n, τα δίκτυα Wi-Fi έγιναν ακόμα πιο γρήγορα και πιο αξιόπιστα. Τα χαρακτηριστικά αυτά, το κατέστησαν σύντομα ένα ευρέως διαδεδομένο και δημοφιλές πρότυπο. Αυτό επιτεύχθηκε με την προσθήκη της τεχνολογίας MIMO και της δυνατότητας χρήσης ενός διπλάσιου μεγέθους εύρους ζώνης (40MHz) στο επίπεδο PHY, καθώς και της μεθόδου συνάθροισης πλαισίων στο επίπεδο MAC, διατηρώντας παράλληλα τη συμβατότητα με τις προηγούμενες τροποποιήσεις [43].

Η τεχνολογία MIMO επιτρέπει τη βελτίωση της χωρητικότητας μιας ραδιοζεύξης χρησιμοποιώντας πολλαπλές κεραίες εκπομπής και λήψης για την εκμετάλλευση των δυνατοτήτων της διάδοσης πολλαπλών διαδρομών. Αυτές οι κεραίες πρέπει να διαχωριστούν χωρικά, έτσι ώστε το σήμα από κάθε κεραία εκπομπής σε κάθε κεραία λήψης να έχει διαφορετική χωρική υπογραφή. Αυτό σημαίνει ότι, κατά την εκπομπή, τα δεδομένα χωρίζονται σε μια σειρά από χωρικές ροές και μεταδίδονται μέσω διαφορετικών κεραιών προς τους δέκτες. Με τον τρόπο, σε κάθε δέκτη προκύπτει ένας διαχωρισμός αυτών των ροών σε παράλληλα ανεξάρτητα κανάλια. Τα κανάλια που λειτουργούν με εύρος ζώνης 40MHz, διπλασιάζουν το πλάτος του καναλιού και παρέχουν διπλάσιο ρυθμό μεταφοράς δεδομένων, σε σύγκριση με τα κανάλια των 20MHz που χρησιμοποιήθηκαν στις προηγούμενες γενιές των προτύπων Wi-Fi. Το πρότυπο IEEE 802.11n επιτρέπει έως και τέσσερις ταυτόχρονες χωρικές ροές [43]. Στο IEEE 802.11n, ο αριθμός των κεραιών που συνδέονται σε ένα σημείο AP έχει αυξηθεί σημαντικά, γεγονός που δίνει τη δυνατότητα υλοποίησης των τεχνικών μορφοποίησης δέσμης (beamforming) και ποικιλομορφίας (diversity). Η ποικιλομορφία μπορεί να επιτευχθεί μέσω των ανακλαστικών πολλαπλών διαδρομών που δημιουργούνται από τον μεγάλο αριθμό κεραιών [44].

Στον πίνακα 3.3 παρουσιάζονται τα διαφορετικά σχήματα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης, καθώς και οι αντίστοιχες ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων που υποστηρίζονταν από το πρότυπο IEEE 802.11n για μία μόνο ροή, για εύρος ζώνης καναλιού 40MHz. Για πολλαπλές ροές, ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων είναι πολλαπλάσιος του αριθμού των ροών. Όπως φαίνεται στον πίνακα, ο μέγιστος ρυθμός μεταφοράς δεδομένων που μπορεί να επιτύχει είναι τουλάχιστον 150Mbps (σε λειτουργία μονής ροής), αρκετές φορές δηλαδή μεγαλύτερος από τα πρότυπα IEEE 802.11b και IEEE 802.11g. Σε λειτουργία πολλαπλών ροών, ο ρυθμός αυτός μπορεί να φτάσει τη μέγιστη θεωρητική απόδοση της τάξης των 600Mbps [43].

Πίνακας 3.3: Τεχνικές διαμόρφωσης IEEE 802.11n και αντίστοιχοι θεωρητικοί ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων, για εύρος ζώνης καναλιού 40MHz [43]

Τεχνική διαμόρφωσης	Ρυθμός κωδικοποίησης	Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων (Mbps)
BPSK	1/2	15
QPSK	1/2	30
QPSK	3/4	45
16QAM	1/2	60
16QAM	3/4	90
64QAM	2/3	120
64QAM	3/4	135
64QAM	5/6	150

Το IEEE 802.11n υποστηρίζει τη μέθοδο συνάθροισης πλαισίων όπου πολλαπλές μονάδες MSDU (MAC Service Data Units) ή μονάδες MPDU (MAC Protocol Data Units) συνενώνονται για να μειώσουν την επιβάρυνση (overhead) του πρωτοκόλλου και να την ισομοιράσουν σε πολλά πλαίσια, αυξάνοντας έτσι τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων σε επίπεδο χρήστη [43].

3.2.5 IEEE802.11ac

Η τροποποίηση IEEE 802.11ac αναβάθμισε το πρότυπο Wi-Fi παρέχοντας ταχύτητες της τάξης των Gbps. Κάτι τέτοιο κατέστη δυνατό με την επέκταση της φιλοσοφίας του προτύπου IEEE 802.11n και

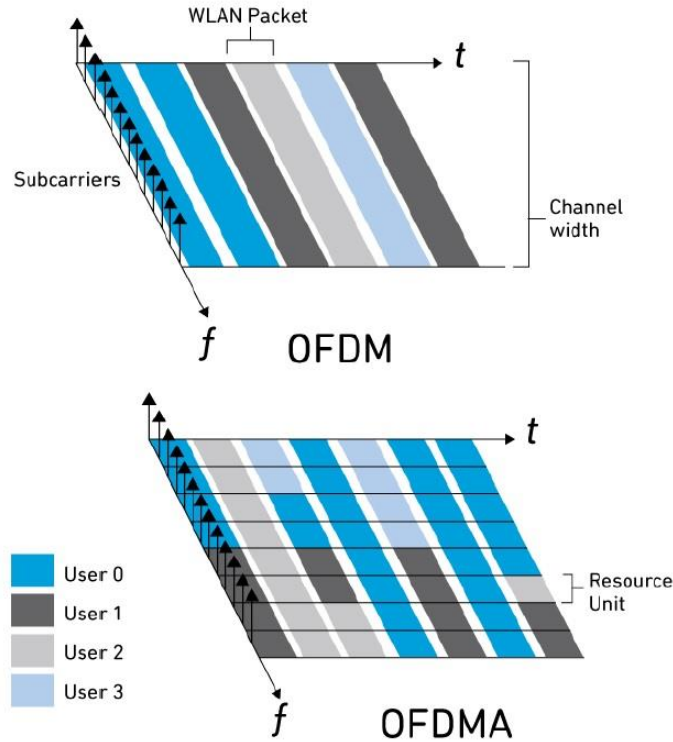
τη δημιουργία μιας σειράς βελτιώσεων στα επίπεδα PHY και MAC. Οι βελτιώσεις του επιπέδου PHY περιλαμβάνουν τη χρήση μεγαλύτερου εύρους ζώνης (έως 160MHz), την υποστήριξη μεγαλύτερου αριθμού χωρικών ροών MIMO (έως 8), τη δυνατότητα υποστήριξης κατερχόμενης σύνδεσης πολλαπλών χρηστών MIMO (έως 4 πελάτες) και τη διαμόρφωση υψηλής πυκνότητας (έως 256QAM). Έτσι, το IEEE 802.11ac υποστηρίζει διαμόρφωση 256QAM με ρυθμούς κωδικοποίησης 3/4 και 5/6, μια διαμόρφωση που είναι τέσσερις φορές πυκνότερη από αυτή του IEEE 802.11n. Οι βελτιώσεις του επιπέδου MAC περιλαμβάνουν μεγαλύτερο μέγιστο μέγεθος των μονάδων MPDU καθώς και τροποποίηση των σημάτων RTS/CTS, ώστε η λειτουργία του δυναμικού εύρους ζώνης να είναι πιο αποτελεσματική. Με όλες αυτές τις βελτιώσεις, το IEEE 802.11ac είναι σε θέση να παρέχει ένα ρυθμό μετάδοσης δεδομένων της τάξης των 6,8Gbps [43].

Το IEEE 802.11ac λειτουργούσε αποκλειστικά στη ζώνη των 5GHz, υποστηρίζοντας την συμβατότητα με άλλες τεχνολογίες IEEE 802.11 που λειτουργούν στην ίδια συχνότητα. Το πρώτο κύμα συσκευών συμβατών με το πρότυπο, που κυκλοφόρησε το 2013, υποστήριξε μόνο κανάλια 80MHz και έως και 3 χωρικές ροές που αποδίδουν ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων έως και 1,3Gbps στο επίπεδο PHY. Το δεύτερο κύμα προϊόντων (προϊόντα 802.11ac wave 2), κυκλοφόρησε το 2015, παρουσιάζοντας πολύ μεγαλύτερες ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων (έως και 2,34Gbps). Παράλληλα, υποστήριζε περισσότερες συνδέσεις καναλιών, περισσότερες χωρικές ροές και τεχνική MIMO πολλαπλών χρηστών (MU-MIMO), μια σημαντική προσθήκη του IEEE 802.11ac. Ενώ η τεχνολογία MIMO υποστηρίζει την εκπομπή πολλαπλών ροών σε έναν μόνο χρήστη, η MU-MIMO υποστηρίζει ταυτόχρονες μεταδόσεις χωρικών ροών σε πολλούς πελάτες, βελτιώνοντας έτσι την αποτελεσματικότητα του δικτύου. Φυσικά, το IEEE 802.11ac εξακολουθεί να χρησιμοποιεί την τεχνική μορφοποίησης δέσμης (beamforming).

3.2.6 IEEE802.11ax

Το πρότυπο 802.11ax, γνωστό και ως Wi-Fi 6, αποτελεί την έκτη γενιά πρωτοκόλλων Wi-Fi και σχεδιάστηκε βασιζόμενο στα πλεονεκτήματα του IEEE 802.11ac, παρέχοντας ακόμα μεγαλύτερη χωρητικότητα και αξιοπιστία στα ασύρματα δίκτυα. Η επίτευξη αυτών των χαρακτηριστικών πραγματοποιήθηκε μέσω της χρήσης πιο πυκνών σχημάτων διαμόρφωσης (1024QAM & OFDMA), μικρότερης απόστασης μεταξύ των υπερουσών (78,125kHz) και κατανομή πόρων βάσει χρονοδιαγράμματος [43].

Σε αντίθεση με τον προκάτοχό του, το IEEE 802.11ax είναι μια τεχνολογία διπλής ζώνης που λειτουργεί στις συχνότητες 2,4 και 5GHz, υποστηρίζοντας υψηλές ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων ακόμη και στη χαμηλότερη ζώνη συχνοτήτων. Έχει σχεδιαστεί για μέγιστη συμβατότητα, συνυπάρχοντας αποτελεσματικά με πελάτες των τροποποιήσεων IEEE 802.11a/g/n/ac. Η χρήση της τεχνικής διαμόρφωσης OFDMA, δίνει τη δυνατότητα διαίρεσης του εύρους ζώνης σύμφωνα με τις ανάγκες των πελατών και της ταυτόχρονης παροχής σε πολλούς χρήστες την ίδια εμπειρία χρήστη με μεγαλύτερες ταχύτητες. Στο πρότυπο IEEE 802.11ac, το κανάλι Wi-Fi αναλύθηκε σε μια συλλογή μικρότερων υποκαναλιών OFDM, πράγμα που σήμαινε ότι σε οποιοδήποτε δεδομένο σημείο, οι φέρουσες σε κάθε μονάδα PDU (Protocol Data Unit) του πρωτοκόλλου PLCP (Physical Layer Convergence Protocol) μπορούσαν να αναλυθούν σε υποκανάλια. Ωστόσο, στην τεχνική OFDMA (του IEEE 802.11ax) μεμονωμένες ομάδες υποφερουσών μπορούν να κατανεμηθούν μεμονωμένα σε πελάτες ως μονάδες πόρων στις μονάδες PPDU. Στην εικόνα 3.3 παρουσιάζεται η διαφορά της κατανομής πόρων μεταξύ των τεχνικών διαμόρφωσης OFDM και OFDMA [43].



Εικόνα 3.3: Κατανομή πόρων στις τεχνικές διαμόρφωσης OFDM και OFDMA [43]

Σε προηγούμενες τροποποιήσεις του βασικού προτύπου IEEE 802.11, η χρήση της μεθόδου πρόσβασης μέσω CSMA/CA επέτρεπε στους ασύρματους πελάτες τη χρήση του καναλιού μετάδοσης μετά τον έλεγχο και την αξιολόγηση ότι το κανάλι δεν χρησιμοποιείται από κάποιον άλλο. Σκοπός της λειτουργίας της συγκεκριμένης μεθόδου πρόσβασης μέσω ήταν η αποφυγή πιθανών συγκρούσεων μετάδοσης. Αν και αυτή η μέθοδος λειτουργησε καλά σε προηγούμενες τροποποιήσεις, η αποτελεσματικότητά της μειώθηκε όταν ο αριθμός των πελατών αυξήθηκε πολύ. Στο πρωτόκολλο IEEE 802.11ax το συγκεκριμένο πρόβλημα επιλύεται μέσω της χρήσης της τεχνικής OFDMA και της κατανομής πόρων βάσει χρονοδιαγράμματος. Τα σημεία πρόσβασης του προτύπου υπαγορεύουν το χρόνο λειτουργίας κάθε συσκευής, με αποτέλεσμα τη δυνατότητα αποτελεσματικότερης διαχείρισης των πελατών. Ο προγραμματισμός πόρων μειώνει επίσης σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας κατά τη διάρκεια του χρόνου αδράνειας των συσκευών, γεγονός που βελτιώνει τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας τροφοδοσίας τους. Στον πίνακα 3.4 παρατίθενται οι διαφορές μεταξύ των πρωτοκόλλων IEEE 802.11ac και IEEE 802.11ax [43].

Το νέο πρότυπο Wi-Fi υποστηρίζει επίσης την ταυτόχρονη μετάδοση πολλαπλών ροών σε έναν μόνο πελάτη ή σε πολλούς πελάτες. Εκτός από την αύξηση της μέγιστης τιμής του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, έχουν γίνει προσπάθειες για τη βελτίωση της φασματικής απόδοσης που χαρακτηρίζει πόσο καλά το σύστημα χρησιμοποιεί το διαθέσιμο φάσμα. Στο IEEE 802.11ax οι τεχνικές MU-MIMO και OFDMA, έχουν βελτιωθεί για να αυξήσουν την αποτελεσματικότητα του δικτύου και τη χωρητικότητα του δικτύου. Ενώ τα προηγούμενα πρότυπα υποστήριζαν την τεχνική MU-MIMO μόνο για τις συνδέσεις κατερχόμενης ζεύξης, το Wi-Fi 6 υποστηρίζει συνδέσεις 8x8 τόσο για ανερχόμενη όσο και για κατερχόμενη ζεύξη [43].

Πίνακας 3.4: Σύγκριση προτύπων IEEE 802.11ac και IEEE 802.11ax [43]

Χαρακτηριστικό	IEEE 802.11ac (Wi-Fi 5)	IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6)
Συχνότητα λειτουργίας (GHz)	5	2,4 / 5
Εύρος ζώνης καναλιού (MHz)	20, 40, 80, 160	20, 40, 80, 160
Αριθμός υποφερουσών	64, 128, 256, 512	256, 512, 1024, 2048
Απόσταση μεταξύ υποφερουσών (kHz)	312,5	78,125
Διάρκεια συμβόλου (μs)	3,2	12,8
Διάρκεια χρονικού διαστήματος ασφαλείας (μs)	0,8/0,4	0,8/1,6/3,2
Μεγαλύτερη διαμόρφωση	256QAM	1024QAM
Μέγιστη ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων (GHz)	6,933	9,608

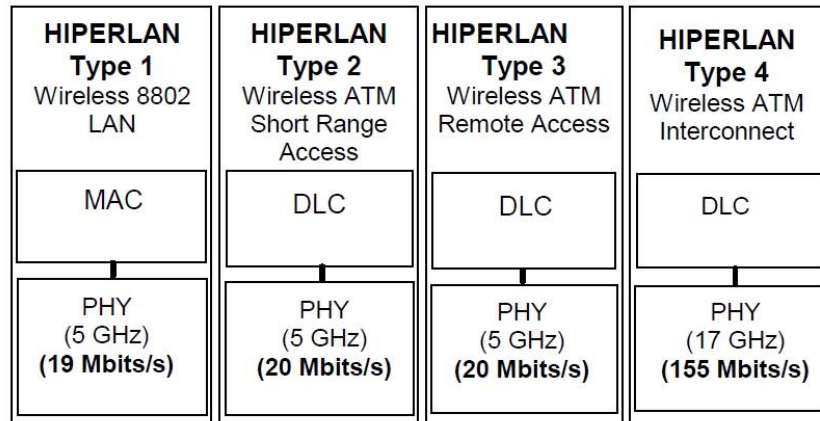
Τον Απρίλιο του 2020, ο οργανισμός FCC άνοιξε τη ζώνη των 6GHz για μη αδειοδοτημένες χρήσεις. Αυτή η κίνηση οδήγησε στη συμπερίληψη της νέας συχνότητας στο πρότυπο WiFi 6 [44]. Το προκύπτον πρότυπο φέρει όλα τα χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου IEEE 802.11ax, αλλά λόγω της επέκτασης της συχνότητας λειτουργίας, είναι γνωστό ως WiFi 6E. Ένα άμεσο αποτέλεσμα της αύξησης του πλάτους του καναλιού επικοινωνίας είναι η περαιτέρω μείωση των παρεμβολών σε σύγκριση με το WiFi 6. Το WiFi 6E είναι συμβατό με όλες τις προηγούμενες γενιές WiFi. Καθώς περισσότερες χώρες ανοίγουν σταδιακά το πρότυπο των 6GHz για μη αδειοδοτημένη χρήση, το WiFi 6E αναμένεται να επεκταθεί σε νεότερες αγορές [43].

3.3 HIPERLAN

Τα πρότυπα HIPERLAN (High Performance Radio Local Area Network) σχεδιάστηκαν από το ευρωπαϊκό ινστιτούτο ETSI (European Telecommunications Standardization Institute) ως μία ευρωπαϊκή απάντηση απέναντι στην πρόκληση της ανάπτυξης των πρωτοκόλλων IEEE802.11. Τα πρότυπα, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε δίκτυα WLAN και δημιουργήθηκαν στο πλαίσιο του project BRAN (Broadband Radio Access Network), υποστηρίζουν σταθερές ζεύξεις μεταξύ κινούμενων σταθμών [8], [11].

Η οικογένεια προτύπων HIPERLAN περιλαμβάνει τέσσερις τύπους πρωτοκόλλων. Τα HIPERLAN 1 (για δίκτυα WLAN υψηλής ταχύτητας), HIPERLAN 2 (για ασύρματη πρόσβαση μικρής εμβέλειας σε δίκτυα ATM) και HIPERLAN 3 (για ασύρματη απομακρυσμένη πρόσβαση σε δίκτυα ATM) λειτουργούν στη ζώνη των 5GHz, ενώ το HIPERLAN 4 (για ασύρματη διασύνδεση δικτύων ATM) λειτουργεί στη ζώνη των 17GHz. Στην εικόνα 3.4 παρουσιάζονται οι συχνότητες λειτουργίας και οι ενδεικτικοί ρυθμοί μεταφοράς δεδομένων των συγκεκριμένων πρωτοκόλλων [46].

Από την εικόνα 3.4 προκύπτει το συμπέρασμα ότι τα πρότυπα HIPERLAN 1 και HIPERLAN 2, τα οποία θα αναλυθούν στη συνέχεια, είναι εκ σχεδιασμού τελείως διαφορετικής φιλοσοφίας, καθώς απευθύνονται σε διαφορετικά είδη ασύρματων δικτύων.

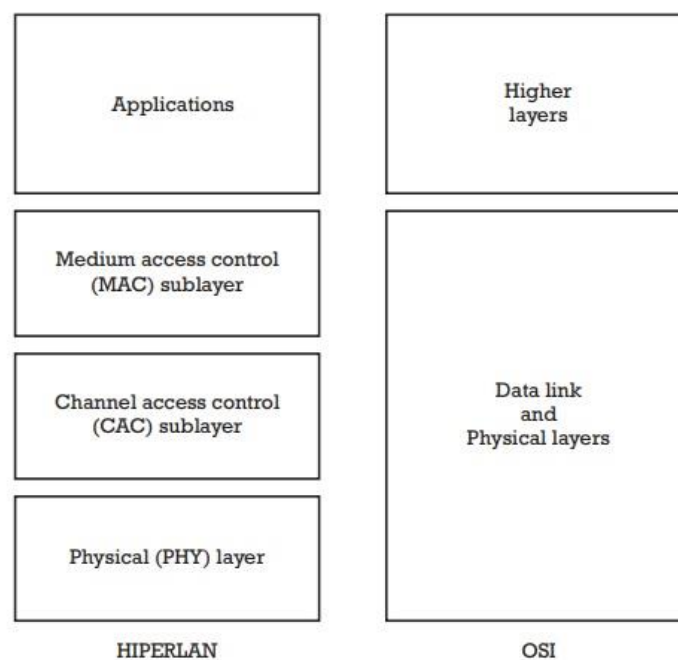


Εικόνα 3.4: Σύνοψη προτύπων οικογένειας HIPERLAN [46]

3.3.1 HIPERLAN 1

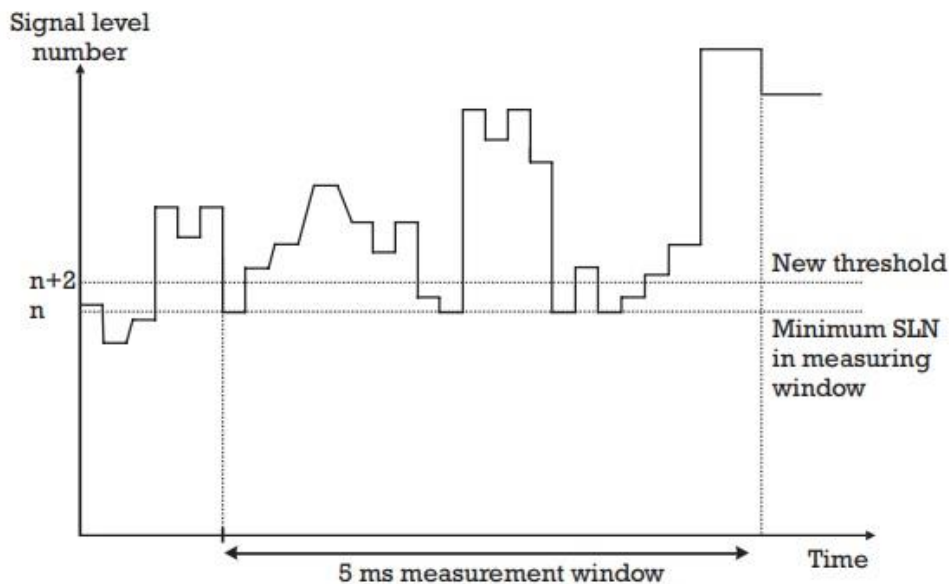
Το πρότυπο HIPERLAN 1 κυκλοφόρησε το 1997 με στόχο να αποτελέσει μία τεχνολογία WLAN ίσης απόδοσης σε σχέση με εκείνη των παραδοσιακών ενσύρματων δικτύων LAN που είναι ικανά να υποστηρίζουν ισόχρονες υπηρεσίες; καθώς και να πετύχει υψηλότερους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων σε σύγκριση με το IEEE 802.11. Σε αντίθεση με το IEEE 802.11, το πρότυπο HIPERLAN 1 δεν βασίστηκε σε κάποια προϋπάρχουσα τεχνολογία, αλλά σχεδιάστηκε με βάση την ικανοποίηση των απαιτήσεων των τότε δικτύων WLAN [47].

Όπως συμβαίνει και με το IEEE 802.11, το HIPERLAN 1 καλύπτει τα επίπεδα PHY και MAC του μοντέλου OSI (Open Systems Interconnection). Η διαφορά των δύο προτύπων είναι ότι στο HIPERLAN 1 εισάγεται ένα ενδιάμεσο επίπεδο, αυτό της πρόσβασης και ελέγχου καναλιού (Channel Access and Control - CAC), με σκοπό την αντιμετώπιση της σηματοδότησης πρόσβασης καναλιού και τη λειτουργία του πρωτοκόλλου για την υποστήριξη της προτεραιότητας πακέτων (Εικ. 3.5) [48].



Εικόνα 3.5: Το μοντέλο αναφοράς του προτύπου HIPERLAN 1 [48]

Μια πρώτη βασική λειτουργία του επιπέδου PHY του προτύπου αποσκοπεί στη δημιουργία μιας φυσικής σύνδεσης για την μετάδοση δεδομένων από έναν πομπό σε έναν ή περισσότερους δέκτες, χρησιμοποιώντας τις τεχνικές διαμόρφωσης που απαιτούνται για τη μετάδοση χαμηλού ρυθμού bit (Low Bit Rate - LBR) και υψηλού ρυθμού bit (High Bit Rate - HBR) και τις τεχνικές διόρθωσης σφαλμάτων [49]. Μια δεύτερη αποσκοπεί στην ενίσχυση του μηχανισμού πολλαπλής πρόσβασης, αναγνωρίζοντας την κατάσταση του καναλιού μέσω χρήσης του μηχανισμού CCA (Clear Channel Assessment), ο οποίος βασίζεται μόνο στη μέτρηση της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιείται ένα όριο το οποίο προσδιορίζει την κατάσταση του καναλιού (απασχολημένο ή αδρανές). Καθώς, η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος ποικίλλει με την πάροδο του χρόνου, το όριο αυτό προσαρμόζεται ανάλογα με τη διακύμανση του λαμβανόμενου σήματος στο τομέα του χρόνου. Οι παράμετροι για τη μέτρηση της ισχύος του σήματος εκφράζεται μέσω του αριθμού επιπέδου σήματος (Signal Level Number - SLN) (Εικ. 3.6). Καθώς τα σήματα HIPERLAN είναι τύπου burst και οποιαδήποτε παρεμβολή θα είναι σχετικά σταθερού επιπέδου ισχύος, το κανάλι θα θεωρείται αδρανές όταν το λαμβανόμενο SLN είναι μικρότερο από την τιμή του καθορισμένου ορίου. Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις το κανάλι θα θεωρείται απασχολημένο. Όταν το κανάλι είναι απασχολημένο, ο αλγόριθμος προσαρμογής ορίου επιδιώκει να αυξήσει το όριο ακριβώς πάνω από το επίπεδο οποιουδήποτε συνεχούς σήματος στο κανάλι [48].

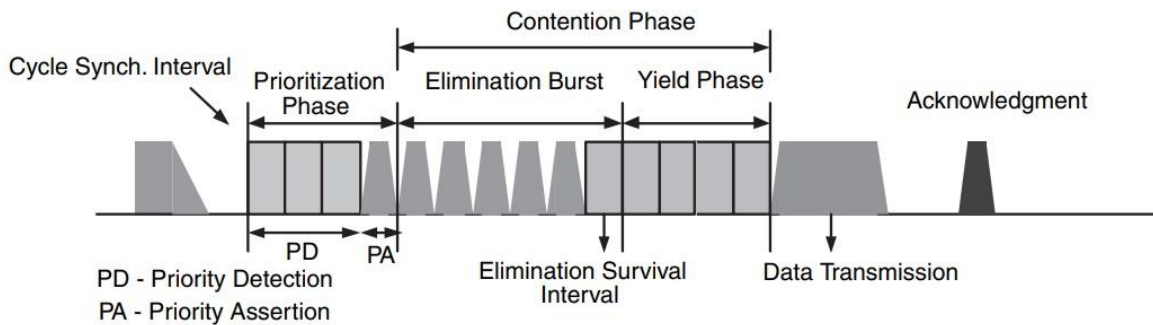


Εικόνα 3.6: Αλγόριθμος προσαρμογής ορίου [48]

Το επίπεδο PHY του HIPERLAN 1 χρησιμοποιεί για επικοινωνία 200MHz στο εύρος ζώνης 5,15 έως 5,35GHz. Αυτό το εύρος διαιρείται σε 5 κανάλια επικοινωνίας τα οποία έχουν μεταξύ τους απόσταση 40MHz. Κάθε κανάλι μεταδίδει δεδομένα με δύο διαφορετικούς ρυθμούς [50]: (α) έναν ρυθμό LBR (1,4706Mbps) που χρησιμοποιείται για τη μετάδοση πακέτων επιβεβαίωσης και την κεφαλίδα του πακέτου και (β) έναν ρυθμό HBR (23,5294Mbps) που χρησιμοποιείται για τη μετάδοση του ίδιου του πακέτου δεδομένων. Για τη μετάδοση ρυθμού LBR χρησιμοποιείται διαμόρφωση FSK, ενώ για την HBR διαμόρφωση GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying) [49].

Το επίπεδο CAC καθορίζει τον τρόπο προσπάθειας πρόσβασης καναλιού ανάλογα με το αν το κανάλι είναι απασχολημένο ή αδρανές, καθώς και το επίπεδο προτεραιότητας αυτής της προσπάθειας, σε περίπτωση ύπαρξης διαμάχης μεταξύ δύο ή περισσότερων πομπών για την πρόσβαση στο κανάλι. Για το σκοπό αυτό, στο επίπεδο CAC υλοποιείται ένας ψευδο-ιεραρχικά ανεξάρτητος μηχανισμός

πρόσβασης, ο οποίος επιτυγχάνεται μέσω ενεργής σηματοδότησης σε ένα πρωτόκολλο πρόσβασης ακρόασης πριν την ομιλία (Listen Before Talk – LBT). Ο μηχανισμός EY-NPMA (Elimination-Yield Non-Preemptive Multiple Access) κωδικοποιεί την επιλογή επιπέδου προτεραιότητας και την ανάλυση της διαμάχης σε έναν ενιαίο ραδιοπαλμό μεταβλητού μήκους που προηγείται των δεδομένων πακέτων. Ο συγκεκριμένος μηχανισμός μπορεί να λειτουργήσει ακόμη και για μεγάλους αριθμούς ταυτόχρονων διεκδικητών καναλιών [48].



