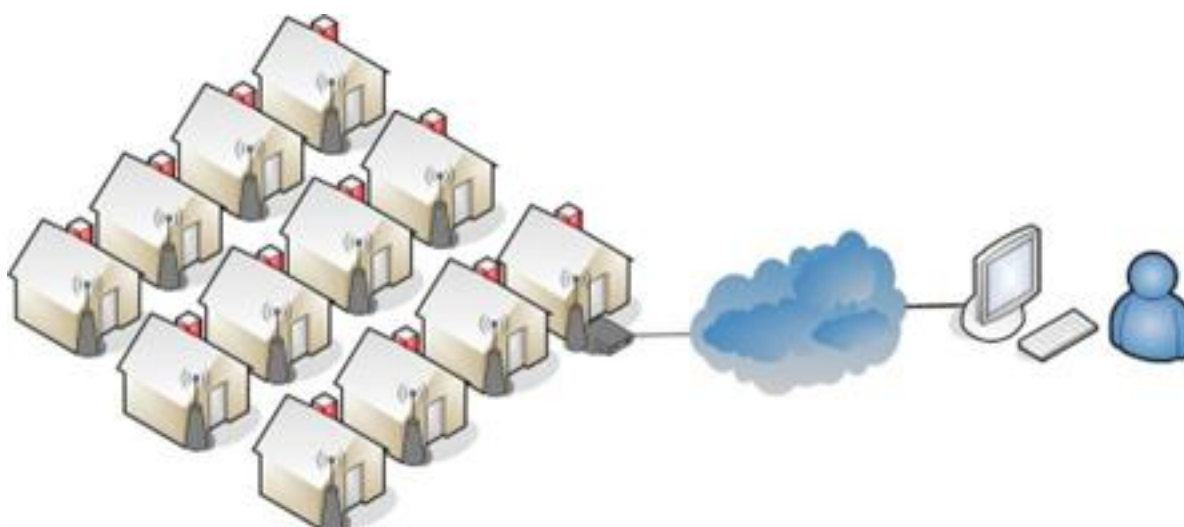


ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Πρωτόκολλα Ασύρματων Τοπικών και Προσωπικών Δικτύων»



Των φοιτητών – Αρ. Μητρώου:

Κρατούνη Μαρία – 113740
Όρλης Βασίλειος – 103652

Επιβλέπων
Ονοματεπώνυμο
Βαθμίδα

Ημερομηνία

Τίτλος Δ.Ε. Πρωτόκολλα Ασύρματων Τοπικών και Προσωπικών Δικτύων
Κωδικός Δ.Ε. ...

Ονοματεπώνυμο φοιτητών *Μαρία Κρατούνη και Βασίλειος Όρλης*

Ονοματεπώνυμο εισηγητή Βασίλειος Βίτσας

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε. 21/12/2025

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε. 31/5/2026

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 των φοιτητών Μαρία Κρατούνη και Βασίλειος Όρλης που την εκπόνησαν. 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 απαραίτητα και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

Σε εμάς, για την προσπάθεια, την αντοχή και την επιμονή μας!

Πρόλογος

Η επιλογή του θέματος της παρούσας πτυχιακής εργασίας έγινε λόγω του ιδιαίτερου ενδιαφέροντός μας για τις τεχνολογίες ασύρματων δικτύων και του σημαντικού ρόλου που διαδραματίζουν στα σύγχρονα συστήματα επικοινωνίας. Τα ασύρματα δίκτυα αποτελούν πλέον αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινότητας, τόσο σε προσωπικό όσο και σε επαγγελματικό επίπεδο, γεγονός που καθιστά τη μελέτη τους ιδιαίτερα επίκαιρη και ουσιαστική. Σκοπός της εργασίας είναι η συγκριτική παρουσίαση βασικών ασύρματων πρωτοκόλλων επικοινωνίας και η κατανόηση του ρόλου τους σε διαφορετικά σενάρια χρήσης.

Κατά την εκπόνηση της εργασίας, είχαμε την ευκαιρία να εμβαθύνουμε σε βασικές έννοιες των ασύρματων επικοινωνιών, να κατανοήσουμε τη λειτουργία διαφορετικών πρωτοκόλλων και προτύπων, καθώς και να μελετήσουμε τεχνολογίες όπως το Bluetooth, IrDA και τα σύγχρονα δίκτυα κινητών επικοινωνιών. Η διαδικασία αυτή συνέβαλε στην ενίσχυση των γνώσεών μας στον τομέα των δικτύων και στην καλύτερη κατανόηση ζητημάτων που σχετίζονται με την ασφάλεια, την απόδοση και την αξιοπιστία των ασύρματων συστημάτων.

Το βασικό όφελος που αποκομίσαμε από την εργασία αυτή είναι η σύνδεση της θεωρητικής γνώσης με πρακτικές εφαρμογές στον χώρο των τηλεπικοινωνιών, καθώς και η ανάπτυξη δεξιοτήτων ανάλυσης και κατανόησης τεχνολογικών συστημάτων.

Περίληψη

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εξετάζει τις τεχνολογίες ασύρματων δικτύων και επικοινωνιών, οι οποίες αποτελούν βασικό πυλώνα των σύγχρονων συστημάτων πληροφορικής και τηλεπικοινωνιών. Στόχος της εργασίας είναι η μελέτη των βασικών αρχών λειτουργίας των ασύρματων δικτύων, η ανάλυση των κυριότερων πρωτοκόλλων και προτύπων επικοινωνίας, καθώς και η διερεύνηση εξειδικευμένων τεχνολογιών ασύρματης διασύνδεσης.

Αρχικά παρουσιάζεται η ιστορική εξέλιξη των ασύρματων επικοινωνιών και αναλύονται οι βασικές κατηγορίες ασύρματων δικτύων, τα χαρακτηριστικά τους και οι εφαρμογές τους. Στη συνέχεια εξετάζονται τα σημαντικότερα πρωτόκολλα ασύρματης επικοινωνίας, οι μηχανισμοί ασφάλειας και οι τεχνικές διασφάλισης της ποιότητας υπηρεσίας. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις λειτουργίες του επιπέδου ζεύξης δεδομένων και στις μεθόδους προσπέλασης του κοινού μέσου μετάδοσης, καθώς και στις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την αποτελεσματική διαχείριση των ασύρματων επικοινωνιών.

Επιπλέον, αναλύονται το φυσικό επίπεδο των ασύρματων δικτύων, τα μέσα μετάδοσης και οι σύγχρονες τεχνικές διαμόρφωσης και πολυπλεξίας που συμβάλλουν στη βελτίωση της απόδοσης και της αξιοπιστίας των συστημάτων. Τέλος, πραγματοποιείται μελέτη των τεχνολογιών Bluetooth, IrDA, 3G έως 5G με έμφαση στην αρχιτεκτονική, τις εφαρμογές, τα πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς τους.

Από τη μελέτη προκύπτει ότι τα ασύρματα δίκτυα προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα ως προς την ευελιξία, την κινητικότητα και τη διασύνδεση συσκευών, ενώ παράλληλα αντιμετωπίζουν προκλήσεις που σχετίζονται με την ασφάλεια, τις παρεμβολές και την ενεργειακή απόδοση. Η συνεχής εξέλιξη των τεχνολογιών και των πρωτοκόλλων αναμένεται να ενισχύσει περαιτέρω τον ρόλο των ασύρματων επικοινωνιών στα μελλοντικά ψηφιακά περιβάλλοντα.

Λέξεις-κλειδιά: Ασύρματα Δίκτυα, Πρωτόκολλα Επικοινωνίας, Bluetooth, IrDA, Δίκτυα Κινητής Τηλεφωνίας.

«Πρωτόκολλα Ασύρματων Τοπικών και Προσωπικών Δικτύων» (Wireless Local and Personal Area Network Protocols)

«Κρατούνη Μαρία – Όρλης Βασίλειος»
(Kratouni Maria – Orlis Vasileios)

Abstract

This thesis examines wireless network technologies, which are a key component of modern information and communication systems. The objective is to present the basic principles of wireless networks, analyze the main communication protocols and standards, and study widely used wireless technologies.

The work first presents the historical development of wireless communications and the main categories of wireless networks, along with their characteristics and applications. It then analyzes the most important wireless communication protocols, security mechanisms, and quality of service (QoS) techniques. Particular attention is given to data link layer functions and medium access control methods used in wireless communication systems.

Furthermore, the physical layer of wireless networks is discussed, including transmission media and key modulation and multiplexing techniques that improve performance and reliability. Finally, Bluetooth, IrDA, 3G-5G technologies are examined, focusing on their architecture, applications, advantages, and limitations.

The study shows that wireless networks offer important advantages such as flexibility, mobility, and easy device connectivity. At the same time, they face challenges related to security, interference, and energy efficiency. Overall, continuous technological development is expected to further enhance the role of wireless communications in modern and future network environments.

Keywords: Wireless Networks, Communication Protocols, Bluetooth, IrDA, Mobile Networks.

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας πτυχιακής εργασίας, θα θέλαμε να εκφράσουμε ειλικρινά τις ευχαριστίες μας σε όλους όσοι μας στήριξαν σε αυτή τη μακρά και απαιτητική πορεία.

Πρώτα απ' όλα, ευχαριστούμε θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μας για την καθοδήγηση και την υποστήριξή του κατά την εκπόνηση της εργασίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες απευθύνουμε στις οικογένειές μας για τη συνεχή στήριξη, την υπομονή και την κατανόησή τους.

Τέλος, ευχαριστούμε τους φίλους μας και το στενό προσωπικό μας περιβάλλον για την ηθική υποστήριξη και την ενθάρρυνση καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μας, με ιδιαίτερη αναφορά σε όσους στάθηκαν δίπλα μας ουσιαστικά σε αυτή την πορεία.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	5
Περίληψη.....	6
Abstract	7
Ευχαριστίες	8
Περιεχόμενα	9
Κατάλογος Εικόνων	15
Κατάλογος Πινάκων.....	17
Συντομογραφίες.....	19
Κεφάλαιο 1ο:Θεωρητικό υπόβαθρο και βασικές έννοιες 29	
1.1 Ορισμός και Τύποι Ασύρματων Τοπικών Δικτύων.....	29
1.2 Ιστορική Αναδρομή Ασύρματων Δικτύων	30
1.2.1 Από τον Ηλεκτρομαγνητισμό στην Πρώιμη Ασύρματη Επικοινωνία (1830–1930).....	30
1.2.2 Ο Marconi και η Εποχή της Ραδιοτηλεγραφίας (1895–1930).....	31
1.2.3 Ραδιοφωνία και Πόλεμος (1930–1945).....	31
1.2.4 Από τον Ψυχρό Πόλεμο στο ARPANET (1945–1979).....	32
1.2.5 Η Ψηφιακή Επανάσταση και τα WLAN (1980–1997).....	33
1.2.6 Η Άνοδος των Ψηφιακών Κινητών Δικτύων (1990–2010).....	34
1.2.7 Προς τα Δίκτυα του Μέλλοντος (2010–σήμερα)	37
1.3 Χρησιμότητα, Εξάπλωση και Βασικές Αρχές Λειτουργίας των Ασύρματων Δικτύων	41
1.4 Σύγκριση Ενσύρματων και Ασύρματων Τοπικών Δικτύων	41
1.5 Τρέχουσες Προκλήσεις	42
Κεφάλαιο 2ο:Πρωτόκολλα και Πρότυπα Ασύρματης Επικοινωνίας 44	
2.1 Εισαγωγή στα Πρωτόκολλα Ασύρματων Δικτύων	44
2.2 Κατηγορίες Πρωτοκόλλων Ασύρματων Δικτύων	44
2.3 Πρωτόκολλα Ασύρματων Δικτύων Προσωπικής Περιοχής (WPAN)	45
2.3.1 Εξειδικευμένα και Λιγότερο Διαδεδομένα WPAN	46
2.4 Πρωτόκολλα Ασύρματων Τοπικών Δικτύων (WLAN)	47
2.4.1 Εξειδικευμένες Παραλλαγές 802.11.....	48
2.5 Πρωτόκολλα Μητροπολιτικών Ασύρματων Δικτύων WMAN.....	48
2.6 Πρωτόκολλα WWAN (Wireless Wide Area Networks)	49
2.7 Άλλα Πρωτόκολλα Χαμηλής Ισχύος και IoT.....	50
2.8 Στοιβα Πρωτοκόλλων και Αρχιτεκτονική.....	51
2.9 Πρωτόκολλα Ασφαλείας (WEP, WPA, WPA2, WPA3, SSP).....	52
2.10 Ποιότητα Υπηρεσίας (QoS) και Αξιοπιστία	54
2.11 Σύγκριση και Επιλογή Πρωτοκόλλων Ασυρμάτων Δικτύων	54

2.12	Μελλοντικές Εξελίξεις στα Πρωτόκολλα Ασύρματων Δικτύων	56
Κεφάλαιο 3ο:Επίπεδο	Ζεύξης και Προσπέλαση στο Μέσο	
57		
3.1	Λειτουργίες Επιπέδου Ζεύξης	57
3.2	Τεχνικές Μέθοδοι Προσπέλασης Μέσου	59
3.2.1	Χρονική Διαίρεση Πολλαπλής Πρόσβασης (Time Division Multiple Access – TDMA)	60
3.2.2	Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA)	61
3.2.3	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA).....	62
3.2.4	Σύγκριση Πρωτοκόλλων Προσπέλασης: CSMA/CA και CSMA/CD.....	63
3.3	Τεχνικές DCF και PCF	65
3.3.1	Τεχνική DCF	65
3.3.2	Τεχνική PCF	65
3.3.3	Σύγκριση Τεχνικών DCF και PCF	66
3.4	Μέθοδοι Πρόσβασης (βασική και Request To Send / Clear To Send)	67
3.5	Κρυφοί και Εκτεθειμένοι Σταθμοί	69
3.6	Σύγκριση και Επιλογή Πρωτοκόλλων.....	70
1.1	Συμπεράσματα.....	71
Κεφάλαιο 4ο:Φυσικό	Επίπεδο και Τεχνικές Μετάδοσης	
73		
4.1	Μηχανισμοί και Απώλειες Διάδοσης	73
4.2	Φυσικά Μέσα Ασύρματης Μετάδοσης	74
4.2.1	Υπέρυθη Μετάδοση	74
4.2.2	Ραδιοκύματα	74
4.2.3	Μικροκύματα	75
4.2.4	Laser / Free Space Optics (FSO)	76
4.2.5	Σύγκριση Φυσικών Μέσων Ασύρματης Μετάδοσης	77
4.3	Τεχνικές Διαμόρφωσης Σήματος	78
4.3.1	Αναλογικές τεχνικές.....	79
4.3.2	Ψηφιακές Τεχνικές	79
4.3.3	Επιλογή Τεχνικής Διαμόρφωσης.....	81
4.4	Τεχνικές Διασποράς Φάσματος.....	82
4.4.1	Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS).....	82
4.4.2	Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)	85
4.5	Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)	86
4.6	Multiple Input Multiple Output (MIMO)	88
4.7	Σύγκριση τεχνικών	91
4.8	Παρεμβολές, θόρυβος και ενεργειακή απόδοση	92
4.9	Συμπεράσματα.....	93
Κεφάλαιο 5ο:.....	Bluetooth	
93		

5.1	Ανάπτυξη και Πρόοδος του Προτύπου Bluetooth	93
5.2	Τοπολογίες Bluetooth.....	96
5.2.1	Piconet (Master–Slave): Πλεονεκτήματα και Περιορισμοί.....	96
5.2.2	Scatternets: Επέκταση και διαχείριση πολυπλοκότητας	97
5.3	Τεχνική Υποδομή και Στοιβά Πρωτοκόλλων	98
5.3.1	Εφαρμογές Bluetooth σε Wearables, Hands-free Συσκευές και IoT.....	99
5.4	Οφέλοι και Περιορισμοί.....	100
5.5	Ασφάλεια, Προστασία και Κίνδυνοι	102
1.2	Συμπεράσματα.....	103
Κεφάλαιο 6ο:IrDA	(Infrared Data Association)	104
6.1	Εισαγωγή στις Βασικές Αρχές Υπέρυθρης Μετάδοσης.....	104
6.2	Αρχές Υπέρυθρης Μετάδοσης	104
6.3	Ιστορική Εξέλιξη και Σημασία της IrDA	105
6.4	Δομή και Λειτουργία της Στοιβάς IrDA	106
6.4.1	Προφίλ Ταχύτητας (SIR, MIR, FIR, VFIR)	107
6.4.2	Ανώτερα Επίπεδα Στοιβάς (IrLAP, IrLMP, TinyTP).....	108
6.4.3	Δυνατότητες και Περιορισμοί της IrDA.....	109
6.5	Εφαρμογές και Σύγχρονες Χρήσεις	110
6.6	Δέκτης και Ενεργειακή Απόδοση.....	111
6.7	Συγκριτική Ανάλυση	111
6.8	Παράγοντες Υποχώρησης της IrDA.....	113
Κεφάλαιο 7ο:Πρότυπα	IEEE	802.11
7.1	Γενικά για το IEEE 802.11	115
7.1.1	Αρχιτεκτονική: AP, BSS, ESS	115
7.1.2	Φάσμα Συχνοτήτων: 2,4, 5 και 6 GHz	117
7.1.3	Κανάλια και Εύρος Ζώνης	118
7.2	Εκδόσεις IEEE 802.11: a / b / g / n / ac / ax / be.....	121
7.2.1	IEEE 802.11a.....	121
7.2.2	IEEE 802.11b	122
7.2.3	IEEE 802.11g	123
7.2.4	IEEE 802.11n	124
7.2.5	IEEE 802.11ac.....	125
7.2.6	IEEE 802.11ax.....	126
7.2.7	IEEE 802.11be.....	128
7.3	Σύγκριση προτύπων IEEE 802.11	129
7.4	Συμπεράσματα και Μελλοντικές Τάσεις.....	132
Κεφάλαιο 8ο:Τεχνολογία	WPAN:	Zigbee
133		

8.1	Εισαγωγή στο ZigBee και το IEEE 802.15.4	133
8.2	Τεχνικά Χαρακτηριστικά	133
8.3	Αρχιτεκτονική και Τύποι Συσκευών	134
8.4	Διαχείριση Ενέργειας	135
8.5	Ασφάλεια.....	136
8.6	Εφαρμογές.....	136
8.7	Σύγκριση με Bluetooth	137
8.8	Συμπεράσματα.....	138
Κεφάλαιο 9ο:Άλλα	πρότυπα	WLAN
139		
9.1	HomeRF	139
9.1.1	Προέλευση και Στόχοι.....	139
9.1.2	Αρχιτεκτονική και Τεχνικά Χαρακτηριστικά.....	139
9.1.3	Εφαρμογές του HomeRF σε Οικιακά Δίκτυα	141
9.1.4	Απόσυρση του HomeRF.....	142
9.1.5	Σύγκριση IEEE 802.11b και HomeRF	142
9.2	HiperLAN.....	143
9.2.1	Ανάπτυξη από ETSI	143
9.2.2	Οικογένεια HiperLAN.....	144
9.2.3	HiperLAN/1.....	144
9.2.4	HiperLAN/2.....	145
9.2.5	HIPERACCESS και HIPERLINK	145
9.2.6	Υποχώρηση των Προτύπων HiperLAN	146
9.2.7	Χαρακτηριστικά και Εφαρμογές	146
9.2.8	Σύγκριση HiperLAN με IEEE 802.11	147
9.3	Συμπεράσματα.....	148
Κεφάλαιο 10ο:Άλλα	Πρότυπα	WMAN
149		
10.1	WiMax.....	149
10.2	Αρχιτεκτονική	150
10.3	Επίπεδα PHY και MAC	152
10.4	Κατηγορίες και Εφαρμογές.....	155
10.5	Πλεονεκτήματα και Περιορισμοί	155
10.6	Σύγκριση WiMAX με LTE και 5G	155
10.7	Συμπεράσματα.....	156
Κεφάλαιο 11ο:Άλλα	Πρότυπα	WWAN
158		
11.1	Εξέλιξη Κινητών Δικτύων: 3G, 4G και 5G.....	158
11.2	Τεχνολογία και Υπηρεσίες 3G (UMTS)	158
11.3	Τεχνολογία και Υπηρεσίες 4G (LTE)	160

11.3.1	Μετάβαση σε All-IP Δίκτυο.....	161
11.3.2	OFDMA και MIMO στο LTE	162
11.3.3	Υπηρεσία VoLTE.....	163
11.3.4	Καθυστερήσεις, Ταχύτητα και Ποιότητα Υπηρεσίας (QoS) στο LTE.....	164
11.4	Τεχνολογία και Υπηρεσίες 5G	165
11.4.1	Αρχιτεκτονική 5G: Standalone και Non-standalone	166
11.4.2	Αρχιτεκτονική 5G-AN και 5G Core.....	167
11.4.3	Ζώνες Συχνοτήτων: mmWave και Sub-6GHz	169
11.4.4	Edge Computing στο 5G	170
11.4.5	Network Slicing και οι Εφαρμογές του	170
11.4.6	Δίκτυο 5G και Internet of Things.....	171
11.4.7	Έξυπνες Πόλεις	172
11.4.8	Βιομηχανία 4.0	172
11.4.9	Υγεία	173
11.4.10	Αυτόνομα Οχήματα.....	173
11.5	Σύγκριση 3G, 4G και 5G.....	174
11.6	Συμπεράσματα.....	175
Κεφάλαιο 12ο:	Εφαρμογές και Μελλοντικές Προοπτικές	176
12.1	Τάσεις Ενοποίησης Τεχνολογιών.....	176
12.2	Ο Ρόλος του 6G στο Μέλλον	176
12.3	Η Σημασία της Ασφάλειας και της Ιδιωτικότητας	177
12.4	Μελλοντικές Προκλήσεις: Φάσμα και Κλιμάκωση	177
12.5	Συμπεράσματα.....	178
	BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	180

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2.1: Κατηγορίες ασύρματων δικτύων με βάση την εμβέλεια κάλυψης (WPAN, WLAN, WMAN, WWAN)

Εικόνα 2.2: Αρχιτεκτονική NB-IoT βασισμένη στο LTE/EPC

Εικόνα 3.1: Δομή μιας διεύθυνσης MAC

Εικόνα 3.2: Ενδεικτικό πλαίσιο TDMA τύπου GSM με 8 χρονοθυρίδες/πλαίσιο

Εικόνα 3.3: Σύγκριση της κατανομής πόρων μεταξύ OFDM και OFDMA

Εικόνα 3.4: Μηχανισμός χρονισμού πρόσβασης CSMA/CA

Εικόνα 3.5: Αντιμετώπιση του προβλήματος κρυφών σταθμών μέσω RTS/CTS

Εικόνα 3.6: Χρονική ακολουθία πλαισίων RTS/CTS/DATA/ACK με SIFS, DIFS και NAV

Εικόνα 4.1: Μηχανισμοί διάδοσης σήματος – LOS.

Εικόνα 4.2: Μετάδοση δεδομένων μέσω FSO

Εικόνα 4.3: Σύγκριση AM και FM διαμόρφωσης

Εικόνα 4.4: Διαγράμματα χώρου σήματος για BPSK, QPSK και 8-PSK

Εικόνα 4.5: Constellation 16-QAM

Εικόνα 4.6: Μοτίβο εναλλαγής συχνοτήτων FHSS

Εικόνα 4.7: Πομπός (a) και δέκτης (b) FHSS

Εικόνα 4.8: Πομπός (a) και δέκτης DSSS

Εικόνα 4.9: OFDM σύμβολο με κυκλικό πρόθεμα

Εικόνα 4.10: Βήματα πομπού OFDM

Εικόνα 4.11: Σύστημα MIMO με πολλαπλές κεραίες πομπού και δέκτη

Εικόνα 5.1: Σύγκριση Bluetooth Classic και Bluetooth Low Energy (BLE)

Εικόνα 5.2: Χρονολογική εξέλιξη των εκδόσεων Bluetooth (V1–V5)

Εικόνα 5.3: Τοπολογίες Bluetooth piconet και scatternet

Εικόνα 5.4: Τοπολογία Bluetooth: Piconet και Scatternet

Εικόνα 6.1: Πλήρης στοίβα πρωτοκόλλων IrDA

Εικόνα 7.1: Αρχιτεκτονική δικτύου IEEE 802.11: BSS, ESS και Access Points

Εικόνα 7.2: Επικαλυπτόμενα και μη επικαλυπτόμενα κανάλια στη ζώνη 2.4 GHz

Εικόνα 7.3: Σύγκριση ζωνών 2.4 GHz και 5 GHz ως προς κάλυψη και ρυθμό μετάδοσης

Εικόνα 7.4: Χρονογραμμή εξέλιξης των προτύπων IEEE 802.11 από το 1997 έως το 2024

Εικόνα 7.5: Σύγκριση OFDM και OFDMA στο Wi-Fi

Εικόνα 8.1: Τοπολογίες δικτύου ZigBee (star, tree, mesh)

Εικόνα 8.2: Στοίβα πρωτοκόλλων ZigBee

Εικόνα 9.1: HomeRF Δικτύωση

Εικόνα 10.1: Αρχιτεκτονική Point-to-Multipoint (PMP) του WiMAX

Εικόνα 10.2: Αρχιτεκτονική αναφοράς WiMAX (NAP, NSP, ASP)

Εικόνα 10.3: Αρχιτεκτονική ολοκλήρωσης WLAN/WMAN

Εικόνα 10.4: Αρχιτεκτονική MAC και PHY του WiMAX (IEEE 802.16)

Εικόνα 11.1: Αρχιτεκτονική δικτύου UMTS/WCDMA και HSPA (3G σύστημα)

Εικόνα 11.2: Αρχιτεκτονική LTE και Evolved Packet Core (EPC) – All-IP δίκτυο

Εικόνα 11.3: Αρχιτεκτονική MIMO-OFDMA στο LTE

Εικόνα 11.4: Αρχιτεκτονικές 5G Non-Standalone και Standalone

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1: Τύποι ασύρματων δικτύων

Πίνακας 1.2: Σύγκριση χαρακτηριστικών ενσύρματων και ασύρματων δικτύων

Πίνακας 2.1: Κατηγοριοποίηση πρωτοκόλλων ασύρματων δικτύων (WPAN, WLAN, WMAN, WWAN)

Πίνακας 2.2: Κύρια πρωτόκολλα WPAN και χρήση

Πίνακας 2.3: Ποσοτική σύνοψη βασικών WPAN

Πίνακας 2.4: Εξειδικευμένα WPAN

Πίνακας 2.5: Επισκόπηση βασικών προτύπων Wi-Fi

Πίνακας 2.6: Εξειδικευμένες παραλλαγές 802.11

Πίνακας 2.7: Κύριες τεχνολογίες WMAN

Πίνακας 2.8: Κύρια πρωτόκολλα WWAN

Πίνακας 2.9: Πρωτόκολλα IoT χαμηλής ισχύος

Πίνακας 2.10: Επίπεδα OSI σε ασύρματα δίκτυα: λειτουργίες και πρωτόκολλα

Πίνακας 2.11: Σύγκριση πρωτοκόλλων ασφάλειας σε ασύρματα δίκτυα

Πίνακας 2.12: Σύγκριση κύριων πρωτοκόλλων ασύρματης επικοινωνίας

Πίνακας 3.1: Οι τέσσερις θεμελιώδεις λειτουργίες του Επιπέδου Ζεύξης

Πίνακας 3.2: Συγκριτική σύνοψη CSMA/CD–CSMA/CA

Πίνακας 3.3: Τεχνολογίες πρόσβασης και πεδία εφαρμογής

Πίνακας 3.4: Σύγκριση DCF και PCF

Πίνακας 3.5: Συγκριτική ανάλυση τεχνικών πολλαπλής πρόσβασης στο μέσο (TDMA, OFDMA, CSMA/CA)

Πίνακας 4.1: Ενδεικτικές ζώνες RF, εύρος και χρήσεις

Πίνακας 4.2: Ενδεικτικές μικροκυματικές ζώνες, ιδιότητες και χρήσεις

Πίνακας 4.3α: Βασικά χαρακτηριστικά φυσικών μέσων ασύρματης μετάδοσης

Πίνακας 4.3β: Πλεονεκτήματα, μειονεκτήματα και εφαρμογές

Πίνακας 4.4: Απαιτήσεις SNR και φασματική αποδοτικότητα ανά διαμόρφωση

Πίνακας 4.6: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα MIMO

Πίνακας 4.7: Ενδεικτικές εφαρμογές MIMO σε σύγχρονα ασύρματα πρότυπα

Πίνακας 4.8: Σύγκριση τεχνικών διασποράς/πολυπλεξίας

Πίνακας 5.1: Κλάσεις ισχύος (BR/EDR & BLE) & εκδόσεις / PHY του BLE

Πίνακας 5.2: Σύνοψη ισχυρών σημείων και περιορισμών του Bluetooth/BLE για προσωπικά δίκτυα

Πίνακας 6.1: Προφίλ IrDA

Πίνακας 6.2: Επίπεδα IrDA

Πίνακας 6.3: Κατανάλωση ενέργειας

Πίνακας 6.4: Σύγκριση βασικών χαρακτηριστικών των IrDA, Bluetooth και Wi-Fi

Πίνακας 7.1: Σύγκριση Infrastructure Mode και Ad Hoc Mode

Πίνακας 7.2: Εξέλιξη και βασικά χαρακτηριστικά των προτύπων IEEE 802.11 (Wi-Fi)

Πίνακας 7.3: Σύγκριση ζωνών συχνοτήτων IEEE 802.11

Πίνακας 7.4: Βασικά χαρακτηριστικά IEEE 802.11a

Πίνακας 7.5: Βασικά χαρακτηριστικά IEEE 802.11b

Πίνακας 7.6: Βασικά χαρακτηριστικά IEEE 802.11g

Πίνακας 7.7: Βασικά χαρακτηριστικά IEEE 802.11n

Πίνακας 7.8: Βασικά χαρακτηριστικά IEEE 802.11ac

Πίνακας 7.9: Βασικά χαρακτηριστικά IEEE 802.11ax

Πίνακας 7.10: Βασικά χαρακτηριστικά IEEE 802.11be

Πίνακας 7.11: Βασικά χαρακτηριστικά προτύπων IEEE 802.11

Πίνακας 7.12: Βασικά χαρακτηριστικά προτύπων IEEE 802.11

Πίνακας 7.13: Βασικά χαρακτηριστικά προτύπων IEEE 802.11

Πίνακας 8.2: Απαιτήσεις ανά τομέα εφαρμογής ZigBee

Πίνακας 8.3: Βασικές διαφορές ZigBee και BLE

Πίνακας 9.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά HomeRF

Πίνακας 9.2: Σύγκριση HomeRF και IEEE 802.11b

Πίνακας 9.3: Χαρακτηριστικά HiperLAN

Πίνακας 9.4: Βασικά χαρακτηριστικά HiperLAN/2 και IEEE 802.11a

Πίνακας 10.1: Σύγκριση χαρακτηριστικών PHY και MAC του WiMAX

Πίνακας 10.2: Συγκριτικά τεχνικά χαρακτηριστικά WiMAX, LTE και 5G

Πίνακας 11.1: Σύγκριση δικτύων GSM και UMTS

Πίνακας 11.2: Σύγκριση τεχνολογιών φωνής (VoLTE, 3G, 2G)

Πίνακας 11.3: Παραδείγματα QoS κλάσεων στο LTE

Πίνακας 11.4: Βασικές Network Functions του 5G Core και οι κύριες λειτουργίες τους

Πίνακας 11.5: Σύγκριση χαρακτηριστικών sub-6GHz και mmWave στο 5G

Πίνακας 11.6: Σύγκριση τεχνολογιών 3G, 4G και 5G

Συντομογραφίες

3DES	Triple Data Encryption Standard
3GPP	3rd Generation Partnership Project
A2DP	Advanced Audio Distribution Profile
ACK	Acknowledgement
AES	Advanced Encryption Standard
AES-CCM	AES Counter with CBC-MAC
AES-CCMP	AES Counter Mode with CBC-MAC Protocol
AES-GCMP	AES Galois/Counter Mode Protocol
AFH	Adaptive Frequency Hopping
AGC	Automatic Gain Control
AI	Artificial Intelligence
AKA	Authentication and Key Agreement
ALOHA	Additive Links On-line Hawaii Area
AM	Amplitude Modulation
AMC	Adaptive Modulation and Coding
AMF	Access and Mobility Management Function
AMR-WB	Adaptive Multi-Rate Wideband
AN	Access Network
ANT	ANT Wireless Protocol
AODV	Ad hoc On-Demand Distance Vector
AP	Access Point
APD	Avalanche Photodiode
APS	Application Support Sublayer
AR	Augmented Reality
AR/VR	Augmented Reality / Virtual Reality
ARPANET	Advanced Research Projects Agency Network
ARQ	Automatic Repeat Request
ASK	Amplitude Shift Keying
ASN	Access Service Network
ASP	Application Service Provider
ATM	Asynchronous Transfer Mode
ATT	Attribute Protocol
AUSF	Authentication Server Function
BE	Best Effort
BFSK	Binary Frequency Shift Keying