Εικόνα 3.7: Λειτουργία του μηχανισμού EY-NPMA στο πρότυπο HIPERLAN 1 [50]

Σε ένα δίκτυο HIPERLAN 1, μια μετάδοση διέρχεται από τρεις φάσεις [50]: (α) τη φάση καθορισμού προτεραιοτήτων (prioritization phase), (β) τη φάση διαμάχης (contention phase) και (γ) τη φάση μετάδοσης (transmission phase). Η φάση μετάδοσης σχηματίζει τους κύκλους πρόσβασης καναλιού γιατί κατά τη μετάδοση το μέσο θεωρείται ελεύθερο. Και οι τρεις φάσεις σχηματίζουν έναν συγχρονισμένο κύκλο πρόσβασης στο κανάλι. Στην εικόνα 3.7 παρουσιάζεται η λειτουργία του μηχανισμού EY-NPMA σε αυτόν τον κύκλο πρόσβασης. Με απλά λόγια ο μηχανισμός λειτουργεί ως εξής. Κατά τη φάση του καθορισμού προτεραιοτήτων, επιλέγονται οι μεταδόσεις δεδομένων με την υψηλότερη προτεραιότητα πρόσβασης στο κανάλι. Η προτεραιότητα πρόσβασης στο κανάλι βασίζεται στην υπολειπόμενη διάρκεια ζωής του πακέτου και στην προτεραιότητα χρήστη. Στη φάση της διαμάχης, το επίπεδο CAC ανταγωνίζεται με οποιοδήποτε άλλο HIPERLAN CAC με την ίδια προτεραιότητα. Το CAC μεταδίδει ένα σήμα (το μήκος του οποίου υπολογίζεται με βάση τη γεωμετρική κατανομή πιθανοτήτων). Στο τέλος της μετάδοσης, το CAC ακούει το κανάλι. Εάν μια άλλη συσκευή εξακολουθεί να εκπέμπει, αναβάλλει τη μετάδοσή της μέχρι τον επόμενο κύκλο πρόσβασης καναλιού. Διαφορετικά το CAC κερδίζει το κανάλι και ξεκινά τη μετάδοσή του [50].

Στο επίπεδο MAC καθορίζονται τα διάφορα πρωτόκολλα που παρέχουν τα χαρακτηριστικά του προτύπου HIPERLAN 1 ως προς την εξοικονόμηση ενέργειας, τη λειτουργία αναζήτησης (look-up function) για κοντινά υπάρχοντα δίκτυα, την ασφάλεια και την δρομολόγηση πολλαπλών αλμάτων, καθώς και η υπηρεσία μεταφοράς δεδομένων στα ανώτερα επίπεδα πρωτοκόλλων [48].

Στο HIPERLAN 1, οι κινητές συσκευές μπορούν να συμφωνήσουν σε μοτίβα αφύπνισης (π.χ. περιοδικές αφυπνίσεις για λήψη δεδομένων). Επομένως, ορισμένοι κόμβοι πρέπει να μπορούν να αποθηκεύουν δεδομένα για συσκευές που βρίσκονται σε κατάσταση αδράνειας και να τα προωθούν την κατάλληλη στιγμή. Για την πραγματοποίηση των λειτουργιών εξοικονόμησης ενέργειας, οι κόμβοι στα δίκτυα HIPERLAN 1 μπορούν να έχουν τους εξής ρόλους [48]: (α) του p-supporter και (β) του p-saver. Οι κόμβοι σε ένα δίκτυο HIPERLAN 1 μπορούν να έχουν έναν, και τους δύο ή κανέναν από τους ρόλους αυτούς, κάτι που καθορίζεται από τον χρήστη. Οι κόμβοι p-saver είναι συσκευές που προσπαθούν να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας έχοντας τους δέκτες τους ενεργούς μόνο σε ορισμένα χρονικά διαστήματα. Οι κόμβοι p-supporter προσαρμόζουν τις μεταδόσεις

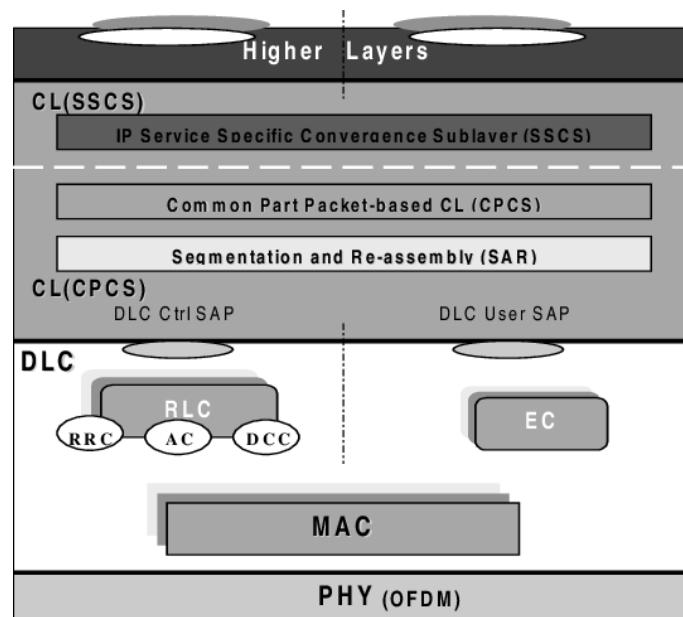
τους ώστε να πραγματοποιούνται όταν οι p-savers είναι ενεργοί. Σε αυτόν τον μηχανισμό, η περιοδικότητα και η διάρκεια των διαστημάτων αδράνειας/αφύπνισης μπορούν να επιλεγούν για να ταιριάζουν σε διαφορετικές ανάγκες εφαρμογής [48].

Όταν ένας κόμβος θέλει να μάθει ποια δίκτυα HIPERLAN βρίσκονται εντός της εμβέλειάς του, στέλνει ένα αίτημα αναζήτησης. Για το λόγο αυτό, το επίπεδο MAC διατηρεί πληροφορίες σχετικά με άλλους σταθμούς εντός του ίδιου δικτύου. Αυτές οι πληροφορίες περιλαμβάνουν αναγνωριστικό και όνομα του δικτύου HIPERLAN, τους κόμβους που περιλαμβάνει και απόσταση από αυτούς, καθώς και ενδείξεις για την καλύτερη διαδρομή πρόσβασης, κλπ. Όλες αυτές οι πληροφορίες ενημερώνονται δυναμικά. Μια μετάδοση στα δίκτυα HIPERLAN 1 πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας τις υπηρεσίες CAC, σε έναν ή περισσότερους προορισμούς εντός του ίδιου του δικτύου, με ή χωρίς κρυπτογράφηση δεδομένων. Μια τέτοια μετάδοση μπορεί να πραγματοποιηθεί με χρήση ενσωματωμένων αλγόριθμων ασφάλειας [48].

Το πρότυπο HIPERLAN 1 υποστηρίζει τοπολογίες σταθερής υποδομής, αλλά και ad hoc. Επιπλέον, υποστηρίζει λειτουργία δρομολόγησης πολλαπλών αλμάτων, σύμφωνα με την οποία ένας σταθμός μπορεί να μεταδώσει ένα πακέτο σε άλλο σταθμό εκτός της εμβέλειάς του χωρίς να απαιτούνται πρόσθετες υποδομές. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη βοήθεια ενδιάμεσων σταθμών που λειτουργούν ως αναμεταδότες προώθησης πακέτων που προορίζονται για άλλους σταθμούς [48].

3.3.2 HIPERLAN 2

Το HIPERLAN 2, που εκδόθηκε το Φεβρουάριο του 2000, στοχεύει να παρέχει πρόσβαση υψηλής ταχύτητας (έως 54Mbps) σε μια ποικιλία δικτύων, όπως δίκτυα κινητής τηλεφωνίας τρίτης γενιάς UMTS (Universal Mobile Telecommunications System), δίκτυα ATM (Asynchronous Transfer Mode), δίκτυα IP, αλλά, όπως και το HIPERLAN 1, και σε οικιακά ασύρματα δίκτυα. Ο σχεδιασμός του προτύπου αποσκοπεί στην υποστήριξη εφαρμογών δεδομένων, φωνής και βίντεο, λαμβάνοντας υπόψη τις ειδικές απαιτήσεις ποιότητας QoS (Quality of Service) κάθε εφαρμογής. Το HIPERLAN 2 παρέχει επίσης υποστήριξη σε θέματα όπως κρυπτογράφηση και ασφάλεια, εξοικονόμηση ενέργειας, δυναμική κατανομή καναλιών, έλεγχο ισχύος κλπ. [49], [51].



Εικόνα 3.8: Το μοντέλο αναφοράς του προτύπου HIPERLAN 2 [51]

Στην εικόνα 3.8 παρουσιάζεται το μοντέλο αναφοράς του προτύπου HIPERLAN 2. Η στοίβα πρωτοκόλλου περιλαμβάνει ένα τμήμα επιπέδου ελέγχου και ένα τμήμα επιπέδου χρήστη. Το επίπεδο χρήστη περιλαμβάνει τη λειτουργικότητα για μετάδοση σε εγκατεστημένες συνδέσεις και το επίπεδο ελέγχου παρέχει διαδικασίες για τον έλεγχο των εγκατεστημένων συνδέσεων. Το πρωτόκολλο έχει τρία βασικά επίπεδα [52]: (α) το φυσικό επίπεδο (PHY), (β) το επίπεδο ελέγχου ζεύξης δεδομένων (DLC) και (γ) το επίπεδο σύγκλισης (CL).

Το επίπεδο PHY του HIPERLAN 2 είναι παρόμοιο του αντίστοιχου επιπέδου του προτύπου IEEE 802.11a των δικτύων WLAN, επομένως λειτουργεί στη μπάνα συχνοτήτων των 5GHz. Πιο συγκεκριμένα, για επικοινωνία χρησιμοποιούνται 455MHz στο εύρος ζώνης 5,15 έως 5,725GHz. Το φάσμα αυτό μπορεί να διαιρεθεί σε 19 κανάλια εύρους 20MHz τα οποία μπορούν να μεταφέρουν 54Mbps το καθένα, σε μέγιστη απόσταση 200m. Η συνολική απόδοση ενός συστήματος HIPERLAN 2 εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως οι διαθέσιμες συχνότητες καναλιών, οι συνθήκες μετάδοσης και η ύπαρξη παρεμβολών. Ως τεχνική μετάδοσης δεδομένων χρησιμοποιήθηκε η OFDM, στην οποία το σύνολο των υποφερουσών ήταν 52, από τις οποίες οι 48 ήταν για μεταφορά δεδομένων και οι 4 για μεταφορά σημάτων ελέγχου και συγχρονισμού. Η λειτουργία τους βασιζόταν σε τεχνικές διαμόρφωσης BPSK, QPSK και 16QAM ή 64QAM [49].

Το επίπεδο DLC (Data Link Control) χρησιμοποιείται για τη δημιουργία των λογικών συνδέσεων μεταξύ των σημείων AP και των κινητών τερματικών. Περιλαμβάνει έναν αριθμό υποεπιπέδων που παρέχουν πρόσβαση στο μέσο, υπηρεσίες μετάδοσης στο επίπεδο χρήστη και υπηρεσίες χειρισμού της σύνδεσης στο επίπεδο ελέγχου. Τα υποεπίπεδα αυτά περιλαμβάνουν αντίστοιχα πρωτόκολλα, τα οποία είναι τα εξής [50]: (α) το πρωτόκολλο MAC, (β) το πρωτόκολλο ελέγχου σφαλμάτων (EC) και το πρωτόκολλο ελέγχου ραδιοζεύξης (RLC).

Το πρωτόκολλο MAC που χρησιμοποιείται από το HIPERLAN 2 βασίζεται στη χρήση μεθόδων πρόσβασης, όπως η τεχνική πρόσβασης TDD (Time Division Duplex) και η δυναμική τεχνική πρόσβασης TDMA. Το ασύρματο μέσο μοιράζεται στον τομέα του χρόνου μέσω της χρήσης πλαισίων MAC που περιέχουν αποκλειστικές θυρίδες είτε στην ανερχόμενη είτε στην κατερχόμενη ζεύξη. Οι θυρίδες αυτές κατανέμονται δυναμικά ανάλογα με την ανάγκη για πόρους μετάδοσης. Ένα πλαίσιο MAC έχει διάρκεια 2ms και αποτελείται από πολλά κανάλια μεταφοράς. Το πλαίσιο MAC και τα κανάλια μεταφοράς αποτελούν τη διεπαφή μεταξύ των επιπέδων DLC και PHY. Όπως φαίνεται στην εικόνα 3.9, κάθε πλαίσιο MAC αποτελείται από τέσσερις φάσεις, κάθε μια από τις οποίες περιλαμβάνει διαφορετικά κανάλια μετάδοσης [52]: (α) τη φάση διάδοσης (Broadcast phase), (β) τη φάση κατερχόμενης ζεύξης (downlink phase), (γ) τη φάση ανερχόμενης ζεύξης (uplink phase) και (δ) τη φάση τυχαίας πρόσβασης (random access phase). Η φάση διάδοσης περιλαμβάνει τα κανάλια ελέγχου εκπομπής BCCH (Broadband Control CHannel) και ελέγχου πλαισίου FCCH (Frame Control CHannel). Στις φάσεις κατερχόμενης και ανερχόμενης ζεύξης περιλαμβάνονται τα κανάλια SCH (Short CHannel) και LCH (Long CHannel). Στη φάση κατερχόμενης ζεύξης οι πληροφορίες ελέγχου και τα δεδομένα χρήστη μεταδίδονται από το σημείο AP προς τα κινητά τερματικά, ενώ στη φάση ανοδικής ζεύξης η μετάδοση γίνεται αντίστροφα. Η φάση τυχαίας πρόσβασης περιλαμβάνει μια σειρά από αντίστοιχα κανάλια RCH (Random access CHannels). Από τα κανάλια μεταφοράς αυτά, τα SCH, LCH και RCH χρησιμοποιούνται ως υποκείμενος πόρος των λογικών καναλιών HIPERLAN 2 [50], [52].

Το πρωτόκολλο ελέγχου σφαλμάτων EC (Error Control) της στοίβας πρωτοκόλλου HIPERLAN 2 χρησιμοποιεί μηχανισμό για την διαδοχική και χωρίς σφάλματα παράδοση των δεδομένων στα ανώτερα επίπεδα. Επιπλέον, το επίπεδο EC περιλαμβάνει ένα μηχανισμό απόρριψης δεδομένων

(μονάδων PDU), σύμφωνα με τον οποίο αν αυτά είναι παρωχημένα, τότε μπορεί να αποφασιστεί η απόρριψή τους. Ένας τέτοιος μηχανισμός έχει καθοριστεί για την υποστήριξη της αποτελεσματικής παροχής ποιότητας QoS σε ευαίσθητες στην καθυστέρηση εφαρμογές [50].

Το πρωτόκολλο ελέγχου ραδιοζεύξης RLC (Radio Link Control) παρέχει υπηρεσίες στις τρεις λειτουργίες του επιπέδου DLC, όπως οι [50] (α) η λειτουργία ελέγχου συσχέτισης, (β) η λειτουργία ελέγχου ραδιοπόρων και (γ) η λειτουργία ελέγχου σύνδεσης χρήστη DLC. Ο συνδυασμός αυτών των λειτουργιών υλοποιούν τη λειτουργικότητα του επιπέδου ελέγχου. Η λειτουργία ελέγχου συσχέτισης (Association Control Function – ACF) χρησιμοποιείται από τους κινητούς κόμβους για την ανταλλαγή πληροφοριών με το σημείο AP πριν από την εγκατάσταση της σύνδεσης. Η λειτουργία ελέγχου ραδιοπόρων (Radio Resource Control – RRC) διαχειρίζεται ζητήματα όπως η παράδοση, η κατανομή καναλιών και η εξοικονόμηση ενέργειας. Τέλος, η λειτουργία ελέγχου σύνδεσης χρήστη DLC (DLC Connection Control – DCC) χρησιμοποιείται για τη δημιουργία συνδέσεων χρήστη DLC, μεταδίδοντας μηνύματα σηματοδότησης [50].

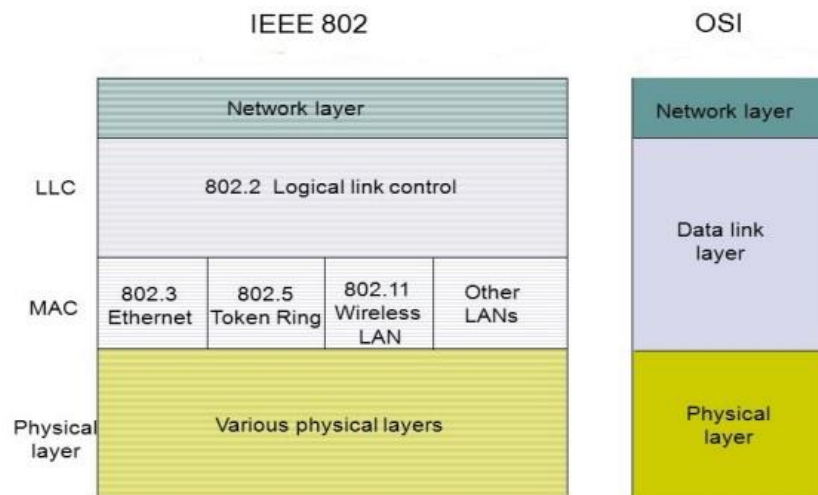
Το επίπεδο σύγκλισης CL (Convergence Layer) εκτελεί δύο λειτουργίες. Η πρώτη αφορά την τμηματοποίηση των μονάδων PDU υψηλότερου επιπέδου σε πακέτα σταθερού μεγέθους που χρησιμοποιούνται από το επίπεδο DLC. Η δεύτερη αφορά την προσαρμογή των υπηρεσιών που απαιτούνται από τα υψηλότερα επίπεδα σε εκείνες που παρέχονται από το επίπεδο DLC. Αυτή η λειτουργία απαιτεί επανασυναρμολόγηση των σταθερού μεγέθους πακέτων DLC στα αρχικά πακέτα μεταβλητού μεγέθους που χρησιμοποιούνται από τα υψηλότερα επίπεδα. Το πρότυπο HIPERLAN 2 περιλαμβάνει δύο διαφορετικούς τύπους επιπέδου CL, κάτι που του δίνει τη δυνατότητα εξυπηρέτησης διαφορετικών δικτύων. Το επίπεδο CL κυψελοειδούς μορφής (cell based) εξυπηρετεί τη διασύνδεση με δίκτυα ATM και ενσωματώνει με διαφάνεια το HIPERLAN με αυτά, ενώ το επίπεδο CL μεταγωγής πακέτου (packet based) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διασύνδεση κινητών κόμβων δικτύων ασύρματων ATM με παλαιού τύπου ενσύρματα LAN, όπως το Ethernet [50].

Κεφάλαιο 4ο: Ασύρματα τοπικά δίκτυα

4.1 Επίπεδο ζεύξης (σύνδεσης) δεδομένων

Το επίπεδο ζεύξης (σύνδεσης) δεδομένων (DLL) είναι το δεύτερο επίπεδο του μοντέλου OSI (Εικ. 4.1). Αν και η βασική λειτουργία οποιουδήποτε επιπέδου DLL είναι η μεταφορά πληροφοριών μέσω της ζεύξης των κόμβων οποιουδήποτε δικτύου, το σύνολο των λειτουργιών του διαφέρει ανάλογα με τον τύπο του δικτύου. Κάποιες από τις σημαντικότερες λειτουργίες ενός επιπέδου DLL στα δίκτυα WLAN αποτελούν [53], [54]:

- **Ενθυλάκωση των δεδομένων σε πλαίσια:** Σχεδόν όλα τα πρωτόκολλα επιπέδου DLL ενσωματώνουν τις πληροφορίες του επιπέδου δικτύου μέσα σε ένα πλαίσιο DLL πριν από τη μετάδοση μέσω της ζεύξης. Ένα πλαίσιο αποτελείται από ένα πεδίο δεδομένων, στο οποίο βρίσκονται οι πληροφορίες του επιπέδου δικτύου και ένας αριθμός πεδίων κεφαλίδας. Η δομή του πλαισίου καθορίζεται από το εκάστοτε πρωτόκολλο επιπέδου DLL
- **Αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων:** Όταν ένα πρωτόκολλο επιπέδου DLL παρέχει υπηρεσία αξιόπιστης μετάδοσης δεδομένων, εγγυάται ότι οι πληροφορίες θα μεταδοθούν μέσω της ζεύξης χωρίς σφάλματα. Μια τέτοια υπηρεσία χρησιμοποιείται συχνά για ζεύξεις που είναι επιρρεπείς σε υψηλά ποσοστά σφαλμάτων, όπως μια ασύρματη σύνδεση, και αποσκοπεί στην τοπική διόρθωση των σφαλμάτων, δηλαδή στη ζεύξη όπου παρουσιάζονται τα σφάλματα, παρά στην αναγκαστική αναμετάδοση των δεδομένων από άκρο σε άκρο, από ένα πρωτόκολλο επιπέδου μεταφοράς ή εφαρμογής
- **Ανίχνευση και διόρθωση σφαλμάτων:** Σφάλματα κατά την μετάδοση των δεδομένων σε ένα δίκτυο WLAN μπορούν να εμφανιστούν λόγω της εξασθένησης του μεταδιδόμενου σήματος, την ύπαρξη παρεμβολών ή την ύπαρξη ηλεκτρομαγνητικού θορύβου. Καθώς η ύπαρξη σφαλμάτων στην μετάδοση των δεδομένων μειώνει την αξιοπιστία του δικτύου, πολλά πρωτόκολλα επιπέδου DLL παρέχουν έναν μηχανισμό εντοπισμού τέτοιων σφαλμάτων. Σε έναν πολύ απλό μηχανισμό εντοπισμού σφαλμάτων, τα πλαίσια των δεδομένων του κόμβου εκπομπής περιλαμβάνουν bits ανίχνευσης σφαλμάτων και ο κόμβος λήψης πραγματοποιεί έλεγχο σφάλματος. Ο μηχανισμός διόρθωσης σφάλματος είναι παρόμοιος με αυτόν της ανίχνευσης σφαλμάτων, με τη διαφορά ότι ο δέκτης δεν εντοπίζει μόνο την εμφάνιση bits σφάλματος στο πλαίσιο, αλλά καθορίζει και την ακριβή τους θέση στο πλαίσιο (και στη συνέχεια διορθώνει αυτά τα σφάλματα)



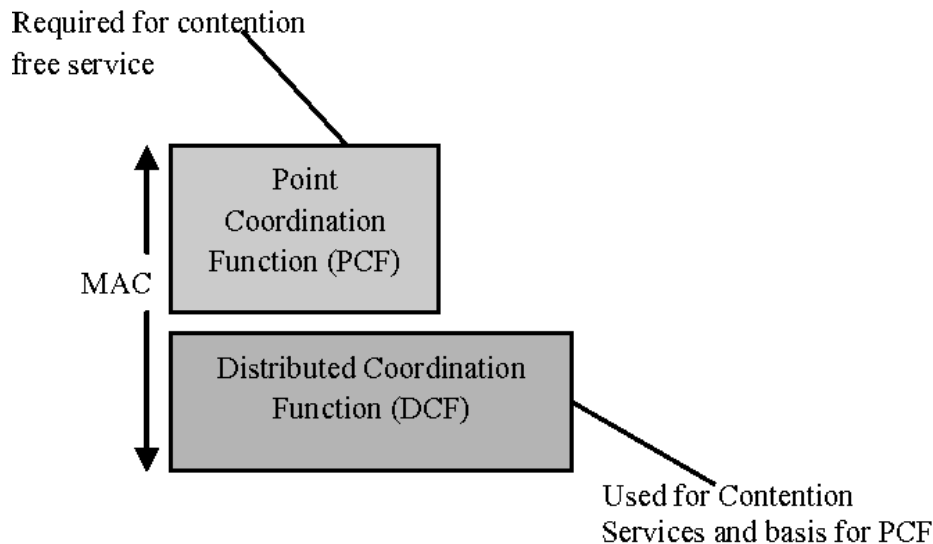
Εικόνα 4.1: Το επίπεδο ζεύξης (σύνδεσης) δεδομένων [53]

Το επίπεδο DLL χωρίζεται σε δύο υποεπίπεδα [53]: (α) το επίπεδο λογικού ελέγχου σύνδεσης (LLC) και (β) το επίπεδο ελέγχου πρόσβασης μέσου (MAC). Το υποεπίπεδο LLC ορίζεται στο πρότυπο IEE 802.2 και είναι το ίδιο για όλα τα είδη δικτύων. Όπως φαίνεται όμως στην εικόνα 4.1, το υποεπίπεδο MAC ορίζεται διαφορετικά σε κάθε τύπο δικτύου [53].

Όταν το μέσο μετάδοσης είναι κοινόχρηστο μεταξύ δύο ή περισσότερων συσκευών δικτύου, τότε απαιτείται διαχείριση πρόσβασης σε αυτό. Το επίπεδο MAC ορίζει το σύνολο των μηχανισμών και τα πρωτόκολλα για τη διασφάλιση της σωστής διαχείρισης της πρόσβασης σε αυτό το μέσο και την αποφυγή συγκρούσεων. Με τον όρο σύγκρουση εννοείται η προσπάθεια ταυτόχρονης μετάδοσης δεδομένων μέσω ενός κοινόχρηστου καναλιού [54].

4.2 Πρόσβαση στο μέσο

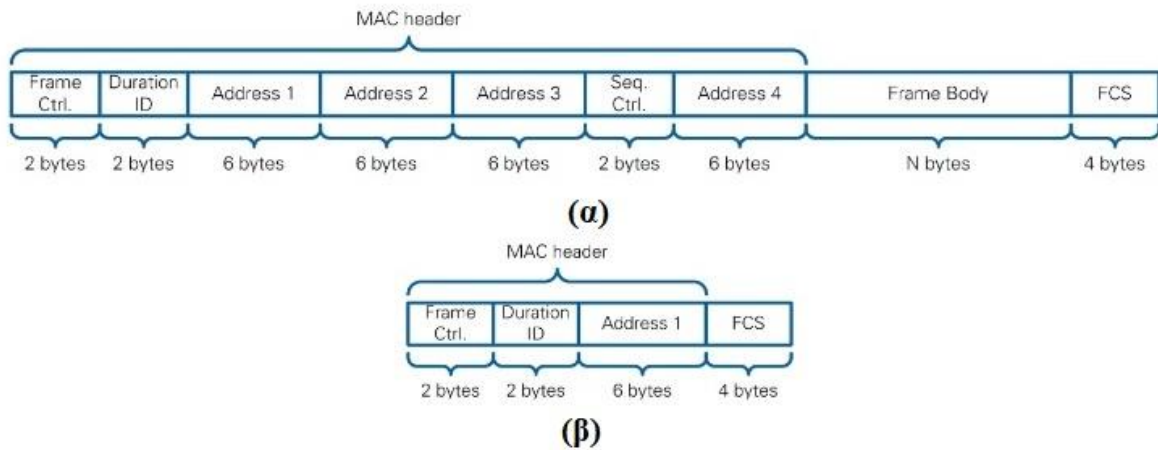
Ανεξάρτητα από το φυσικό επίπεδο που χρησιμοποιείται, όλοι οι πελάτες ενός δικτύου WLAN χρησιμοποιούν το ίδιο κανάλι για τις μεταδόσεις τους, κάτι που απαιτεί ακριβείς μηχανισμούς πολλαπλής πρόσβασης. Η βασική λειτουργία του επιπέδου MAC ενός δικτύου WLAN που βασίζεται στο πρότυπο IEEE 802.11, είναι να παρέχει ασύγχρονο, περιορισμένου χρόνου και χωρίς συγκρούσεις, έλεγχο πρόσβασης σε μια ποικιλία φυσικών επιπέδων. Η βασική μέθοδος ελέγχου πρόσβασης στο μέσο που χρησιμοποιείται στο επίπεδο MAC των δικτύων WLAN είναι μέσω της χρήσης του αλγόριθμου DCF (Distributed Coordination Function), ο οποίος επιτρέπει την κοινή χρήση του ασύρματου καναλιού μέσω του πρωτοκόλλου CSMA/CA και μιας διαδικασίας τυχαίου χρόνου υπαναχώρησης (back-off time), στην περίπτωση που το μέσο είναι απασχολημένο. Εκτός από τον αλγόριθμο DCF, το επίπεδο MAC χρησιμοποιεί επίσης ένα προαιρετικό μηχανισμό, γνωστό ως PCF (Point Coordination Function), ως εναλλακτική μέθοδο πρόσβασης μέσου. Όπως φαίνεται στην εικόνα 4.2, ο μηχανισμός PCF μπορεί να υλοποιηθεί πάνω από τον αλγόριθμο DCF, χρησιμοποιώντας έναν συντονιστή (Point Coordinator - PC) που καθορίζει το ποιος ασύρματος σταθμός έχει το δικαίωμα να μεταδώσει δεδομένα [55].



Εικόνα 4.2: Αρχιτεκτονική δομή επιπέδου MAC [55]

Στην εικόνα 4.3 παρουσιάζονται οι μορφές πλαισίων του επιπέδου MAC. Εκτός από το κύριο σώμα του πλαισίου δεδομένων MSDU (μήκους N byte) και την ακολουθία ελέγχου πλαισίου FCS (Frame Check Sequence) (μήκους 4 byte) για τον έλεγχο σφαλμάτων, το πλαίσιο του επιπέδου MAC περιλαμβάνει διευθύνσεις μήκους 6 byte που χρησιμοποιούνται για την αναγνώριση των σταθμών

προέλευσης και προορισμού. Το πεδίο διάρκειας ID (μήκους 2 byte) υποδεικνύει τον χρόνο (τιμή διανύσματος NAV (Network Allocation Vector)) που το κανάλι έχει δεσμευτεί για επιτυχή μετάδοση μιας μονάδας MPDU. Το διάνυσμα NAV μπορεί να θεωρηθεί ως μετρητής που μετρά αντίστροφα από μια μέγιστη τιμή μέχρι το μηδέν. Η μέγιστη τιμή του διανύσματος NAV αντιστοιχεί στο χρόνο που απαιτείται για τη μετάδοση του πλαισίου, δηλαδή ο χρόνος για τον οποίο θα είναι απασχολημένο το κανάλι. Κατά την έναρξη της μετάδοσης ενός πλαισίου, η τιμή του NAV παίρνει τη μέγιστη τιμή της. Μια μη μηδενική τιμή υποδηλώνει ότι το κανάλι είναι απασχολημένο και επομένως κανένας σταθμός δεν μπορεί να το χρησιμοποιήσει. Όταν η τιμή NAV μειωθεί στην τιμή 0, υποδηλώνεται ότι το κανάλι είναι ελεύθερο και ότι οι άλλοι σταθμοί μπορούν να διεκδικήσουν τη χρήση του [56]. Τέλος, το πεδίο ελέγχου πλαισίου (μήκους 2 byte) υποδεικνύει τον τύπο του πλαισίου, δηλαδή αν το πλαίσιο είναι ελέγχου (RTS, CTS και ACK), δεδομένων ή διαχείρισης. Τα πλαίσια ελέγχου και δεδομένων συνεργάζονται για να εξασφαλίσουν αξιόπιστη παράδοση δεδομένων. Τα πλαίσια διαχείρισης εκτελούν λειτουργίες εποπτείας που χρησιμοποιούνται για την σύνδεση/αποσύνδεση ενός ασύρματου σταθμού με/από το δίκτυο WLAN [57].