BLE	Bluetooth Low Energy
BPSK	Binary Phase Shift Keying
BR/EDR	Basic Rate / Enhanced Data Rate
BRAN	Broadband Radio Access Networks
BS	Base Station
BSS	Basic Service Set
BSSID	Basic Service Set Identifier
CA	Collision Avoidance
CAP	Contention Access Period
CCK	Complementary Code Keying
CD	Collision Detection
CDMA	Code Division Multiple Access
CFP	Contention-Free Period
CFP1	Contention-Free Period 1 (HiperLAN)
CFP2	Contention-Free Period 2 (HiperLAN)
CNSA	Commercial National Security Algorithm
CP	Contention Period / Cyclic Prefix
CPS	Common Part Sublayer
CQI	Channel Quality Indicator
CRC	Cyclic Redundancy Check
CS	Convergence Sublayer
CSFB	Circuit Switched Fallback
CSI	Channel State Information
CSMA	Carrier Sense Multiple Access
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
CSMA/CD	Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection
CSN	Connectivity Service Network
CTS	Clear To Send
DAB	Digital Audio Broadcasting
DAC	Digital-to-Analog Converter
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency
DCF	Distributed Coordination Function
DECT	Digital Enhanced Cordless Telecommunications
DES	Data Encryption Standard
DES/3DES	Data Encryption Standard / Triple DES
DFS	Dynamic Frequency Selection

DFT	Discrete Fourier Transform
DH	Diffie-Hellman
DIFS	DCF Interframe Space
DL	Downlink
DLC	Data Link Control
DLE	Data Length Extension
DMT	Discrete Multitone
DNS	Domain Name System
DQPSK	Differential Quadrature Phase Shift Keying
DSB	Double Sideband
DSB-LC	Double Sideband Large Carrier
DSL	Digital Subscriber Line
DSS	Dynamic Spectrum Sharing
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
DVB-T/T2	Digital Video Broadcasting – Terrestrial
EAP	Extensible Authentication Protocol
EAP-AKA	EAP Authentication and Key Agreement
ECC	Elliptic Curve Cryptography
ECDH	Elliptic Curve Diffie-Hellman
EDCA	Enhanced Distributed Channel Access
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
EDR	Enhanced Data Rate
EHF	Extremely High Frequency
EHT	Extremely High Throughput
EMC	Electromagnetic Compatibility
ENISA	European Union Agency for Cybersecurity
EPC	Evolved Packet Core
EPS	Evolved Packet System
ESS	Extended Service Set
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
EY-NPMA	Elimination Yield Non-Preemptive Multiple Access
FCC	Federal Communications Commission
FCS	Frame Check Sequence
FDD	Frequency Division Duplex
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FEC	Forward Error Correction

FFD	Full Function Device
FFT	Fast Fourier Transform
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
FIR	Fast Infrared
FM	Frequency Modulation
FMC	Fixed-Mobile Convergence
FSK	Frequency Shift Keying
FSO	Free Space Optics
FTP	File Transfer Protocol
GATT	Generic Attribute Profile
GDPR	General Data Protection Regulation
GFSK	Gaussian Frequency Shift Keying
GMSK	Gaussian Minimum Shift Keying
GPRS	General Packet Radio Service
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
GSMA	GSM Association
HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request
HBR	High Bit Rate
HCF	Hybrid Coordination Function
HCI	Host Controller Interface
HD	High Definition
HDLC	High-Level Data Link Control
HF	High Frequency
HFP	Hands-Free Profile
HID	Human Interface Device
HIPERACCESS	High Performance Radio Access
HIPERLAN	High Performance Radio LAN
HIPERLAN/1	High Performance Radio LAN Type 1
HIPERLAN/2	High Performance Radio LAN Type 2
HIPERLINK	High Performance Radio Link
HLR	Home Location Register
HS	High Speed
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
HSPA	High Speed Packet Access
HSUPA	High Speed Uplink Packet Access

HTTP	Hypertext Transfer Protocol
IBSS	Independent Basic Service Set
ICI	Inter-Carrier Interference
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
IFS	Interframe Space
IM/DD	Intensity Modulation / Direct Detection
IMS	IP Multimedia Subsystem
IMT	International Mobile Telecommunications
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
IPS	Indoor Positioning System
IPTV	Internet Protocol Television
IR	Infrared
IrDA	Infrared Data Association
IRS	Intelligent Reflecting Surfaces
IS-95	Interim Standard 95
ISI	Inter-Symbol Interference
ISM	Industrial, Scientific and Medical
ISO	International Organization for Standardization
ITU	International Telecommunication Union
ITU-R	ITU Radiocommunication Sector
IV	Initialization Vector
KRACK	Key Reinstallation Attack
L2CAP	Logical Link Control and Adaptation Protocol
LAN	Local Area Network
LBR	Low Bit Rate
LC3	Low Complexity Communication Codec
LE	Low Energy
LED	Light Emitting Diode
LF	Low Frequency
LFSR	Linear Feedback Shift Register
LLC	Logical Link Control
LM-IAS	Link Management – Information Access Service
LMDS	Local Multipoint Distribution Service

LoRa	Long Range
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network
LOS	Line of Sight
LPWAN	Low Power Wide Area Network
LSAP	Link Service Access Point
LTE	Long Term Evolution
LTE-A	LTE-Advanced
LTE-M	LTE for Machines
M2M	Machine-to-Machine
MAC	Medium Access Control
MEC	Multi-access Edge Computing
MF	Medium Frequency
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MIR	Medium Infrared
MITM	Man-in-the-Middle
MLO	Multi-Link Operation
MME	Mobility Management Entity
MMS	Multimedia Messaging Service
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
MSC	Mobile Switching Center
MSC/HLR	Mobile Switching Center / Home Location Register
MU-MIMO	Multi-User MIMO
NAP	Network Access Provider
NAV	Network Allocation Vector
NB-IoT	Narrowband Internet of Things
NCP	Network Control Protocol
NEF	Network Exposure Function
NFC	Near Field Communication
NFV	Network Functions Virtualization
NIC	Network Interface Card
NIST	National Institute of Standards and Technology
NR	New Radio (5G)
NRF	Network Repository Function
NRZ	Non-Return-to-Zero
NSA	Non-Standalone
NSP	Network Service Provider

NSSF	Network Slice Selection Function
O-QPSK	Offset Quadrature Phase Shift Keying
OASIS	Organization for the Advancement of Structured Information Standards
OBEX	Object Exchange
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OOB	Out-of-Band
OOK	On-Off Keying
OSI	Open Systems Interconnection
OUI	Organizationally Unique Identifier
OWE	Opportunistic Wireless Encryption
P-GW	Packet Data Network Gateway
P2MP	Point-to-Multipoint
P2P	Point-to-Point
PAN	Personal Area Network
PAPR	Peak-to-Average Power Ratio
PC	Point Coordinator
PCF	Point Coordination Function / Policy Control Function
PCRF	Policy and Charging Rules Function
PDA	Personal Digital Assistant
PDU	Protocol Data Unit
PHY	Physical Layer
PIFS	PCF Interframe Space
PIN	Personal Identification Number
PLC	Programmable Logic Controller
PM	Phase Modulation
PMI	Precoding Matrix Indicator
PMP	Point-to-Multipoint
PN	Pseudo-Noise
POS	Point of Sale
PPM	Pulse Position Modulation
PPP	Point-to-Point Protocol
PSK	Phase Shift Keying
PSTN	Public Switched Telephone Network
QAM	Quadrature Amplitude Modulation

QCI	QoS Class Identifier
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RC4	Rivest Cipher 4
RCS	Rich Communication Services
REST	Representational State Transfer
RF	Radio Frequency
RFC	Request for Comments
RFCOMM	Radio Frequency Communication
RFD	Reduced Function Device
RFID	Radio Frequency Identification
RI	Rank Indicator
RM	Resource Manager
RNC	Radio Network Controller
RS-232	Recommended Standard 232
RSSI	Received Signal Strength Indication
RTS	Request To Send
RZI	Return-to-Zero Inverted
S-GW	Serving Gateway
S1	S1 Interface (LTE/EPC)
SA	Standalone
SAE	Simultaneous Authentication of Equals
SAP	Service Access Point
SBA	Service-Based Architecture
SC-FDMA	Single Carrier Frequency Division Multiple Access
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SCR-300	Signal Corps Radio 300
SDN	Software-Defined Networking
SDP	Service Discovery Protocol
SGSN	Serving GPRS Support Node
SHA	Secure Hash Algorithm
SHF	Super High Frequency
SIFS	Short Interframe Space
SIG	Special Interest Group (Bluetooth)
SINCGARS	Single Channel Ground and Airborne Radio System
SIR	Serial Infrared

SISO	Single Input Single Output
SMF	Session Management Function
SMS	Short Message Service
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SPP	Serial Port Profile
SS	Subscriber Station
SSB	Single Sideband
SSCS	Service-Specific Convergence Sublayer
SSID	Service Set Identifier
SSP	Secure Simple Pairing
STBC	Space-Time Block Coding
SU-MIMO	Single-User MIMO
SVD	Singular Value Decomposition
SWAP	Shared Wireless Access Protocol
TCP	Transmission Control Protocol
TCP/IP	Transmission Control Protocol / Internet Protocol
TDD	Time Division Duplex
TDMA	Time Division Multiple Access
TETRA	Terrestrial Trunked Radio
TIA	Transimpedance Amplifier
TKIP	Temporal Key Integrity Protocol
TLS	Transport Layer Security
TPC	Transmit Power Control
TS	Technical Specification
TSN	Time Sensitive Networking
TTI	Transmission Time Interval
TV	Television
TWT	Target Wake Time
U-NII	Unlicensed National Information Infrastructure
UDM	Unified Data Management
UDP	User Datagram Protocol
UE	User Equipment
UFIR	Ultra Fast Infrared
UGS	Unsolicited Grant Service
UHF	Ultra High Frequency
UHR	Ultra High Reliability

UL	Uplink		
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System		
UPF	User Plane Function		
URLLC	Ultra-Reliable Low-Latency Communication		
USB	Universal Serial Bus		
UWB	Ultra-Wideband		
V2X	Vehicle-to-Everything		
VFIR	Very Fast Infrared		
VHF	Very High Frequency		
VLAN	Virtual Local Area Network		
VoLTE	Voice over LTE		
VoNR	Voice over New Radio		
VPN	Virtual Private Network		
VR	Virtual Reality		
VSAT	Very Small Aperture Terminal		
WBAN	Wireless Body Area Network		
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access		
WEP	Wired Equivalent Privacy		
Wi-Fi	Wireless Fidelity		
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access		
WirelessHART	Wireless Highway Addressable Remote Transducer		
WLAN	Wireless Local Area Network		
WMAN	Wireless Metropolitan Area Network		
WPA	Wi-Fi Protected Access		
WPA2	Wi-Fi Protected Access 2		
WPA3	Wi-Fi Protected Access 3		
WPAN	Wireless Personal Area Network		
WWAN	Wireless Wide Area Network		
X2	X2 Interface (LTE eNodeB interconnect)		
ZDO	ZigBee	Device	Object

Κεφάλαιο 1ο: Θεωρητικό υπόβαθρο και βασικές έννοιες

1.1 Ορισμός και Τύποι Ασύρματων Τοπικών Δικτύων

Ένα δίκτυο είναι ένα σύστημα διασυνδεδεμένων συσκευών που καθιστά δυνατή την ανταλλαγή δεδομένων και την αξιοποίηση κοινών πόρων. Από τις πρώτες μορφές ραδιοεπικοινωνίας έως τα προηγμένα συστήματα πέμπτης γενιάς, τα πρότυπα ασύρματης επικοινωνίας έχουν εξελιχθεί σε βασικό συστατικό των πληροφοριακών υποδομών (Goldsmith, 2005). Η επικοινωνία πραγματοποιείται με τεχνολογίες όπως το Wi-Fi, το Bluetooth και τα κινητά δίκτυα (4G/5G). Στις περισσότερες περιπτώσεις, το μέσο μετάδοσης είναι τα ραδιοκύματα, ενώ σε ειδικές εφαρμογές χρησιμοποιείται και η υπέρυθρη ακτινοβολία. Στόχος της δικτύωσης είναι να διευκολύνει την επικοινωνία και τη συνεργασία μεταξύ υπολογιστών, συσκευών και λογισμικών εφαρμογών (Stallings, 2017).

Η ασύρματη επικοινωνία αξιοποιεί το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα για τη μεταφορά πληροφοριών χωρίς φυσική καλωδίωση. Η δυνατότητα αυτή διευκολύνει την ανάπτυξη ευέλικτων και οικονομικών υποδομών ακόμη και σε απομακρυσμένες περιοχές, βελτιώνοντας την προσβασιμότητα και μειώνοντας το κόστος εγκατάστασης (Stallings, 2017). Οι εφαρμογές της επεκτείνονται σε κρίσιμους τομείς όπως η υγεία, η εκπαίδευση, η βιομηχανία και οι μεταφορές, καθιστώντας τις ασύρματες τεχνολογίες κεντρικό άξονα της σύγχρονης κοινωνίας.

Οι ασύρματες τεχνολογίες διακρίνονται σε κατηγορίες με βάση τη γεωγραφική τους εμβέλεια:

- Ασύρματα Προσωπικά Δίκτυα Σώματος (Wireless Body Area Networks – WBANs): Καλύπτουν την περιοχή γύρω από το ανθρώπινο σώμα, συνδέοντας φορητές και ιατρικές συσκευές. Παραδείγματα είναι αισθητήρες καρδιακής λειτουργίας που επικοινωνούν με smartwatch ή εμφυτεύσιμες συσκευές παρακολούθησης γλυκόζης που στέλνουν δεδομένα σε κινητό τηλέφωνο του ασθενούς ή του γιατρού.
- Ασύρματα Προσωπικά Δίκτυα (Wireless Personal Area Networks – WPANs): Εξυπηρετούν την επικοινωνία μεταξύ κοντινών συσκευών, όπως ενός smartphone με Bluetooth ακουστικό. Εφαρμογές περιλαμβάνουν μεταφορά αρχείων μεταξύ κινητού και φορητού υπολογιστή μέσω Bluetooth, καθώς και χρήση ασύρματου πληκτρολογίου ή ποντικιού σε υπολογιστή.
- Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα (Wireless Local Area Networks – WLANs): Καλύπτουν περιορισμένους χώρους, όπως κατοικίες ή γραφεία, παρέχοντας υψηλή ταχύτητα και χαμηλή καθυστέρηση. Παραδείγματα χρήσης Wi-Fi είναι η σύνδεση συσκευών σε σπίτι, η δικτύωση εργαστηρίου υπολογιστών και η κοινή χρήση εκτυπωτή σε γραφείο.
- Ασύρματα Μητροπολιτικά Δίκτυα (Wireless Metropolitan Area Networks – WMANs): Επεκτείνονται σε μεγάλες περιοχές, όπως πόλεις ή πανεπιστημιούπολεις. Ενδεικτικά παραδείγματα είναι η κάλυψη όλων των κτιρίων ενός πανεπιστημίου ή η ασύρματη διασύνδεση δημόσιων κτιρίων, όπως σχολείων και νοσοκομείων μιας πόλης. Κύριο πρότυπο αυτής της κατηγορίας είναι το WiMAX.
- Ασύρματα Δίκτυα Ευρείας Περιοχής (Wireless Wide Area Networks – WWANs): Καλύπτουν εκτεταμένες γεωγραφικές περιοχές, ακόμη και παγκόσμια. Παραδείγματα χρήσης είναι τα κινητά δίκτυα (3G, 4G, 5G), οι δορυφορικές επικοινωνίες, τα δίκτυα δημόσιας ασφάλειας, καθώς και οι υπηρεσίες παγκόσμιας εμβέλειας όπως το Starlink (Sauter, 2021).

Η κατηγοριοποίηση αυτή αποτυπώνεται συνοπτικά στον παρακάτω Πίνακα 1.1, όπου παρουσιάζονται οι βασικοί τύποι ασύρματων δικτύων μαζί με την τυπική εμβέλεια, την ενδεικτική ταχύτητα μετάδοσης και τις κύριες χρήσεις τους. Ο πίνακας λειτουργεί ως εργαλείο σύγκρισης, διευκολύνοντας την κατανόηση των διαφορών και των δυνατοτήτων που προσφέρει κάθε τεχνολογία.