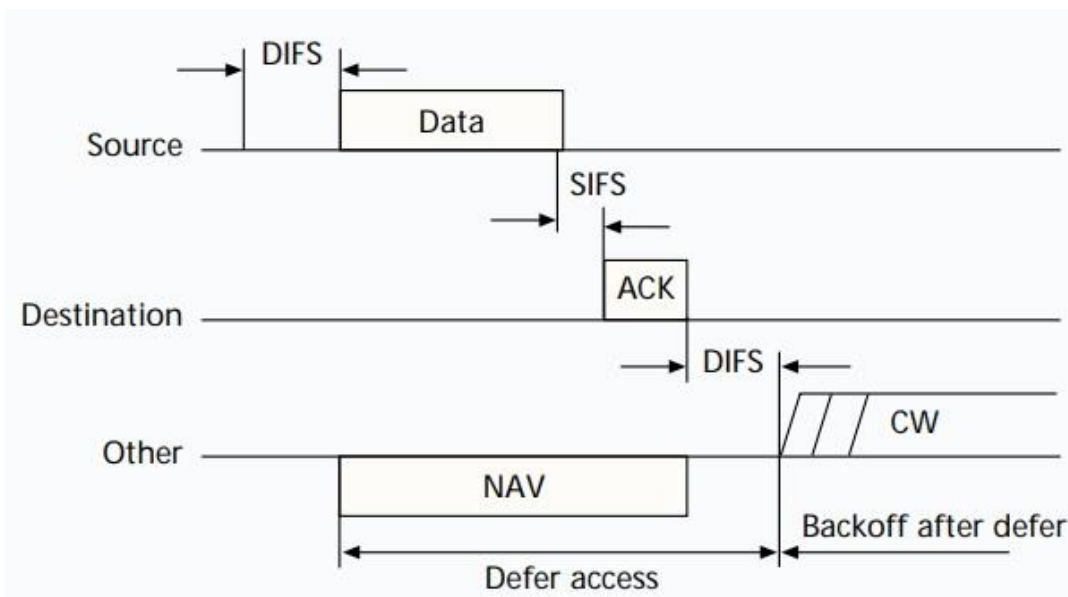
Εικόνα 4.3: Μορφές πλαισίων επιπέδου MAC (α) δεδομένων MPDU, (β) ACK [57]

Το επίπεδο MAC διαθέτει επίσης λειτουργίες διαδικασιών εκχώρησης καναλιών, διευθυνσιοδότησης μονάδων δεδομένων πρωτοκόλλου (PDU), μορφοποίησης πλαισίων, ελέγχου σφαλμάτων και κατακερματισμού και επανασυναρμολόγησης. Υποστηρίζει πολλαπλά φυσικά επίπεδα, διαχείριση ενέργειας, ασφάλεια (συμπεριλαμβανομένης της εγγραφής και του ελέγχου ταυτότητας) και συσχέτιση. Όλες αυτές οι λειτουργίες και υπηρεσίες του επιπέδου MAC αποσκοπούν στην επίλυση ή τουλάχιστον στην ελαχιστοποίηση του ζητήματος ύπαρξης ανταγωνισμών μεταξύ πολλαπλών σταθμών για πρόσβαση στο μέσο [49].

4.3 Αλγόριθμος DCF

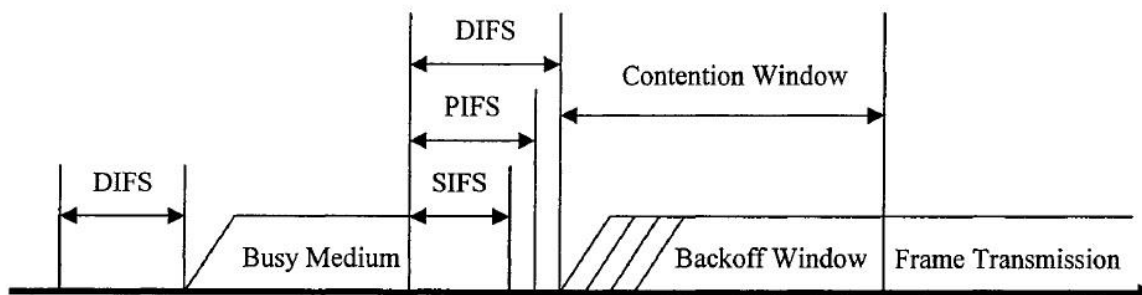
Ο αλγόριθμος DCF αποτελεί τη βασική μέθοδο πρόσβασης που χρησιμοποιείται στο επίπεδο MAC για την υποστήριξη της ασύγχρονης μεταφοράς δεδομένων με την καλύτερη δυνατή προσπάθεια. Η κατανομημένη λειτουργία του βασίζεται στη χρήση του πρωτοκόλλου πρόσβασης CSMA/CA σε συνδυασμό με τον αλγόριθμο BEB (Binary Exponential Back-off). Η χρήση του πρωτοκόλλου CSMA/CA έχει σκοπό να επιτρέψει την πρόσβαση στο ασύρματο μέσο κατά τρόπο που ελαχιστοποιεί τον κίνδυνο συγκρούσεων, ενώ ο συνδυασμός του με τον αλγόριθμο BEB δημιουργεί ένα μηχανισμό μεταφοράς δεδομένων βέλτιστης προσπάθειας (best effort service). Ο αλγόριθμος DCF χρησιμοποιεί τεχνικές αμφίδρομου ή τετραπλού handshaking. Κατά το αμφίδρομο handshaking χρησιμοποιεί

επιβεβαίωση ACK για την επιβεβαίωση της λήψης, ενώ πλαίσια RTS και CTS χρησιμοποιούνται στην τεχνική τετραπλού handshaking [58], [59].



Εικόνα 4.4: Μετάδοση MPDU χωρίς RTS/CTS [60]

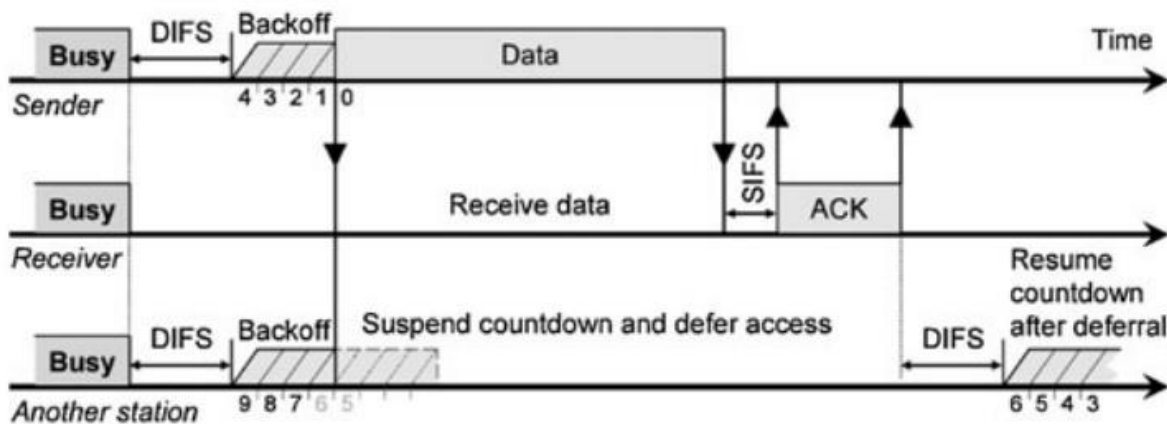
Ο αλγόριθμος περιλαμβάνει διαδικασίες ανίχνευσης του μέσου με βάση την εκάστοτε υπάρχουσα κυκλοφορία. Αρχικά, μέσω του πρωτοκόλλου CSMA/CA, πραγματοποιείται έλεγχος του μέσου μετάδοσης ως προς τη μη χρήση του. Αν και ο έλεγχος αυτός μπορεί να εφαρμοστεί και στα δύο επίπεδα PHY και MAC, οι διαδικασίες που ακολουθούνται είναι διαφορετικές. Στο φυσικό επίπεδο, ο έλεγχος περιλαμβάνει την ανίχνευση φορέα, εκ μέρους των ασύρματων σταθμών, για τυχόν δραστηριότητα σήματος στο κοινόχρηστο κανάλι. Αντίθετα, στο επίπεδο MAC, ο έλεγχος περιλαμβάνει τη διαδικασία ρύθμισης του διανύσματος NAV, ενός εικονικού μηχανισμού ανίχνευσης φορέα, που χρησιμοποιείται για να υποδείξει το χρονικό διάστημα που πρέπει να μεσολαβήσει πριν ολοκληρωθεί η τρέχουσα περίοδος μετάδοσης και μπορεί να γίνει ξανά δειγματοληψία του καναλιού για κατάσταση αδράνειας. Το κανάλι επισημαίνεται ως κατειλημμένο εάν είτε ο φυσικός είτε ο εικονικός μηχανισμός ανίχνευσης φορέα υποδεικνύει ότι το κανάλι είναι απασχολημένο. Η τιμή NAV στο πεδίο διάρκειας ID των πλαισίων ενημερώνει την τιμή NAV των άλλων σταθμών ως προς την πιο πρόσφατη διάρκεια δέσμευσης του καναλιού για επιτυχή μετάδοση ενός πλαισίου δεδομένων (MPDU). Στην εικόνα 4.4 παρουσιάζεται το χρονικό διάγραμμα μιας επιτυχημένης μετάδοσης πλαισίου δεδομένων [60].



Εικόνα 4.5: Σχέση μεταξύ των χρονικών διαστημάτων IFS [61]

Προκειμένου να διαχωριστούν οι διαφορετικοί τύποι πακέτων, εφαρμόζονται διαφορετικά επίπεδα προτεραιότητας πρόσβασης. Η πρόσβαση κατά προτεραιότητα στο ασύρματο μέσο ελέγχεται μέσω της χρήσης του χώρου μεταξύ πλαισίων (Inter-Frame Space - IFS), ενός χρονικού διαστήματος μεταξύ των μεταδόσεων των πλαισίων. Στο επίπεδο MAC καθορίζονται τρία υποχρεωτικά διαστήματα IFS [61]: (α) το Short IFS (SIFS), (β) το PCF IFS (PIFS) και (γ) το DCF IFS (DIFS). Όπως φαίνεται στην εικόνα 4.5, το SIFS είναι το μικρότερο χρονικό διάστημα IFS από τα τρία, ακολουθούμενο από τα PIFS και DIFS, με αποτέλεσμα να έχει την υψηλότερη προτεραιότητα στην πρόσβαση στο μέσο επικοινωνίας [61].

Εάν το μέσο, κατά την αρχική του ανίχνευση, διαπιστωθεί ότι είναι αδρανές για χρονικό διάστημα DIFS, τότε δίνεται η δυνατότητα σε έναν ασύρματο σταθμό να μεταδώσει δεδομένα αμέσως. Στην περίπτωση αυτή, ο δέκτης απαντά με ένα πλαίσιο ACK μετά την ολοκλήρωση της λήψης και την αναμονή ενός χρονικού διαστήματος SIFS. Εάν, όμως, διαπιστωθεί ότι δεν είναι αδρανές, τότε ο έλεγχος πρόσβασης στο μέσο, όταν αυτό ξαναμπεί σε αδράνεια, πραγματοποιείται μέσω του αλγόριθμου BEB. Σύμφωνα με τον αλγόριθμο BEB, η αναμετάδοση ενός ασύρματου σταθμού πρέπει να αναβληθεί για μια τυχαία χρονική περίοδο, που αναφέρεται ως χρόνος υπαναχώρησης (back-off time), ώστε να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα ανταγωνισμού για πρόσβαση στο μέσο. Στην εικόνα 4.6 παρουσιάζεται αυτή η λειτουργία του αλγόριθμου DCF [62].



Εικόνα 4.6: Βασική λειτουργία αλγόριθμου DCF [62]

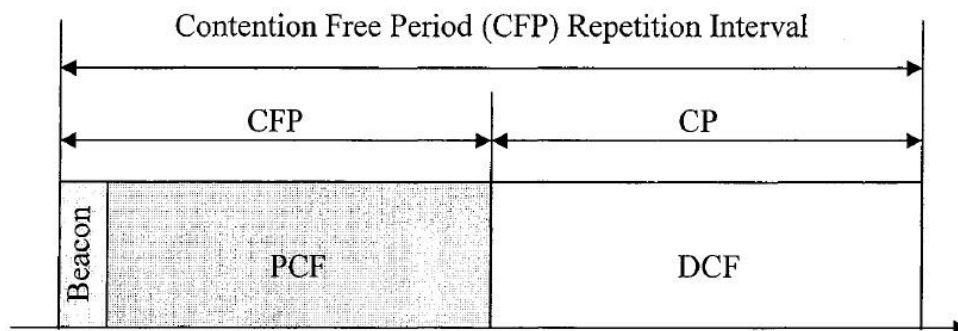
Όπως φαίνεται στην εικόνα 4.6, εάν το μέσο, κατά την αρχική του ανίχνευση, διαπιστωθεί ότι είναι απασχολημένο, ο ασύρματος σταθμός αναβάλλει τη μετάδοσή του, έως ότου εντοπιστεί ένα χρονικό διάστημα DIFS και στη συνέχεια δημιουργεί μια τυχαία περίοδο υπαναχώρησης για ένα επιπλέον διάστημα αναβολής πριν από τη μετάδοση. Το διάστημα αυτό, γνωστό ως παράθυρο διαμάχης (Contention Window - CW), ελαχιστοποιεί τις συγκρούσεις μεταξύ πολλών ασύρματων σταθμών. Ο χρόνος υπαναχώρησης μετριέται μέσω ενός χρονομέτρου υπαναχώρησης, η ένδειξη του οποίου μειώνεται μόνο όταν το μέσο είναι αδρανές, ενώ παραμένει σταθερή όταν το μέσο είναι απασχολημένο. Μετά το τέλος της περιόδου χρήσης του μέσου, η ένδειξη του χρονομέτρου back-off συνεχίζεται μόνο, αν το μέσο παραμείνει ελεύθερο για μεγαλύτερο χρόνο από το χρονικό διάστημα DIFS. Το παράθυρο CW χωρίζεται σε μια σειρά χρονοθυρίδων (time slots) ίσου μήκους, ο αριθμός των οποίων παίρνει τιμές από το σύνολο $[CW_{min}, CW_{max}]$, με το CW_{max} να είναι ο μέγιστος αριθμός χρονοθυρίδας. Στην πρώτη προσπάθεια μετάδοσης πακέτου, το CW παίρνει την τιμή CW_{min} . Μετά από κάθε ανεπιτυχή μετάδοση (π.χ. μετά από κάποια διαμάχη), το παράθυρο CW διπλασιάζεται

την τιμή του μέχρι να φτάσει την τιμή CW_{max} και θα παραμείνει σε αυτή για όλες τις υπόλοιπες επαναλήψεις. Μετά από μια επιτυχημένη μετάδοση, το παράθυρο CW επαναφέρεται στην αρχική τιμή CW_{min} . Με αυτόν τον τρόπο, διαμάχες μπορούν πλέον να συμβούν μόνο στην περίπτωση που δύο ασύρματοι σταθμοί επέλεξαν την ίδια περίοδο υπαναχώρησης. Αντίθετα, εάν η επιλεγμένη περίοδος υπαναχώρησης είναι διαφορετική, τότε ο ασύρματος σταθμός με την μεγαλύτερη επιλεγμένη περίοδο, παγώνει το χρονομέτρο back-off, περιμένει μέχρι το τέλος της μετάδοσης του άλλου σταθμού και συνεχίζει να περιμένει για τη δική του μετάδοση για όσες χρονοθυρίδες έχουν απομείνει από τον προηγούμενο ανταγωνισμό (Εικ. 4.6) [62].

Παρά το γεγονός ότι ο αλγόριθμος DCF είναι απλός και παρουσιάζει μικρή καθυστέρηση μετάδοσης, υπάρχουν πολυάριθμες μελέτες που έχουν δείξει ότι δεν μπορεί να χρησιμοποιήσει αποτελεσματικά το περιορισμένο εύρος ζώνης ασύρματος καναλιού, όταν πολλοί σταθμοί έχουν πρόσβαση στο ίδιο κανάλι. Βασικός λόγος αυτής της μη αποτελεσματικότητας θεωρείται η σταθερότητα που παρουσιάζει το αρχικό μέγεθος του παραθύρου CW , ανεξάρτητα από τη δραστηριότητα της κυκλοφορίας, ενώ στην ιδανική περίπτωση, θα έπρεπε να ποικίλλει ανάλογα με τον αριθμό των ενεργών σταθμών [62]. Σημαντικά επίσης μειονεκτήματα του αλγόριθμου DCF είναι η αδυναμία του να ελέγχει την επιλογή του ασύρματος σταθμού προς μετάδοση, καθώς και ο απρόβλεπτος αριθμός συγκρούσεων που, σε συνδυασμό με τις απρόβλεπτες καθυστερήσεις επιτυχούς μετάδοσης, τελικά οδηγούν σε μια μη σταθερή συνολική απόδοση της μετάδοσης [58], [63].

4.4 Αλγόριθμος PCF

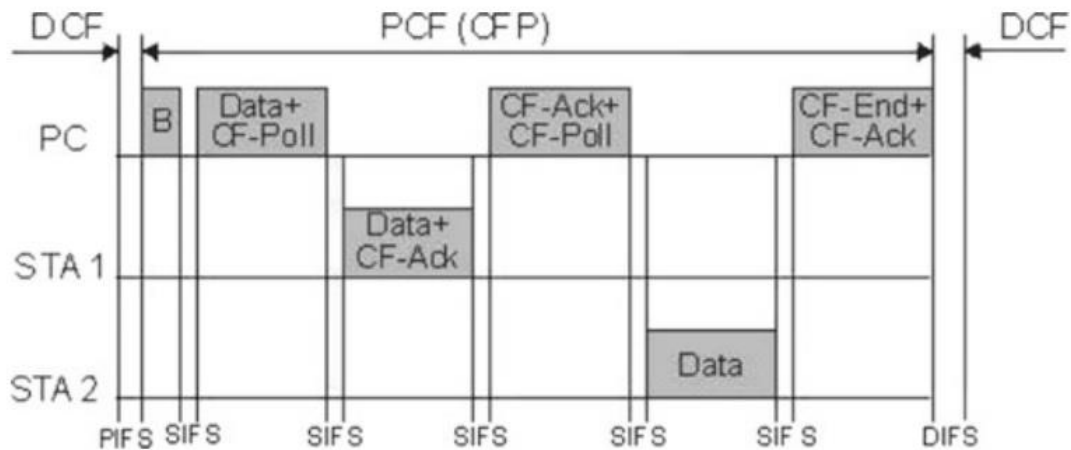
Ο κεντρικά ελεγχόμενος αλγόριθμος πρόσβασης PCF αποτελεί μια προαιρετική δυνατότητα του επιπέδου MAC των δικτύων WLAN που βασίζονται στο πρότυπο IEEE 802.11. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος είναι προσανατολισμένος στη σύνδεση (connection-oriented) και παρέχει μετάδοση πλαισίων χωρίς διαμάχες. Η λειτουργία του βασίζεται στη χρήση ενός συντονιστή PC, ο οποίος πραγματοποιεί μια διαδικασία polling, σύμφωνα με την οποία δίνεται διαδοχικά η δυνατότητα σε κάθε ασύρματο σταθμό να εκπέμψει χωρίς να διεκδικήσει πρόσβαση στο κανάλι. Σε ένα δίκτυο WLAN, η λειτουργία του συντονιστή PC πραγματοποιείται από το σημείο AP κάθε μίας από τις αρχιτεκτονικές μονάδες BSS (Basic Service Set) [58].



Εικόνα 4.7: Συνύπαρξη αλγορίθμων PCF και DCF [59]

Σε μια μονάδα BSS απαιτείται συνύπαρξη των αλγορίθμων PCF και DCF. Αυτή η συνύπαρξη οδηγεί στη δημιουργία ενός υπερπλαισίου, το οποίο αποτελείται από μια περίοδο με ανταγωνισμούς (Contention Period - CP), στην οποία χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος DCF, και από μια περίοδο χωρίς ανταγωνισμούς (Contention Free Period - CFP), στην οποία χρησιμοποιείται ο PCF. Οι δύο περίοδοι

επαναλαμβάνονται μετά από κάθε διάστημα επανάληψης CFP (CFP Repetition interval - CFPR). Η έναρξη κάθε διαστήματος CFPR καθορίζεται από ένα πλαίσιο beacon, το οποίο μεταδίδεται από το σημείο AP της BSS και χρησιμοποιείται για συγχρονισμό (Εικ. 4.7) [59]. Η διάρκεια του διαστήματος CFPR είναι μεταβλητή και θα πρέπει να είναι πάντα ένας ακέραιος αριθμός πλαισίων beacon. Η διάρκεια της περιόδου CFP σε κάθε διάστημα CFPR καθορίζεται από το σημείο AP. Εάν η κίνηση είναι πολύ μικρή, το AP μπορεί να συντομεύσει την περίοδο CFP και να παρέχει το υπόλοιπο του διαστήματος CFPR για τη λειτουργία του αλγόριθμου DCF. Η περίοδος CFP ενός διαστήματος CFPR μπορεί επίσης να συντομευτεί εάν δεν έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία μετάδοσης δεδομένων με χρήση του αλγόριθμου DCF του προηγούμενου διαστήματος CFPR [58].



Εικόνα 4.8: Διαδικασία μετάδοσης με χρήση αλγόριθμου PCF [59]

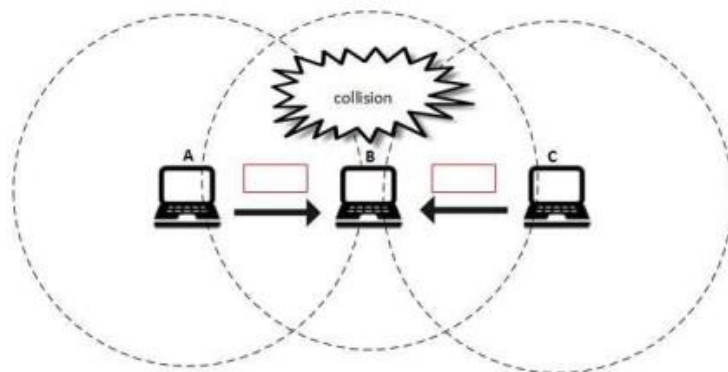
Η διαδικασία μετάδοσης με χρήση του αλγόριθμου PCF παρουσιάζεται στην εικόνα 4.8. Πριν την έναρξη της διαδικασίας, ο συντονιστής PC ανιχνεύει το μέσο και εάν αυτό παραμένει αδρανές για ένα διάστημα PIFS, μεταδίδει ένα πλαίσιο beacon για να εκκινήσει την περίοδο CFP. Όλοι οι ασύρματοι σταθμοί της BSS πρέπει να συμμορφώνονται με τους κανόνες πρόσβασης μέσω του αλγόριθμου PCF, επειδή αυτοί οι κανόνες βασίζονται στον αλγόριθμο DCF. Για το λόγο αυτό, στην αρχή κάθε περιόδου CPF θα πρέπει να ορίσουν στην τιμή NAV τη διάρκειά της. Ο συντονιστής PC ξεκινά τη μετάδοση χωρίς ανταγωνισμό (Contention Free - CF) ένα διάστημα SIFS μετά τη μετάδοση του πλαισίου beacon. Αν ο συντονιστής PC δεν έχει να στείλει δεδομένα, μεταδίδει ένα πλαίσιο CF-POLL για να ξεκινήσει τη διαδικασία του polling. Αν έχει να στείλει δεδομένα, τότε τα μεταδίδει μαζί με το πλαίσιο CF-POLL (Data+CF-Poll). Στο πλαίσιο CF-POLL απαντούν μόνο οι ασύρματοι σταθμοί που μπορούν να υποστηρίξουν τη λειτουργία του αλγόριθμου PCF. Με αυτόν τον τρόπο, ο συντονιστής PC δημιουργεί μια λίστα polling με όλους τους κόμβους της BSS με δυνατότητα PCF. Αυτή η λίστα οργανώνεται σύμφωνα με τις διευθύνσεις MAC των κόμβων. Μετά τη λήψη του πλαισίου CF-POLL από τον συντονιστή PC, οι ασύρματοι σταθμοί μπορεί να απαντήσουν μετά από ένα διάστημα SIFS, με ένα πλαίσιο Data+CF-ACK, αν έχουν να στείλουν δεδομένα ή με ένα πλαίσιο CF-ACK (χωρίς δεδομένα) για να επιβεβαιώσουν τη λήψη των δεδομένων. Με αυτόν τον τρόπο το κανάλι απελευθερώνεται και ο συντονιστής PC δεν θα περιμένει άλλη επικοινωνία από τους ασύρματους σταθμούς με δυνατότητα PCF που δεν έχουν δεδομένα για μετάδοση. Εάν ο συντονιστής PC λάβει ένα πλαίσιο Data+CF ACK από έναν σταθμό, τότε μπορεί να στείλει ένα πλαίσιο Data+CF_ACK+CF Poll σε διαφορετικό σταθμό, όπου το τμήμα CF_ACK του πλαισίου χρησιμοποιείται για να επιβεβαιώσει τη λήψη του προηγούμενου πλαισίου δεδομένων. Μετά από αναμονή μιας περιόδου SIFS, εάν ο συντονιστής PC δεν λάβει τα δεδομένα ή το πλαίσιο CF-ACK (χωρίς δεδομένα), τότε θα

επαναλάβει τη διαδικασία polling για τον ίδιο κόμβο. Η διαδικασία αυτή θα συνεχιστεί μέχρι κάποιον μέγιστο αριθμό αποτυχημένων προσπαθειών polling. Στη συνέχεια, περιμένει να ολοκληρωθεί η τρέχουσα περίοδος CFP και ξεκινά τη διαδικασία polling με τον επόμενο σταθμό [59].

Η δυνατότητα που υποστηρίζει ο αλγόριθμος PCF συνδυασμού των πλαισίων polling και ACK με πλαίσια δεδομένων, που μεταδίδονται μεταξύ των σταθμών και του συντονιστή PC, βελτιώνει την αποτελεσματικότητα της μετάδοσης. Επίσης, η δυνατότητά του να πραγματοποιεί διαδικασίες polling που είναι προσανατολισμένες στη σύνδεση, είναι σε θέση να μειώσει το πλήθος των συγκρούσεων σε μεγάλο βαθμό. Ο αλγόριθμος θεωρείται ιδανικός για περιβάλλοντα WLAN, στα οποία όλοι οι σταθμοί συνδέονται με το σημείο AP μέσω ενός μόνο άλματος. Ωστόσο, στην περίπτωση της μικρής μετάδοσης δεδομένων, η επιβάρυνση του δικτύου είναι αρκετά μεγάλη. Επίσης, όσον αφορά την παρεχόμενη ποιότητα QoS, τα ζητήματα του αλγόριθμου είναι αρκετά αφού, οι ασύρματοι σταθμοί δεν έχουν τρόπο να μεταδώσουν τις απαιτήσεις τους στο σημείο AP, το σημείο AP δεν μπορεί να διακόψει μια μετάδοση σε εξέλιξη για να στείλει ένα πλαίσιο beacon και η διαδικασία polling δεν καθορίζει το χρόνο στον οποίο το κανάλι μπορεί να χρησιμοποιηθεί με αποτέλεσμα ένας σταθμός να μπορεί να το κρατήσει όσο έχει δεδομένα προς μετάδοση [58].

4.5 Αλγόριθμοι RTS & CTS

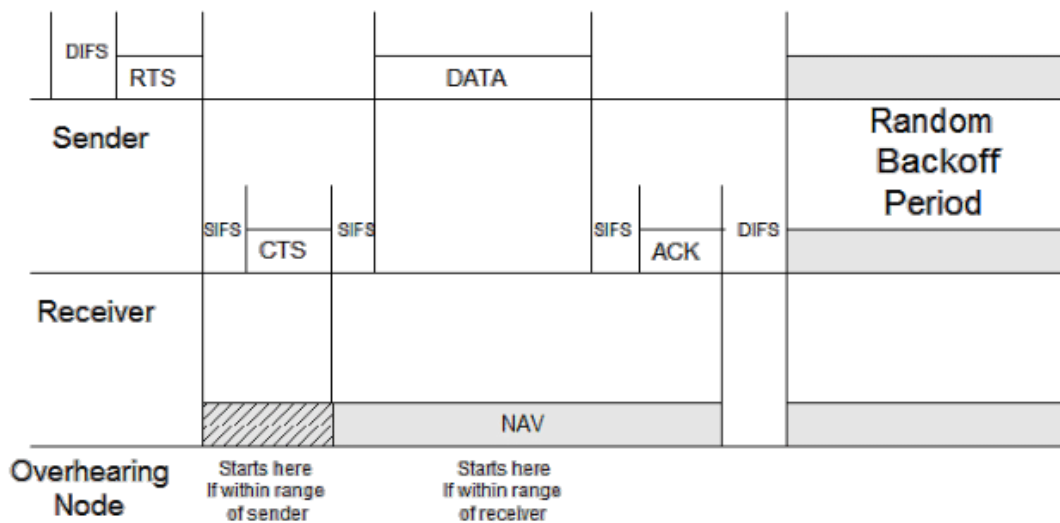
Στα δίκτυα WLAN, το πρόβλημα του κρυφού κόμβου αποτελεί ένα ζήτημα μετάδοσης που προέρχεται από το γεγονός ότι κάθε ασύρματος κόμβος έχει περιορισμένη εμβέλεια εκπομπής και επομένως δεν μπορεί να αναμένεται ότι θα μπορεί να επικοινωνεί με κάθε άλλο κόμβο του δικτύου. Το πρόβλημα του κρυφού κόμβου παρουσιάζεται όταν ένας κόμβος είναι ορατός από έναν ενδιάμεσο ασύρματο κόμβο, αλλά όχι από άλλους κόμβους που επικοινωνούν με αυτόν. Στην εικόνα 4.9, ο κόμβος B είναι ο ενδιάμεσος και οι δύο κόμβοι A και Γ μπορούν να επικοινωνούν με αυτόν. Ωστόσο, οι κόμβοι A και Γ δεν μπορούν να αισθανθούν την ύπαρξη ο ένας του άλλου, καθώς βρίσκονται εκτός της εμβέλειας εκπομπής τους. Επομένως, αν ο κόμβος Γ εκπέμπει προς τον κόμβο B και ο κόμβος A, που δεν μπορεί να αισθανθεί αυτήν την εκπομπή, αρχίσει να εκπέμπει και αυτός προς τον κόμβο B, τότε θα εμφανιστεί περίπτωση σύγκρουσης μεταξύ των εκπομπών των δύο κόμβων προς τον B. Για να μετριαστεί το πρόβλημα του κρυφού κόμβου και να αυξηθεί η αξιοπιστία του δικτύου, όπως θα εξηγηθεί στην επόμενη ενότητα, στα δίκτυα WLAN χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο CSMA/CA [64].