Πίνακας 1.1: Τύποι ασύρματων δικτύων

Τύπος Ασύρματου Δικτύου	Ενδεικτική Εμβέλεια	Ενδεικτική Ταχύτητα Μετάδοσης	Κύριες Χρήσεις
WBAN (Wireless Body Area Network)	<1 μέτρο	~20 kbps έως μερικά Mbps	Σύνδεση φορητών συσκευών πάνω στο σώμα (π.χ. αισθητήρες υγείας, ιατρική παρακολούθηση)
WPAN (Wireless Personal Area Network)	1 – 10 μέτρα	Έως 3 Mbps (Bluetooth Classic/EDR), έως 24 Mbps (Bluetooth 3.0+HS)	Σύνδεση συσκευών όπως ακουστικά, smartwatch, smartphones
WLAN (Wireless Local Area Network)	έως ~1–2 χλμ (με ειδικό εξοπλισμό)	100 Mbps – 10 Gbps	Τοπική δικτύωση, Wi-Fi, ασύρματοι εκτυπωτές
WMAN (Wireless Metropolitan Area Network)	~5 – 100 χλμ	10 Mbps – 10 Gbps	Διασύνδεση δικτύων σε επίπεδο πόλης ή campus
WWAN (Wireless Wide Area Network)	Διεθνής εμβέλεια	1 Mbps (3G) – >20 Gbps (5G θεωρητικό μέγιστο)	Διασύνδεση απομακρυσμένων περιοχών, κινητά δίκτυα 4G/5G, δορυφορικές συνδέσεις

1.2 Ιστορική Αναδρομή Ασύρματων Δικτύων

1.2.1 Από τον Ηλεκτρομαγνητισμό στην Πρώιμη Ασύρματη Επικοινωνία (1830–1930).

Η ιστορία της ασύρματης επικοινωνίας έχει τις ρίζες της στις επιστημονικές ανακαλύψεις και τεχνολογικές εφευρέσεις του 19ου αιώνα, οι οποίες άλλαξαν ριζικά την αντίληψη για τη μετάδοση πληροφοριών σε μεγάλες αποστάσεις. Αν και η ιδέα της επικοινωνίας χωρίς φυσικά καλώδια θεωρούνταν αρχικά αδιανόητη, οι θεμελιώδεις συνεισφορές των Samuel Morse, James Clerk Maxwell και Heinrich Hertz άνοιξαν τον δρόμο για τη διαμόρφωση μιας νέας πραγματικότητας.

Το πρώτο σημαντικό βήμα έγινε το 1837 (δημόσια επίδειξη: 1838), όταν ο Samuel Morse ανέπτυξε τον κώδικα Morse, ένα σύστημα απλής αλλά αποτελεσματικής κωδικοποίησης με τελείες και παύλες. Σε συνδυασμό με τον ηλεκτρικό τηλέγραφο, ο κώδικας αυτός κατέστησε δυνατή την ταχεία επικοινωνία σε μεγάλες αποστάσεις, προσφέροντας νέες δυνατότητες σε στρατιωτικό, πολιτικό και εμπορικό επίπεδο (Standage, 1998).

Λίγες δεκαετίες αργότερα, το 1865, ο James Clerk Maxwell παρουσίασε τη θεωρία της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, αποδεικνύοντας μαθηματικά ότι τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία μπορούν να διαδίδονται στον χώρο με ταχύτητα ίση με αυτήν του φωτός (Maxwell, 1865). Η εργασία του (A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field), αν και θεωρητική, έθεσε τις βάσεις για την κατανόηση της ασύρματης μετάδοσης σημάτων.

Κατά την περίοδο 1885-1889, ο Heinrich Hertz κατάφερε να δώσει πειραματική επιβεβαίωση στις προβλέψεις και εξισώσεις του Maxwell. Μέσα από εργαστηριακά πειράματα με πηνία, σπινθήρες και μεταλλικούς αγωγούς, απέδειξε την ύπαρξη ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και κατέδειξε τις ιδιότητές τους, όπως η ανάκλαση, η διάθλαση και η πόλωση (Hertz, 1894). Η συμβολή του υπήρξε καταλυτική, καθώς προσέφερε το απαραίτητο πειραματικό υπόβαθρο για την ανάπτυξη των μελλοντικών ασύρματων συστημάτων.

Από τον Morse στον Maxwell και τον Hertz, η πρόοδος ήταν συνεχής και η κάθε ανακάλυψη άνοιγε τον δρόμο για την επόμενη. Η ανάγκη για πιο γρήγορη και αξιόπιστη επικοινωνία οδήγησε σε συνεχείς ανακαλύψεις, οι οποίες έθεσαν τα θεμέλια για την πρακτική εφαρμογή της ασύρματης μετάδοσης σημάτων μέσω ραδιοκυμάτων, που πραγματοποιήθηκε στις αρχές του 20ού αιώνα.

1.2.2 Ο Marconi και η Εποχή της Ραδιοτηλεγραφίας (1895–1930)

Η μετάβαση από τη θεωρητική θεμελίωση στην πρακτική εφαρμογή της ασύρματης επικοινωνίας συνδέεται με το έργο του Ιταλού εφευρέτη Guglielmo Marconi. Στα τέλη του 19ου αιώνα, αξιοποιώντας τις θεμελιώδεις αρχές που είχαν διατυπωθεί από τον Maxwell και τον Hertz, ο Marconi κατόρθωσε να μετατρέψει την ηλεκτρομαγνητική θεωρία σε λειτουργικό τηλεπικοινωνιακό σύστημα (Hong, 2001; Huurdeman, 2003). Το 1895, στο εργαστήριό του στη Μπολόνια, πραγματοποίησε την πρώτη επιτυχημένη ασύρματη μετάδοση σήματος σε απόσταση μεγαλύτερη των δύο χιλιομέτρων, χρησιμοποιώντας κεραία, γείωση και πομπό με εκπομπή σπινθήρων (Hong, 2001).

Η πρόοδος αυτή δεν έμεινε περιορισμένη σε πειραματικό επίπεδο. Το 1901, ο Marconi πέτυχε ένα από τα πιο καθοριστικά επιτεύγματα στην ιστορία των επικοινωνιών: την πρώτη υπερατλαντική ασύρματη μετάδοση, από την Κορνουάλη (Cornwall) της Αγγλίας προς το Σεντ Τζονς (St. John's) στη Νέα Γη (Newfoundland) του Καναδά (Huurdeman, 2003). Το σήμα περιείχε το γράμμα «S» σε κώδικα Morse και αποδείκνυε ότι τα ραδιοκύματα μπορούν να διαδίδονται πέρα από τον ορίζοντα. Η επιτυχία της μετάδοσης εξηγήθηκε αργότερα από την αλληλεπίδραση των ραδιοκυμάτων με τα ιονοσφαιρικά στρώματα της ατμόσφαιρας (Huurdeman, 2003).

Η τεχνολογία που ανέπτυξε ο Marconi στηριζόταν σε βασικά στοιχεία, όπως κεραίες μεγάλης εμβέλειας, συστήματα συντονισμού και πομπούς σπινθήρων. Την ίδια περίοδο, οι πρώτοι δέκτες βασισμένοι σε “crystal sets”, διατάξεις που αξιοποιούσαν ημιαγώγιμα κρύσταλλα για την ανίχνευση ραδιοκυμάτων, αποτέλεσαν το αρχικό βήμα στην ανάπτυξη πιο εξελιγμένων συσκευών (Hong, 2001). Στη συνέχεια, η εισαγωγή ηλεκτρονικών λυχνιών επέτρεψε σημαντική ενίσχυση των σημάτων, βελτιώνοντας την ποιότητα και την εμβέλεια των εκπομπών (Hong, 2001).

Η εποχή αυτή σηματοδεύτηκε επίσης από τη διαμόρφωση του μοντέλου της μονοκατευθυντικής εκπομπής (broadcast), κατά το οποίο ένας πομπός μπορούσε να μεταδίδει ταυτόχρονα σε πλήθος δεκτών. Το μοντέλο αυτό αποτέλεσε το θεμέλιο της ραδιοφωνίας, σηματοδοτώντας τη μετάβαση από την ατομική στη μαζική επικοινωνία και εγκαινιάζοντας τη νέα εποχή των μέσων μαζικής ενημέρωσης (Huurdeman, 2003).

Η συμβολή του Marconi αναγνωρίστηκε διεθνώς, τόσο μέσα από την ίδρυση της εταιρείας Wireless Telegraph & Signal Company, όσο και με την απονομή του Βραβείου Νόμπελ Φυσικής το 1909. Το έργο του συνδύασε την επιστημονική θεωρία με την τεχνολογική καινοτομία, αποτελώντας καθοριστικό σταθμό για την εξέλιξη των ασύρματων τηλεπικοινωνιών στις δεκαετίες που ακολούθησαν (Briggs & Burke, 2010).

1.2.3 Ραδιοφωνία και Πόλεμος (1930–1945)

Η περίοδος 1930-1945 αποτέλεσε κομβικό σημείο για την ωρίμανση της ραδιοφωνίας, τόσο ως τεχνολογίας όσο και ως κοινωνικού και πολιτισμικού φαινομένου. Από τις πρώτες δοκιμαστικές εκπομπές της δεκαετίας του 1920, το ραδιόφωνο εξελίχθηκε σε μέσο μαζικής επικοινωνίας, ικανό να διαμορφώνει αντιλήψεις, να ενισχύει την πολιτιστική ταυτότητα και να δημιουργεί νέες μορφές δημόσιου διαλόγου (Briggs & Burke, 2010). Η μαζική διάδοση των ραδιοφωνικών δεκτών σε νοικοκυριά των Ηνωμένων Πολιτειών, της Μεγάλης Βρετανίας και της Γερμανίας, κατέστησε τη ραδιοφωνία πρωτεύον εργαλείο ενημέρωσης και ψυχαγωγίας, με εκατομμύρια ακροατές να έχουν καθημερινή πρόσβαση σε εκπομπές ειδήσεων, μουσικής και πολιτικών λόγων (Huurdeman, 2003; Briggs & Burke, 2010; Douglas, 2004).

Κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, η ραδιοφωνία απέκτησε στρατηγική σημασία. Οι ένοπλες δυνάμεις χρησιμοποίησαν φορητές και σταθερές ραδιοσυσκευές για την ταχεία και ασφαλή επικοινωνία μεταξύ μονάδων ξηράς, ναυτικού και αεροπορίας. Η ανάπτυξη συσκευών όπως το SCR-300, ένα από τα πρώτα φορητά στρατιωτικά ραδιοσύστημα, επέτρεψε τον αποτελεσματικό συντονισμό επιχειρήσεων σε πραγματικό χρόνο, προσφέροντας ουσιαστικό επιχειρησιακό πλεονέκτημα (Gleason, 1999).

Παράλληλα, η τεχνολογία του ραντάρ (Radio Detection and Ranging), βασισμένη στην εκπομπή και ανίχνευση ανακλώμενων ραδιοκυμάτων, αποτέλεσε κρίσιμο εργαλείο στον εντοπισμό εχθρικών στόχων σε μεγάλες αποστάσεις. Η χρήση του κατά τη Μάχη της Αγγλίας (1940) υπήρξε καθοριστική, καθώς το βρετανικό δίκτυο Chain Home επέτρεπε την έγκαιρη προειδοποίηση και αναχαίτιση των γερμανικών αεροσκαφών (Huurdeman, 2003; Gleason, 1999).

Εκτός από στρατιωτικό εργαλείο, το ραδιόφωνο αποτέλεσε μέσο πολιτικής προπαγάνδας και ψυχολογικού πολέμου. Σταθμοί, όπως το BBC στο Ηνωμένο Βασίλειο και το δίκτυο Reichssender στη ναζιστική Γερμανία, χρησιμοποιήθηκαν για τη διάδοση εθνικών αφηγήσεων, την ενίσχυση του ηθικού των πολιτών και τη διαμόρφωση της κοινής γνώμης. Ομιλίες ηγετών, όπως εκείνες του Winston Churchill μεταδόθηκαν σε εκατομμύρια ακροατές, ενισχύοντας το ηθικό και την αντοχή των λαών σε καιρό πολέμου (Douglas, 2004).

Παράλληλα, η ραδιοφωνία διατήρησε τον ψυχαγωγικό της χαρακτήρα, ακόμη και εν μέσω πολέμου. Ραδιοφωνικοί σταθμοί συνέχισαν να μεταδίδουν μουσικά προγράμματα, θεατρικά έργα και ψυχαγωγικές εκπομπές, προσφέροντας στους πολίτες στιγμές ανακούφισης και σύνδεσης με μια αίσθηση κανονικότητας (Briggs & Burke, 2010; Douglas, 2004).

Συνολικά, η περίοδος 1930-1945 ανέδειξε το ραδιόφωνο τόσο ως εργαλείο μαζικής ενημέρωσης και ψυχαγωγίας, όσο και ως μέσο πολιτικής επιρροής. Η καθιέρωσή του κατά την περίοδο αυτή έθεσε τα θεμέλια για την περαιτέρω ανάπτυξη των μέσων μαζικής ενημέρωσης και ανέδειξε την ασύρματη επικοινωνία ως αναπόσπαστο κομμάτι της σύγχρονης ιστορίας (Briggs & Burke, 2010).

1.2.4 Από τον Ψυχρό Πόλεμο στο ARPANET (1945–1979)

Η περίοδος από το τέλος του Β' Παγκοσμίου Πολέμου έως τα τέλη της δεκαετίας του 1970 αποτέλεσε μια εποχή ριζικών αλλαγών στον τομέα της επικοινωνίας, όπου τέθηκαν τα θεμέλια για τη μετάβαση από τα αναλογικά στα ψηφιακά συστήματα. Ο ανταγωνισμός μεταξύ Ηνωμένων Πολιτειών και Σοβιετικής Ένωσης κατά τη διάρκεια του Ψυχρού Πολέμου, αποτέλεσε καθοριστικό παράγοντα για την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών με στρατηγικές, επιστημονικές και ακαδημαϊκές εφαρμογές (Flichy, 1995). Η ανάγκη για ασφάλεια, αξιοπιστία και ανθεκτικότητα σε περίπτωση καταστροφής υπήρξε καθοριστικός παράγοντας για την εξέλιξη των επικοινωνιακών δικτύων.

Μετά το 1945, η ραγδαία πρόοδος στη μικροηλεκτρονική άλλαξε σημαντικά τον τομέα των τηλεπικοινωνιών. Η εφεύρεση του τρανζίστορ στα τέλη της δεκαετίας του 1940 από τους Bardeen, Brattain και Shockley έδωσε τη δυνατότητα αντικατάστασης των ογκωδών και ενεργοβόρων λυχνιών με μικρότερα, πιο αξιόπιστα και οικονομικά εξαρτήματα (Riordan & Hoddeson, 1997). Στη δεκαετία του 1950, οι τηλεπικοινωνιακές συσκευές έγιναν φορητές και πιο αποδοτικές, γεγονός που διευρύνει τη χρήση τους στον στρατό, στην αεροπορία και στις υπηρεσίες εσωτερικής ασφάλειας (Sauter, 2021).

Παράλληλα, οι πρώτες προσπάθειες μετάβασης από τη μεταγωγή κυκλώματος στη μεταγωγή πακέτων άλλαξαν στην ιστορία των δικτύων. Σε αντίθεση με τη συνεχή δέσμευση γραμμών που απαιτούσε η τηλεφωνία, η μεταγωγή πακέτων (packet switching) χώριζε τα δεδομένα σε μικρότερα τμήματα τα οποία μπορούσαν να ακολουθούν ανεξάρτητες διαδρομές στο δίκτυο, αυξάνοντας την αποδοτικότητα και την ανθεκτικότητα (Baran, 1964; Davies, 1966). Η ιδέα αυτή ήταν ιδιαίτερα χρήσιμη στο κλίμα του Ψυχρού Πολέμου, καθώς εξασφάλιζε τη συνέχεια της επικοινωνίας ακόμη και αν μέρος του δικτύου καταστρεφόταν (Baran, 1964).

Μία από τις πρώτες πρακτικές εφαρμογές αυτής της λογικής ήταν το ALOHA system, που αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο της Χαβάης από τον Norman Abramson, καθηγητή του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών, και την ομάδα του το 1971. Το ALOHA protocol, ένα από τα πρώτα πρωτόκολλα τυχαίας πρόσβασης (random access), επέτρεψε την ασύρματη επικοινωνία πολλών υπολογιστών με έναν κεντρικό κόμβο, χρησιμοποιώντας UHF ραδιοκύματα. Το μοντέλο ALOHA, αν και απλό, έδειξε ότι αποτελεσματική δικτύωση μπορεί να υπάρξει χωρίς κεντρικό έλεγχο. Η ιδέα αυτή αποτέλεσε τη βάση για πιο εξελιγμένα πρωτόκολλα, όπως το Ethernet και, αργότερα, το Wi-Fi (Abramson, 1970).

Σχεδόν ταυτόχρονα, το Ethernet αναπτύχθηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1970 στο ερευνητικό κέντρο Xerox PARC από τον Robert Metcalfe, προσφέροντας μια ενσύρματη και πιο αποδοτική μορφή μεταγωγής πακέτων σε τοπικά δίκτυα (LANs). Το Ethernet συνδύαζε χαμηλό κόστος με υψηλή αποδοτικότητα και έγινε η κυρίαρχη τεχνολογία στα τοπικά δίκτυα των δεκαετιών που ακολούθησαν (Metcalfe & Boggs, 1976).

Η κορυφαία τεχνολογική τομή της περιόδου υπήρξε η δημιουργία του ARPANET (Advanced Research Projects Agency Network) από την αμερικανική DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) το 1969. Στόχος του ήταν η διασύνδεση πανεπιστημίων και ερευνητικών κέντρων για την κοινή χρήση πόρων και την επιστημονική συνεργασία. Το ARPANET ξεκίνησε το 1969 συνδέοντας αρχικά τέσσερις κόμβους, τα UCLA, Stanford Research Institute, University of California Santa Barbara και University of Utah. Στα πρώτα χρόνια λειτουργίας του χρησιμοποιούσε το πρωτόκολλο NCP (Network Control Protocol), ενώ το 1983 πραγματοποιήθηκε η μετάβαση στο TCP/IP, σηματοδοτώντας τη θεμελίωση της αρχιτεκτονικής του σύγχρονου Διαδικτύου (Hauben & Hauben, 1997).

Η περίοδος 1945-1979 σήμανε το πέραςμα από την αναλογική εποχή στην ψηφιακή. Οι καινοτομίες που αναπτύχθηκαν σε αυτό το διάστημα (από το τρανζίστορ και τη μεταγωγή πακέτων έως το ALOHA, το Ethernet και το ARPANET) δεν υπήρξαν μεμονωμένα γεγονότα, αλλά κρίκοι μιας αλυσίδας που διαμόρφωσε την αρχιτεκτονική της σημερινής ψηφιακής επικοινωνίας και έθεσε τις βάσεις για την παγκόσμια συνδεσιμότητα των επόμενων δεκαετιών.

1.2.5 Η Ψηφιακή Επανάσταση και τα WLAN (1980–1997)

Η δεκαετία του 1980 σηματοδότησε την είσοδο της ψηφιακής επικοινωνίας σε ευρύτερες καταναλωτικές εφαρμογές. Η εξέλιξη της μικροηλεκτρονικής και της επεξεργασίας ψηφιακών σημάτων οδήγησε σε σημαντικές καινοτομίες που επέτρεψαν την είσοδο της ασύρματης επικοινωνίας σε καταναλωτικές εφαρμογές, πέρα από το στρατιωτικό και ερευνητικό πλαίσιο. Η ασύρματη πρόσβαση πέρασε σταδιακά στην καθημερινότητα, προετοιμάζοντας το έδαφος για την κινητή υπολογιστική και τον εκδημοκρατισμό της πρόσβασης στην πληροφορία (Castells, 1996).

Στις αρχές της δεκαετίας εμφανίστηκαν τα πρώτα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 1G, τα οποία χρησιμοποιούσαν αναλογική τεχνολογία. Τα συστήματα αυτά βασίζονταν στην αρχιτεκτονική της «κυψέλης» (cell), όπου κάθε γεωγραφική περιοχή καλυπτόταν από έναν σταθμό βάσης, και η επικοινωνία ενός κινητού χρήστη μεταφέρεται αυτόματα από κυψέλη σε κυψέλη μέσω της διαδικασίας handoff. Αν και τα δίκτυα πρώτης γενιάς παρείχαν αποκλειστικά υπηρεσίες φωνής, με περιορισμένη ποιότητα ήχου και ανεπαρκή ασφάλεια, έθεσαν τα θεμέλια για την ανάπτυξη πιο εξελιγμένων δικτύων κινητής τηλεφωνίας στις επόμενες δεκαετίες (Redl et al., 1995).

Η Federal Communications Commission στις Ηνωμένες Πολιτείες διέυρνε τη χρήση των ISM ζωνών (Industrial, Scientific and Medical), συμπεριλαμβανομένων των 2.4 GHz, διευκολύνοντας την

ανάπτυξη ασύρματων τεχνολογιών, όπως Wi-Fi και Bluetooth (Sauter, 2021). Ένα καθοριστικό βήμα έγινε το 1985, όταν η FCC στις Ηνωμένες Πολιτείες επέτρεψε τη χρήση ορισμένων ζωνών του ραδιοφάσματος χωρίς κρατική άδεια, όπως οι 2.4 GHz. Οι ζώνες αυτές, που προορίζονταν για βιομηχανική, επιστημονική και ιατρική χρήση (ISM bands - Industrial, Scientific and Medical), αποτέλεσαν το υπόβαθρο για την ανάπτυξη τεχνολογιών που θα κυριαρχούσαν τις επόμενες δεκαετίες, όπως το Wi-Fi και το Bluetooth (Sauter, 2021).

Παράλληλα, αναπτύχθηκαν τα πρώτα πρωτόκολλα ασύρματης επικοινωνίας μικρής εμβέλειας. Η υπέρυθρη επικοινωνία, η οποία αναπτύχθηκε στη δεκαετία του 1980 και τυποποιήθηκε επίσημα με το IrDA το 1993, αποτέλεσε ένα από τα πρώτα πρότυπα που υιοθετήθηκαν εμπορικά, προσφέροντας απλή ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ φορητών συσκευών, όπως φορητοί υπολογιστές και εκτυπωτές. Αν και παρουσίαζε περιορισμούς στην κατευθυντικότητα και στην απόσταση, έθεσε τις βάσεις για τα προσωπικά δίκτυα (Tanenbaum et al., 2021).

Στη δεκαετία του 1990, η ανάγκη για φορητές συσκευές ενισχύθηκε με την εμφάνιση των Personal Digital Assistants (PDAs). Συσκευές όπως το Apple Newton (1993) και το Palm Pilot (1996) συνδυάζαν δυνατότητες αποθήκευσης, επεξεργασίας και περιορισμένης ασύρματης επικοινωνίας μέσω υπέρυθρης (IrDA), αποτελώντας το πρώτο βήμα προς τα σημερινά smartphones (Ceruzzi, 2003). Οι PDAs σηματοδότησαν την πρώτη φάση της κινητής υπολογιστικής, φέρνοντας στο προσκήνιο την ανάγκη για ευέλικτα πρότυπα επικοινωνίας με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας.

Σε αυτό το πλαίσιο, η Ericsson ξεκίνησε την ανάπτυξη της τεχνολογίας Bluetooth το 1994, σχεδιασμένη για ασύρματη επικοινωνία μικρής εμβέλειας και χαμηλής ισχύος. Το όνομα «Bluetooth» προέρχεται από τον Δανό βασιλιά Harald Bluetooth, που ενοποίησε τις σκανδιναβικές φυλές, συμβολίζοντας έτσι την ένωση διαφορετικών συσκευών μέσω ενός κοινού προτύπου. Η επίσημη καθιέρωση της τεχνολογίας επιτεύχθηκε με την ίδρυση του Bluetooth Special Interest Group (SIG) το 1998, το οποίο ανέλαβε την τυποποίηση και εμπορική διάδοση (Haartsen, 1998).

Η πιο καθοριστική τεχνολογική εξέλιξη της περιόδου ήταν η ανάπτυξη του προτύπου IEEE 802.11 για τα ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLANs). Η πρώτη έκδοση δημοσιεύθηκε το 1997, προσφέροντας ταχύτητες μετάδοσης 1-2 Mbps. Αν και υποδεέστερη σε σχέση με τα ενσύρματα Ethernet, η ασύρματη πρόσβαση χωρίς καλώδια ήταν σημαντική αλλαγή για σπίτια και επιχειρήσεις, παρέχοντας ευελιξία και χαμηλό κόστος εγκατάστασης (Gast, 2005; Sauter, 2021).

Η περίοδος 1980–1997 χαρακτηρίζεται από τη μετάβαση από την ενσύρματη ψηφιακή επικοινωνία σε ένα υβριδικό μοντέλο, όπου η ασύρματη πρόσβαση άρχισε να γίνεται εφικτή και προσιτή. Οι βάσεις που τέθηκαν με την ανάπτυξη του προτύπου IEEE 802.11, του Bluetooth και την εμφάνιση των πρώτων PDAs διαμόρφωσαν το πλαίσιο για τις τεχνολογίες κινητής συνδεσιμότητας που ακολούθησαν και οδήγησαν στον κόσμο των δικτυωμένων συσκευών και του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) (Gast, 2005; Haartsen, 2000).

1.2.6 Η Άνοδος των Ψηφιακών Κινητών Δικτύων (1990–2010)

Η περίοδος 1990–2010 χαρακτηρίζεται από τη θεαματική άνοδο των ψηφιακών κινητών δικτύων, τα οποία μετέβαλαν ριζικά τον τρόπο με τον οποίο οι άνθρωποι επικοινωνούν, εργάζονται και αλληλεπιδρούν. Η διάδοση της κινητής τηλεφωνίας, η επέκταση των WLANs και η ωρίμανση τεχνολογιών όπως το Bluetooth συνδιαμόρφωσαν την καθημερινότητα, δημιουργώντας τις βάσεις για την εποχή των έξυπνων συσκευών.

Η πρώτη μεγάλη εξέλιξη ήταν η υιοθέτηση του προτύπου GSM (Global System for Mobile Communications) στην Ευρώπη στις αρχές της δεκαετίας του 1990, γνωστό στα ελληνικά ως Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Επικοινωνιών. Το GSM (2G), το οποίο ξεκίνησε εμπορικά το 1991, την ψηφιακή μετάδοση φωνής και δεδομένων σε κινητά δίκτυα, αντικαθιστώντας τις αναλογικές τεχνολογίες της προηγούμενης γενιάς (1G). Εισήγαγε επίσης υπηρεσίες όπως τα SMS (Short Message Service) στο GSM και αργότερα τα MMS (Multimedia Messaging Service) σε δίκτυα GPRS/3G, επιτρέποντας τη μετάδοση πολυμεσικού περιεχομένου, καθιστώντας το πρώτο παγκόσμιο πρότυπο κινητής επικοινωνίας (Sauter, 2021).

Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά του GSM ήταν η υποστήριξη περιαγωγής (roaming), δηλαδή η δυνατότητα του χρήστη να χρησιμοποιεί τη συσκευή του και εκτός της χώρας προέλευσης, χάρη στην υιοθέτηση ενιαίων τεχνικών προτύπων από διαφορετικά δίκτυα παρόχων σε πολλές χώρες. Αυτό άνοιξε τον δρόμο για την παγκοσμιοποίηση των κινητών επικοινωνιών, καθώς οι χρήστες μπορούσαν πλέον να ταξιδεύουν στο εξωτερικό και να εξακολουθούν να έχουν πρόσβαση στο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας χωρίς αλλαγή συσκευής ή αριθμού. Η επικράτηση του GSM έθεσε τις βάσεις για τις μελλοντικές γενιές κινητής τηλεφωνίας (3G, 4G, 5G), καθιερώνοντας ένα παγκόσμιο πρότυπο για την ψηφιακή κινητή επικοινωνία (Mouly & Pautet, 1992; Sauter, 2021).

Οι πρώτες εμπορικά διαθέσιμες συσκευές Wi-Fi έκαναν την εμφάνισή τους το 1999, με δυνατότητες περιήγησης στο διαδίκτυο, αποστολή email και βασική μεταφορά αρχείων. Μεταξύ αυτών ήταν και τα PDAs, η ενσωμάτωση Wi-Fi στα οποία αύξησε ραγδαία τη χρηστικότητά τους, καθώς πλέον μπορούσαν να συνδεθούν στο διαδίκτυο ασύρματα, ενισχύοντας την ασύρματη και φορητή εργασία (Geier, 2001).

Η μετάβαση στην τρίτη γενιά κινητών δικτύων (3G) ξεκίνησε στα τέλη της δεκαετίας του 1990 με τα πρώτα πειραματικά δίκτυα στην Ιαπωνία και την Ευρώπη. Το 2001 λειτούργησε το πρώτο εμπορικό δίκτυο 3G στην Ιαπωνία χρησιμοποιώντας την τεχνολογία UMTS/W-CDMA, ενώ τα επόμενα δύο χρόνια η 3G τεχνολογία επεκτάθηκε σε Ευρώπη, Ασία και Βόρεια Αμερική. Μέχρι το 2004-2005 η 3G έγινε ευρέως διαθέσιμη, παρέχοντας αυξημένες ταχύτητες δεδομένων, κινητό Internet και δυνατότητες όπως video calls, σηματοδοτώντας μια νέα εποχή στη φορητή επικοινωνία. Τα δίκτυα 3G παρείχαν θεωρητικά ταχύτητες έως 2 Mbps (Goldsmith, 2005).

Τα δίκτυα 3G υποστήριζαν για πρώτη φορά πραγματικές υπηρεσίες κινητού διαδικτύου, καθιστώντας δυνατή τη φυλλομέτρηση ιστότοπων, την ανταλλαγή email, και τη χρήση εφαρμογών δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Μία από τις βασικές υπηρεσίες ήταν το MMS (Multimedia Messaging Service), δηλαδή η Υπηρεσία Πολυμεσικών Μηνυμάτων. Το MMS επέκτεινε τη λειτουργικότητα των απλών μηνυμάτων κειμένου (SMS), επιτρέποντας στους χρήστες να στέλνουν και να λαμβάνουν περιεχόμενο όπως φωτογραφίες, σύντομα βίντεο, αρχεία ήχου και συνδυασμούς αυτών μέσω του δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Η αποστολή MMS απαιτεί ενεργή σύνδεση δεδομένων, μέσω GPRS (General Packet Radio Service) ή 3G, και συνήθως χρεώνεται ως υπηρεσία δεδομένων από τον πάροχο κινητής τηλεφωνίας. Η υπηρεσία αποτέλεσε ένα ενδιάμεσο βήμα προς την οπτική επικοινωνία, πριν από την εξαπλώση των σύγχρονων εφαρμογών μηνυμάτων, και εμπλούτισε την εμπειρία χρήσης των κινητών συσκευών (Goldsmith, 2005).

Την ίδια περίοδο, σημειώθηκαν κρίσιμες εξελίξεις και στον τομέα των WLANs. Η τεχνολογία Wi-Fi έγινε πιο προσιτή και αξιόπιστη, επιτρέποντας την ευρεία χρήση σε σπίτια, γραφεία και δημόσιους χώρους. Η ενσωμάτωσή του Wi-Fi σε φορητούς υπολογιστές και router κατέστησε την ασύρματη πρόσβαση στο διαδίκτυο βασικό χαρακτηριστικό της σύγχρονης ψηφιακής ζωής.

Τον Σεπτέμβριο του 1999 εγκρίθηκαν ταυτόχρονα δύο νέα πρότυπα Wi-Fi, το IEEE 802.11b και το IEEE 802.11a. Το 802.11b λειτουργούσε στη συχνότητα των 2.4 GHz με ταχύτητες έως 11 Mbps, προσφέροντας την πρώτη ευρεία διάδοση ασύρματου τοπικού δικτύου και επιτρέποντας την αρχική μαζική χρήση του Wi-Fi. Το 802.11a, από την άλλη, λειτουργούσε στη ζώνη των 5 GHz και προσέφερε σημαντικά υψηλότερες ταχύτητες, έως 54 Mbps. Παρότι παρείχε ανώτερη απόδοση, η μικρότερη εμβέλεια του και η περιορισμένη διείσδυση του σήματος σε εμπόδια, λόγω της υψηλότερης συχνότητας, περιόρισαν την ευρεία υιοθέτησή του (Gast, 2005).

Παράλληλα, η πρώτη τυποποιημένη έκδοση, Bluetooth 1.0, κυκλοφόρησε το 1999, επιτρέποντας ασύρματη επικοινωνία μικρής εμβέλειας μέσω της ζώνης των 2.4 GHz, με μέγιστη ταχύτητα περίπου 721 Kbps. Παρά τα προβλήματα συμβατότητας των πρώτων υλοποιήσεων, η τεχνολογία γρήγορα υιοθετήθηκε για την αντικατάσταση καλωδίων μεταξύ κινητών τηλεφώνων και περιφερειακών συσκευών.