Εικόνα 4.9: Πρόβλημα κρυφού κόμβου [64]

Το επίπεδο MAC, όμως, περιλαμβάνει και έναν προαιρετικό μηχανισμό για την επίλυση του προβλήματος του κρυφού κόμβου, σύμφωνα με τον οποίο χρησιμοποιούνται δύο πλαίσια ελέγχου [65]: (α) ένα πλαίσιο RTS (Request To Send) που στέλνει ένας πομπός σε έναν δέκτη και (β) ένα πλαίσιο CTS (Clear To Send) που στέλνει ένας δέκτης ως απόκριση στο πλαίσιο RTS του πομπού.

Στον μηχανισμό διαπραγμάτευσης RTS/CTS, ο σταθμός που θέλει να στείλει δεδομένα στέλνει ένα πλαίσιο RTS σε όλους τους σταθμούς εντός της εμβέλειας εκπομπής του για να μην εκκινήσει καμία μετάδοση για έναν δεδομένο χρόνο NAV. Όλοι οι σταθμοί που λαμβάνουν το πλαίσιο RTS ρυθμίζουν ανάλογα την τιμή NAV, η οποία αντιστοιχεί στη χρονική διάρκεια που το κανάλι παραμένει απασχολημένο. Μετά από μια περίοδο SIFS, ο σταθμός προορισμού ανταποκρίνεται με ένα πλαίσιο CTS εάν είναι έτοιμος για λήψη και το μέσο είναι αδρανές. Οι υπόλοιποι σταθμοί που “ακούν” την εκπομπή ρυθμίζουν και πάλι την τιμή NAV. Μετά την επιτυχημένη λήψη του πλαισίου CTS, ο σταθμός εκπομπής είναι σίγουρος ότι το κανάλι είναι δεσμευμένο και μεταδίδει το πλαίσιο δεδομένων του. Εάν το πλαίσιο CTS δεν ληφθεί, προσπαθεί ξανά μετά από έναν τυχαίο χρόνο υπαναχώρησης. Οι υπόλοιποι σταθμοί μπορούν να ενημερώσουν τις τιμές NAV με βάση τα πλαίσια RTS και CTS, κάτι που μειώνει τις πιθανότητες εμφάνισης του προβλήματος του κρυφού κόμβου (Εικ. 4.10) [66].



Εικόνα 4.10: Μετάδοση MPDU με RTS/CTS [66]

Τα πλαίσια RTS και CTS περιέχουν πληροφορίες για τη διάρκεια της επερχόμενης μετάδοσης δεδομένων, η οποία επιτρέπει στους σταθμούς που “ακούν” την ανταλλαγή RTS/CTS να απέχουν από τη μετάδοση κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου [65]. Οι ανταλλαγές των ζευγών πλαισίων RTS και CTS ελαχιστοποιούν το χρόνο σύγκρουσης καθώς τα μήκη τους είναι συνήθως πολύ μικρότερα από το μήκος ενός πακέτου MPDU. Στην περίπτωση εμφάνισης σύγκρουσης, χάνεται μόνο μια περίοδος RTS/CTS αντί για ολόκληρο το MPDU. Ο μηχανισμός εξοικονομεί εύρος ζώνης ειδικά όταν το MPDU (μέγιστο μέγεθος πλαισίου δεδομένων έως 2346 byte) είναι σχετικά πολύ μεγαλύτερο από τα πλαίσια ελέγχου RTS και CTS (20 και 14 byte, αντίστοιχα). Ωστόσο, για ένα μέσο στο οποίο η κίνηση είναι μικρή, επιβάλλεται πρόσθετη καθυστέρηση από την επιβάρυνση των πλαισίων RTS/CTS. Επομένως, η χρήση του μηχανισμού προτιμάται όταν το MPDU υπερβαίνει την τιμή του ορίου RTS σε περιβάλλοντα μεγάλης κίνησης με επικαλυπτόμενα δίκτυα [67].

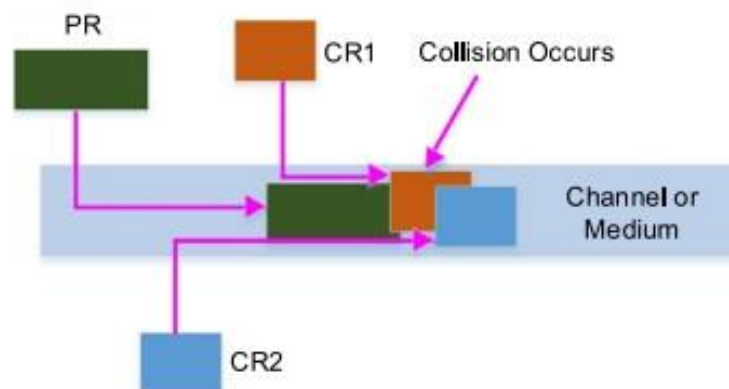
4.6 Σύγκριση πρωτοκόλλων πρόσβασης CSMA/CA & CSMA/CD

Το πρωτόκολλο CSMA (Carrier Sense Multiple Access) αποτελεί μέλος της οικογένειας πρωτοκόλλων ALOHA. Το ALOHA ήταν το πρώτο πρωτόκολλο πολλαπλής/τυχαίας πρόσβασης που εφαρμόστηκε σε ασύρματα δίκτυα μεγάλης κλίμακας. Το CSMA, το οποίο ανιχνεύει την κατάσταση ενός καναλιού πριν από τη μετάδοση πακέτων, είναι ο απλούστερος τρόπος βελτίωσης του ALOHA. Οι βελτιώσεις αυτές επιτεύχθηκαν μέσω της χρήσης πρόσθετης δυνατότητας σε κάθε σταθμό για την ανίχνευση των εκπομπών των άλλων σταθμών. Οι πληροφορίες ανίχνευσης φορέα χρησιμοποιούνται

για την ελαχιστοποίηση του μήκους των διαστημάτων σύγκρουσης. Για να είναι αποτελεσματική η ανίχνευση φορέα, οι καθυστερήσεις μετάδοσης θα πρέπει να είναι μικρότερες από τους χρόνους μετάδοσης πακέτων [68].

Το CSMA αποτελεί επομένως έναν μηχανισμό ανίχνευσης της κατάστασης του κοινόχρηστου καναλιού με σκοπό την αποτροπή ενός ανταγωνισμού απόκτησης πρόσβασης στο κανάλι ή την ανάκτηση των πακέτων δεδομένων μετά από την πιθανότητα ταυτόχρονης αποστολής τους. Χρησιμοποιείται επίσης για τον έλεγχο της ροής των πακέτων δεδομένων μέσω του δικτύου, έτσι ώστε τα πακέτα να μην χάνονται και να διατηρείται η ακεραιότητα των δεδομένων. Τροποποιήσεις του πρωτοκόλλου CSMA περιλαμβάνουν την προσθήκη της δυνατότητας ανίχνευσης σύγκρουσης (collision detection) και της δυνατότητας αποφυγής σύγκρουσης (collision avoidance), από τις οποίες προέκυψαν αντίστοιχα πρωτόκολλα πρόσβασης, το καθένα με τα δικά του δυνατά σημεία [69].

Το πρωτόκολλο CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection) χρησιμοποιείται για την ανίχνευση σύγκρουσης στο επίπεδο MAC συστημάτων ενσύρματης επικοινωνίας, όπως το πρότυπο IEEE 802.3 (Ethernet), συστημάτων αμφίδρομης επικοινωνίας, κλπ. Η βασική αρχή λειτουργίας αυτού του πρωτοκόλλου είναι ίδια με αυτή του CSMA (Εικ. 4.11). Στα ενσύρματα δίκτυα, στην περίπτωση που δύο ή περισσότεροι σταθμοί προσπαθήσουν να προωθήσουν δεδομένα ταυτόχρονα μέσω του ίδιου μέσου (καλωδίου), τότε η περίπτωση εμφάνισης σύγκρουσης των μεταδόσεων είναι αναπόφευκτη. Η εφαρμογή του CSMA/CD στο Ethernet βασίζεται στη χρήση μιας μεθόδου μέτρησης του σήματος που αποστέλλεται από το σταθμό για να διαπιστωθεί αν η αποστολή πραγματοποιήθηκε με επιτυχία ή υπάρχει περίπτωση σύγκρουσης. Η ανίχνευση της σύγκρουσης πραγματοποιείται μέσω της παρακολούθησης της αναλογικής κυματομορφής που μεταφέρεται από το κανάλι. Όταν εντός του καναλιού υπάρχουν ταυτόχρονα σήματα από δύο ή περισσότερους σταθμούς, η σύνθετη κυματομορφή εμφανίζεται παραμορφωμένη σε σχέση με αυτή ενός μόνο σταθμού. Η παραμόρφωση αυτή εμφανίζεται με τη μορφή μεγαλύτερου από το κανονικό πλάτος τάσης στο καλώδιο μεταφοράς. Όταν ένας σταθμός CSMA/CD αντιληφθεί ότι έχει συμβεί σύγκρουση, σταματά αμέσως τη μετάδοσή του και στέλνει ένα σύντομο σήμα παρεμβολής (jamming) για να ειδοποιήσει όλους τους σταθμούς για τη σύγκρουση αυτή. Ο σταθμός που σταμάτησε την εκπομπή του, περνά σε φάση αναμετάδοσης μετά από έναν τυχαίο χρόνο, ο οποίος προκύπτει από τη χρήση του αλγόριθμου εκθετικής υπαναχώρησης (Exponential Back-off algorithm). Εξαιτίας αυτής της λειτουργίας του πρωτοκόλλου, ο μηχανισμός ανίχνευσης σύγκρουσης είναι γνωστός και ως listen-while-talk [68].



Εικόνα 4.11: Μηχανισμός λειτουργίας πρωτοκόλλου CSMA/CD [68]

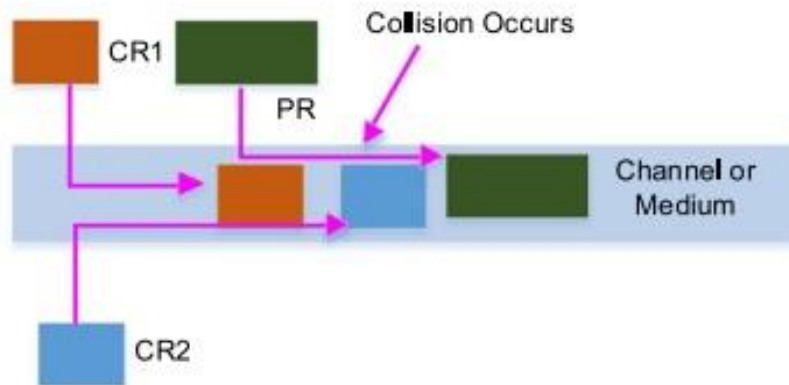
Στα πλεονεκτήματα του πρωτοκόλλου CSMA/CD περιλαμβάνονται [70]:

- Χρησιμοποιείται για την ανίχνευση σύγκρουσης σε ένα κοινόχρηστο κανάλι σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα
- Είναι καλύτερο από το CSMA για ανίχνευση σύγκρουσης
- Χρησιμοποιείται για την αποφυγή οποιασδήποτε μορφής άσκοπης μετάδοσης
- Όταν είναι απαραίτητο, χρησιμοποιείται για τη χρήση ή την κοινή χρήση του ίδιου εύρους ζώνης σε κάθε σταθμό.
- Παρουσιάζει μικρότερη επιβάρυνση σε σύγκριση με το CSMA/CA

Στα μειονέκτημα του CSMA/CD περιλαμβάνονται [70]:

- Δεν είναι κατάλληλο για δίκτυα μεγάλων αποστάσεων γιατί όσο αυξάνεται η απόσταση, η απόδοση του μειώνεται
- Μπορεί να ανιχνεύσει την ύπαρξη σύγκρουσης μόνο μέχρι τα 2500m
- Παρουσιάζει μικρή απόδοσης ανίχνευσης σύγκρουσης, όταν ο αριθμός των σταθμών είναι μεγάλος

Η εφαρμογή του πρωτοκόλλου CSMA/CD είναι επιτυχημένη μόνο σε ενσύρματα δίκτυα, καθώς στα δίκτυα WLAN, το πρωτόκολλο δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί με μεγάλη αξιοπιστία, από τη στιγμή που ένας ασύρματος σταθμός δεν μπορεί να ακούσει το κανάλι για συγκρούσεις κατά τη διάρκεια της μετάδοσής του [70]. Το πρωτόκολλο CSMA/CA χρησιμοποιείται για την ανίχνευση σύγκρουσης στο επίπεδο MAC, σε συστήματα ασύρματης επικοινωνίας, παρουσιάζοντας μεγαλύτερη απόδοση σε σύγκριση με το CSMA/CD. Τα δίκτυα IEEE 802.11b αποτελούν ένα παράδειγμα χρήσης του πρωτοκόλλου CSMA/CA. Καθώς είναι ένα πρωτόκολλο που εστιάζει στην αποφυγή συγκρούσεων παρά στο να επιτρέπει να πραγματοποιούνται και μετά να ασχολείται με την ανάκτηση των πακέτων, μπορεί να θεωρηθεί ως μία πιο βελτιωμένη τροποποίηση του CSMA. Στο CSMA/CA, κάθε φορά που ένας σταθμός θέλει να πραγματοποιήσει μια μετάδοση δεδομένων σε ένα κανάλι, ελέγχει πρώτα αν αυτό είναι σε χρήση (Εικ. 4.12). Εάν το κοινόχρηστο κανάλι είναι απασχολημένο, ο σταθμός περιμένει έως ότου το κανάλι εισέλθει σε κατάσταση αναμονής. Στην περίπτωση που δύο ή περισσότεροι σταθμοί πρέπει να μεταδώσουν δεδομένα ταυτόχρονα, η επιλογή της μετάδοσης πραγματοποιείται βάσει προτεραιότητας, με βάση τους μηχανισμούς προτεραιότητας πρόσβασης στο μέσο που αναφέρθηκαν στον αλγόριθμο DCF. Ως εκ τούτου, μειώνει τις πιθανότητες συγκρούσεων και κάνει καλύτερη χρήση του μέσου για την πιο αποτελεσματική αποστολή πακέτων δεδομένων [68].



Εικόνα 4.12: Μηχανισμός λειτουργίας πρωτοκόλλου CSMA/CA [68]

Στα πλεονεκτήματα του πρωτοκόλλου CSMA/CA περιλαμβάνονται [70]:

- Όταν το μέγεθος των πακέτων δεδομένων είναι μεγάλο, οι πιθανότητες σύγκρουσης στο CSMA/CA είναι μικρότερες

- Ελέγχει τα πακέτα δεδομένων και στέλνει τα δεδομένα όταν ο παραλήπτης θέλει να τα στείλει
- Χρησιμοποιείται για την αποτροπή σύγκρουσης στο κοινόχρηστο κανάλι αντί για την ανίχνευσή της
- Χρησιμοποιείται για την αποφυγή οποιασδήποτε μορφής άσκοπης μετάδοσης
- Αποφεύγει την περιττή κίνηση δεδομένων στο δίκτυο με τη βοήθεια των πλαισίων RTS/CTS

Στα μειονέκτημα του CSMA/CA περιλαμβάνονται [70]:

- Παρουσιάζει μεγαλύτερο χρόνο αναμονής για τη μετάδοση των δεδομένων
- Καταναλώνει περισσότερο εύρος ζώνης

Κεφάλαιο 5ο: Ασύρματα προσωπικά δίκτυα

5.1 Δίκτυα WPAN

Τα WPAN είναι δίκτυα που χρησιμοποιούν ασύρματη επικοινωνία για τη διασύνδεση συσκευών εντός μιας πολύ μικρής περιοχής. Ο όρος προσωπικά δίκτυα προέκυψε από το γεγονός ότι η μετάδοση των δεδομένων στα WPAN πραγματοποιείται μεταξύ προσωπικών συσκευών, όπως υπολογιστές, smartphone, tablet και συσκευές PDA (προσωπικούς ψηφιακούς βοηθούς). Τα δίκτυα WPAN υποστηρίζουν την επικοινωνία μεταξύ αυτών των προσωπικών συσκευών ή χρησιμοποιούνται για να τις συνδέσουν σε δίκτυο υψηλότερου επιπέδου και στο Διαδίκτυο, όπου μια κύρια συσκευή αναλαμβάνει το ρόλο της πύλης. Χαρακτηρίζονται από μικρή εμβέλεια (που ποικίλλει από μερικά εκατοστά έως λίγα μέτρα), μικρή κατανάλωση ενέργειας και χαμηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων [8].

Η λειτουργία των δικτύων WPAN βασίζεται στη χρήση ραδιοκυμάτων ή υπερύθρων. Στην πρώτη περίπτωση, η επιτροπή IEEE σχεδίασε μια οικογένεια προτύπων μικρής εμβέλειας και μικρής κατανάλωσης ενέργειας, τα οποία ονομάστηκαν IEEE 802.15 και υποστηρίζουν διάφορες τεχνολογίες. Οι σημαντικότερες από τις τεχνολογίες αυτές είναι το Bluetooth (IEEE 802.15.1), το UWB (Ultra Wide Band) (IEEE 802.15.3) και το ZigBee (IEEE 802.15.4) που λειτουργούν στις μπάντες συχνοτήτων ISM. Πρότυπα δικτύων WPAN που χρησιμοποιούν επικοινωνία υπερύθρων δημιουργήθηκαν από την ένωση IrDA [8]. Οι τεχνολογίες αυτές είναι εύκολες στη χρήση, καθώς για να επικοινωνήσουν μεταξύ τους δύο ή περισσότερες συσκευές, αρκεί να βρεθούν κοντά η μία στην άλλη. Επιπλέον, οι τεχνολογίες αυτές δίνουν στις συσκευές τη δυνατότητα επιλογής επικοινωνίας με άλλες, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η προστασία τους από περιπτώσεις μη εξουσιοδοτημένης πρόσβασης [71].

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας θα γίνει παρουσίαση των τεχνολογιών Bluetooth και IrDA.

5.2 Bluetooth

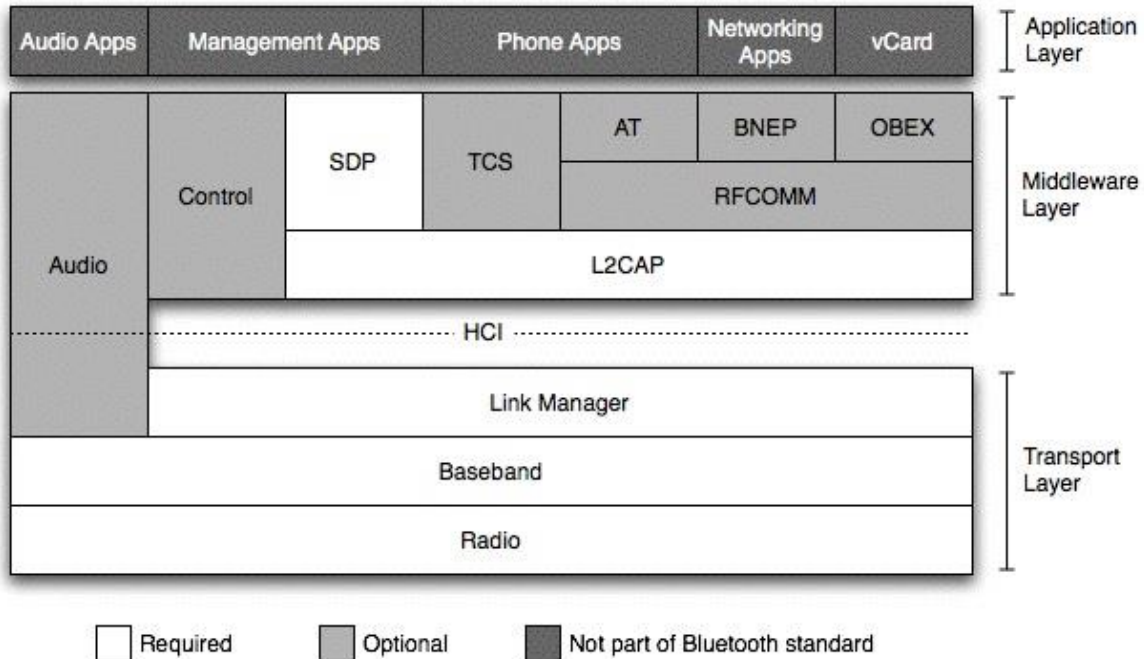
Το Bluetooth είναι ένα πρότυπο ασύρματης επικοινωνίας μικρής εμβέλειας που δημιουργήθηκε από τον οργανισμό τυποποίησης Bluetooth Special Interest Group (SIG) το 1994. Σχεδιάστηκε αρχικά ως ασύρματη εναλλακτική λύση αποστολής και λήψης πληροφοριών, για τη μέχρι τότε μεταφορά δεδομένων μέσω καλωδίου, χρησιμοποιώντας ραδιοκύματα. Οι αρχικοί στόχοι σχεδιασμού του ήταν η παγκόσμια λειτουργία, το χαμηλό κόστος, η μικρή εμβέλεια και η μικρή ισχύς κατανάλωσης. Το πρότυπο είναι πολύ ασφαλές για τη σύνδεση σταθερών και κινητών συσκευών, δίνοντας τη δυνατότητα στους χρήστες τους να σχηματίζουν δίκτυα adhoc [72].

Από την πρώτη του έκδοση, το 1998, το πρότυπο έχει εξελιχθεί και βελτιωθεί σημαντικά. Οι εκδόσεις 1.1 και 1.2 υποστηρίζουν ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων μόνο έως και 1Mbps, μια ταχύτητα που είναι γνωστή ως βασικός ρυθμός BR (Basic Rate). Ο ενισχυμένος ρυθμός μεταφοράς Bluetooth EDR (Enhanced Data Rate), που εισήχθη στην έκδοση 2.0 (2005), υποστηρίζει ταχύτητες μετάδοσης 2,1Mbps. Μεγάλη ώθηση στην τεχνολογία, ως προς το ρυθμό μεταφοράς δεδομένων πραγματοποιήθηκε το 2009 με την κυκλοφορία της έκδοσης 3.0 (Bluetooth BR/EDR), η οποία υποστήριζε ταχύτητα της τάξης των 24Mbps. Το Bluetooth 4.0, γνωστό και ως BLE (Bluetooth Low Energy), εμφανίστηκε το 2010, με χαμηλότερη ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων (1Mbps), αλλά μεγάλη ενεργειακή αποδοτικότητα και με εμβέλεια που φτάνει έως και 100m. Η έκδοση 4.0 εισήγαγε, επίσης, το Multipoint, μια δυνατότητα που επέτρεπε την ταυτόχρονη σύνδεση μιας συσκευής με άλλες δύο. Η πιο πρόσφατη έκδοση, το Bluetooth 5.0, παρουσιάστηκε το 2017 με βελτιωμένα

χαρακτηριστικά, που ταιριάζουν στις σύγχρονες απαιτήσεις των δικτύων WPAN, και εμβέλεια που μπορεί να φτάσει ακόμα και τα 240m [73].

5.2.1 Επισκόπηση πρωτοκόλλου

Η στοίβα πρωτοκόλλου του βασικού προτύπου Bluetooth χωρίζεται σε τρία λογικά επίπεδα (Εικ. 5.1) [71]: (α) το επίπεδο μεταφοράς, (β) το επίπεδο μεσαίου λογισμικού και (γ) το επίπεδο εφαρμογών.



Εικόνα 5.1: Στοίβα πρωτοκόλλων βασικού προτύπου Bluetooth [71]

Το επίπεδο μεταφοράς (transport layer) επιτρέπει στις συσκευές Bluetooth να εντοπίζουν άλλες συσκευές που χρησιμοποιούν το ίδιο πρότυπο. Όπως φαίνεται στην εικόνα 5.1, το επίπεδο μεταφοράς του Bluetooth δεν είναι σε καμία περίπτωση ισοδύναμο με το επίπεδο μεταφοράς του παραδοσιακού μοντέλου OSI, αλλά κατά κάποιο τρόπο ταιριάζει με τα επίπεδα PHY και DLL. Αποτελείται από τρία υποεπίπεδα [71]: (α) το επίπεδο Radio, (β) το επίπεδο Baseband και (γ) το επίπεδο Link Manager. Αυτά τα υποεπίπεδα συνδυάζονται ώστε να υποστηρίξουν σύγχρονη και ασύγχρονη μετάδοση δεδομένων, αλλά και οποιαδήποτε επικοινωνία μεταξύ συσκευών Bluetooth.

Το επίπεδο Radio είναι αντίστοιχο του επιπέδου PHY του μοντέλου OSI. Αποτελεί το χαμηλότερο επίπεδο της στοίβας πρωτοκόλλων και είναι υπεύθυνο για τη διαμόρφωση των τεχνικών χαρακτηριστικών των ραδιοσυχνοτήτων στις οποίες λειτουργεί το Bluetooth. Το πρότυπο λειτουργεί στη ζώνη ISM των 2,4GHz (2,4 - 2,4835GHz) και χρησιμοποιεί τεχνική μετάδοσης σήματος FHSS γρήγορης εναλλαγής συχνότητας (1.600hops/sec). Κατά τη μετάδοση, τα δεδομένα πακετοποιούνται και κάθε πακέτο μεταδίδεται σε ένα από τα 79 διαφορετικά κανάλια, εύρους 1MHz, που χρησιμοποιεί το πρότυπο. Στις αρχικές εκδόσεις του Bluetooth, όλες οι συσκευές χρησιμοποιούσαν διαμόρφωση BPSK. Για την επίτευξη όμως μεγαλύτερων ταχυτήτων μεταφοράς δεδομένων, οι μεταγενέστερες εκδόσεις του προτύπου χρησιμοποίησαν διαμόρφωση GFSK, DQPSK (Differential Quaternary Phase Shift Keying) περιστροφής $\pi/4$ και 8DPSK (8 phase Differential Phase Shift Keying) [74].

Το επίπεδο Baseband περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο οι συσκευές Bluetooth αναζητούν και συνδέονται με άλλες συσκευές (ο τρόπος αυτός θα περιγραφεί στην επόμενη υποενότητα). Επιπλέον,

το επίπεδο Baseband περιγράφει τους τύπους των πακέτων, τους μηχανισμούς επεξεργασίας τους, και τις προσεγγίσεις ανίχνευσης και διόρθωσης σφαλμάτων, περίπλεξης δεδομένων (data scrambling), κρυπτογράφησης, μετάδοσης και αναμετάδοσης πακέτων. Το επίπεδο Baseband παρέχει υποστήριξη για δύο τύπους ζεύξεων [71]: (α) την σύγχρονη ζευξοστρεφή SCO (Synchronous Connection Oriented) και (β) την ασύγχρονη χωρίς ζεύξη ACL (Asynchronous Connection-less). Οι ζεύξεις SCO μπορεί να είναι απλής ή περιοδικής ανάθεσης χρονοθυρίδων μεταφοράς πακέτων και χρησιμοποιούνται κυρίως για φωνητικές μεταδόσεις που χρειάζονται γρήγορη, αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων. Μια συσκευή που έχει δημιουργήσει ζεύξη SCO δεσμεύει ορισμένες χρονοθυρίδες για τη χρήση της. Τα πακέτα της αντιμετωπίζονται ως πακέτα υψηλής προτεραιότητας και εξυπηρετούνται πριν από οποιαδήποτε πακέτο ACL. Μια συσκευή με ζεύξη ACL μπορεί να στείλει πακέτα κυμαινόμενου μήκους 1, 3 ή 5 χρονοθυρίδων. Ωστόσο, δεν μπορεί να δεσμεύσει καμία χρονοθυρίδα για την αποστολή τους [71].

Το επίπεδο Link Manager διαχειρίζεται τις ιδιότητες της σύνδεσης διεπαφής αέρα μεταξύ των συσκευών Bluetooth. Η διαχείριση αυτή αφορά το εύρος ζώνης που χρησιμοποιείται για γενικά δεδομένα, το εύρος ζώνης που δεσμεύεται για δεδομένα ήχου, τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για έλεγχο ταυτότητας, τις σχέσεις εμπιστοσύνης μεταξύ των συσκευών, την κρυπτογράφηση δεδομένων και τον έλεγχο της χρήσης ενέργειας. Καθώς το Bluetooth καθορίζει τρεις τρόπους εξοικονόμησης ενέργειας, ο έλεγχος χρήσης ενέργειας περιλαμβάνει όλες τις διαδικασίες λειτουργίας αυτών των τριών τρόπων, καθώς και τα επίπεδα της ισχύος μετάδοσης των συσκευών [71].

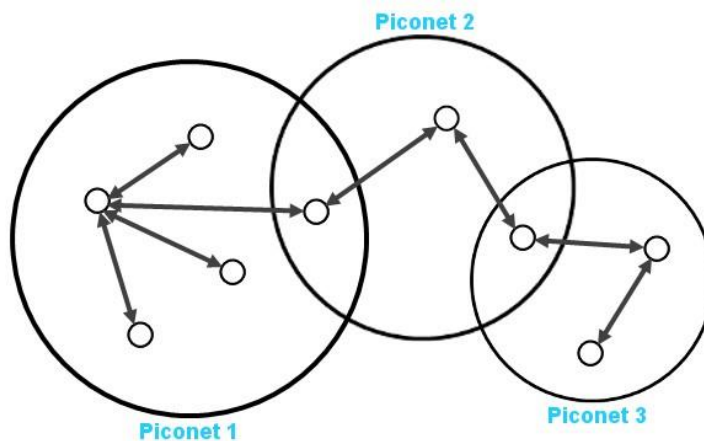
Μεταξύ των επιπέδων μεταφοράς και μεσαίου λογισμικού υπάρχει μια διεπαφή η οποία ονομάζεται HCI (Host Controller Interface). Η διεπαφή HCI δεν αποτελεί ζωτικό μέρος του προτύπου αλλά χρησιμοποιείται για να διευκολύνει την πρόσβαση των εφαρμογών υψηλότερου επιπέδου στα χαμηλότερα επίπεδα της στοιβάς πρωτοκόλλων. Βασικός ρόλος της είναι να επιτρέπει τη διαλειτουργικότητα μεταξύ των συσκευών Bluetooth και τη χρήση υπαρχόντων πρωτοκόλλων και εφαρμογών υψηλότερου επιπέδου [71].

Το επίπεδο μεσαίου λογισμικού (middleware layer) περιλαμβάνει μια σειρά από πρωτόκολλα και εφαρμογές λογισμικού που σχεδιάστηκαν ή υιοθετήθηκαν από άλλα πρότυπα, στοχεύοντας στην υποστήριξη των συσκευών Bluetooth με συσκευές άλλων προτύπων WPAN. Για παράδειγμα, πρωτόκολλα όπως τα PPP (Point-to-Point Protocol), ασύρματων εφαρμογών (Wireless Application Protocol - WAP), ελέγχου μετάδοσης (Transmission Control Protocol - TCP), Διαδικτύου (IP) και πρωτόκολλα ανταλλαγής αντικειμένων (Object Exchange - OBEX) υιοθετήθηκαν από την ένωση IrDA. Ο οργανισμός τυποποίησης Bluetooth SIG ανέπτυξε πρωτόκολλα όπως τα [71]:

- **RFCOMM (RF Communication)**: επιτρέπει σε εφαρμογές παλαιού τύπου να λειτουργούν απρόσκοπτα μέσω των πρωτοκόλλων μεταφοράς Bluetooth
- **TCS (Telephony Control Specification)**: ένα πρωτόκολλο σηματοδότησης ελέγχου τηλεφωνίας μεταγωγής πακέτων που υποστηρίζει εφαρμογές τηλεφωνίας
- **SDP (Service Discovery Protocol)**: ένα πρωτόκολλο εντοπισμού υπηρεσίας που επιτρέπει στις συσκευές να λαμβάνουν πληροφορίες για τις διαθέσιμες υπηρεσίες άλλων συσκευών

Ιδιαίτερη αναφορά αξίζει να γίνει στο πρωτόκολλο L2CAP (Logical Link Control and Adaptation Protocol) το οποίο παρέχει διεπαφή μεταξύ των πρωτοκόλλων ανωτέρου επιπέδου και των πρωτοκόλλων μεταφοράς των χαμηλότερων επιπέδων. Το L2CAP παρέχει υποστήριξη για πολυπλεξία ορισμένων πρωτοκόλλων υψηλότερου επιπέδου, όπως τα RFCOMM και SDP. Αυτή η υποστήριξη επιτρέπει σε πολλά πρωτόκολλα και εφαρμογές κοινής χρήσης της διεπαφής αέρα. Το πρωτόκολλο L2CAP είναι επίσης υπεύθυνο για την τμηματοποίηση και την επανασυναρμολόγηση

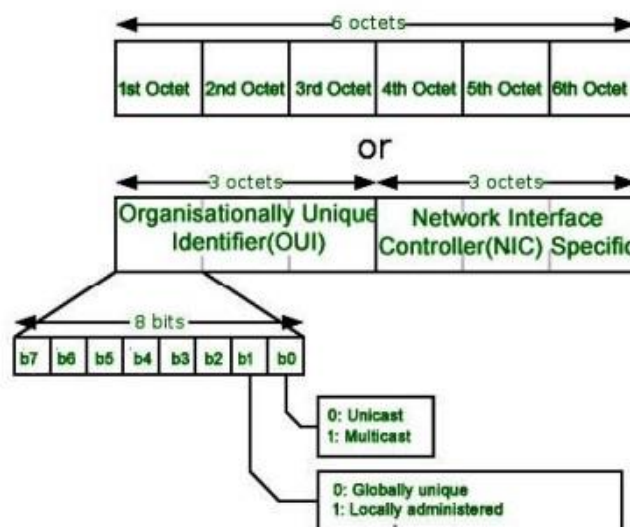
των πακέτων, καθώς και για τη διατήρηση του διαπραγματευόμενου επιπέδου εξυπηρέτησης μεταξύ των συσκευών [71].



Εικόνα 5.2: Τοπολογία Bluetooth [71]

5.2.2 Λειτουργία Bluetooth

Το Bluetooth είναι ένα πρωτόκολλο μεταγωγής πακέτων με αρχιτεκτονική master-slave. Κάθε master συσκευή μπορεί να επικοινωνήσει με έως και επτά slave συσκευές δημιουργώντας ένα δίκτυο ad-hoc συνδέσεων, το οποίο είναι γνωστό ως piconet. Master συσκευή ενός piconet γίνεται εκείνη που το δημιουργήσει. Σε ένα piconet, η master συσκευή μπορεί να αλλάξει, αλλά σε κανένα piconet δεν μπορεί να υπάρχει πάνω από μια master συσκευή. Όπως φαίνεται στην εικόνα 5.2, σε ένα piconet, οι slave συσκευές επικοινωνούν με την master συσκευή, αλλά όχι μεταξύ τους. Ωστόσο, μια slave συσκευή μπορεί να συμμετέχει σε ένα ή περισσότερα piconet. Μια τοπολογία με πολλά piconet, ονομάζεται scatternet. Σε ένα scatternet, όλες οι μονάδες μοιράζονται το ίδιο εύρος συχνοτήτων, αλλά κάθε piconet χρησιμοποιεί διαφορετικές ακολουθίες εναλλαγής συχνότητας και εκπέμπει σε διαφορετικό κανάλι εύρους 1MHz [71], [74].

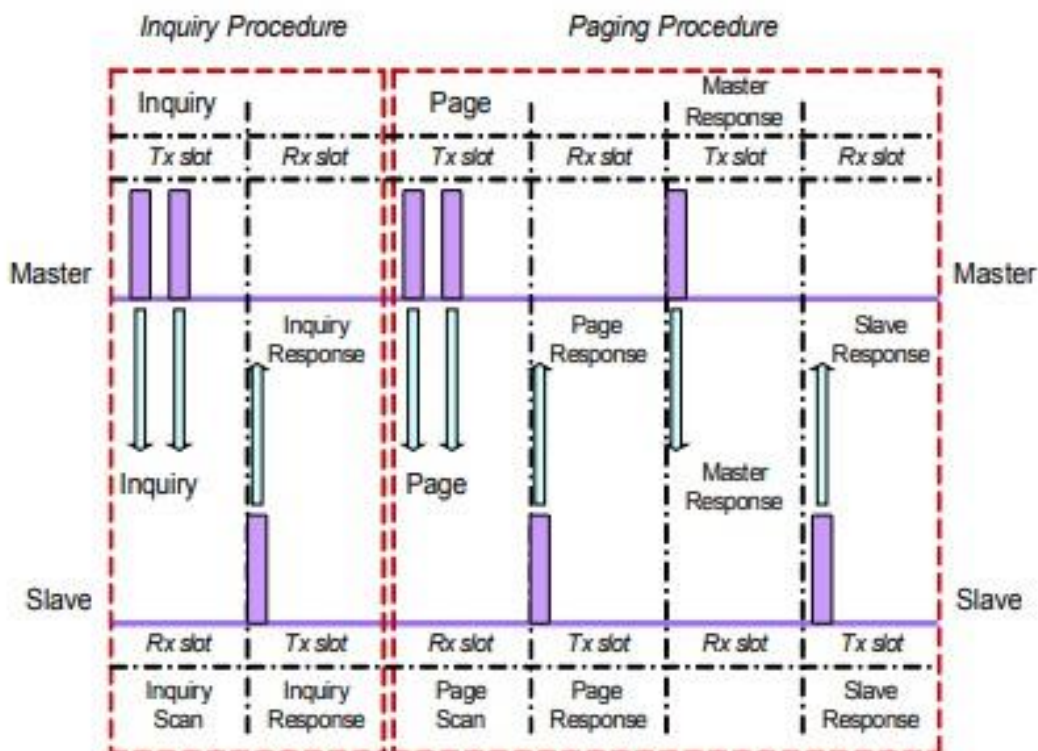


Εικόνα 5.3: Διεύθυνση MAC 48bit των συσκευών Bluetooth [75]

Κάθε μεμονωμένη συσκευή Bluetooth έχει μια μοναδική διεύθυνση των 48bit. Τα 24 πρώτα bit της διεύθυνσης αποτελούν το μοναδικό αναγνωριστικό της συσκευής OUI (Organisation Unique Identifier), το οποίο αναγνωρίζει τους κατασκευαστές (Εικ. 5.3). Το αναγνωριστικό OUI μιας συσκευής Bluetooth μπορεί να εμφανίζεται και ως ένας 12ψήφιος δεκαεξαδικός αριθμός [75]. Με σκοπό την εύκολη αναγνώρισή τους από τους χρήστες, οι συσκευές Bluetooth υποστηρίζουν και τη διαδικασία της ονοματοδοσίας, σύμφωνα με την οποία ο χρήστης μπορεί να τις ονοματίσει όπως εκείνος θέλει. Η ονοματοδοσία των συσκευών Bluetooth διέπεται από κανόνες, οι οποίοι όμως είναι λιγότερο αυστηροί. Τα ονόματα των συσκευών μπορούν να έχουν μήκος έως 248 byte, ενώ επιτρέπεται δύο διαφορετικές συσκευές να έχουν το ίδιο όνομα [71].

Η πραγματοποίηση μιας σύνδεσης μεταξύ δύο συσκευών Bluetooth είναι μια διαδικασία πολλών βημάτων που περιλαμβάνει τρεις καταστάσεις (Εικ. 5.4) [71], [76]:

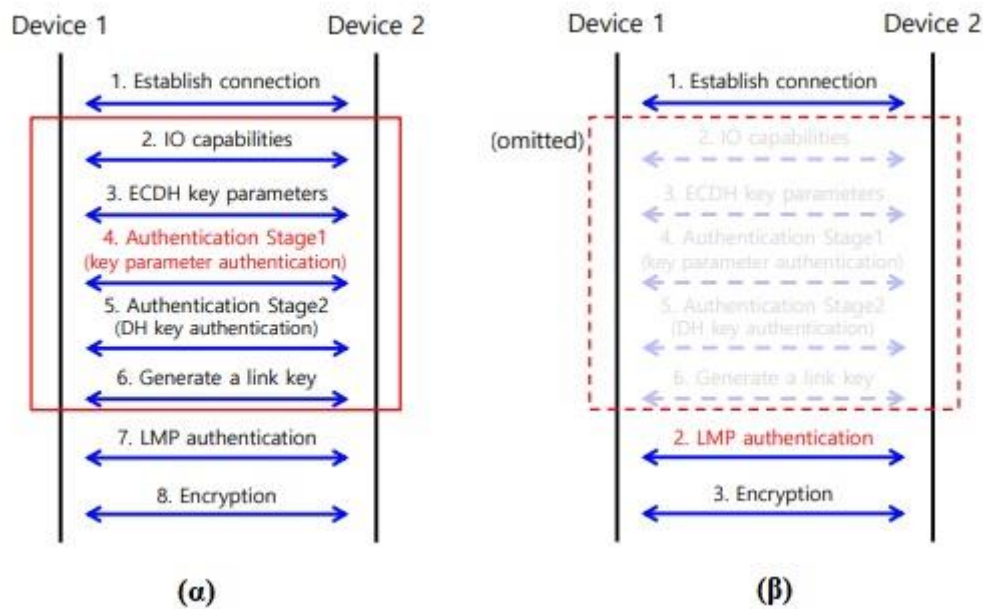
- **Αναζήτηση (inquiry):** Εάν δύο συσκευές Bluetooth δεν γνωρίζουν τίποτα η μία για την άλλη, η μία πρέπει να πραγματοποιήσει μια διαδικασία αναζήτησης για να μπορέσει να ανακαλύψει την ύπαρξη της άλλης. Για το λόγο αυτό, αποστέλλει ένα αίτημα αναζήτησης και οποιαδήποτε συσκευή το ακούσει θα ανταποκριθεί αποστέλλοντας τη διεύθυνσή της, το όνομά της και άλλες πληροφορίες
- **Δημιουργία σύνδεσης (paging):** Η διαδικασία του paging αφορά τη δημιουργία της σύνδεσης μεταξύ δύο συσκευών Bluetooth. Πριν την έναρξη της διαδικασίας, απαιτείται η γνώση των διευθύνσεων και από τις δύο συσκευές, οι οποίες μπορούν να βρεθούν με τη διαδικασία αναζήτησης. Η συσκευή που εκκινεί τη διαδικασία του paging καθίσταται η master συσκευή, ενώ η άλλη συσκευή της σύνδεσης η slave.
- **Σύνδεση (connection):** Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας του paging, οι συσκευές Bluetooth μεταβαίνουν στην κατάσταση σύνδεσης.



Εικόνα 5.4: Διαδικασία σύνδεσης συσκευών Bluetooth [76]

Το Bluetooth είναι ένα πρωτόκολλο που μπορεί να υποστηρίξει τη δημιουργία συνδέσεων εμπιστοσύνης μεταξύ των συσκευών. Αυτή η σύνδεση εμπιστοσύνης δημιουργείται μέσω μιας

διαδικασίας που ονομάζεται pairing. Η διαδικασία του pairing περιλαμβάνει τη δημιουργία ενός προσωρινού κλειδιού κατά τη σύνδεση, το οποίο χρησιμοποιείται για την κρυπτογράφηση της και δεν αποθηκεύεται. Ουσιαστικά, η διαδικασία του pairing αποτελεί μια διαδικασία ελέγχου ταυτότητας, όπου ο χρήστης πρέπει να πιστοποιήσει τη σύνδεση μεταξύ συσκευών. Η ροή της διαδικασίας ελέγχου ταυτότητας διαφέρει και συνήθως εξαρτάται από τις δυνατότητες διασύνδεσης της μιας ή της άλλης συσκευής. Κάποιες φορές, η διαδικασία του pairing είναι απλή, αφού απαιτείται απλά το πάτημα ενός κουμπιού. Άλλες φορές είναι πιο περίπλοκη, καθώς απαιτείται η εισαγωγή κάποιου κωδικού. Στις αρχικές εκδόσεις του προτύπου, αυτός ο κωδικός ήταν ο κωδικός PIN κάθε συσκευής, ο οποίος μπορεί να ποικίλλει σε μήκος και πολυπλοκότητα. Στην περίπτωση, που είναι επιθυμητή η μόνιμη σύνδεση μεταξύ δύο συσκευών Bluetooth, τότε ακολουθείται μια διαδικασία σύνδεσης, η οποία είναι γνωστή ως bonding. Η διαδικασία του bonding είναι παρόμοια με αυτή του pairing, με μόνη διαφορά ότι τα κλειδιά που ανταλλάσσονται μεταξύ των συσκευών αποθηκεύονται σε μη-πτητικές μνήμες προκειμένου να επαναχρησιμοποιηθούν. Για παράδειγμα, διαδικασία bonding θα πραγματοποιηθεί κατά τη μόνιμη σύνδεση ενός πληκτρολογίου ή ενός ποντικιού Bluetooth σε υπολογιστή. Η διαφορά των διαδικασιών pairing και bonding φαίνεται στην εικόνα 5.5. [71], [77].



Εικόνα 5.5: Διαδικασίες σύνδεσης (α) pairing, (β) bonding [77]

5.2.3 Διαχείριση ενέργειας και ασφάλεια

Η κατανάλωση ενέργειας των συσκευών Bluetooth είναι υψηλή σε σύγκριση με τις συσκευές που χρησιμοποιούν άλλα πρωτόκολλα ασύρματης επικοινωνίας. Η υψηλή αυτή κατανάλωση οφείλεται στη συνεχή αναζήτηση των συσκευών Bluetooth για σύνδεση. Καθώς οι συσκευές αυτές είναι περιορισμένων ενεργειακών πόρων, υπάρχει ανάγκη βελτιστοποίησης της διαχείρισης της ενέργειάς τους ώστε να μπορέσει να επιτευχθεί υψηλή απόδοση με λιγότερη κατανάλωση ενέργειας. Η κατανάλωση της ενέργειας των συσκευών Bluetooth μπορεί να μειωθεί σε ένα ορισμένο επίπεδο χρησιμοποιώντας τέσσερις διαφορετικούς τρόπους λειτουργίας τους, οι οποίοι μπορούν να συμβάλλουν στην αύξηση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας τους. Οι τρόποι λειτουργίας αυτοί είναι οι εξής [71], [78]:

- **Ενεργή λειτουργία (active mode):** Αφορά την κανονική λειτουργία της συσκευής, όπου στέλνει ή λαμβάνει δεδομένα

- **Λειτουργία εξοικονόμησης ενέργειας (sniff mode):** Αφορά τον τρόπο λειτουργίας κατά τον οποίο η συσκευή είναι λιγότερο ενεργή. Σε αυτήν την λειτουργία η συσκευή είναι σε κατάσταση αδράνειας αλλά μπορεί να ακούει μεταδόσεις σε ένα καθορισμένο διάστημα (π.χ. κάθε 100ms)
- **Λειτουργία αναμονής (hold mode):** Αποτελεί μια προσωρινή λειτουργία εξοικονόμησης ενέργειας όπου μια συσκευή βρίσκεται σε αδράνεια για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο και στη συνέχεια επιστρέφει στην ενεργή λειτουργία της. Κάθε master συσκευή έχει δικαίωμα να θέσει τις slave συσκευές σε κατάσταση αναμονής
- **Λειτουργία στάθμευσης (park mode):** Αποτελεί τη λειτουργία με τη μεγαλύτερη διάρκεια αδράνειας της συσκευής. Μια master συσκευή μπορεί να θέσει τις slave συσκευές σε λειτουργία στάθμευσης, από την οποία δεν μπορεί να βγει, αν δεν οριστεί από την master συσκευή

Σε κάθε συσκευή Bluetooth, υπάρχουν τέσσερις μονάδες που χρησιμοποιούνται για τη διατήρηση της ασφάλειας στο επίπεδο Link Manager [71]:

- **Διεύθυνση συσκευής Bluetooth (BD_ADDR):** Διεύθυνση 48 bit που είναι διακριτή για κάθε συσκευή Bluetooth και ορίζεται από το ινστιτούτο IEEE
- **Ιδιωτικό κλειδί ελέγχου ταυτότητας:** Ένας τυχαίος αριθμός 128 bit που χρησιμοποιείται για σκοπούς ελέγχου ταυτότητας
- **Ιδιωτικό κλειδί κρυπτογράφησης:** Κλειδί μήκους 8-128 bit που χρησιμοποιείται για κρυπτογράφηση
- **Τυχαίος αριθμός RAND (random number):** Ένας τακτικά μεταβαλλόμενος τυχαίος ή ψευδοτυχαίος αριθμός 128 bit που δημιουργείται από την ίδια τη συσκευή Bluetooth

Κάθε σύνδεση μεταξύ συσκευών Bluetooth λειτουργεί βάσει ενός επιπέδου ασφάλειας το οποίο μπορεί να μεταβληθεί ανάλογα με τις εκάστοτε απαιτήσεις των συσκευών. Το προφίλ γενικής πρόσβασης GAP (General Access Profile), που βρίσκεται στο επίπεδο middleware του προτύπου, ορίζει τρία επίπεδα ασφάλειας [71]:

- **Επίπεδο ασφάλειας 1:** Δεν παρέχεται καμία ασφάλεια
- **Επίπεδο ασφάλειας 2:** Επιβεβλημένη ασφάλεια σε επίπεδο υπηρεσίας
- **Επίπεδο ασφάλειας 3:** Επιβεβλημένη ασφάλεια σε επίπεδο σύνδεσης

Η διαφορά μεταξύ των επιπέδων ασφάλειας 2 και 3 είναι ότι στο επίπεδο ασφάλειας 3 η συσκευή Bluetooth ξεκινά διαδικασίες ασφαλείας πριν από τη δημιουργία του καναλιού επικοινωνίας. Επίσης, το πρότυπο υποστηρίζει διαφορετικά επίπεδα ασφάλειας για συσκευές και υπηρεσίες. Για τις συσκευές, υπάρχουν 2 επίπεδα ασφάλειας: "αξιόπιστη συσκευή" και "μη αξιόπιστη συσκευή". Μια αξιόπιστη συσκευή έχει σαφώς απεριόριστη πρόσβαση σε όλες τις υπηρεσίες. Για τις υπηρεσίες, περιγράφονται 3 επίπεδα ασφάλειας: "υπηρεσίες που απαιτούν εξουσιοδότηση και έλεγχο ταυτότητας", "υπηρεσίες που απαιτούν μόνο έλεγχο ταυτότητας" και "υπηρεσίες που είναι ανοιχτές σε όλες τις συσκευές" [71].

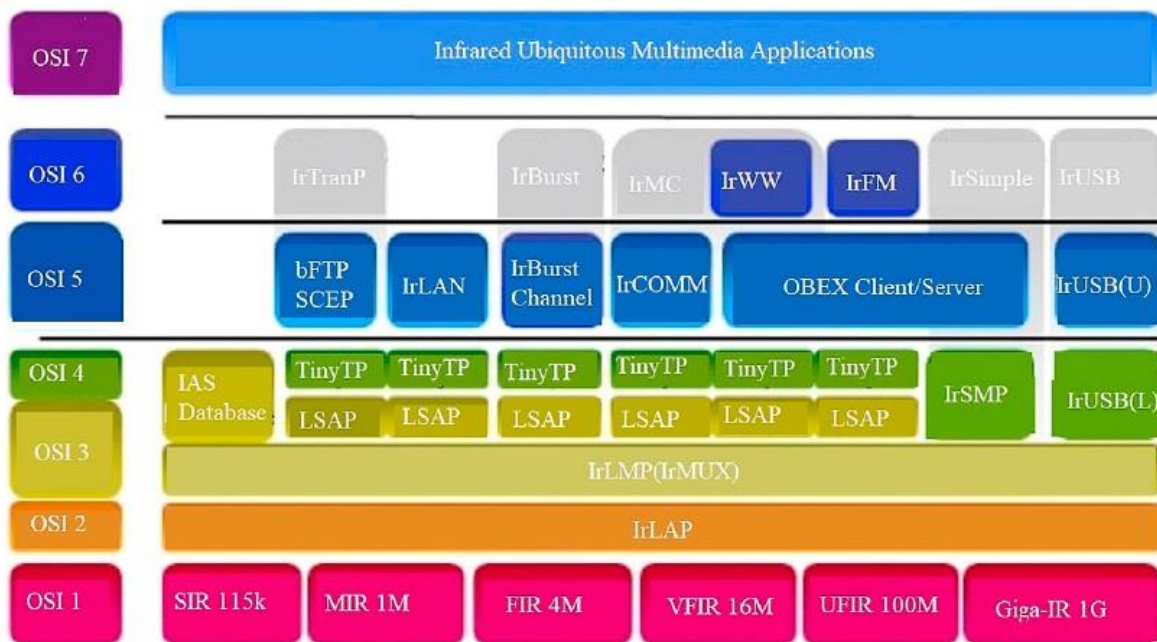
5.3 IrDA

Η ένωση IrDA ιδρύθηκε το 1994 από περίπου 50 εταιρείες με σκοπό τη δημιουργία ενός πλήρους συνόλου πρωτοκόλλων για ασύρματες επικοινωνίες με χρήση υπερύθρων. Η βασική φιλοσοφία των πρωτοκόλλων IrDA ήταν η ασύρματη μεταφορά δεδομένων σε μικρές αποστάσεις (μέγιστης εμβέλειας 1m). Τα πρωτόκολλα IrDA εφαρμόστηκαν σε αρκετούς τύπους φορητών συσκευών, όπως κινητά τηλέφωνα, φορητούς υπολογιστές, φωτογραφικές μηχανές, εκτυπωτές και ιατρικές συσκευές. Τα κύρια χαρακτηριστικά αυτού του είδους ασύρματης οπτικής επικοινωνίας είναι η ασφαλής μεταφορά δεδομένων, η λειτουργία LoS και ο πολύ χαμηλός ρυθμός σφάλματος bit (Bit Error Rate - BER), που την καθιστούν πολύ αποτελεσματική [79].

Η δημοτικότητα των πρωτοκόλλων IrDA διήρκησε μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 2000, καθώς αντικαταστάθηκε από άλλες ασύρματες τεχνολογίες όπως το Wi-Fi και το Bluetooth, που ευνοούνται επειδή δεν χρειάζονται άμεση οπτική επαφή για να λειτουργήσουν και επομένως μπορούν να υποστηρίξουν φορητές συσκευές, όπως ασύρματα πληκτρολόγια και ποντίκια. Παρόλα αυτά, εξακολουθεί να χρησιμοποιείται σε ορισμένα περιβάλλοντα όπου οι παρεμβολές καθιστούν μη αξιοποιήσιμες τις ασύρματες τεχνολογίες που βασίζονται στα ραδιοκύματα [80]. Επίσης, καθώς τα προϊόντα IrDA εξακολουθούσαν να είναι λιγότερο ακριβά και να μην παρουσιάζουν τα ζητήματα ασφαλείας που αντιμετωπίζουν οι ασύρματες τεχνολογίες όπως το Bluetooth, το 2005 έγινε προσπάθεια αναβίωσης των πρωτοκόλλων IrDA με τη χρήση του πρωτοκόλλου IrSimple σε ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές και κάμερες παρέχοντας μεταφορές εικόνων κάτω του 1s μεταξύ κινητών τηλεφώνων, εκτυπωτών και συσκευών προβολής [81]. Για παράδειγμα, ορισμένες φωτογραφικές μηχανές DSLR της Pentax ενσωμάτωσαν το IrSimple για μεταφορά εικόνας και gaming [82].

5.3.1 Επισκόπηση πρωτοκόλλων

Η στοίβα πρωτοκόλλων του IrDA βασίζεται στο μοντέλο αναφοράς OSI. Επομένως χωρίζεται σε επτά λογικά επίπεδα (Εικ. 5.6) [83]: (α) το φυσικό επίπεδο, (β) το επίπεδο ζεύξης δεδομένων, (γ) το επίπεδο δικτύου, (δ) το επίπεδο μεταφοράς, (ε) το επίπεδο συνεδρίας, (στ) το επίπεδο παρουσίασης και (ζ) το επίπεδο εφαρμογών.



Εικόνα 5.6: Στοίβα πρωτοκόλλων IrDA [83]

Το σύνολο πρωτοκόλλων IrDA περιλαμβάνει κάποια υποχρεωτικά και κάποια προαιρετικά πρωτόκολλα. Στα υποχρεωτικά πρωτόκολλα περιλαμβάνονται [84]: (α) τα πρωτόκολλα και οι υπηρεσίες του επιπέδου PHY, (β) το πρωτόκολλο IrLAP (επίπεδο ζεύξης δεδομένων) και (γ) τα πρωτόκολλα IrLMP (επίπεδο δικτύου) και IAS (υποεπίπεδο δικτύου). Από τα προαιρετικά πρωτόκολλα, τα σημαντικότερα είναι [84]: (α) το πρωτόκολλο TinyTP του επιπέδου μεταφοράς και (β) τα πρωτόκολλα OBEX, IrCOMM και IrLAN του επιπέδου συνεδρίας.

5.3.2 Υποχρεωτικά πρωτόκολλα

Το φυσικό επίπεδο της στοίβας πρωτοκόλλων του IrDA περιέχει την πραγματική μονάδα του μορφοτροπέα IR. Είναι υπεύθυνο για τη μετάδοση και λήψη σημάτων IR και την κωδικοποίηση/αποκωδικοποίηση αυτών των σημάτων για το επίπεδο ζεύξης δεδομένων (IrLAP). Το φυσικό στρώμα ορίζει επίσης τα χαρακτηριστικά των οπτικών ζεύξεων, τις τεχνικές διαμόρφωσης και κωδικοποίησης και πραγματοποιεί έλεγχο κυκλικού πλεονασμού CRC (Cyclic Redundancy Check) [85].

Η χρήση των υπερύθρων (IR) για μετάδοση δημιουργούν διάφορους περιορισμούς, που άλλα συστήματα που χρησιμοποιούν ραδιοζεύξεις δεν παρουσιάζουν. Αυτοί οι περιορισμοί περιλαμβάνουν την εμβέλεια μετάδοσης, την ύπαρξη LoS και την οπτική γωνία εκπομπής και λήψης. Έτσι η εμβέλεια κάλυψης ενός δικτύου WPAN τεχνολογίας IrDA είναι μεταξύ 20cm και 1m (σε μερικές περιπτώσεις 2m), ενώ οι πομποί και οι δέκτες IrDA παρουσιάζουν περιορισμό γωνίας από τον οπτικό άξονα 15ο-30ο και 15ο, αντίστοιχα [84].

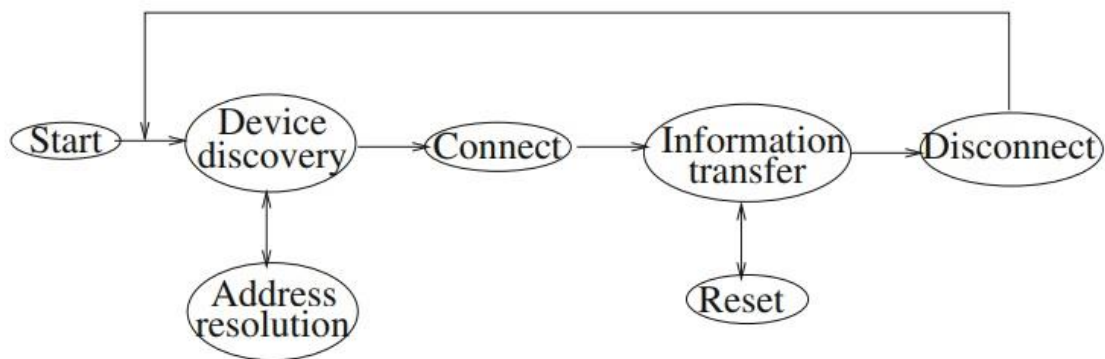
Το πρότυπο IrDA προσφέρει υπηρεσίες διαφορετικών ρυθμών δεδομένων [83]: (α) Serial Infrared (SIR) (9,6 – 115,2kbps), (β) Mid-Infrared (MIR) (0,576 – 1,152Mbps), (γ) Fast Infrared (FIR) (4Mbps), (δ) Very Fast Infrared (VFIR) (16Mbps), (ε) Ultra-fast Infrared (UFIR) (96Mbps) και (στ) Giga-Infrared (Giga-IR) (512Mbps – 1Gbps). Μέρος του φυσικού επιπέδου αποτελεί και ένα υποεπίπεδο λογισμικού, το οποίο είναι γνωστό ως framer. Το επίπεδο framer αποτελεί ουσιαστικά μια διεπαφή μεταξύ του φυσικού επιπέδου IrDA και του επιπέδου IrLAP, προωθώντας προς αυτό τα πακέτα που προέρχονται από τις μονάδες των μορφοτροπέων IR. Το μέγεθος του πλαισίου των πακέτων εξαρτάται κυρίως από τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και κυμαίνεται μεταξύ 64 byte και 64 kbyte. Μπλοκ δεδομένων έως 8 Mbyte μπορούν να αποσταλούν μέσω μίας μετάδοσης. Μεγαλύτερα μπλοκ δεδομένων μπορούν να μεταφερθούν με την διαδοχική αποστολή πολλαπλών πλαισίων. Ένας τέτοιος μηχανισμός αποστολής δεδομένων, σε συνδυασμό με ένα χαμηλό ποσοστό σφάλματος BER ($<10^{-9}$), δίνει στην επικοινωνία IrDA το πλεονέκτημα της μεγαλύτερης αποτελεσματικότητας σε σύγκριση με άλλες ασύρματες λύσεις [86].