Παρά το γεγονός ότι τα δύο πρότυπα εγκρίθηκαν την ίδια περίοδο, το 802.11b επικράτησε στην καταναλωτική αγορά λόγω της μεγαλύτερης εμβέλειας, του χαμηλότερου κόστους υλοποίησης και της καλύτερης συμβατότητας με τον διαθέσιμο εξοπλισμό της εποχής, ενώ το 802.11a χρησιμοποιήθηκε

κυρίως σε επαγγελματικά και εταιρικά περιβάλλοντα. Για τον λόγο αυτό, το IEEE 802.11b θεωρείται συχνά η «πρώτη ευρεία γενιά Wi-Fi».

Το 2003 εγκρίθηκε το πρότυπο IEEE 802.11g, το οποίο λειτουργούσε επίσης στη συχνότητα των 2.4 GHz και προσέφερε ταχύτητες έως 54 Mbps. Το 802.11g συνδύαζε την εμβέλεια του 802.11b με ταχύτητες έως 54 Mbps, υποστηρίζοντας πλήρη οπισθοδρομική συμβατότητα (backward compatibility) με παλαιότερες συσκευές και δίκτυα 802.11b. Συνολικά, την περίοδο 1999-2009 το Wi-Fi γνώρισε ραγδαία εξέλιξη, με τα πρότυπα IEEE 802.11b, 802.11g και 802.11n να αυξάνουν σταδιακά τη χωρητικότητα, την ταχύτητα και την εμβέλεια των ασύρματων τοπικών δικτύων, καθιερώνοντας το Wi-Fi ως τη βασική τεχνολογία ασύρματης συνδεσιμότητας σε οικιακά, επαγγελματικά και δημόσια περιβάλλοντα.

Μετά την αρχική έκδοση, το Bluetooth 1.1 κυκλοφόρησε το 2001, διορθώνοντας προβλήματα συμβατότητας και εισάγοντας βελτιώσεις στη σταθερότητα της σύνδεσης (Haartsen, 2000). Στη συνέχεια, το Bluetooth 1.2 παρουσιάστηκε το 2003, προσφέροντας ταχύτερη μετάδοση δεδομένων μέσω του Adaptive Frequency Hopping (AFH), μειώνοντας τις παρεμβολές από άλλα ασύρματα δίκτυα και υποστηρίζοντας βελτιωμένη ροή ήχου και ταχύτερη ανίχνευση συσκευών. Αυτές οι εκδόσεις συνέβαλαν σημαντικά στην ευρεία υιοθέτηση της τεχνολογίας σε κινητά τηλέφωνα, υπολογιστές και περιφερειακές συσκευές. Οι εκδόσεις 2.0 (2004) και 2.1 (2007) βελτίωσαν περαιτέρω την ταχύτητα και μείωσαν την κατανάλωση ενέργειας, ενώ το Bluetooth 3.0 (2009) εισήγαγε υψηλότερες ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων (Sauter, 2021).

Το 2004 κυκλοφόρησε το Bluetooth 2.0 + EDR, το οποίο εισήγαγε τη δυνατότητα EDR (Enhanced Data Rate), δηλαδή Ενισχυμένου Ρυθμού Μετάδοσης Δεδομένων, που επέτρεψε ταχύτητες μετάδοσης έως και 3 Mbps, σε σύγκριση με τα περίπου 720 Kbps των προηγούμενων εκδόσεων (π.χ. Bluetooth 1.2), προσφέροντας έτσι σημαντικά υψηλότερη απόδοση στη μεταφορά αρχείων, στη ροή ήχου και στη σύνδεση περιφερειακών (Padgett et al., 2022). Παράλληλα, το EDR σχεδιάστηκε για να είναι πιο ενεργειακά αποδοτικό, μειώνοντας την κατανάλωση ενέργειας κατά τη διάρκεια σύντομων μεταδόσεων με μεγάλους όγκους δεδομένων, κάτι ιδιαίτερα κρίσιμο για φορητές συσκευές και wearables. Η έκδοση αυτή καθιέρωσε την τεχνολογία ως καθημερινό εργαλείο, ιδίως για την ασύρματη σύνδεση ακουστικών, εκτυπωτών, κινητών τηλεφώνων και υπολογιστών, και αποτελεί το θεμέλιο για πιο σύνθετες και σταθερές εφαρμογές ασύρματων προσωπικών δικτύων (WPANs) (Padgett et al., 2022).

Το 2009 τυποποιήθηκε το Bluetooth 3.0, το οποίο αποτέλεσε εξέλιξη του Bluetooth 2.1 + EDR, διατηρώντας βασικές ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων έως περίπου 3 Mbps. Η σημαντικότερη καινοτομία του προτύπου ήταν η προαιρετική λειτουργία High Speed (HS), η οποία επέτρεπε τη μεταφορά δεδομένων με θεωρητικές ταχύτητες έως 24 Mbps.

Το Bluetooth είχε ωριμάσει ως βασική τεχνολογία ασύρματων προσωπικών δικτύων (WPAN – Wireless Personal Area Networks). Χρησιμοποιήθηκε ευρέως για την ασύρματη επικοινωνία μεταξύ κινητών τηλεφώνων, ακουστικών, έξυπνων ρολογιών (smartwatches), φορητών συσκευών παρακολούθησης φυσικής δραστηριότητας (fitness trackers), καθώς και συστημάτων ψυχαγωγίας και πληροφορόρησης σε αυτοκίνητα (infotainment systems).

Την ίδια περίοδο σημειώθηκε η ραγδαία εξάπλωση των δικτύων τέταρτης γενιάς (4G LTE - Long-Term Evolution), τα οποία προσέφεραν ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων που ξεπερνούσαν τα 100 Mbps, φτάνοντας ακόμη και το 1 Gbps υπό βέλτιστες συνθήκες. Αυτές οι ταχύτητες επέτρεψαν τη ζωντανή ροή βίντεο υψηλής ευκρίνειας (HD - High Definition), την απρόσκοπτη εμπειρία online παιχνιδιών και τη διεξαγωγή τηλεδιασκέψεων σε πραγματικό χρόνο, χωρίς καθυστερήσεις. Οι πρώτες εμπορικές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν τέλη δεκαετίας 2000 σε χώρες όπως η Σουηδία και η Νορβηγία, ενώ από το 2009-2010 ξεκίνησε η ευρύτερη εμπορική διάθεσή τους. Έτσι, τα επόμενα χρόνια, η τεχνολογία 4G LTE έγινε διαδεδομένη διεθνώς, προσφέροντας σημαντικά αυξημένες ταχύτητες δεδομένων και βελτιωμένη ποιότητα υπηρεσιών (Zeadally et al., 2019).

Παράλληλα στον τομέα των ασύρματων τοπικών δικτύων, εγκρίθηκε το πρότυπο IEEE 802.11n, το οποίο εισήγαγε λειτουργία διπλής ζώνης (dual-band) στα 2.4 & 5 GHz, με μέγιστη ταχύτητα 600 Mbps, και ενσωμάτωσε τεχνολογίες όπως το MIMO (Multiple Input, Multiple Output). Το MIMO

χρησιμοποιεί πολλαπλές κεραίες για τη βελτίωση της χωρητικότητας και της αξιοπιστίας της ασύρματης σύνδεσης, ακόμη και σε περιβάλλοντα με υψηλή πυκνότητα συσκευών (Gast, 2005). Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν οι οικιακοί δρομολογητές (routers) με πολλαπλές κεραίες, τα smartphones που συνδέονται ταυτόχρονα σε πολλαπλές ζώνες συχνοτήτων, καθώς και τα laptops που αξιοποιούν το MIMO για σταθερή σύνδεση σε πολυσύχναστα περιβάλλοντα, όπως γραφεία και πανεπιστήμια.

Αυτές οι παράλληλες τεχνολογικές εξελίξεις στο Bluetooth, στα κινητά δίκτυα και το Wi-Fi βελτίωσαν σημαντικά την αξιοπιστία, την ταχύτητα και τη σταθερότητα της ασύρματης επικοινωνίας, καθιστώντας τις φορητές συσκευές πιο λειτουργικές και διασυνδεδεμένες. Ταυτόχρονα, η ραγδαία ανάπτυξη και διάδοση των smartphones και των φορητών υπολογιστών συνέβαλε καθοριστικά στην εξέλιξη και ενίσχυση των ασύρματων ψηφιακών τεχνολογιών, διευρύνοντας το φάσμα εφαρμογών και τη συνδεσιμότητα. Οι συσκευές αυτές αποτέλεσαν τους πρώτους πραγματικούς κόμβους ασύρματης διασύνδεσης, συγκεντρώνοντας τις δυνατότητες GSM/3G, Wi-Fi και Bluetooth, ενώ υποστήριζαν πλέον εφαρμογές που απαιτούσαν συνεχή διασύνδεση με το διαδίκτυο (Ceruzzi, 2003; Stallings, 2017).

Καθώς προχωρούσε η δεκαετία του 2000, η πολυτροπική συνδεσιμότητα (multi-radio connectivity) και η αντίληψη του διαδικτύου ως υπηρεσίας διαθέσιμης οποτεδήποτε και οπουδήποτε εξελίχθηκαν από αφηρημένες ιδέες σε εφαρμόσιμους στόχους, χάρη στις τεχνολογικές προόδους. Η τεχνολογική βάση για την έλευση της τέταρτης γενιάς (4G) είχε ήδη τεθεί.

1.2.7 Προς τα Δίκτυα του Μέλλοντος (2010–σήμερα)

Η περίοδος από το 2010 έως σήμερα χαρακτηρίζεται από τη μετάβαση σε ασύρματα δίκτυα υψηλής απόδοσης, όπως το Wi-Fi 5/6/7 (802.11ac/ax/be) και τα κινητά δίκτυα 4G LTE και 5G, που προσφέρουν υψηλές ταχύτητες, χαμηλή καθυστέρηση και μαζική διασύνδεση συσκευών. Αυτές οι τεχνολογίες υποστηρίζουν τόσο την ανθρώπινη επικοινωνία όσο και το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT), θέτοντας τις βάσεις για έξυπνες πόλεις, αυτόνομη οδήγηση και βιομηχανία 4.0. Το IoT επιτρέπει σε καθημερινές και βιομηχανικές συσκευές να συνδέονται και να ανταλλάσσουν δεδομένα αυτόνομα, ενώ η Βιομηχανία 4.0 αξιοποιεί αισθητήρες, ρομποτική και ανάλυση δεδομένων για αυτοματοποιημένες και ευφυείς βιομηχανικές διαδικασίες (Wang et al., 2019).

Η τεχνολογία Machine-to-Machine (M2M) επιτρέπει την απευθείας επικοινωνία μεταξύ συσκευών χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση και θεωρείται θεμελιώδες στοιχείο για την ανάπτυξη του σύγχρονου Internet of Things (IoT) (Chen et al., 2014). Η έννοιά της εμφανίστηκε ήδη από τα τέλη της δεκαετίας του 1990, ωστόσο η ευρεία υιοθέτησή της επιταχύνθηκε την περίοδο 2010–2014, κυρίως λόγω της εξάπλωσης των κινητών ευρυζωνικών δικτύων και των εξελιγμένων πρωτοκόλλων επικοινωνίας. Συνολικά, η εξέλιξη των ασύρματων δικτύων έχει συμβάλει καθοριστικά στη διασύνδεση ετερογενών συσκευών και στην ανάπτυξη ψηφιακών οικοσυστημάτων μεγάλης κλίμακας.

Επιπλέον, οι τεχνολογίες Χρονικά Ευαίσθητης Δικτύωσης (Time Sensitive Networking – TSN) διασφαλίζουν την ακριβή χρονική διαχείριση κρίσιμων δεδομένων σε εφαρμογές όπως αυτοματοποιημένα εργοστάσια και συνδεδεμένα οχήματα. Όλες αυτές οι τεχνολογίες διαμορφώνουν ένα νέο μοντέλο ψηφιακής συνδεσιμότητας, στο οποίο η υψηλή ταχύτητα, η αξιοπιστία και η μαζική διασύνδεση συσκευών επιτρέπουν την ανάπτυξη έξυπνων πόλεων, συνδεδεμένων συστημάτων μεταφορών και αυτοματοποιημένων βιομηχανικών διαδικασιών (Farkas et al., 2020; Khoron et al., 2018).

Το 2013 εγκρίθηκε το πρότυπο IEEE 802.11ac (Wi-Fi 5), το οποίο λειτουργεί αποκλειστικά στη ζώνη των 5 GHz και εισήγαγε σημαντικές βελτιώσεις στην απόδοση των ασύρματων τοπικών δικτύων. Οι τυπικές υλοποιήσεις της αρχικής φάσης του προτύπου προσέφεραν θεωρητικές ταχύτητες έως περίπου 1,3 Gbps, ενώ η πλήρης προδιαγραφή του 802.11ac προβλέπει μέγιστες θεωρητικές ταχύτητες που φτάνουν έως περίπου 6,9 Gbps, επιτυγχανόμενες με τη χρήση 8x8 MIMO, καναλιών 160 MHz και διαμόρφωσης 256-QAM (IEEE 802.11ac-2013 ; Khoron et al., 2018).

Το πρότυπο εισήγαγε ευρύτερα κανάλια και πιο αποδοτικά σχήματα διαμόρφωσης, αυξάνοντας σημαντικά το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και τη συνολική αποδοτικότητα του δικτύου. Στις νεότερες υλοποιήσεις του (802.11ac Wave 2), υποστηρίχθηκε η τεχνολογία MU-MIMO (Multi-User Multiple Input Multiple Output), επιτρέποντας την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλών χρηστών, γεγονός που κατέστησε το Wi-Fi 5 ιδιαίτερα κατάλληλο για περιβάλλοντα με υψηλή πυκνότητα συσκευών, όπως γραφεία, αεροδρόμια και συνεδριακούς χώρους (Liao et al., 2014).

Το 2019, η έγκριση του προτύπου IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6) επέφερε θεμελιώδεις αλλαγές στην απόδοση των ασύρματων τοπικών δικτύων, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα με πυκνή χρήση. Το πρότυπο λειτουργεί στις ζώνες 2.4 GHz και 5 GHz, υποστηρίζοντας εύρη ζώνης 20, 40, 80 και 160 MHz. Οι θεωρητικές ταχύτητες μετάδοσής του φτάνουν έως και τα 9.6 Gbps, αν και στην πράξη κυμαίνονται χαμηλότερα ανάλογα με το περιβάλλον και τον εξοπλισμό (Khoron et al., 2018).

Το Wi-Fi 6 εισάγει δύο τεχνολογίες που μεταβάλλουν τη διαχείριση πολλαπλών συσκευών, το OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) και το MU-MIMO. Το OFDMA διαιρεί το κανάλι σε μικρότερα υποκανάλια (Resource Units) για την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλαπλών χρηστών, επιτρέποντας σε αυτούς να στέλνουν και να λαμβάνουν δεδομένα ταυτόχρονα με ελάχιστη καθυστέρηση. Αυτό είναι αποδοτικό για μικρά πακέτα δεδομένων, όπως αυτά που χρησιμοποιούν οι IoT συσκευές (IEEE 802.11ax-2021).

Το MU-MIMO (Multi-User Multiple Input Multiple Output), το οποίο εισήχθη στο Wi-Fi 5 (IEEE 802.11ac) για downlink επικοινωνία, επεκτάθηκε στο Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax) υποστηρίζοντας πλέον τόσο downlink (από το σημείο πρόσβασης προς τις συσκευές) όσο και uplink (από τις συσκευές προς το σημείο πρόσβασης). Παράλληλα, το Wi-Fi 6 αυξάνει τον μέγιστο αριθμό των υποστηριζόμενων χωρικών ροών (spatial streams) έως και 8, επιτρέποντας την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση περισσότερων χρηστών ή τη βελτίωση της απόδοσης ανά χρήση.

Η τεχνολογία MU-MIMO αξιοποιεί πολλαπλές κεραίες για την ταυτόχρονη μετάδοση δεδομένων προς διαφορετικές συσκευές μέσω ανεξάρτητων χωρικών ροών, αυξάνοντας τη συνολική χωρητικότητα και την αποδοτικότητα του δικτύου. Σε συνδυασμό με το OFDMA, το Wi-Fi 6 καθίσταται πιο αποδοτικό και ικανό να διαχειρίζεται υψηλή κίνηση δεδομένων και μεγάλο αριθμό συσκευών, ιδιαίτερα σε πυκνοκατοικημένα περιβάλλοντα (Khoron et al., 2018).