Το IrLAP (Infrared Link Access Protocol) αντιστοιχεί στο επίπεδο ζεύξης (σύνδεσης) δεδομένων του μοντέλου OSI. Βασίζεται σε υψηλού επιπέδου και σύγχρονο έλεγχο ζεύξης δεδομένων. Για την αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων, το IrLAP υποστηρίζει αναμετάδοση δεδομένων, έλεγχο ροής χαμηλού επιπέδου και ανίχνευση σφαλμάτων [84].

Η λειτουργία του IrLAP υποστηρίζει μεταγωγή πακέτων και αρχιτεκτονική master-slave. Σε κάθε σύνδεση, μια συσκευή παίζει το ρόλο του master και η άλλη του slave, κάθε μια από τις οποίες έχουν διακριτές αρμοδιότητες. Μια master συσκευή, όπως ένας σταθερός ή φορητός υπολογιστής, δεν πρέπει να αντιμετωπίζει πρόβλημα πόρων. Οι βασικές αρμοδιότητές του περιλαμβάνουν την αποστολή πλαισίων ελέγχου για την έναρξη μιας σύνδεσης, τον έλεγχο της ροής δεδομένων και την αντιμετώπιση των μη ανακτήσιμων σφαλμάτων της ζεύξης. Αντίθετα, η αρμοδιότητα μιας slave συσκευής, όπως ένας εκτυπωτής ή άλλες λιγότερο περίπλοκες συσκευές περιορισμένων πόρων, είναι να στέλνει μόνο πλαίσια απόκρισης [84].

Σκοπός του επιπέδου IrLAP είναι η δημιουργία σύνδεσης μεταξύ των συσκευών IrDA. Για το λόγο αυτό, το επίπεδο IrLAP πρέπει να ασχοληθεί με την ανακάλυψη συσκευών IrDA, την αντιμετώπιση του ζητήματος των διενέξεων διεύθυνσης και τη διαχείριση των αιτημάτων και των επιβεβαιώσεων τους στα ανώτερα επίπεδα. Κατά την προετοιμασία της σύνδεσης, το IrLAP επιλέγει μια τυχαία διεύθυνση 32 bit για τις συσκευές, η οποία είναι δυνατό να είναι η ίδια για πολλές συσκευές. Το

IrLAP έχει όμως ενσωματωμένους μηχανισμούς για τον εντοπισμό και την επίλυση των διενέξεων που προκύπτουν από την επιλογή της ίδιας διεύθυνσης. Το IrLAP μπορεί να λειτουργήσει με δύο τρόπους, που αντιστοιχούν στο αν υπάρχει ή όχι σύνδεση. Οι δύο αυτοί τρόποι λειτουργίας είναι η κανονική λειτουργία αποσύνδεσης (Normal Disconnect Mode - NDM) και η λειτουργία κανονικής απόκρισης (Normal Response Mode - NRM). Έτσι, μετά την προετοιμασία μιας σύνδεσης, το IrLAP εισέρχεται στη λειτουργία NDM, όπου η συσκευή πρέπει να βρει εάν το μέσο είναι απασχολημένο. Η απουσία δραστηριότητας για περισσότερα από 500ms συνεπάγεται ότι το μέσο είναι ελεύθερο και μπορεί να δημιουργηθεί σύνδεση. Το IrLAP εισέρχεται στον τρόπο λειτουργίας NRM, όταν μια συσκευή είναι σε κατάσταση σύνδεσης. Οι μεταβάσεις κατάστασης στη λειτουργία του IrLAP φαίνονται στην εικόνα 5.7 [84].



Εικόνα 5.7: Ροή λειτουργίας επιπέδου IrLAP [84]

Κατά τη διαδικασία ανακάλυψης συσκευής IrDA, η master συσκευή προσπαθεί να εντοπίσει την ύπαρξη συσκευών εντός του εύρους επικοινωνίας της. Εάν ορισμένες από τις υπάρχουσες συσκευές έχουν τις ίδιες διεύθυνσεις, τότε ξεκινά η διαδικασία επίλυσης των διενέξεων διεύθυνσης, κατά την οποία η master συσκευή ζητά από τις άλλες συσκευές την επιλογή άλλης διεύθυνσης. Αν μετά την αλλαγή της διεύθυνσης, εξακολουθεί να υπάρχει ζήτημα, η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Μετά την ολοκλήρωσή της, το επίπεδο εφαρμογής είναι εκείνο που αποφασίζει τη δημιουργία σύνδεσης με κάποια από τις συσκευές που ανακαλύφθηκαν. Η σύνδεση πραγματοποιείται όταν επίπεδο εφαρμογής αποστέλλει ένα αίτημα σύνδεσης, το οποίο εξυπηρετείται από το IrLAP μέσω της δημιουργίας ενός πλαισίου SNMP (Set Normal Response command Mode), στο οποίο περιλαμβάνεται ένα polling bit. Η χρήση του συγκεκριμένου bit αποσκοπεί στην αίτηση απόκρισης για σύνδεση από κάποια συσκευή και ουσιαστικά υποδεικνύει την ύπαρξη επιθυμίας από τη συσκευή που αποστέλλει το αίτημα για δημιουργία σύνδεσης. Εάν η συσκευή που λαμβάνει το αίτημα σύνδεσης το αποδεχτεί, απαντά με ένα μη αριθμημένο πλαίσιο αποδοχής ACK. Με αυτόν τον τρόπο, κατά τη δημιουργία της σύνδεσης, η συσκευή που έστειλε το αίτημα σύνδεσης γίνεται η master συσκευή, ενώ εκείνη που το αποδέχθηκε η slave συσκευή [84].

Το IrLMP (Infrared Link Management Protocol) αποτελεί το τρίτο επίπεδο (επίπεδο δικτύου) της προδιαγραφής IrDA και μπορεί να υποστηρίξει διάφορες λειτουργίες, όπως η πολυπλεξία των συνδέσεων, η πρόσβαση σε πληροφορίες σχετικά με τις υπηρεσίες οι οποίες υπάρχουν σε άλλες συσκευές και ο έλεγχος των συνδέσεων σχετικά με τη δυνατότητα δημιουργίας δικτύων ad hoc. Η πραγματοποίηση αυτών των λειτουργιών γίνεται με τη βοήθεια των πρωτοκόλλων διαχείρισης της πολυπλεξίας της ζεύξης (LM-MUX) και διαχείρισης της πρόσβασης στις πληροφορίες της ζεύξης (LM-IAS) [84].

Το πρωτόκολλο LM-MUX (Link Management MULTipleXing), γνωστό και ως πολυπλέκτης IrLMP, παρέχει υποστήριξη πολυπλεξίας ζεύξεων για το επίπεδο εφαρμογών, δηλαδή δίνει τη δυνατότητα σε πολλούς πελάτες να συνδεθούν σε μία σύνδεση IrLAP, απαλλάσσοντάς τους από την απαίτηση για συντονισμό πρόσβασης σε μία μόνο σύνδεση IrLAP. Για να γίνει αυτό, το πρωτόκολλο LM-MUX χρησιμοποιεί αρκετές από τις υπηρεσίες IrLAP, όπως την ανακάλυψη συσκευών, τον έλεγχο των συνδέσεων και τη μεταφορά δεδομένων [84]. Το LM-MUX χρησιμοποιεί το μοναδικό κανάλι που παρέχεται από το IrLAP και υλοποιεί πολλά ανεξάρτητα λογικά κανάλια. Αυτά τα κανάλια LM-MUX χρησιμοποιούνται από εφαρμογές ανώτερου επιπέδου της ίδιας ή διαφορετικών συσκευών, λειτουργώντας με έναν από τους εξής τρόπους [86]: (α) λειτουργία πολυπλεξίας ή (β) αποκλειστική λειτουργία. Στην πρώτη λειτουργία (Multiplexed Mode), το LM-MUX χρησιμοποιεί πολλά από τα λογικά κανάλια που υλοποιεί και πολυπλέκει τα πακέτα που αποστέλλονται μεταξύ των συσκευών και των εφαρμογών, χωρίς όμως να παρέχει κανέναν έλεγχο ροής τους. Στην αποκλειστική λειτουργία (Exclusive Mode) χρησιμοποιείται μόνο το κανάλι που παρέχεται από το IrLAP, με εκμετάλλευση όλων των δυνατοτήτων του, όπως η χρήση του ελέγχου ροής που υλοποιείται στο IrLAP ως βάση για τον έλεγχο ροής της εκάστοτε εφαρμογής [86].

Το πρωτόκολλο LM-IAS (Link Management Information Access Service) παρέχει υπηρεσία καταλόγου μέσω της οποίας οι εφαρμογές μπορούν να ανακαλύψουν συσκευές και να αποκτήσουν πρόσβαση στη βάση πληροφοριών τους. Επομένως, το LM-IAS λειτουργεί σαν ένα μητρώο υπηρεσιών, διατηρώντας πληροφορίες σχετικά με τις υπηρεσίες που παρέχονται από μια συσκευή. Το LM-IAS παρέχει όλα τα απαραίτητα εργαλεία για την αναζήτηση αυτών των διαθέσιμων πληροφοριών. Η λειτουργία του LM-IAS βασίζεται στην υλοποίηση της αρχιτεκτονικής client-server. Όλες αυτές οι διαδικασίες βασίζονται στη χρήση ενός απλού πρωτοκόλλου πρόσβασης πληροφοριών IAP (Information Access Protocol) το οποίο πραγματοποιεί επικοινωνίες μεταξύ δύο οντοτήτων IAS [84], [86].

5.3.3 Προαιρετικά πρωτόκολλα

Το πρωτόκολλο TinyTP αποτελεί το πρωτόκολλο μεταφοράς του IrDA. Είναι υπεύθυνο για τη διατήρηση του ελέγχου ροής ανά κανάλι και γενικά επιβλέπει την υλοποίηση ομαλής επικοινωνίας μεταξύ των διαφόρων οντοτήτων των πρωτοκόλλων. Η ύπαρξη ενός τέτοιου πρωτοκόλλου ελέγχου ροής απαιτείται ιδιαίτερα στις περιπτώσεις της λειτουργίας πολυπλεξίας του LM-MUX, όπου όπως αναφέρθηκε προηγουμένως δεν παρέχεται τέτοιος έλεγχος. Μια δεύτερη λειτουργία του TinyTP είναι η υλοποίηση ενός μηχανισμού κατάτμησης και επανασυναρμολόγησης. Στον συγκεκριμένο μηχανισμό, το TinyTP διαχωρίζει τα μεγάλα δεδομένα σε επιμέρους τμήματα, τα οποία ονομάζονται μονάδες δεδομένων υπηρεσίας SDU (Service Data Units). Το μέγιστο μέγεθος κάθε μονάδας SDU διαπραγματεύεται τη στιγμή της δημιουργίας μιας σύνδεσης TinyTP/IrLMP. Στο άκρο της λήψης τα επιμέρους τμήματα θα πρέπει να συναρμολογηθούν ξανά. Το πρότυπο IrDA δίνει τη δυνατότητα στις εφαρμογές να χρησιμοποιούν τις υπηρεσίες που παρέχονται από το TinyTP ή να υλοποιούν τους δικούς τους αλγόριθμους ελέγχου ροής σε άμεση συνεργασία με τις υπηρεσίες LM-MUX. Επίσης, τους δίνει τη δυνατότητα ανάπτυξης και χρήσης διαφορετικών πρωτοκόλλων μεταφοράς αντί του TinyTP, κάτι που αναδεικνύει και τον προαιρετικό χαρακτήρα του πρωτοκόλλου [84], [86].

Το IrOBEX (Infrared Object Exchange) είναι ένα πρωτόκολλο του επιπέδου συνεδρίας (session layer), υπεύθυνο για τη μεταφορά αρχείων και άλλων αντικειμένων δεδομένων. Αν και λειτουργία του ομοιάζει με αυτή του πρωτοκόλλου HTTP (Hypertext Transfer Protocol), ωστόσο, δεν διαθέτει πόρους όπως το HTTP και οι συσκευές που στοχεύει έχουν διαφορετικά μοντέλα χρήσης από αυτά στο web. Επιπλέον, το HTTP είναι περισσότερο μια pull αρχιτεκτονική ανταλλαγής αντικειμένων,

ενώ το IrOBEX είναι ομοιόμορφα ισορροπημένο, υποστηρίζοντας διαδικασίες pull και push. Ο σχεδιασμός του είναι αρκετά περιεκτικός, γεγονός που απλοποιεί την ανάπτυξη εφαρμογών που βασίζονται στην επικοινωνία. Το πρωτόκολλο υποστηρίζει τη μορφή επικοινωνίας αίτησης-απόκρισης της αρχιτεκτονικής client-server. Η μετάδοση των αντικειμένων πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας τις λειτουργίες GET και PUT. Λόγω του περιορισμένου μεγέθους των πακέτων, οι λειτουργίες GET και PUT για μεγάλα αντικείμενα χωρίζονται σε πολλαπλά πακέτα OBEX. Το πρότυπο απαιτεί ότι κάθε πακέτο αιτήματος που μεταδίδεται είτε σε λειτουργία GET είτε σε λειτουργία PUT πρέπει να αναγνωριστεί από ένα πακέτο απόκρισης CONTINUE. Μια τέτοια λειτουργία είναι κατάλληλη μόνο για ανταλλαγή μικρής ποσότητας πληροφοριών και παρουσιάζει μειονεκτήματα σε περιπτώσεις ανταλλαγής πληροφοριών μεγάλης κλίμακας, λόγω της ημι-αμφίδρομης φύσης των συνδέσεων IrDA [84].

Το πρωτόκολλο IrCOMM (Infrared Communication) υποστηρίζει τη σειριακή και την παράλληλη επικοινωνία μεταξύ των συσκευών. Με τον τρόπο αυτό δίνεται η δυνατότητα σε εφαρμογές παλαιότερου τύπου, που χρησιμοποιούν σειριακή και παράλληλη επικοινωνία, να επικοινωνήσουν μέσω χρήσης υπερύθρων. Ουσιαστικά, το IrCOMM βοηθά στην αντικατάσταση των καλωδίων με εικονικά καλώδια και επομένως υποστηρίζει την επικοινωνία των συσκευών με άλλες συσκευές (π.χ. σύνδεση φορητών υπολογιστών με τα περιφερειακά τους, όπως πληκτρολόγιο, ποντίκι, εκτυπωτής, κλπ). Ο άμεσος συγχρονισμός των συσκευών αυτών πραγματοποιείται μέσω επιλογής μιας εικονικής θύρας COM της βασικής συσκευής (master) [84].

Τέλος, το πρωτόκολλο IrLAN (Infrared LAN) δίνει τη δυνατότητα σύνδεσης μιας συσκευής IrDA σε ένα δίκτυο LAN. Αυτή η προαιρετική δυνατότητα του IrDA υποστηρίζεται για τις υπηρεσίες FIR (με ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων 4Mbps) και μετά, καθώς μόνο τότε η σύνδεση IrDA κατέστη αρκετά γρήγορη ώστε να μπορεί να υπάρξει επικοινωνία με διαπαφές δικτύου LAN χωρίς προβλήματα. Το IrLAN μπορεί να υποστηρίξει τις εξής λειτουργίες [84], [86]:

- τη σύνδεση ενός υπολογιστή IrDA σε ένα δίκτυο LAN μέσω μιας συσκευής σημείου πρόσβασης που, για τον υπολογιστή, λειτουργεί ως προσαρμογέα δικτύου
- την απευθείας διασύνδεση μεταξύ δύο υπολογιστών IrDA, οι οποίοι μπορούν να επικοινωνούν σαν να ήταν διασυνδεδεμένοι μέσω ενός δικτύου LAN
- τη σύνδεση ενός υπολογιστή IrDA σε ένα δίκτυο LAN μέσω ενός άλλου υπολογιστή IrDA που είναι ήδη συνδεδεμένος σε αυτό

5.3.4 Ασφάλεια

Τα πρωτόκολλα IrDA δεν περιλαμβάνουν τεχνικές κρυπτογράφησης ή άλλα μέσα ασφάλειας. Ωστόσο, θεωρούνται ασφαλή λόγω της περιορισμένης εμβέλειάς τους και του γεγονότος ότι απαιτούν LoS. Για την πραγματοποίηση κάποιου είδους επιθέσεως κατά των δικτύων IrDA, όπως για παράδειγμα την λαθρακρόαση της επικοινωνίας (eavesdropping), ο επίδοξος επιτιθέμενος θα πρέπει να βρίσκεται σε άμεση γειτνίαση με τις συσκευές που επικοινωνούν και εντός των ορίων των οπτικών γωνιών εκπομπής και λήψης [87]. Παρόλα αυτά, μελέτες έχουν αποδείξει ότι επιθέσεις eavesdropping είναι δυνατόν να πραγματοποιηθούν, μέσω παρεμβολής στο ανακλώμενο υπέρυθρο σήμα και φιλτράροντας το περιβάλλοντα θόρυβο [88].

Κεφάλαιο 6ο: Ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα

6.1 Δίκτυα WMAN

Η χρήση του όρου WMAN χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη δικτύωση, αλλά και ένα σύνολο τεχνολογιών που παρέχουν ασύρματη επικοινωνία σε μητροπολιτικές περιοχές. Οι τεχνολογίες WMAN αποτελούσαν συνήθως παλαιότερα συμπλήρωμα ενσύρματων τεχνολογιών, όπως οι RPR (Resilient Packet Ring), SONET/SDH (Synchronous Optical Network/Synchronous Digital Hierarchy), SONET μέσω IP, Gigabit Ethernet και WDM (Wavelength Division multiplexing). Η περιοχή κάλυψης ενός δικτύου WMAN εμπίπτει μεταξύ της εμβέλειας των δικτύων WLAN/WPAN και αυτής των ασύρματων δικτύων WWAN. Οι μέθοδοι πρόσβασης στο μέσο που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα WMAN έχουν κάποια ομοιότητα με εκείνες των τεχνολογιών ευρυζωνικής ενσύρματης πρόσβασης, όπως οι τεχνολογίες DSL (Digital Subscriber Line) και DOCSIS (Data over Cable Service Interface Specifications) [89].

Τα δίκτυα WMAN παρέχουν υπηρεσίες σε μητροπολιτικές ή περιφερειακές (αστικές ή αγροτικές) περιοχές, σε ακτίνα 50km. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για σύνδεση δικτύων WLAN/WPAN και παρέχουν πρόσβαση σε υπηρεσίες δεδομένων, φωνής, βίντεο και πολυμέσων. Αν και τα δίκτυα WMAN μπορούν να παρέχουν κάλυψη στο πλαίσιο μιας ολόκληρης πόλης, η χρήση του μπορεί να εφαρμοστεί και σε περιοχές μικρότερης γεωγραφικής έκτασης, όπως μια πανεπιστημιούπολη ή μια συγκρότημα κτιρίων. Ένα δίκτυο WMAN μπορεί να ανήκει σε φορέα εκμετάλλευσης δικτύου ή πάροχο υπηρεσιών, σε πολλές περιπτώσεις ως επέκταση των υπηρεσιών που παρέχονται από άλλα ενσύρματα ή ασύρματα δίκτυα. Η υλοποίηση ενός δικτύου WMAN μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω της χρήσης πολλών ασύρματων τεχνολογιών, όπως οι [90], [91]: LMDS (Local Multipoint Distributed Service), MMDS (Multi-Channel Multipoint Distributed Service), FSO (Free Space Optics), WLL (Wireless Local Loop) και WiMAX (Wireless Interoperable Metropolitan Area Exchange).

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας θα γίνει παρουσίαση μόνο της τεχνολογίας WiMAX.

6.2 WiMAX

Το WiMAX αποτελεί μια οικογένεια προτύπων ασύρματης ευρυζωνικής επικοινωνίας που βασίζονται στο σύνολο προτύπων IEEE 802.16, τα οποία παρέχουν επιλογές φυσικού επιπέδου (PHY) και ελέγχου πρόσβασης μέσων (MAC). Το 1999, η επιτροπή IEEE 802 δημιούργησε την ομάδα εργασίας 802.16 με σκοπό την ανάπτυξη προτύπων, σε μια προσπάθεια κάλυψης των αυξανόμενων αναγκών των χρηστών για πρόσβαση σε υπηρεσίες ασύρματης ευρυζωνικής σύνδεσης BWA (Broadband Wireless Access). Τα βασικά χαρακτηριστικά που θα έπρεπε να παρουσιάζουν τα πρότυπα IEEE 802.16 αφορούσαν την προτυποποίηση της διεπαφής αέρα και των λειτουργιών των δικτύων που σχετίζονταν με την παροχή υπηρεσιών BWA [92]:

- χρήση ασύρματων ζεύξεων ραδιοκυμάτων (μικροκυμάτων ή κυμάτων χιλιοστών)
- χρήση του αδειοδοτημένου φάσματος
- εμβέλεια σε μητροπολιτικές περιοχές
- παροχή υπηρεσιών μέσω δημόσιου δικτύου σε πελάτες
- χρήση αρχιτεκτονικής P2MP (point-to-multipoint) με σταθερές κεραιές σε υψηλά σημεία (π.χ. ταρατσες κτιρίων)
- παροχή αποτελεσματικής μετάδοσης ετερογενών δεδομένων, υποστηρίζοντας την ποιότητα QoS
- δυνατότητα ευρυζωνικής μετάδοσης (>2 Mbps)

Αν και η οικογένεια προτύπων IEEE 802.16 ονομάζεται επίσημα τεχνολογίες δικτύων WMAN, η ευρέως διαδεδομένη ονομασία WiMAX επιλέχθηκε από το WiMAX Forum, που δημιουργήθηκε τον Ιούνιο του 2001. Σκοπός ήταν η πιστοποίηση και η προώθηση της υιοθέτησης των προϊόντων και των υπηρεσιών WiMAX, που βασίζονταν στα πρότυπα IEEE 802.16, καθώς και ο καθορισμός της διαλειτουργικότητας των συσκευών WiMAX και των προδιαγραφών της διεπαφής αέρα, του δικτύου και της περιαγωγής [93].

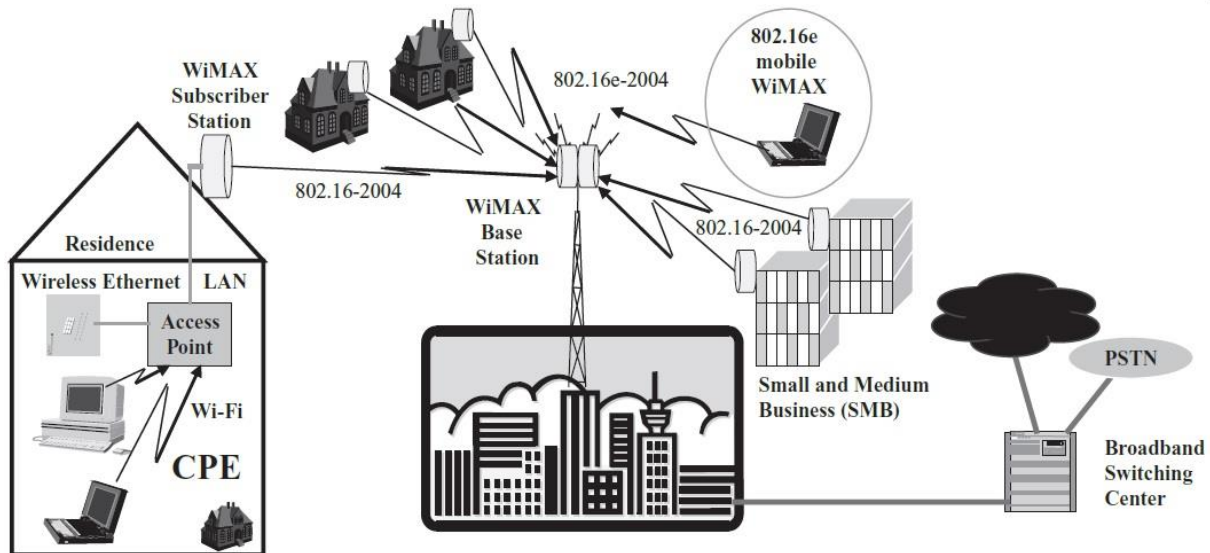
Στις βασικότερες εκδόσεις της οικογένειας προτύπων IEEE 802.16 περιλαμβάνονται οι εξής [94]:

- **IEEE 802.16d-2004:** που καθορίζει τις προδιαγραφές των σταθερών δικτύων WMAN
- **IEEE 802.16e-2005:** που καθορίζει τις προδιαγραφές των φορητών/κινητών δικτύων WMAN
- **IEEE 802.16m (Mobile WiMAX 2 ή WirelessMAN-Advanced):** υποψήφια τεχνολογία για τα δίκτυα 4G, συνυποψήφια της LTE
- **WiMAX 2.1 (WiMAX 2+):** έκδοση συμβατή με τις προηγούμενες γενιές WiMAX και διαλειτουργική με την LTE

6.2.1 Αρχιτεκτονική δομή δικτύων WMAN-WiMAX

Η οικογένεια προτύπων WiMAX επικεντρώνεται σε δύο τύπους μοντέλων χρήσης, αυτά των δικτύων WMAN-WiMAX σταθερής πρόσβασης (fixed access) και των δικτύων WMAN-WiMAX κινητής πρόσβασης (mobile access). Το βασικό στοιχείο που διαφοροποιεί αυτά τα δίκτυα είναι η ταχύτητα μεταφοράς των δεδομένων που είναι σχεδιασμένα να διαχειρίζονται. Βασιζόμενα στην έννοια της κινητικότητας, τα συστήματα ασύρματης πρόσβασης έχουν σχεδιαστεί για να λειτουργούν ώστε να καλύπτουν τις ανάγκες των χρηστών τους που βρίσκονται σε κίνηση χωρίς όμως να αντιμετωπίζουν καμία διακοπή στην παρεχόμενη υπηρεσία [95]. Η έννοια της κινητικότητας μπορεί να απευθύνεται σε τρεις κατηγορίες χρηστών: τους σταθερούς χρήστες, τους πεζούς και τα οχήματα. Με βάση αυτή τη διάκριση, ένα δίκτυο WMAN-WiMAX σταθερής πρόσβασης μπορεί να υποστηρίξει τους σταθερούς χρήστες και τους πεζούς, ενώ ένα δίκτυο WMAN-WiMAX κινητής πρόσβασης μπορεί να εξυπηρετεί την κατηγορία των οχημάτων [96].

Ένα τυπικό παράδειγμα δικτύου WMAN-WiMAX που υποστηρίζει σταθερή και κινητή πρόσβαση φαίνεται στην εικόνα 6.1 [89]. Η χρήση των ευρυζωνικών υπηρεσιών από τους καταναλωτές στο μοντέλο σταθερής πρόσβασης WiMAX βασίστηκε σε αυτήν της παροχής υπηρεσιών μέσω ενσύρματων γραμμών, με πολλές από τις απαιτήσεις να περιορίζονται στη διεπαφή αέρα. Επειδή οι επικοινωνίες πραγματοποιούνται μέσω ασύρματων συνδέσεων μεταξύ του εξοπλισμού εγκατάστασης των πελατών WiMAX (WiMAX Customer Premise Equipment - CPE) και ενός απομακρυσμένου σταθμού βάσης WiMAX χωρίς οπτική επαφή, οι απαιτήσεις για ασφάλεια σύνδεσης είναι μεγαλύτερες από αυτές που απαιτούνται στην περίπτωση της παροχής υπηρεσιών μέσω ενσύρματης σύνδεσης. Για το λόγο αυτό, τα πρότυπα IEEE 802.16 έχουν ενσωματωμένους μηχανισμούς ασφαλείας που επαρκούν για την παροχή υπηρεσιών μέσω του μοντέλου σταθερής πρόσβασης WiMAX. Μια άλλη πρόκληση που αντιμετωπίστηκε κατά το σχεδιασμό της διεπαφής αέρα στο μοντέλο σταθερής πρόσβασης WiMAX ήταν η ανάγκη δημιουργίας ραδιοζεύξεων υψηλής απόδοσης, ικανές να υποστηρίξουν ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων συγκρίσιμους με τις ενσύρματες ευρυζωνικές υπηρεσίες, χρησιμοποιώντας εξοπλισμό που μπορεί να εγκατασταθεί σε εσωτερικούς χώρους από τους ίδιους τους χρήστες, όπως στην περίπτωση των modem/router της τεχνολογίας DSL [95].



Εικόνα 6.1: Παράδειγμα δικτύου WMAN-WiMAX [89]

Το μοντέλο χρήσης των δικτύων WMAN-WiMAX κινητής πρόσβασης βασίστηκε στην τροποποίηση IEEE 802.16e-2005, που λειτουργεί στη ζώνη συχνοτήτων 2 - 6GHz, υποστηρίζοντας συνδέσεις χωρίς οπτική επαφή. Επίσης, αξιοποιεί τις νέες δυνατότητες των προτύπων IEEE 802.16 που μπορούν να υποστηρίξουν την έννοια της κινητικότητας των πελατών WiMAX. Έτσι, οι πελάτες WiMAX μπορούν να κινηθούν άνετα σε περιοχές που καλύπτονται από την εμβέλεια των κεραιών των σταθμών βάσης [95]. Τα δίκτυα WMAN-WiMAX κινητής πρόσβασης αποτελούνται από σταθμούς συνδρομητών (Subscriber Stations – SS) και σταθμούς βάσης WiMAX (WiMAX Base Stations – BS). Ο σταθμός WiMAX BS είναι σταθερός, συνδέεται με το δημόσιο δίκτυο και μπορεί να διαχειριστεί ταυτόχρονα πολλαπλούς τομείς, ενώ οι σταθμοί SS είναι κινητοί [93].

6.2.2 Τυποποίηση WiMAX

Από το 1999 που δημιουργήθηκε, η ομάδα εργασίας IEEE 802.16 έχει αναπτύξει μια σειρά από πρότυπα για το WiMAX. Το βασικό πρότυπο, που δημοσιεύθηκε το 2001, υποστήριζε λειτουργία δικτύου στο εύρος συχνοτήτων 10 - 66GHz (ίδιο εύρος συχνοτήτων με την τεχνολογία LMDS) και για τη μετάδοση των δεδομένων απαιτούσε την ύπαρξη οπτικής επαφής (LoS) μεταξύ του πομπού και του δέκτη. Καθώς η ύπαρξη της οπτικής επαφής μεταξύ πομπού και δέκτη μειώνει την παραμόρφωση πολλαπλών διαδρομών, μια τέτοια απαίτηση ενίσχυε την αποτελεσματικότητα της επικοινωνίας, αλλά ταυτόχρονα αύξανε το κόστος υλοποίησης των δικτύων. Θεωρητικά, το IEEE 802.16 μπορούσε να παρέχει ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων από 10 έως 75Mbps και στα δύο κανάλια της ζεύξης (ανερχόμενη και κατερχόμενη ζεύξη). Η δυνατότητα ενοποίησης πολλών καναλιών IEEE 802.16 για μία μόνο μετάδοση έδινε τη δυνατότητα εμφάνισης ταχυτήτων μεταφοράς δεδομένων έως 350Mbps [93]. Το βασικό πρότυπο χρησιμοποιούσε διαμόρφωση SC (Single-Carrier), ενώ κάθε σταθμός βάσης μετέδιδε ένα σήμα TDM με χρονοθυρίδες που κατανέμονταν στο εξοπλισμό του χρήστη CPE. Κατά την ανερχόμενη ζεύξη χρησιμοποιήθηκε η τεχνολογία πρόσβασης TDMA με δύο εναλλακτικούς τρόπους πολυπλεξίας [89]: (α) πολυπλεξία TDD, όταν η ανερχόμενη και κατερχόμενη ζεύξη μοιράζονται τα ίδια κανάλια αλλά δεν εκπέμπουν ταυτόχρονα και (β) πολυπλεξία FDD, όταν η ανερχόμενη και κατερχόμενη ζεύξη λειτουργούν σε ξεχωριστά κανάλια και εκπέμπουν ταυτόχρονα ή εναλλάξ (Half duplex FDD).