Το επόμενο πρότυπο, IEEE 802.11be (Wi-Fi 7), εγκρίθηκε το 2024, αξιοποιεί πλήρως το φάσμα των 6 GHz και προσφέρει θεωρητικές ταχύτητες έως 46 Gbps (IEEE, 2024). Το πρότυπο εισάγει το Multi-Link Operation (MLO), που επιτρέπει την ταυτόχρονη χρήση πολλαπλών ζωνών συχνοτήτων (2.4, 5 και 6 GHz), κανάλια 320 MHz (διπλάσιο από το Wi-Fi 6), και 4K-QAM για υψηλότερη απόδοση. Με αυτά τα χαρακτηριστικά, το Wi-Fi 7 αποτελεί το πιο προηγμένο ασύρματο πρότυπο έως σήμερα, κατάλληλο τόσο για οικιακές όσο και για επαγγελματικές εφαρμογές (Deng et al., 2020).

Παράλληλα, το 4G LTE παραμένει η κυρίαρχη υποδομή κινητής επικοινωνίας από τη δεκαετία του 2010, προσφέροντας ταχύτητες που υποστηρίζουν υπηρεσίες υψηλής ποιότητας, όπως streaming πολυμέσων, τηλεδιάσκεψη και εφαρμογές υπολογιστικού νέφους (cloud) (Sauter, 2011). Ωστόσο, η εμπορική έλευση του 5G το 2019 σηματοδότησε μια νέα γενιά κινητών δικτύων με σημαντικά βελτιωμένα χαρακτηριστικά, όπως αυξημένο εύρος ζώνης (bandwidth), εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση (έως 1 ms σε ιδανικές συνθήκες) και δυνατότητα υποστήριξης έως και ενός εκατομμυρίου συνδεδεμένων συσκευών ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο.

Επιπλέον, το 5G εισάγει προηγμένες αρχιτεκτονικές δυνατότητες, όπως το network slicing, που επιτρέπει τον λογικό διαχωρισμό του δικτύου σε εικονικά υποδίκτυα προσαρμοσμένα σε διαφορετικές εφαρμογές, καθώς και το mobile edge computing, το οποίο μεταφέρει την επεξεργασία δεδομένων στην περιφέρεια του δικτύου, μειώνοντας περαιτέρω την καθυστέρηση και βελτιώνοντας την απόδοση σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου (ITU, 2020; GSMA, 2020).

Από το 2019, τα δίκτυα πέμπτης γενιάς κινητής τηλεφωνίας (5G - Fifth Generation Mobile Networks) προσφέρουν εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση (latency έως 1 ms), υψηλή αξιοπιστία και εντυπωσιακές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, που σε ορισμένες εφαρμογές μπορούν να υπερβαίνουν τα 10 Gbps. Αυτές οι δυνατότητες υποστηρίζουν προηγμένες τεχνολογίες όπως IoT, αυτόνομα οχήματα, εικονική και επανζημένη πραγματικότητα (VR/AR), τηλεϊατρική, smart cities και βιομηχανικό αυτοματισμό (Industry 4.0).

Η αρχιτεκτονική του 5G έχει σχεδιαστεί για να υποστηρίζει μαζική ταυτόχρονη σύνδεση έως 1 εκατομμυρίου συσκευών ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο, μέσω της δυνατότητας mMTC (massive Machine-Type Communications), ενώ παράλληλα παρέχει εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση και υψηλή αξιοπιστία για κρίσιμες εφαρμογές μέσω της δυνατότητας URLLC (Ultra-Reliable Low-Latency Communications) (ITU-R, 2015; 3GPP, 2024; Dahlman et al., 2018). Αυτό το καθιστά ιδανικό για ευφυή περιβάλλοντα όπως:

- Υγειονομική περίθαλψη: Απομακρυσμένη παρακολούθηση ασθενών και τηλεχειρουργικές επεμβάσεις.
- Γεωργία ακριβείας: Αισθητήρες για υγρασία, θερμοκρασία και λίπανση.
- Εφοδιαστική (Logistics): Παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο (real-time tracking) της εφοδιαστικής αλυσίδας (supply chain).
- Έξυπνες πόλεις (Smart cities): Ολοκληρωμένα συστήματα κυκλοφορίας, φωτισμού και καθαριότητας.
- Βιομηχανία 4.0: Αυτοματοποιημένα συστήματα παραγωγής με real-time έλεγχο.
- Αυτόνομα οχήματα: Επικοινωνία vehicle-to-everything (V2X) για ασφαλή πλοήγηση.

Συνολικά, το 5G δεν περιορίζεται μόνο σε μεγαλύτερες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, αλλά αποτελεί και πλατφόρμα διασύνδεσης για την πλήρη ψηφιοποίηση της καθημερινότητας, δημιουργώντας το τεχνολογικό υπόβαθρο για την 4η Βιομηχανική Επανάσταση (ITU, 2020). Δίνει τη δυνατότητα για σταθερή, γρήγορη και αποδοτική σε ενέργεια σύνδεση πολλών συσκευών ταυτόχρονα, βελτιώνοντας την αποτελεσματικότητα και την ποιότητα των εφαρμογών IoT.

Επιπλέον, η τεχνολογία TSN (Time Sensitive Networking) ενσωματώνεται στα δίκτυα 5G για εφαρμογές όπου η ακρίβεια και ο συγχρονισμός δεδομένων είναι κρίσιμοι, όπως στην υγειονομική περίθαλψη, τα αυτόνομα οχήματα και τα βιομηχανικά συστήματα ελέγχου. Η ενσωμάτωση TSN με το 5G δημιουργεί ένα υβριδικό οικοσύστημα που ενισχύει περαιτέρω τις δυνατότητες URLLC, προσφέροντας απόλυτη αξιοπιστία και χρονική ακρίβεια.

Παράλληλα με την εξέλιξη των κινητών δικτύων, η τεχνολογία Bluetooth σημείωσε σημαντική πρόοδο, εστιάζοντας κυρίως σε υψηλότερες ταχύτητες, χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας και βελτιωμένη απόδοση σε περιβάλλοντα με πολλές συσκευές. Το 2010 κυκλοφόρησε το Bluetooth 4.0, όπου εισήγαγε το Low Energy (BLE), επιτρέποντας τη σύνδεση μικρών, φορητών συσκευών με πολύ μικρή κατανάλωση ενέργειας, ιδανικό για αισθητήρες και wearables. Το 2013, το Bluetooth 4.1 βελτίωσε τη συμβατότητα με τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας και την αποδοτικότητα των συνδέσεων. Η εξέλιξη της τεχνολογίας Bluetooth από την έκδοση 4.0 και μετά αποτέλεσε σημαντικό ορόσημο στην ανάπτυξη του IoT και των φορητών συσκευών (Zeadally et al., 2019).

Το 2017 τυποποιήθηκε το Bluetooth 5.0, το οποίο επέκτεινε την εμβέλεια και διπλασίασε τον ρυθμό μετάδοσης, εισάγοντας βελτιωμένη υποστήριξη για εφαρμογές Internet of Things (IoT) και έξυπνες πόλεις, με έμφαση σε συσκευές χαμηλής κατανάλωσης όπως

αισθητήρες και wearables (Bluetooth SIG, 2020; Bluetooth SIG, 2021; Koulouras et al., 2025).

Το Bluetooth 5.2 (2020) εισήγαγε το LE Audio, μια νέα αρχιτεκτονική ήχου που βασίζεται στο Bluetooth Low Energy (BLE), αντικαθιστώντας το παραδοσιακό audio stack του κλασικού Bluetooth. Το LE Audio αξιοποιεί το codec LC3 (Low Complexity Communication Codec), προσφέροντας υψηλότερη ποιότητα ήχου με μειωμένη κατανάλωση ενέργειας και μεγαλύτερη αποδοτικότητα σε σχέση με προηγούμενα codecs (Bluetooth SIG, 2020).

Επιπλέον, υποστηρίζει multi-stream audio, επιτρέποντας τη μετάδοση πολλαπλών συγχρονισμένων ροών ήχου σε συσκευές όπως ασύρματα ακουστικά, βελτιώνοντας τη σταθερότητα και την ποιότητα ήχου. Παράλληλα, εισάγει το broadcast audio (Auracast), το οποίο επιτρέπει τη μετάδοση ήχου σε πολλαπλές συμβατές συσκευές ταυτόχρονα, καθιστώντας το κατάλληλο για εφαρμογές όπως αεροδρόμια, σταθμούς, μουσεία και βοηθητικές ακουστικές τεχνολογίες (Bluetooth SIG, 2021).

Συνολικά, το LE Audio βελτιώνει σημαντικά την ενεργειακή απόδοση, την ευελιξία και την ποιότητα της ασύρματης ηχητικής μετάδοσης, επεκτείνοντας τη χρήση του Bluetooth σε σύγχρονες εφαρμογές ακουστικών συσκευών και Internet of Things (IoT) (Gómez et al., 2012)..

Το Bluetooth 6.0, το οποίο ανακοινώθηκε το 2024 από το Bluetooth Special Interest Group (Bluetooth SIG), εισάγει σημαντικές βελτιώσεις στην απόδοση, την ασφάλεια και την ακρίβεια εντοπισμού θέσης. Η νέα έκδοση περιλαμβάνει το Channel Sounding, μια τεχνολογία ακριβούς μέτρησης απόστασης μεταξύ συσκευών, καθώς και βελτιώσεις στη διαχείριση advertising και στη μείωση καθυστέρησης μέσω του Isochronous Adaptation Layer (Bluetooth SIG, 2024).

Οι πρόσφατες εξελίξεις στο Bluetooth Low Energy (BLE), συμπεριλαμβανομένων των βελτιώσεων που εισάγονται στις νεότερες εκδόσεις του Bluetooth Core Specification, ενισχύουν εφαρμογές που απαιτούν χαμηλή καθυστέρηση, ενεργειακή αποδοτικότητα και βελτιωμένη ακρίβεια εντοπισμού θέσης (Bluetooth SIG, 2024). Οι βελτιώσεις αυτές υποστηρίζουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών στο Internet of Things (IoT) και σε συστήματα πραγματικού χρόνου, όπως (Gubbi et al., 2013):

- Έξυπνα σπίτια: Αισθητήρες φωτισμού και θερμοστάτες που προσαρμόζονται δυναμικά στη θέση και την παρουσία χρηστών.
- Wearables και fitness trackers: Συνεχής και συγχρονισμένη παρακολούθηση φυσιολογικών δεδομένων.
- Βιομηχανικό IoT: Ρομποτικά συστήματα και αισθητήρες με ανάγκη ακριβούς εντοπισμού και συντονισμού.
- Gaming και AR/VR: Εφαρμογές που απαιτούν εξαιρετικά χαμηλό latency για βελτιωμένη εμπειρία χρήστη.
- Ιατρικές συσκευές: Συστήματα παρακολούθησης ασθενών σε πραγματικό χρόνο με υψηλή αξιοπιστία.

Η εξάπλωση του Internet of Things (IoT) έχει καταστεί εφικτή χάρη σε μία σειρά ασύρματων πρωτοκόλλων που επιτρέπουν τη διασύνδεση αισθητήρων, μηχανών και αντικειμένων με το διαδίκτυο, συχνά με αυστηρές απαιτήσεις χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και μεγάλης αυτονομίας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το Narrowband IoT (NB-IoT), το οποίο προσφέρει εκτεταμένη εμβέλεια επικοινωνίας με πολύ χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις, καθιστώντας το κατάλληλο για συσκευές που μεταδίδουν μικρούς όγκους δεδομένων σε μεγάλα χρονικά διαστήματα, όπως μετρητές ή αισθητήρες παρακολούθησης (Chen et al., 2017; Ahmad et al., 2022).

Σε διαφορετικό πλαίσιο, το LoRaWAN δίνει έμφαση στην επικοινωνία μεγάλης απόστασης με ελάχιστο ενεργειακό αποτύπωμα, προσφέροντας σημαντικά πλεονεκτήματα για εφαρμογές σε «έξυπνες πόλεις» και στη γεωργία ακριβείας, όπου απαιτείται η κάλυψη εκτεταμένων γεωγραφικών περιοχών (The Things Network, 2020). Παράλληλα, το Bluetooth Low Energy (BLE) έχει αναπτυχθεί ως τεχνολογία βραχείας εμβέλειας και χαμηλής κατανάλωσης, η οποία χρησιμοποιείται ευρέως σε φορητές συσκευές, καθώς και σε εφαρμογές εσωτερικού εντοπισμού και πλοήγησης, όπως συστήματα beacon και υπηρεσίες location-based services (Gomez et al., 2012; Faragher, 2014).

Ιδιαίτερα στη Βιομηχανία 4.0, τα δίκτυα 5G επιτρέπουν την υλοποίηση διαδικασιών αυτοματισμού σε πραγματικό χρόνο, με εφαρμογές σε ρομποτική, παρακολούθηση παραγωγικής γραμμής και διαχείριση αποθεμάτων. Η αξιοποίηση τεχνολογιών όπως το TSN διασφαλίζει ότι οι καθυστερήσεις στην επικοινωνία περιορίζονται εντός αυστηρών χρονικών ορίων (Farkas et al., 2020; Dahlman et al., 2018).

Προς το τέλος της δεκαετίας του 2020, το Wi-Fi 7 (2024) και η υπό ανάπτυξη τεχνολογία 6G (αναμένεται ~2030) αναδύονται ως η επόμενη γενιά εξελίξεων, με στόχο τη ενοποίηση του φυσικού και ψηφιακού κόσμου μέσω τεχνητής νοημοσύνης, επανξιμένης πραγματικότητας και δικτύων αισθητήρων παγκόσμιας εμβέλειας. Το δίκτυο του μέλλοντος αναμένεται να λειτουργεί ως δυναμική υποδομή, ικανή να προσαρμόζεται στις ανάγκες κάθε χρήστη και εφαρμογής, υποστηρίζοντας την ενοποίηση φυσικού και ψηφιακού κόσμου.

1.3 Χρησιμότητα, Εξάπλωση και Βασικές Αρχές Λειτουργίας των Ασύρματων Δικτύων

Τα ασύρματα δίκτυα έχουν αλλάξει ριζικά την επικοινωνία, προσφέροντας συνδεσιμότητα χωρίς καλωδίωση και μειώνοντας το κόστος και τον χρόνο ανάπτυξης υποδομών. Η ευελιξία και η απλότητα εγκατάστασής τους τα καθιστούν απαραίτητα σε πολλούς τομείς, από τον οικιακό αυτοματισμό έως τη βιομηχανία, την υγειονομική περίθαλψη και τα εταιρικά δίκτυα. Επιπλέον, επιτρέπουν κινητικότητα, εύκολη κλιμάκωση και πρόσβαση ακόμη και σε αγροτικές ή δυσπρόσιτες περιοχές, όπου οι ενσύρματες λύσεις δεν είναι εφικτές (Li et al., 2006).

Η ανάπτυξη ασύρματων δικτύων γίνεται με διαφορετικά μοντέλα, ανάλογα με τις ανάγκες κάλυψης, χωρητικότητας και ασφάλειας. Στο μοντέλο υποδομής (infrastructure), οι συσκευές συνδέονται μέσω σημείων πρόσβασης (APs) που επιτρέπουν κεντρική διαχείριση και έλεγχο, γι' αυτό χρησιμοποιείται κυρίως σε εταιρικά περιβάλλοντα (Gast, 2005). Η ad-hoc λειτουργία επιτρέπει απευθείας επικοινωνία μεταξύ συσκευών χωρίς AP και είναι χρήσιμη σε προσωρινά δίκτυα ή καταστάσεις έκτακτης ανάγκης (Tanenbaum et al., 2021). Τα δίκτυα πλέγματος (mesh) διασυνδέουν πολλούς κόμβους, επεκτείνοντας την κάλυψη και αυξάνοντας την ανθεκτικότητα, με εφαρμογές σε έξυπνες πόλεις και IoT (Kurose & Ross, 2021; Tanenbaum & Wetherall, 2011).

Σε επίπεδο λειτουργίας, τα ασύρματα δίκτυα βασίζονται στη μετάδοση ραδιοσυχνοτήτων σε αδειοδοτημένες και μη αδειοδοτημένες ζώνες φάσματος. Η ποιότητα του σήματος επηρεάζεται από εμπόδια, ανακλάσεις και πολυδιόδευση (multipath), που προκαλούν μεταβολές στην ισχύ λήψης. Για τη βελτίωση της απόδοσης χρησιμοποιούνται τεχνικές όπως η προσαρμοστική διαμόρφωση (AMC), το beamforming και το MIMO, που αυξάνουν τη σταθερότητα και την αποδοτικότητα της σύνδεσης (Dahlman et al., 2018). Στα ασύρματα τοπικά δίκτυα, η πρόσβαση στο μέσο διαχειρίζεται μέσω του CSMA/CA, με μηχανισμούς αποφυγής συγκρούσεων (Gast, 2005).