Μετά την έκδοση του βασικού προτύπου σχεδιάστηκαν πολλές τροποποιήσεις του, με σκοπό τη βελτίωση των χαρακτηριστικών του. Η τροποποίηση IEEE 802.16a, του 2003, σχεδιάστηκε για την υποστήριξη των περιπτώσεων της μη ύπαρξης οπτικής επαφής μεταξύ πομπού και δέκτη, αλλά και τη λειτουργία των δικτύων στο αδειοδοτημένο φάσμα συχνοτήτων (2–11GHz). Η τροποποίηση ήταν σε θέση να υποστηρίξει πολλές προδιαγραφές διεπαφής, όπως WirelessMAN-SC2, ασύρματο OFDM με μετασχηματισμό 256 σημείων, πρόσβαση TDMA (υποχρεωτική για τις μη αδειοδοτημένες ζώνες) και Wireless MAN-OFDMA με μετασχηματισμό 2048 σημείων. Με όλα αυτά τα χαρακτηριστικά, το IEEE 802.16a μπορούσε να παρέχει ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων έως 75Mbps [89], [93].

Το WiMAX σταθερής πρόσβασης (IEEE 802.16d ή IEEE 802.16-2004), σχεδιάστηκε για να βελτιώσει το πεδίο εφαρμογής της τεχνολογίας στις αδειοδοτημένες και στις μη αδειοδοτημένες ζώνες συχνοτήτων από 2 έως 10GHz. Η τροποποίηση καθορίζει τη διεπαφή αέρα καθώς και το επίπεδο MAC ασύρματης πρόσβασης για τα δίκτυα WMAN-WiMAX. Το IEEE 802.16d χρησιμοποιεί την τεχνική πρόσβασης OFDMA με 256 υποφέρουσες συχνότητες [89], [93].

Η δυνατότητα υποστήριξης φορητών και κινητών συσκευών εισήχθη στην τροποποίηση IEEE 802.16e (IEEE 802.16-2005). Σε αντίθεση με το IEEE 802.16-2004, το IEEE 802.16e χρησιμοποιεί διαφορετική τεχνική διαμόρφωσης, την κλιμακούμενη OFDMA (Scalable OFDMA - S-OFDMA). Αυτό έγινε για να καλυφθούν όλες οι περιπτώσεις σύνδεσης μεταξύ πομπών και δεκτών (ύπαρξη ή μη ύπαρξη οπτικής επαφής), με την υιοθέτηση προσαρμοστικών συστημάτων κεραιών MIMO, που βοηθούν στον μετριασμό της παρεμβολής πολλαπλών διαδρομών. Δεδομένου ότι τα δύο σχήματα διαμόρφωσης που χρησιμοποιούνται στις τροποποιήσεις IEEE 802.16-2004 και IEEE 802.16-2005 είναι μη συμβατά, η αναβάθμιση από δίκτυο WiMAX σταθερής πρόσβασης σε αντίστοιχο δίκτυο κινητής πρόσβασης απαιτεί την αλλαγή των στοιχείων RF του εξοπλισμού [89]. Περισσότερα για το πρότυπο IEEE 802.16e θα αναφερθούν στις επόμενες υποενότητες.

Το IEEE 802.16m, γνωστό και ως Mobile WiMAX 2 ή WirelessMAN-Advanced, είναι μια τροποποίηση που ανακοινώθηκε επίσημα το 2011 και είχε ως βασικό στόχο να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις των δικτύων επόμενης γενιάς IMT-Advanced, παρουσιάζοντας συμβατότητα με όλες τις προηγούμενες εκδόσεις των προτύπων WiMAX. Το IEEE 802,16m, που αποτέλεσε συνοψήφια τεχνολογία της LTE για τα δίκτυα 4G, έχει σχεδιαστεί για να υποστηρίζει συχνότητες σε όλες τις αδειοδοτημένες ζώνες IMT κάτω των 6GHz. Το πρότυπο παρείχε βελτιώσεις όσον αφορά την κάλυψη και τη φασματική απόδοση, τη χωρητικότητα για δεδομένα και εφαρμογές VoIP, την καθυστέρηση, την παρεχόμενη ποιότητα QoS, την εξοικονόμηση ενέργειας, κλπ. Το WiMAX 2 υποστηρίζει προηγμένες τεχνολογίες σχεδιασμού κεραίας, όπως τις ενισχυμένες κεραίες MIMO και τις κατευθυντικές κεραίες, οι οποίες μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση καθώς εκπέμπει ισχύ σε μία ή περισσότερες κατευθύνσεις. Μια τέτοια λειτουργία ισοδυναμεί με μια κατευθυντική κεραία Omni που εκπέμπει ίση ισχύ προς όλες τις κατευθύνσεις. Το πρότυπο υιοθέτησε επίσης τη χρήση σταθμών αναμετάδοσης, οι οποίοι μπορούν να συνεργαστούν με τους σταθμούς BS για να βελτιώσουν τη συνολική απόδοση και κάλυψη. Με όλα αυτά τα χαρακτηριστικά, το WiMAX 2 κατάφερε να πετύχει σημαντικά υψηλότερους μέγιστους και μέσους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων, φτάνοντας σε μέγιστες ταχύτητες που υπερβαίνουν το 1Gbps [97].

Στον πίνακα 6.1 παρουσιάζεται μια σύγκριση των χαρακτηριστικών των βασικότερων εκδόσεων της οικογένειας προτύπων WIMAX (IEEE 802.16d, IEEE 802.16e και IEEE 802.16m).

Πίνακας 6.1: Σύγκριση χαρακτηριστικών βασικότερων εκδόσεων της οικογένειας προτύπων WiMAX [98]

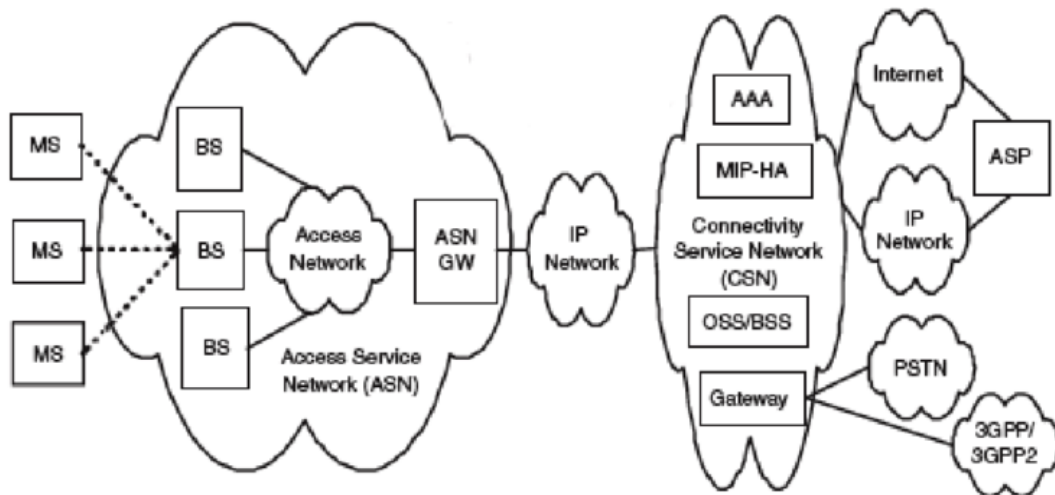
Χαρακτηριστικά προδιαγραφής	IEEE 802.16d	IEEE 802.16e	IEEE 802.16m
Μέσος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων (Mbps)	75	60 - 70	100 (για κινητούς συνδρομητές) 1000 (για σταθερούς συνδρομητές)
Συχνότητα λειτουργίας (GHz)	2 - 10	2,3 2,5 – 2,7 3,5	<6
Διαμόρφωση	OFDMA 256 OFDMA 2048 QPSK 16QAM 64QAM	Scalable OFDMA 256 Scalable OFDMA 2048 QPSK 16QAM 64QAM	Scalable OFDMA 256 Scalable OFDMA 2048 QPSK 16QAM 64QAM
Κεραίες MIMO	-	μέχρι 4 ροές (χωρίς περιορισμό στον αριθμό των κεραιών)	από 4 μέχρι 8 ροές (χωρίς περιορισμό στον αριθμό των κεραιών)
Εμβέλεια κάλυψης (km)	5 – 30 (με LoS)	<10	3 - 100
Εύρος ζώνης (MHz)	20	1,25 - 20	1,25 - 20
Καθυστέρηση (ms)	10	20	<10
Υποστήριξη κινητικότητας	-	+	+

6.2.3 Κύρια χαρακτηριστικά WiMAX 802.16e

Τα δίκτυα WiMAX κινητής πρόσβασης, βασιζόμενα στο πρότυπο IEEE 802.16e, αποτελούν μια βελτίωση των δικτύων WiMAX σταθερής πρόσβασης, ενώ παράλληλα δημιουργούν μια καλύτερη βάση για την επίτευξη σύγκλισης των δικτύων WMAN με τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας [88]. Η ομάδα εργασίας του WiMAX Forum ανέπτυξε ένα μοντέλο αναφοράς δικτύου για να χρησιμεύσει ως πλαίσιο αρχιτεκτονικής σε αναπτύξεις WiMAX και για να διασφαλίσει τη διαλειτουργικότητα μεταξύ του εξοπλισμού WiMAX παλαιότερων εκδόσεων, αλλά και διαφορετικών κατασκευαστών. Αυτό το μοντέλο αποτελεί μια ενοποιημένη αρχιτεκτονική δικτύου σταθερής και κινητής πρόσβασης και βασίζεται σε ένα μοντέλο υπηρεσίας IP (Εικ. 6.2) [99].

Τα βασικά δομικά στοιχεία ενός τέτοιου μοντέλου είναι τα εξής [99]: (α) οι κινητοί σταθμοί, (β) το δίκτυο υπηρεσιών πρόσβασης, (γ) η πύλη του δικτύου πρόσβασης υπηρεσιών και (δ) το δίκτυο υπηρεσιών συνδεσιμότητας. Οι κινητοί σταθμοί (Mobile Stations – MS) χρησιμοποιούνται από τον τελικό χρήστη για πρόσβαση στο δίκτυο. Με τον όρο MS αναφέρονται τόσο οι σταθεροί όσο και οι κινητοί σταθμοί SS των συνδρομητών στους οποίους παρέχεται ασύρματη συνδεσιμότητα σε ένα δίκτυο WiMAX από έναν ή πολλούς σταθερούς σταθμούς BS. Το δίκτυο υπηρεσιών πρόσβασης (Access Service network – ASN) εκτελεί διάφορες λειτουργίες δικτύου που απαιτούνται για την παροχή ασύρματης πρόσβασης στους σταθμούς MS, όπως η μεταφορά μηνυμάτων AAA (Authentication, Authorization και Accounting) στον πάροχο υπηρεσιών του οικιακού δικτύου (Home

Network Service Provider - H-NSP), η μεταφορά δεδομένων μεταξύ των δικτύων πρόσβασης και συνδεσιμότητας υπηρεσιών (ASN-CSN tunneling), η ανακάλυψη και επιλογή του βέλτιστου παρόχου NSP, ο προγραμματισμός ενός αιτήματος αναζήτησης (paging) και η διαχείριση τοποθεσίας. Η πύλη του δικτύου πρόσβασης υπηρεσιών (ASN Gateway – ASN-GW) αποτελεί μια λογική οντότητα που αντιπροσωπεύει μια συνάθροιση κεντρικών λειτουργιών, οι οποίες σχετίζονται με την ποιότητα QoS, την ασφάλεια και τη διαχείριση κινητικότητας, για όλες τις συνδέσεις δεδομένων που εξυπηρετούνται από τη συσχέτισή της με τους σταθμούς BS. Οι σταθμοί BS και η πύλη ASN-GW μπορούν να έχουν μια σχέση πολλών προς πολλά (many to many), επιτρέποντας την εξισορρόπηση φορτίου και τον πλεονασμό. Η πύλη ASN-GW πραγματοποιεί επίσης αλληλεπιδράσεις επιπέδου IP με το δίκτυο CSN και με άλλα δίκτυα ASN για κινητικότητα. Τέλος, το δίκτυο υπηρεσιών συνδεσιμότητας (Connectivity Service Network - CSN) παρέχει υπηρεσίες συνδεσιμότητας IP σε συνδρομητές WiMAX και μπορεί να περιλαμβάνει στοιχεία δικτύου όπως δρομολογητές, διακομιστές μεσολάβησης/διακομιστές AAA, οικιακούς πράκτορες και βάσεις δεδομένων χρηστών, καθώς και πύλες διασύνδεσης ή βελτιωμένους διακομιστές δικτύου για υποστήριξη υπηρεσιών πολλαπλής μετάδοσης, εκπομπής και τοποθεσίας. Μερικές από τις βασικές λειτουργίες του δικτύου CSN περιλαμβάνουν τη διαχείριση διευθύνσεων IP, την πολιτική QoS και τον έλεγχο αποδοχής βάσει του προφίλ συνδρομής χρηστών, καθώς και η μεταφορά δεδομένων εντός του ίδιου του δικτύου για περιαγωγή [99].



Εικόνα 6.2: Ενοποιημένη αρχιτεκτονική δικτύου WiMAX σταθερής-κινητής πρόσβασης βασισμένο σε μοντέλο υπηρεσίας IP [99]

Λαμβάνοντας υπόψη το συγκεκριμένο μοντέλο αναφοράς δικτύου, ένα δίκτυο WiMAX κινητής πρόσβασης μπορεί να παρουσιάζει τα εξής βασικά χαρακτηριστικά [89]:

- **Κινητικότητα:** Ο εξοπλισμός του δικτύου WiMAX κινητής πρόσβασης έχει δυνατότητες μεταβίβασης (handover) παρουσιάζοντας καθυστερήσεις της τάξης των 20ms. Κάτι τέτοιο επιτρέπει την υποστήριξη σε ευαίσθητες στο χρόνο εφαρμογές, όπως οι VoIP και IPTV
- **Ρυθμοί δεδομένων ευρυζωνικών δεδομένων:** Η υιοθέτηση κλιμακούμενης καναλιοποίησης (1,25 - 20MHz) και προηγμένων σχημάτων διαμόρφωσης και κωδικοποίησης δίνει τη δυνατότητα επίτευξης ταχύτητας μετάδοσης δεδομένων 60 – 70Mbps .Για παράδειγμα, σε ένα κανάλι εύρους ζώνης 10MHz, ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων κατερχόμενης ζεύξης φτάνει τα 63Mbps, ενώ αντίστοιχα στην ανερχόμενη ζεύξη τα 28Mbps
- **Ποιότητα υπηρεσίας:** Το WiMAX είναι ένα από τα λίγα πρότυπα που εξαρχής σχεδιάστηκαν με γνώμονα την παροχή υπηρεσιών, κάτι που του δίνει τη δυνατότητα να υποστηρίξει ευέλικτη παροχή ποιότητας QoS ανάλογα με τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής

- **Ασφάλεια:** Η ασφάλεια στο πρότυπο εξασφαλίζεται μέσω ενσωματωμένων μηχανισμών ελέγχου ταυτότητας, κρυπτογράφησης, χρήσης διάφορων ονομάτων χρήστη και κωδικών πρόσβασης και ευέλικτης διαχείρισης κλειδιών ασφαλείας
- **Επεκτασιμότητα:** Η χρήση προσαρμοστικών κεραιών MIMO και τεχνικών καναλιοποίησης υποστηρίζει την παροχή επεκτασιμότητας, όσον αφορά την ανάπτυξη σε πυκνοκατοικημένες αστικές και αγροτικές περιοχές

6.2.4 Αρχιτεκτονική πρωτοκόλλου WiMAX

Το κλειδί για πολλά χαρακτηριστικά του WiMAX, που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη υποενότητα, είναι η υιοθέτηση της κλιμακούμενης τεχνικής διαμόρφωσης S-OFDMA στο φυσικό επίπεδο του προτύπου. Σε αυτή την τεχνική, το εύρος ζώνης χωρίζεται σε πολλαπλές υποφέρουσες συχνότητες και οι ενεργές συχνότητες ομαδοποιούνται σε υποσύνολα υποφερουσών, που ονομάζονται υποκανάλια (sub-channels). Αυτή η τεχνική, που εφαρμόζεται τόσο στην κατερχόμενη όσο και στην ανερχόμενη ζεύξη, εξαλείφει τις παρεμβολές εντός των κυψελών. Η υψηλή ταχύτητα ροής δεδομένων εισόδου χωρίζεται σε διάφορες υπο-ροές χαμηλότερων ρυθμών μετάδοσης δεδομένων. Κάθε υπο-ροή διαμορφώνεται και μεταδίδεται μέσω χωριστών ορθογώνιων υποφερουσών. Τα υποκανάλια μπορούν να συγκεντρωθούν για να παρέχουν μεγαλύτερο εύρος ζώνης για μεμονωμένους χρήστες. Με τον τρόπο αυτό, το εύρος ζώνης κάθε καναλιού μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ 1,25 και 20MHz, με τις τιμές των 5MHz και 10MHz, να είναι οι επικρατέστερες [94], [100].

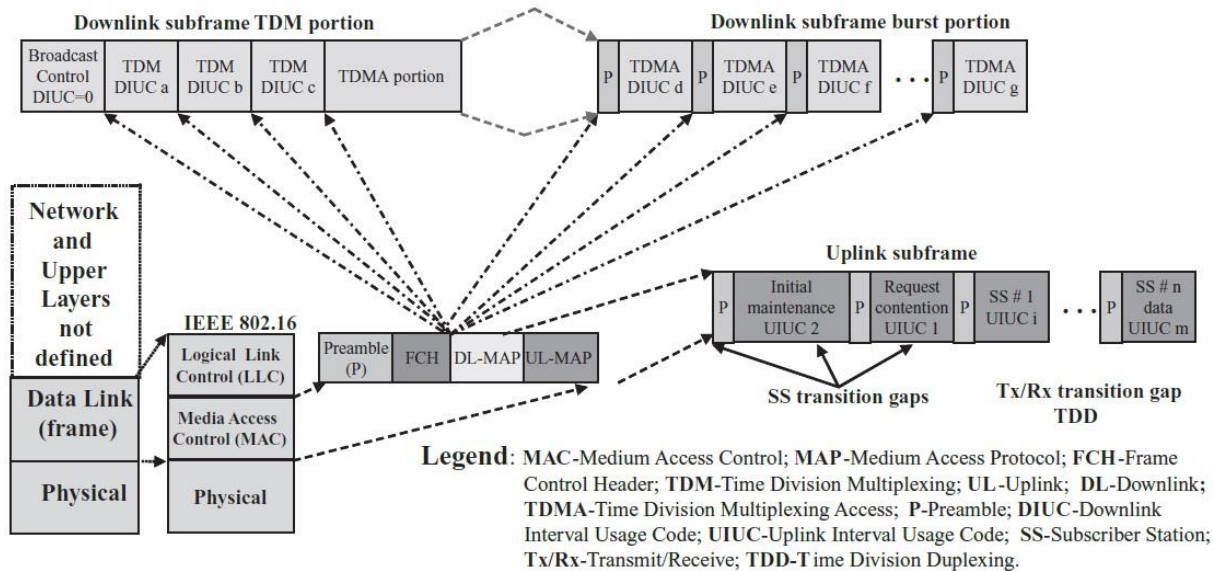
Το WiMAX υποστηρίζει τεχνολογία πρόσβασης TDMA με δύο εναλλακτικούς τρόπους πολυπλεξίας TDD, καθώς και πλήρως αμφίδρομης και ημιαμφίδρομης FDD. Η πολυπλεξία TDD χρησιμοποιείται μόνο σε περιπτώσεις όπου στο ίδιο κανάλι, η μετάδοση ανερχόμενης ζεύξης ακολουθείται από μετάδοση κατερχόμενης ζεύξης. Αν και η τεχνολογία μπορεί να υποστηρίξει πολλές τεχνικές διαμόρφωσης, μόνο τρεις είναι υποχρεωτικές: οι QPSK, 16 QAM και 64QAM. Σε αυτές τις διαμορφώσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί συνελκτική κωδικοποίηση με διάφορους ρυθμούς κωδικοποίησης (1/2, 2/3, 3/4, 5/6), ανάλογα με τις απαιτήσεις [94], [100].

Το κύριο καθήκον του επιπέδου MAC του προτύπου WiMAX είναι να παρέχει μια διεπαφή μεταξύ των ανώτερων επιπέδων μεταφοράς και του φυσικού στρώματος. Το 802.16 MAC έχει σχεδιαστεί για να υποστηρίζει τρεις διαφορετικές τοπολογίες [89]: (α) τοπολογία PTP, (β) τοπολογία P2MP και (γ) τοπολογία πλέγματος MMR (Mobile Multi-hop Relay). Στις δύο πρώτες τοπολογίες, πραγματοποιείται επικοινωνία μεταξύ των σταθμών BS και SS που βρίσκονται εντός της εμβέλειας μετάδοσης, ανεξάρτητα αν η μεταξύ τους οπτική επαφή είναι τέλεια. Στις τοπολογίες πλέγματος, κάθε κόμβος είναι ικανός να λάβει να παίξει το ρόλο του σταθμού MS με αναμετάδοση πληροφοριών σε γειτονικούς κόμβους [89]. Ανεξάρτητα από την τοπολογία του δικτύου, η πρόσβαση στο δίκτυο γίνεται με χρήση της τεχνικής CSMA/CA [101].

Στην εικόνα 6.3 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του φυσικού επιπέδου, του επιπέδου MAC, καθώς και το πλαίσιο των πακέτων της μονάδας PDU του επιπέδου DLL. Τα πιο σημαντικά πεδία αυτού του πλαισίου είναι τα εξής [89]:

- **Πεδίο Preamble:** Χρησιμοποιείται για συγχρονισμό μεταξύ πομπού και δέκτη
- **Πεδίο FCH(Frame Control Header):** Παρέχει πληροφορίες σχετικά με τη διαμόρφωση MAC, το μήκος, το σχήμα κωδικοποίησης και τη διαθεσιμότητα υποκαναλιών
- **Πλαίσιο DL-MAC (Down Link MAC):** Παρέχει πληροφορίες υποκαναλιού και ελέγχου σχετικά με τα πλαίσια της κατερχόμενης ζεύξης (DL)
- **Πλαίσιο UL-MAC (Up Link MAC):** Παρέχει πληροφορίες υποκαναλιού και ελέγχου σχετικά με τα πλαίσια της ανερχόμενης ζεύξης (UL)
- **Πλαίσιο DL Burst:** Το τμήμα ριπής των υποπλασίων της κατερχόμενης ζεύξης (DL)

- **Πλαίσιο UL Ranging:** Ένα ειδικό πλαίσιο που χρησιμοποιείται από τους σταθμούς MB για την παροχή πληροφοριών σχετικά με το χρόνο, τη συχνότητα και την ισχύ της λειτουργίας ελέγχου ισχύος κλειστού βρόγχου (closed loop power control) τους, μαζί με αιτήματα για εύρος ζώνης
- **Πλαίσιο UL Fast Feedback:** Χρησιμοποιείται από τους σταθμούς MS για την παροχή πληροφοριών του καναλιού ανάδρασης
- **Πλαίσιο UL Burst:** Το τμήμα ριπής των υποπλαίσίων της ανερχόμενης ζεύξης (UL)



Εικόνα 6.3: Αρχιτεκτονική πρωτοκόλλου WiMAX [89]

6.2.5 Ποιότητα QoS και ασφάλεια

Το επίπεδο MAC του WiMAX υιοθετεί την συνδεοστρεφή αρχιτεκτονική, στην οποία απαιτείται η δημιουργία μίας ζεύξης πριν τη μετάδοση των δεδομένων. Σε κάθε σύνδεση εκχωρείται ένα μοναδικό αναγνωριστικό (IDI σύνδεσης) και συνδέεται με μια ροή υπηρεσίας που ορίζει το επιθυμητό επίπεδο ποιότητας QoS της σύνδεσης. Σε ένα τυπικό πλαίσιο χρονοπρογραμματισμού (scheduling framework), τα πακέτα δεδομένων που φτάνουν στο σταθμό BS ταξινομούνται σε συνδέσεις που στη συνέχεια ταξινομούνται σε ροές υπηρεσιών. Τα πακέτα της ίδιας ροής υπηρεσιών τοποθετούνται σε μια ουρά και στη συνέχεια ταξινομούνται περαιτέρω με βάση τις προτεραιότητες εξυπηρέτησης της σύνδεσης. Για πακέτα σε πολλαπλές ουρές με διαφορετικές απαιτήσεις υπηρεσίας, χρησιμοποιείται ένας χρονοπρογραμματιστής (scheduler) πακέτων για να αποφασίσει τη σειρά εξυπηρέτησης των πακέτων από τις ουρές. Ο σωστός σχεδιασμός του αλγόριθμου χρονοπρογραμματισμού μπορεί να παρέχει τις επιθυμητές εγγυήσεις παροχής μιας επαρκούς ποιότητας QoS [101]. Οι εγγυήσεις αυτές αφορούν τη διαθεσιμότητα, το εύρος ζώνης, την καθυστέρηση, το jitter και την απώλεια πακέτων. Αυτά τα χαρακτηριστικά είναι ακόμη πιο κρίσιμα στις τοπολογίες πλέγματος MMR, όπου πολλοί κόμβοι αναμετάδοσης και πύλης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να συνδέσουν το δίκτυο WiMAX με δημόσια ενσύρματα ή ασύρματα δίκτυα [89].

Καθώς το WiMAX χρησιμοποιεί κανάλια ραδιοσυχνοτήτων για επικοινωνία, είναι εύλογο να αντιμετωπίζει διάφορους κινδύνους που μπορούν να δημιουργήσουν πολύ σοβαρά προβλήματα ασφάλειας για το ίδιο το δίκτυο. Για το λόγο αυτό, το WiMAX διαθέτει ένα ισχυρό επίπεδο ασφάλειας, το οποίο δεν ενεργοποιείται μόνο κατά την πρόσβαση στο σύστημα, αλλά και κατά τη διάρκεια της περιόδου σύνδεσης και της μεταφοράς δεδομένων. Το συγκεκριμένο επίπεδο ασφάλειας παρουσιάζει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά και δυνατότητες ασφάλειας [89]:

- **Έλεγχος ταυτότητας (Authentication):** Αναγνώριση των έγκυρων χρηστών του συστήματος τόσο στην κατερχόμενη ζεύξη (πραγματοποιείται από το σταθμό BS, όσο και στην ανερχόμενη ζεύξη (πραγματοποιείται από τους σταθμούς SS)
- **Εξουσιοδότηση (Authorization):** Άδεια που δίνεται σε πιστοποιημένους συνδρομητές για χρήση των υπηρεσιών ανάλογα με το ατομικό τους προφίλ
- **Διαθεσιμότητα (Availability):** Διατήρηση ασφαλούς επικοινωνίας παρά τις προσπάθειες εισβολής στα συστήματα, συμπεριλαμβανομένης της προστασίας από επιθέσεις άρνησης υπηρεσίας DoS (Denial of Service)
- **Εμπιστευτικότητα (Confidentiality):** Προστασία ευαίσθητων πληροφοριών μέσω κρυπτογράφησης
- **Ακεραιότητα (Integrity):** Προστασία της ακεραιότητας των πληροφοριών από απροσδόκητες αλλαγές που προκαλούνται από αστοχίες μετάδοσης ή κακόβουλες ενέργειες

Το επίπεδο MAC παρέχει το συγκεκριμένο επίπεδο ασφάλειας βασισμένο στη χρήση του πρωτοκόλλου διαχείρισης ιδιωτικού κλειδιού. Όλα τα δεδομένα που μεταδίδονται στο δίκτυο WiMAX είναι εικονικά κρυπτογραφημένα. Αυτή η κρυπτογράφηση πραγματοποιείται μέσω του προτύπου 3DES (Triple Data Encryption Standard) για πολύ ισχυρή κρυπτογράφηση των 168 bit ή του AES (Advanced Encryption Standard) που παρέχει υποστήριξη για τη δημιουργία κλειδιών κρυπτογράφησης των 128 bit, 192 bit και 256 bit. Το πρότυπο AES είναι ταχύτερο από το 3DES, πιο εύκολο στην εφαρμογή και χρησιμοποιεί λιγότερη μνήμη. Για τον έλεγχο ταυτότητας, χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο EAP (Extensible Authentication Protocol) [102].

6.2.6 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της τεχνολογίας WiMAX

Ο σχεδιασμός του WiMAX βασίστηκε πάνω στην αποτυχία λύσεων, όπως τα δίκτυα LMDS και MMDS, στην ασύρματη μητροπολιτική δικτύωση. Μεγάλο πλεονέκτημα της τεχνολογίας αποτελεί η δυνατότητα της να εξυπηρετεί πελάτες σταθερής και κινητής πρόσβασης. Με αυτόν τον τρόπο το WiMAX μετακινήθηκε από την κατηγορία των τεχνολογιών που ταξινομήθηκαν ως ασύρματα δίκτυα σταθερής πρόσβασης σε αυτές που χαρακτηρίζονται ως τεχνολογίες υποστήριξης ασύρματης κινητής πρόσβασης. Επιπλέον, παρέχοντας επικοινωνίες μεγάλης εμβέλειας, το WiMAX μπόρεσε να συναγωνιστεί τα παραδοσιακά κυψελοειδή δίκτυα κινητής τηλεφωνίας σε μητροπολιτικές περιοχές, κάτι που μεταφράστηκε στην συνυποψηφιότητά του με την τεχνολογία LTE για την παροχή υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας 4G [89].

Στα πλεονεκτήματα και τα οφέλη της τεχνολογίας περιλαμβάνονται επίσης [89]:

- η παροχή ενσύρματης και ασύρματης ευρυζωνικής πρόσβασης, ανταγωνιζόμενη με τεχνολογίες όπως το DSL και το 3G
- η δυνατότητα υποστήριξης υψηλού επιπέδου κινητικότητας
- η ευκολία εφαρμογής της καθώς δεν υπάρχουν πλέον απαιτήσεις επικοινωνίας οπτικής επαφής
- η λειτουργία σε αδειοδοτημένες και μη αδειοδοτημένες ζώνες του φάσματος
- η δυνατότητα χρήσης της ως τεχνολογία backhaul σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας και σε απομακρυσμένους μεμονωμένους χρήστες ή ομάδες χρηστών
- η ανάπτυξη της με βάση διεθνώς αναγνωρισμένα πρότυπα IEEE
- η δυνατότητα υποστήριξης επικοινωνιών δεδομένων, φωνής και πολυμέσων
- η δυνατότητα παροχής υπηρεσιών πρόσβασης μεγάλης εμβέλειας (έως και 100km)
- η διαθεσιμότητα ενσωματωμένου μηχανισμού QoS που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μεταδόσεις φωνής και πολυμέσων
- η επεκτασιμότητα όσον αφορά τον αριθμό των χρηστών και την περιοχή κάλυψης
- η εμφάνιση πολύ καλής φασματικής απόδοσης

Ωστόσο, υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί και μειονεκτήματα στη χρήση του WiMAX, όπως [89]:

- η συνολική απόδοση επηρεάζεται από τον βαθμό κινητικότητας, τις διαδρομές οπτικής επαφής και τις περιβαλλοντικές συνθήκες
- υπάρχει περιορισμένο επίπεδο υποστήριξης από μεγάλες εταιρείες κινητής τηλεφωνίας
- δεν υπάρχει ένα ενιαίο (παγκόσμιο) αδειοδοτημένο φάσμα χρήσης του
- η λειτουργία του στη μη αδειοδοτημένη μπάντα συχνοτήτων το καθιστά επιρρεπές σε παρεμβολές
- παρουσιάζει σχετικά υψηλή κατανάλωση ενέργειας

Κεφάλαιο 7ο: Συμπεράσματα

Η ασύρματη επικοινωνία είναι ένας από τους πιο επιθυμητούς τρόπους επικοινωνίας μεταξύ δύο ή περισσότερων συσκευών. Σε αντίθεση με τα ενσύρματα συστήματα επικοινωνίας, όπου η μεταφορά των δεδομένων πραγματοποιείται μέσω της δημιουργίας κάποιου είδους φυσικής σύνδεσης μεταξύ των συσκευών με χρήση καλωδίων, τα ασύρματα δίκτυα αποτελούν τον ευκολότερο τρόπο επικοινωνίας, καθώς η μετάδοση των πληροφοριών πραγματοποιείται μέσω της χρήσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, όπως ραδιοσυχνοτήτων ή υπέρυθρων.

Οι συνεχιζόμενες εξελίξεις στις Τεχνολογίες της Πληροφορίας και των Επικοινωνιών (ΤΠΕ) έχουν οδηγήσει σε μια συνεχώς αυξανόμενη τάση της χρήσης των ασύρματων επικοινωνιών. Με τον τρόπο αυτό, τα ασύρματα δίκτυα έχουν καταστεί μέσα ραγδαίου μετασχηματισμού πολλών τομέων της σύγχρονης ζωής και της οικονομίας, από την περιβαλλοντική παρακολούθηση έως τη διαχείριση των εταιρειών και από τον αυτοματισμό της βιομηχανίας έως την βελτιστοποίηση της υγειονομικής περίθαλψης. Η ταυτόχρονη λειτουργία τεράστιου αριθμού ασύρματων συνδέσεων και ζευξέων έχει δημιουργήσει τη δυνατότητα της υιοθέτησης των ασύρματων επικοινωνιών, σε μια τεράστια γκάμα ποικίλων εφαρμογών, με διαφορετικές απαιτήσεις όσον αφορά την κάλυψη καθώς και τη χωρητικότητα. Λόγω της δυναμικής φύσης των απαιτήσεων αυτών των διαφόρων εμπορικά καθοδηγούμενων εφαρμογών, έχουν αναπτυχθεί διαφορετικές μέθοδοι και πρότυπα ασύρματης επικοινωνίας, τα οποία μπορούν να ταξινομηθούν με βάση την εμβέλεια κάλυψης της μετάδοσης των δεδομένων. Μια τέτοια ταξινόμηση των ασύρματων δικτύων επικοινωνίας δημιουργεί σε γενικές γραμμές πέντε επιμέρους κατηγορίες, όπως είναι τα δίκτυα WBAN, τα δίκτυα WPAN, τα δίκτυα WLAN, τα δίκτυα WMAN και τα δίκτυα WWAN. Κάθε ασύρματο πρωτόκολλο έχει το δικό του σύνολο προτύπων που καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο οι συσκευές επικοινωνούν μεταξύ τους. Αυτά τα πρότυπα αφορούν τον ρυθμό μεταφοράς δεδομένων, το εύρος συχνοτήτων, την ισχύ μετάδοσης, τη διόρθωση σφαλμάτων, την ασφάλεια και τη διαχείριση του δικτύου. Η επιλογή του πρωτοκόλλου εξαρτάται από τις ειδικές απαιτήσεις του ασύρματου δικτύου, όπως το εύρος μέσα στο οποίο πρέπει να πραγματοποιηθεί η επικοινωνία, ο αριθμός των συσκευών του δικτύου και ο τύπος των δεδομένων που μεταδίδονται.

Στα πλαίσια της παρούσας πτυχιακής εργασίας παρουσιάστηκε μια λεπτομερής ανασκόπηση των πρωτοκόλλων των δικτύων WPAN, WLAN και WMAN, τα οποία γίνονται ολοένα και πιο δημοφιλή λόγω της ευελιξίας, της επεκτασιμότητας και της οικονομικής τους αποδοτικότητας. Η κατανόηση των διαφορετικών πρωτοκόλλων και των δυνατοτήτων τους είναι ζωτικής σημασίας για το σχεδιασμό και τη διαχείριση δικτύων με αποτελεσματική ασύρματη επικοινωνία.

Στο εισαγωγικό κεφάλαιο δόθηκε ο ορισμός των ασύρματων δικτύων και παρουσιάστηκε μια σύντομη ιστορική αναδρομή τους. Στη συνέχεια παρουσιάστηκαν κάποιοι από τους βασικότερους παράγοντες οι οποίοι έχουν συμβάλει τα μέγιστα στην εξάπλωση των ασύρματων δικτύων. Το εισαγωγικό κεφάλαιο ολοκληρώθηκε με την παρουσίαση των κατηγοριών των ασύρματων δικτύων, κάποιων πρωτοκόλλων τους, καθώς με την πραγματοποίηση μιας σύγκρισης μεταξύ ασύρματων και ενσύρματων δικτύων. Το δεύτερο κεφάλαιο αποτέλεσε μια ανάλυση του φυσικού επιπέδου των ασύρματων δικτύων. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην παρουσίαση των χαρακτηριστικών που παρουσιάζουν τα φάσματα των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση των πληροφοριών στα ασύρματα δίκτυα, δηλαδή των ραδιοσυχνοτήτων και των υπέρυθρων. Επίσης αναλύθηκαν οι βασικότερες από τις τεχνικές μετάδοσης σήματος, όπως είναι οι τεχνικές FHSS, DSSS και OFDM. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν κάποια πρότυπα ασύρματων δικτύων, όπως τα

HomeRF, η οικογένεια των προτύπων IEEE 802.11 και τα πρότυπα HIPERLAN. Το τέταρτο κεφάλαιο αποτέλεσε μια ανάλυση του επιπέδου ζεύξης (σύνδεσης) των ασύρματων δικτύων, εστιάζοντας στο επίπεδο MAC, το οποίο ορίζει το σύνολο των μηχανισμών και τα πρωτόκολλα για τη διασφάλιση της σωστής διαχείρισης της πρόσβασης στο μέσο και την αποφυγή συγκρούσεων. Παρουσιάστηκαν κάποιες από τις βασικότερες τεχνικές πρόσβασης στο μέσο, όπως είναι οι αλγόριθμοι DCF, PCF και RTS/CTS. Το κεφάλαιο ολοκληρώθηκε με μια σύγκριση μεταξύ των πρωτοκόλλων πρόσβασης CSMA/CA και CSMA/CD. Το πέμπτο κεφάλαιο ασχολήθηκε με τα δίκτυα WPAN και με την παρουσίαση των τεχνολογιών Bluetooth και IrDA. Τέλος, το έκτο κεφάλαιο εστίασε στα δίκτυα WMAN και την ανάλυση της σημαντικότερης τεχνολογίας τους, όπως είναι το WiMAX.

Λόγω της φύσης της ταχείας εξέλιξης των ασύρματων δικτύων, τα στοιχεία που αναφέρθηκαν για αυτές τις τεχνολογίες, αφορούν στοιχεία που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία την περίοδο συγγραφής της παρούσας πτυχιακής εργασίας. Φυσικά, κάποιες από τις τεχνολογίες αυτές, όπως οι HomeRF, HIPERLAN και IrDA, θεωρούνται πλέον ξεπερασμένες. Για τις υπόλοιπες, η συγκεκριμένη εργασία μπορεί να αποτελέσει μια καλή βάση αναφοράς για την εξέταση και μελέτη νέων πιθανών εξελίξεών τους που θα μπορούν να αντιμετωπίσουν τις προκλήσεις και τα όποια ζητήματα προκύψουν από την υλοποίηση των μελλοντικών ασύρματων δικτύων WPAN, WLAN και WMAN.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] G. B. Bellido, *Mobile application able to analyse the Internet connections*. Bachelor of Science in Engineering. University of Applied Sciences. Technikum, Wien. 2021.
- [2] N. Singh, and A. Shukla. *A review on progress and future trends for wireless network for communication system*. Advances in Communication, Devices and Networking: Proceedings of ICCDN 2020, 445-453. 2022.
- [3] D. D. Garcia-Swartz, and M. Campbell-Kelly. *The First Generation: The 1980s*. Cellular: An Economic and Business History of the International Mobile-phone Industry. MIT Press. Chapter 1, pp: 11-95, 2022.
- [4] G. O'Regan, G. *A Short History of Telecommunications*. A Brief History of Computing. Cham: Springer International Publishing. Chapter 17, pp: 227-236, 2021.
- [5] R. U. Ayres and R. U. Ayres. *The transistor transition: 1945–1969*. The History and Future of Technology. Springer, Cham. pp: 425-466, 2021.
- [6] A. A. Salih, S. R. Zeebaree, A. S. Abdulraheem, R. R. Zebari, M. A. Sadeeq, and O. M. Ahmed. *Evolution of mobile wireless communication to 5G revolution*. Technology Reports of Kansai University, 62(5), 2139-2151, 2020.
- [7] K. Pahlavan, and P. Krishnamurthy. *Evolution and impact of Wi-Fi technology and applications: A historical perspective*. International Journal of Wireless Information Networks, 28, 3-19, 2021.
- [8] J. Salazar Soler. *Wireless networks*. Faculty of electrical engineering. Czech Technical University of Prague. 2017.
- [9] A. Salam, A. D. Hoang, A. Meghna, D. R. Martin, G. Guzman, Y. H. Yoon, ... and X. Fan. *The future of emerging IoT paradigms: architectures and technologies*. 2019.
- [10] S. Shukla, K. M. Meghana, C. R. Manjunath, and N. Shantosh. *Comparison of Wireless Network over Wired Network and Its Type*. Int. J. Res. Granthaalayah, 5, 14-20, 2017.
- [11] P. W. Fink. *Wireless Network Communications Overview for Space Mission Operations*. Organization and Processes for the Consultative Committee for Space Data Systems (CCSDS A02.1-Y-4). Informational Report, Issue 3. Washington, DC, USA. 2017.
- [12] Z. Wang, Q. Wang, W. Huang, and Z. Xu. *Introduction to Visible Light Communications*. Visible light communications: modulation and signal processing. John Wiley & Sons. Chapter 1, pp: 1-16, 2017.
- [13] O. Aboelala, I. E. Lee, and G. C. Chung. *A survey of hybrid free space optics (FSO) communication networks to achieve 5g connectivity for backhauling*. Entropy, 24(11), 1573, 2022.
- [14] M. Chowdhury and A. Biswas. *Overview of Wireless Communications*. Wireless communication: theory and applications. Cambridge university press. Chapter 1, pp: 1-35, 2017.
- [15] M. Islam, and S. Jin. *An overview research on wireless communication network*. Advances in Wireless Communications and Networks, 5(1), 19-28, 2019.

- [16] P. Dominique, and P. Crégo. *RF Connectivity in Wearables*. Wearables, Smart Textiles and Smart Apparel. Elsevier. Chapter 10, pp: 265-294, 2019.
- [17] S. Mohammady, and P. Varahram. *Introductory Chapter: Multiplexing History-How It Applies to Current Technologies*. Multiplexing. Rijeka, Croatia: IntechOpen. 2019.
- [18] P. Anker. *From spectrum management to spectrum governance*. Telecommunications Policy, 41(5-6), 486-497, 2017.
- [19] J. Nikonowicz, A. Mahmood, E. Sisinni, and M. Gidlund. *Quantitative benchmarks and new directions for noise power estimation methods in ISM radio environment*. arXiv preprint arXiv:1711.05642. 2017.
- [20] W. Yang, M. Wang, J. Zhang, J. Zou, M. Hua, T. Xia, and X. You. *Narrowband wireless access for low-power massive internet of things: A bandwidth perspective*. IEEE wireless communications, 24(3), 138-145, 2017.
- [21] N. Poursafar, M. E. E. Alahi, and S. Mukhopadhyay. *Long-range wireless technologies for IoT applications: A review*. IEEE 2017 Eleventh International Conference on Sensing Technology (ICST), pp. 1-6, December 2017.
- [22] M. Dogotari. *Hardware Design and RF Performance Evaluation of a Long Range 2.4 GHz Radio Module*. Doctoral dissertation, Hochschule Rhein-Waal. 2017.
- [23] E. A. Tiwari. *Introduction*. Engineering Communication. BFC Publications. Volume II, Chapter 1, pp: 64-66, 2021.
- [24] S. Indriani Lestaringati. *Week 9 Spread Spectrum*. Unikom Indonesia Computer University, 2017. [Online]. Available: <https://repository.unikom.ac.id/51396/1/Week%209%20Spread%20Spectrum.pdf>
- [25] D. J. Torrieri. *Frequency Hopping Systems*. Principles of Spread-Spectrum Communication Systems. 5th Ed., Springer Nature. Chapter3, pp: 151-204, 2022.
- [26] A. Bensky. *Wireless local area networks*. Short-range wireless communication. Newnes. Chapter 11, pp: 273-315, 2019.
- [27] L. S. Gordon. *Spread Spectrum Techniques*. Principles of mobile communication. 4th Ed., Springer. Chapter 9, pp: 449-500, 2017.
- [28] R. K. Ghosh and R. K. Ghosh. *Wireless Local Area Network*. Wireless Networking and Mobile Data Management. Springer. Chapter 4, pp: 95-124, 2017.
- [29] N. Chaitanya, R. Hrishikesh, S. Sb, L. S. K. Raja, and Y. N. K. Reddy. *Overview on CDMA networks and Implementation of CDMA Spread Spectrum Techniques using MATLAB*. IEEE 2020 5th International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES) (pp. 524-529). 2020, June.
- [30] S.A. Mondal. *Approach to reduce PAPR in Orthogonal Frequency Division Multiplexing Technique*. Turkish Journal of Computer and Mathematics Education (TURCOMAT), 12(10), 4480-4484, 2021.
- [31] A. Manikandan. *A Performance Analysis of Index Modulation in MIMO System*. Journal of Electronics, Computer Networking and Applied Mathematics (JECNAM) ISSN: 2799-1156, 1(01), 56-64, 2021.

- [32] F. Rashidi, J. He, and L. Chen. *Performance investigation of FSO-OFDM communication systems under the heavy rain weather*. Journal of Optical Communications, 39(1), 37-42, 2017.
- [33] D. H. Morais, and D. H. Morais. *Multi-Carrier-Based Multiple-Access Techniques*. Key 5G Physical Layer Technologies: Enabling Mobile and Fixed Wireless Access. Springer Cham. Chapter 7, pp: 143-189, 2022.
- [34] N. Mathur, and R. Vamne. *Energy-efficient resource allotment for OFDM-based cognitive radio networks*. International Journal of Advanced Computer Technology, 9(4), 07-09, 2020.
- [35] J. P. De Vries, P. Mähönen, M. Petrova, L. Simic, and A. M. Voicu. *Much Ado: Assessing Wi-Fi/LTE Coexistence in Unlicensed Bands*. TPRC. 2016, March.
- [36] E. B. M. I. Osman, M. A. A. M. Omer, M. O. S. Ahmed, and M. M. A. Ali. *A Comparative Analysis of Different Queuing Techniques in Wireless LANs*. Doctoral dissertation. Sudan University of Science and Technology. 2016.
- [37] I. AlShourbaji. *An overview of wireless local area network (WLAN)*. arXiv preprint arXiv:1303.1882. 2013.
- [38] Home RF Working Group. *Wireless Networking Choices for the Broadband Internet Home*. White Paper. 2001. [Online]. Available: http://www.homerf.org/data/tech/homerfbroadband_whitepaper.pdf
- [39] A. Vikulov, and A. Paramonov. *Practical retrospective of 5-year evolution of the IEEE 802.11 client device capabilities*. IEEE 12th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT) (pp. 296-300), 2020, October.
- [40] K. Pahlavan, and P. Krishnamurthy. *Evolution and impact of Wi-Fi technology and applications: A historical perspective*. International Journal of Wireless Information Networks, 28, 3-19, 2021.
- [41] J. Wang, X. Guo, X. Liu, and Y. Ge. *RPO-MAC: reciprocal Partially observable MAC protocol based on application-value-awareness in VANETs*. Wireless Networks, 27(4), 2509-2528, 2021.
- [42] P. M. Manohar. *Analyzing the impact of Physical Characteristics of AODV Routing Protocol in MANETs*. International journal of Computing & Decision Sciences, 1-7, 2022.
- [43] A. H. Abdelmajid. *The Wi-Fi Evolution*. White Paper. Qorvo. 2019.
- [44] K. K. Vaigandla and D. N. Venu. *A survey on future generation wireless communications-5G: multiple access techniques, physical layer security, beamforming approach*. Journal of Information and Computational Science, 11(9), 449-474, 2021.
- [45] Federal Communications Commission. *FCC opens 6 GHz band to Wi-Fi and other unlicensed uses*. FCC Report and Order. 2020. [Online]. Available: <https://www.fcc.gov/document/fcc-opens-6-ghz-band-wi-fi-and-other-unlicensed-uses>
- [46] K. Manavadariya, K. Shukla, and D. Patel. *Comparative Study of Bluetooth, 802.11 and HIPERLAN*. International Journal of Computer Engineering and Technology. 4. 455-463, 2013.
- [47] K. Jakobs, W. Lemstra, V. Hayes, B. Tuch, and C. Links. *Creating a wireless LAN standard: IEEE 802.11*. The Innovation Journey of Wi-Fi: The Road to Global Success. Cambridge: Cambridge University Press. Chapter3, pp: 53-109, 2010.

- [48] R. Pérez-Jiménez, J. M. Riera, and F. J. López-Hernández. *The HIPERLAN Standard*. Wireless LAN Standards and Applications. ARTECH HOUSE, INC. Chapter 4, pp: 109-150, 2001.
- [49] S. Banerji, and R. S. Chowdhury. *On IEEE 802.11: wireless LAN technology*. arXiv preprint arXiv:1307.2661. 2013.
- [50] N. Sai Shankar. *Multimedia Wireless Local Area Networks*. Emerging Wireless Multimedia: Services and Technologies. John Wiley & Sons, Ltd. Chapter 5, pp: 121-167, 2005.
- [51] A. Gupta, and R. G. Mishra. *Comprehensive Study of HiperLAN and HiperMAN Family of Wireless Communication Standards*. HCTL Open International Journal of Technology Innovations and Research (IJTIR), 18(2), 2016, February.
- [52] C. Politis, and R. Tafazolli. MAC protocol for supporting QoS in All-IP HiperLAN2. In Proceedings of the Fourth European Wireless Conference (EW'02), Florence, Italy. 2002, February.
- [53] D. Pascual Mir. *Matlab Wi-Fi simulations considering interferences in dense urban environments*. Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya. 2017.
- [54] J. F. Kurose, and K. W. Ross. *The Link Layer and LANs*. Computer Networking: A Top-Down Approach. 7th Edition. Addison Wesley. Chapter 6, pp: 439-518, 2007.
- [55] P. S. Patheja, A. A. Wao, and V. Tiwari. *Improving Performance of 802.11 MAC by Optimizing DCF in Mobile ad-hoc Network*. Computer Science. 2012.
- [56] M. Gast. *The 802.11 MAC*. 802.11 wireless networks: the definitive guide. O'Reilly Media, Inc., Chapter 3, 2005.
- [57] National Instruments. *Overview of MAC Layer Features in the LabVIEW Communications 802.11 Application Framework*. 2023, April. [Online]. Available: <https://www.ni.com/en-us/support/documentation/supplemental/17/overview-of-mac-layer-features-in-the-labview-communications-802.html>
- [58] A. Kumar. *Qualitative Analysis of dual MAC in Multihop Adhoc Wireless Network*. International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology (IJSCEIT), 7(2), 128-136, 2021.
- [59] D. S. Kim, and H. Tran-Dang. *802.11 Medium Access Control DCF and PCF: Performance Comparison*. Industrial Sensors and Controls in Communication Networks. Springer Nature Switzerland AG. Chapter 13, pp: 173–179, 2019.
- [60] A. Hossain, M. Tarique, and R. Islam. *Shadowing effects on routing protocol of multihop ad hoc networks*. arXiv preprint arXiv:1004.0422. 2010.
- [61] S. K. Tiwari, S. K. Mishra, and V. Richariya. *Multi-Hop Wireless Networks – Improved Congestion Control Mechanism*, International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), 1(8), 2012, October.
- [62] M. Al Hubaishi, T. Alahdal, R. Alsaqour, A. Berqia, M. Abdelhaq, and O. Alsaqour. *Enhanced binary exponential backoff algorithm for fair channel access in the IEEE 802.11 medium access control protocol*. International journal of communication systems, 27(12), 4166-4184, 2014.
- [63] Z. Li, A. Das, A. K. Gupta, and S. Nandi. *Performance analysis of IEEE 802.11 DCF: Throughput, delay, and fairness*. 2011.

- [64] E. Weyulu, M. Hanada, and M. W. Kim. *Optimizing RTS/CTS to improve throughput in ad hoc WLANs*. In IEEE 2017 Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS) (pp. 885-889). 2017, September.
- [65] M. R. Amin, M. S. Hossain, and M. Atiquzzaman. *In-band full duplex wireless LANs: Medium access control protocols, design issues and their challenges*. Information, 11(4), 216, 2020.
- [66] A. F. Rochim, and R. F. Sari. *Performance comparison of IEEE 802.11 n and IEEE 802.11 ac*. In IEEE 2016 International Conference on Computer, Control, Informatics and its Applications (IC3INA) (pp. 54-59). 2016, October.
- [67] P. Chatzimisios, A. C. Boucouvalas, V. Vitsas, A. Vafiadis, A. Oikonomidis, and P. Huang. A simple and effective backoff scheme for the IEEE 802.11 MAC protocol. In Proceedings of the 2nd International Conference on Cybernetics and Information Technologies, Systems and Applications (CITSA 2005) (Vol. 1, pp. 48-53). 2005, July.
- [68] A. Kumar, and K. Kumar. *Multiple access schemes for cognitive radio networks: A survey*. Physical Communication, 38, 100953, 2020.
- [69] J. J. Garcia-Luna-Aceves. *Carrier resolution multiple access*. In Proceedings of the 14th ACM Symposium on Performance Evaluation of Wireless Ad Hoc, Sensor, & Ubiquitous Networks (pp. 1-8). 2017, November.
- [70] Z. Gao, N. Zhang, and H. Han. *Analysis and design of collision avoidance optimization algorithm based on CSMA/CA*. In 2018 International Symposium on Communication Engineering & Computer Science (CECS 2018) (pp. 82-87). Atlantis Press. 2018, July.
- [71] A. A. Mhawes. *Wireless Personal Area Network (WPAN) Bluetooth and ZigBee Survey*. International Journal of Recent Research in Mathematics Computer Science and Information Technology. 8(1), 23-33, 2021.
- [72] A. B. Noel, A. Abdaoui, T. Elfouly, M. H. Ahmed, A. Badawy, and M. S. Shehata. *Structural health monitoring using wireless sensor networks: A comprehensive survey*. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 19(3), 1403-1423, 2017.
- [73] I. Natgunanathan, N. Fernando, S. W. Loke, and C. Weerasuriya. *Bluetooth Low Energy Mesh: Applications, Considerations and Current State-of-the-Art*. Sensors, 23(4), 1826, 2023.
- [74] J. Lee. *Reconnection Establishment Scheme Based on Energy Detection for Prepagged Bluetooth BR/EDR Device*. IEEE Internet of Things Journal, 7(1), 88-98, 2019.
- [75] M. A. Y. Imam, and M. P. K. Biswas. *MAC Address Routing Policy over the IP Network*. International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology (IJEAST), 3(11), 8-11, 2019.
- [76] T. Thamrin, and S. Sahib. *The inquiry and page procedure in Bluetooth connection*. In IEEE 2009 International Conference of Soft Computing and Pattern Recognition (pp. 218-222). 2009, December.
- [77] C. Koh, J. Kwon, and J. Hur. *BLAP: Bluetooth Link Key Extraction and Page Blocking Attacks*. In IEEE 2022 52nd Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks (DSN) (pp. 227-238). 2022, June.

- [78] J. K. R. Sastry, N. Venkatram, R. Deepika, and L. S. S. Reddy. *Efficient Power Management Techniques for increasing the Longevity of Intelligent tags*. International Transactions on Electrical, Electronics and Communication Engineering, 2(2), 21-25, 2012.
- [79] M. Anastasiadis. *Standards for providing Internet Services over Wireless Networks*. Master in Information Systems. Computer Networks, University of Macedonia. 2012.
- [80] M. C. Laghi. *Service Oriented Mobile Computing*. Dottorato di Ricerca in Tecnologie dell'Informazione. Università degli Studi di Parma. Dipartimento di Ingegneria dell'informazione. 2010.
- [81] M. Tozuka, K. Takano, M. Matsumoto, and K. Sato. *Transmission and Reconstructed of the Computer Generated Hologram using the Digital Wireless LED Visible Light Communication--Improvement of the reconstruction image using the band pass filter*. ITE Technical Report; ITE Tech. Rep. 2017.
- [82] P. Lilly. *Pentax Crashes DSLR Party with Colorful K-r Camera*. Hot Hardware, Inc. 2010, September. [Online]. Available: <https://hothardware.com/news/pentax-crashes-dslr-party-with-colorful-kr-camera>
- [83] C. Jenila, and R. K. Jeyachitra. *Green indoor optical wireless communication systems: Pathway towards pervasive deployment*. Digital Communications and Networks, 7(3), 410-444, 2021.
- [84] R. K. Ghosh and R. K. Ghosh. *Short Range Radio Protocols: Bluetooth and IR. Wireless Networking and Mobile Data Management*, Springer Singapore. Chapter 5, pp: 125-145, 2017.
- [85] A. C. Boucouvalas, and K. P. Peppas. *Link Layer Protocols for Short-Range IR Communications*. Optical Wireless Communications: An Emerging Technology, 463-483, 2016.
- [86] A. Santamaría, J. R. Vento-Álvarez, J. A. Rabadán, and R. Pérez-Jiménez. *The IrDA Standard. Wireless LAN standards and applications*. Artech. Chapter 2, pp: 9-44, 2001.
- [87] M. Fomichev, F. Álvarez, D. Steinmetzer, P. Gardner-Stephen, and M. Hollick. *Survey and systematization of secure device pairing*. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 20(1), 517-550, 2017.
- [88] D. Koutras, G. Stergiopoulos, T. Dasaklis, P. Kotzanikolaou, D. Glynos, and C. Douligeris. *Security in IoMT communications: A survey*. Sensors, 20(17), 4828, 2020.
- [89] J. Ghetie. *Wireless Metropolitan Area Networking. Fixed-Mobile Wireless Networks Convergence*, Cambridge University Press. Chapter 8, pp:172–190, 2009.
- [90] J. Olenewa. *Wireless Metropolitan Area Networks. Guide to wireless communications*. Cengage Learning. Chapter 9, pp: 317-356, 2013.
- [91] S. D. Ilcev, and S. D. Ilčev. *Stratospheric Platform Systems (SPSs). Global Mobile Satellite Communications Applications: For Maritime, Land and Aeronautical Applications Volume 2*, 561-621, 2018.
- [92] C. Beard, W. Stallings, *Long Range Communications. Wireless Communication, Networks and Systems*, Pearson Higher Education, Inc., 1st Edition, Chapter 16, pp: 544-587, 2016.
- [93] R. Sharma, P. Kumar, and D. Gaurav. *A Systematic Investigation of WiMAX and its Standards, Development, Technology and Security*. International Journal of Computer Applications, 160(3), 30-38. 2017.

- [94] I.B. Djordjevic. OFDM for Wireless and Optical Communications. Advanced optical and wireless communications systems. Chapter 7, pp: 495-574. Heidelberg: Springer. 2018.
- [95] G. Matange, and R. Gupta, R. Performance evaluation of fixed WiMAX IEEE 802.16 d and mobile WiMAX IEEE 802.16 e System. Proceedings of Recent Advances in Interdisciplinary Trends in Engineering & Applications (RAITEA). 2019.
- [96] R. Kulkarni, P. Rajput, and S. K. Shelke. Wi MAX Deinter leaver's Address Generation Unit through FPGA Implementation. International Journal of Computational Engineering Research (IJCER), 7(3), March 2017.
- [97] B. Hemnani. An Overview of 4G Technology. Iconic Research and Engineering (IRE) Journals, 1(9), 383-387, March 2018.
- [98] H. B. Nafea, F. W. Zaki, and H. E. Moustafa. Performance and capacity evaluation for mobile WiMAX IEEE 802.16 m standard. Nature, 1(1), 12-19, 2013.
- [99] A. Kaur. Bandwidth allocation scheduling algorithms for IEEE 802.16 WiMax protocol to improve QoS: A survey. International Journal of Computer Applications, 98(11), 16-22, 2014.
- [100] M. O. Odhiambo and A. P. O. Rayolla. The WiMAX PHY Layer. Digital Communication, InTech. Chapter 11, pp: 195-208, 2012.
- [101] D. Sikhwal, and R. Rathi. WiMAX (802.16) - A Study of Mobility and MAC layer. International Refereed Journal of Engineering and Science (IRJES), 3(3), 61-66, March 2014.
- [102] A. Mishra, and N. Glore. Privacy and security in WiMAX networks. WiMAX: Standards and security, CRC Press. Chapter 11, pp: 205-228, 2018.