Η ασφάλεια είναι κρίσιμη, καθώς το ασύρματο μέσο είναι προσβάσιμο σε τρίτους. Σύγχρονοι μηχανισμοί όπως το WPA3 και το TLS προστατεύουν από υποκλοπή και μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση. Σε επιχειρησιακά περιβάλλοντα, η χρήση 802.1X/EAP, ο διαχωρισμός VLAN και η τμηματοποίηση του δικτύου περιορίζουν την έκθεση σε επιθέσεις (Sauter, 2021).

Καθώς η εξάρτηση από την ασύρματη πρόσβαση αυξάνεται, νέες τεχνολογίες στοχεύουν σε υψηλότερες ταχύτητες, χαμηλότερη καθυστέρηση και καλύτερη ενεργειακή αποδοτικότητα. Το 5G

και το Wi-Fi 6 βελτιώνουν την απόδοση σε πυκνά περιβάλλοντα και επιτρέπουν αξιόπιστη επικοινωνία για εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Παράλληλα, οι τεχνολογίες δυναμικής κατανομής φάσματος διευκολύνουν τη συνύπαρξη διαφορετικών συστημάτων. Αυτές οι εξελίξεις είναι απαραίτητες για αυτόνομα οχήματα, έξυπνα δίκτυα ενέργειας και βιομηχανικό αυτοματισμό (ITU, 2020).

1.4 Σύγκριση Ενσύρματων και Ασύρματων Τοπικών Δικτύων

Τα ενσύρματα και τα ασύρματα δίκτυα αποτελούν δύο διαφορετικές προσεγγίσεις στη σχεδίαση τοπικών υποδομών. Τα ενσύρματα δίκτυα βασίζονται σε φυσικά μέσα, όπως συνεστραμμένο ζεύγος χαλκού και οπτικές ίνες, και προσφέρουν υψηλές ταχύτητες, χαμηλή καθυστέρηση και σταθερή σύνδεση. Τα ασύρματα δίκτυα αξιοποιούν ραδιοκύματα, προσφέροντας κινητικότητα και ευκολία ανάπτυξης, αλλά με μεγαλύτερη ευαισθησία σε παρεμβολές και αυξημένες απαιτήσεις ασφάλειας (Dahlman et al., 2018).

Στα ενσύρματα δίκτυα η απόδοση είναι προβλέψιμη, με ταχύτητες από 1 Gbps έως 100+ Gbps στο κορμό με οπτικές ίνες. Το μειονέκτημά τους είναι η περιορισμένη ευελιξία, καθώς κάθε μετακίνηση συσκευών απαιτεί φυσική αναδιάταξη, και το υψηλό κόστος εγκατάστασης λόγω καλωδιώσεων και υποδομών. Αντίθετα, τα ασύρματα δίκτυα (Wi-Fi) επιτρέπουν σύνδεση πολλών συσκευών χωρίς καλώδια εντός της εμβέλειας ενός σημείου πρόσβασης (AP). Το Wi-Fi 6 (802.11ax) υποστηρίζει θεωρητικά έως 9,6 Gbps, αν και η πραγματική απόδοση εξαρτάται από την απόσταση, τα εμπόδια και τη συνύπαρξη άλλων δικτύων (IEEE 802.11ax-2021). Η απουσία καλωδίωσης αυξάνει την ευελιξία, αλλά εισάγει επιπλέον απαιτήσεις διαχείρισης και ασφάλειας.

Κρίσιμο κριτήριο διαφοροποίησης είναι η αξιοπιστία. Στα ενσύρματα δίκτυα οι παρεμβολές είναι περιορισμένες και η σύνδεση παραμένει σταθερή, ενώ στα ασύρματα τοίχοι, μεταλλικές επιφάνειες και γειτονικά δίκτυα μπορούν να υποβαθμίσουν την ποιότητα. Ως προς την ασφάλεια, τα ενσύρματα απαιτούν φυσική πρόσβαση για κακόβουλη παρέμβαση, ενώ τα ασύρματα είναι πιο εκτεθειμένα σε επιθέσεις όπως spoofing και packet sniffing, γεγονός που επιβάλλει ισχυρές πολιτικές κρυπτογράφησης όπως WPA3 και 802.1X/EAP (Gast, 2005; IEEE Std 802.1X-2001).

Ακολουθεί ο συγκριτικός Πίνακας 1.2 που συνοψίζει τις βασικές παραμέτρους:

Πίνακας 1.2: Σύγκριση χαρακτηριστικών ενσύρματων και ασύρματων δικτύων

Παράμετρος	Ενσύρματο δίκτυο	Ασύρματο δίκτυο
Κινητικότητα	Σταθερή	Υψηλή
Μέσο Μετάδοσης	Χαλκός/Ινες	Αέρας
Ασφάλεια	Υψηλή	Χαμηλότερη
Αξιοπιστία	Πολύ υψηλή	Χαμηλότερη
Ταχύτητα	Πολύ υψηλή (έως ≥ 1 Gbps)	Χαμηλότερη
Πρόσβαση	Απαιτεί φυσική σύνδεση	Απαιτεί εγγύτητα/ κάλυψη
Ευελιξία αλλαγών	Περιορισμένη	Μεγαλύτερη
Κόστος εγκατάστασης	Υψηλό	Χαμηλό
Κόστος συντήρησης/αναβάθμισης	Υψηλό	Χαμηλό
Τυπικός εξοπλισμός	Hub, Switch, Router	Access Point, Wireless Router

Σε περιβάλλοντα όπου απαιτείται υψηλή απόδοση, χαμηλή καθυστέρηση και αυξημένη ασφάλεια, όπως σε κέντρα δεδομένων ή υποδομές υγείας, τα ενσύρματα δίκτυα αποτελούν μονόδρομο.

Αντιθέτως, για εφαρμογές με ανάγκες κινητικότητας, ευελιξίας και ταχείας ανάπτυξης, όπως σε εκπαιδευτικά ιδρύματα ή μικρές επιχειρήσεις, τα WLAN προσφέρουν ένα πιο πρακτικό και οικονομικά αποδοτικό μοντέλο.

Η σύγχρονη τάση σε πολλές εγκαταστάσεις είναι η υιοθέτηση υβριδικών λύσεων, όπου τα ενσύρματα δίκτυα χρησιμοποιούνται ως backbone (κορμός) και τα ασύρματα παρέχουν πρόσβαση στις άκρες του δικτύου. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται συνδυασμός υψηλής απόδοσης, ευελιξίας και επεκτασιμότητας, καλύπτοντας ένα ευρύ φάσμα αναγκών δικτύωσης σε σύγχρονα περιβάλλοντα.

1.5 Τρέχουσες Προκλήσεις

Τα ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLAN) αποτελούν πλέον κρίσιμη υποδομή επικοινωνίας, ωστόσο η λειτουργία τους γίνεται όλο και πιο απαιτητική λόγω της αύξησης των συνδεδεμένων συσκευών και της εντατικής χρήσης πολυμεσικών εφαρμογών. Η ταυτόχρονη πρόσβαση πολλών χρηστών στο κοινόχρηστο ασύρματο μέσο οδηγεί σε ανταγωνισμό για χρόνο μετάδοσης (airtime), προκαλώντας συμφόρηση και υποβάθμιση της απόδοσης.

Το πρόβλημα εντείνεται στις ζώνες των 2,4 GHz και 5 GHz, όπου ο περιορισμένος αριθμός καναλιών και οι παρεμβολές από άλλες τεχνολογίες όπως Bluetooth και IoT οδηγούν σε αυξημένο θόρυβο και μειωμένες ταχύτητες. Η ζώνη των 6 GHz μειώνει τις παρεμβολές, αλλά η μικρότερη διείσδυση του σήματος απαιτεί πυκνότερη εγκατάσταση σημείων πρόσβασης (Sauter, 2021).

Σε περιβάλλοντα υψηλής πυκνότητας χρηστών, όπως εκπαιδευτικά ιδρύματα, γραφεία ανοικτής διάταξης και συνεδριακοί χώροι, το βασικό ζητούμενο δεν είναι μόνο η γεωγραφική κάλυψη, αλλά η διαθέσιμη χωρητικότητα ανά χρήστη. Τεχνολογίες όπως το OFDMA και το MU-MIMO, που εισήχθησαν με το πρότυπο IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6), βελτιώνουν σημαντικά την αποδοτικότητα του ασύρματου μέσου, επιτρέποντας την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλών συσκευών και τη μείωση των καθυστερήσεων. Ωστόσο, η πλήρης αξιοποίησή τους προϋποθέτει τη συμβατότητα τόσο των σημείων πρόσβασης όσο και των τερματικών συσκευών.

Παράλληλα, οι σύγχρονες εφαρμογές, όπως υπηρεσίες βίντεο, τηλεδιασκέψεις και διαδικτυακά παιχνίδια, είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες σε καθυστέρηση και διακυμάνσεις καθυστέρησης (jitter). Η εφαρμογή μηχανισμών ποιότητας υπηρεσίας (QoS) στα WLAN συμβάλλει στη βελτίωση της εμπειρίας χρήστη, μέσω της προτεραιοποίησης της κίνησης και της αποτελεσματικότερης διαχείρισης των διαθέσιμων πόρων, ιδιαίτερα σε συνθήκες υψηλού φορτίου (Sauter, 2021).

Συνολικά, η εξέλιξη των ασύρματων τοπικών δικτύων δεν εξαρτάται μόνο από την αύξηση των θεωρητικών ταχυτήτων, αλλά από την ικανότητά τους να διαχειρίζονται αποδοτικά μεγάλο αριθμό συσκευών, να περιορίζουν τις παρεμβολές και να προσφέρουν σταθερή ποιότητα υπηρεσίας σε απαιτητικά και πυκνά περιβάλλοντα χρήσης.

Κεφάλαιο 2ο: Πρωτόκολλα και Πρότυπα Ασύρματης Επικοινωνίας

2.1 Εισαγωγή στα Πρωτόκολλα Ασύρματων Δικτύων

Το παρόν κεφάλαιο εξετάζει τα πρωτόκολλα και τα πρότυπα που διέπουν τη λειτουργία των ασύρματων δικτύων, οργανωμένα σε τέσσερις κατηγορίες με βάση τη γεωγραφική τους εμβέλεια: Ασύρματα Προσωπικά Δίκτυα (WPAN), Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα (WLAN), Ασύρματα Μητροπολιτικά Δίκτυα (WMAN) και Ασύρματα Δίκτυα Ευρείας Περιοχής (WWAN). Για κάθε κατηγορία αναλύονται τα βασικά πρωτόκολλα και τα πρότυπα τυποποίησης. Στη συνέχεια, το κεφάλαιο επεκτείνεται στα πρωτόκολλα ασφάλειας και στους μηχανισμούς ποιότητας υπηρεσίας (QoS), που αποτελούν κρίσιμες παραμέτρους για την αξιόπιστη και ασφαλή λειτουργία των ασύρματων δικτύων.

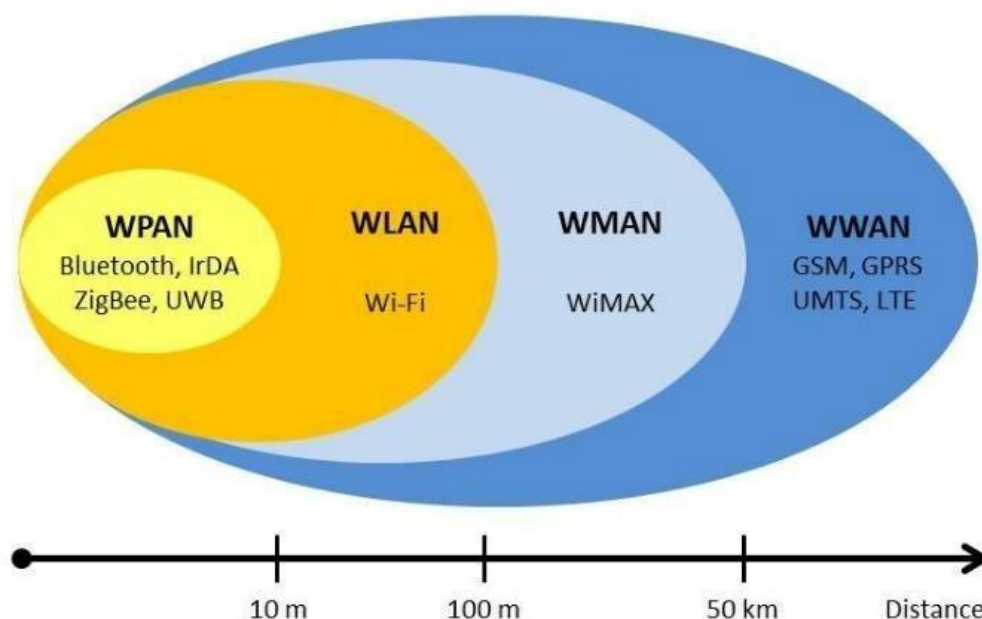
2.2 Κατηγορίες Πρωτοκόλλων Ασύρματων Δικτύων

Τα πρωτόκολλα ασύρματων δικτύων κατηγοριοποιούνται με βάση την εμβέλεια κάλυψης, την κατανάλωση ενέργειας και τον τύπο εφαρμογών που εξυπηρετούν. Όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 1, οι βασικές κατηγορίες είναι οι WPAN, WLAN, WMAN και WWAN. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι τεχνολογίες IoT δεν ανήκουν σε μία μόνο κατηγορία, αλλά αξιοποιούν πρωτόκολλα από διαφορετικά επίπεδα εμβέλειας, όπως WPAN για αισθητήρες μικρής εμβέλειας ή WWAN για NB-IoT και LTE-M. Ο Πίνακας 2.1 συνοψίζει τις κατηγορίες με τα αντίστοιχα πρωτόκολλα και τις κύριες χρήσεις τους.

Πίνακας 2.1: Κατηγοριοποίηση πρωτοκόλλων ασύρματων δικτύων (WPAN, WLAN, WMAN, WWAN)

Κατηγορία	Ενδεικτική εμβέλεια	Ενδεικτικά πρωτόκολλα	Ενδεικτικές χρήσεις
WPAN	cm – ~10/30 m	Bluetooth/BLE, Zigbee, Thread, Z-Wave, NFC	Wearables, αισθητήρες, έξυπνα σπίτια, ανέπαφες πληρωμές
WLAN	~10–100 m	Wi-Fi (IEEE 802.11)	Οικιακά και επιχειρησιακά δίκτυα, πρόσβαση στο internet
WMAN	αρκετά km	WiMAX (IEEE 802.16), LMDS, WiBro	Σύνδεση σε περιοχές χωρίς καλωδίωση, ζεύξη σταθμών βάσης με το κεντρικό δίκτυο, ασύρματη διασύνδεση κτιρίων
WWAN	Αρκετά km ανά κυψέλη σε εθνικό ή παγκόσμιο επίπεδο	2G/3G/4G/5G (GSM, UMTS, LTE, 5G NR)	Κινητή τηλεφωνία και δεδομένα, μαζική συνδεσιμότητα, κινητικότητα

Η διάκριση των ασύρματων δικτύων βάσει της ενδεικτικής εμβέλειας κάλυψης διευκολύνει την κατανόηση του ρόλου κάθε κατηγορίας. Η Εικόνα 2.1 παρουσιάζει σχηματικά τις βασικές κατηγορίες WPAN, WLAN, WMAN και WWAN και την αντίστοιχη απόσταση κάλυψης.



Εικόνα 2.1: Κατηγορίες ασύρματων δικτύων με βάση την ενδεικτική εμβέλεια κάλυψης (WPAN, WLAN, WMAN, WWAN). Πηγή: Pakhomova & Nazarova (2020)

2.3 Πρωτόκολλα Ασύρματων Δικτύων Προσωπικής Περιοχής (WPAN)

Τα WPAN (Wireless Personal Area Networks) είναι δίκτυα πολύ μικρής εμβέλειας, από λίγα εκατοστά έως περίπου εκατό μέτρα ανά κόμβο. Σχεδιάζονται για τη σύνδεση φορητών συσκευών με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και μικρές απαιτήσεις σε εύρος ζώνης. Ενδεικτικές εφαρμογές είναι wearables, αισθητήρες, περιφερειακά, έξυπνες κλειδαριές και φορητές ιατρικές συσκευές. Τα κοινά χαρακτηριστικά τους είναι η μεγάλη διάρκεια μπαταρίας, η απλή ζευγοποίηση (pairing) και η ανθεκτικότητα σε παρεμβολές (Gomez et al., 2012).

Τα πρωτόκολλα WPAN εφαρμόζονται σε ποικίλα σενάρια καθημερινής χρήσης. Το Bluetooth Classic χρησιμοποιείται κυρίως σε ασύρματα ακουστικά και hands-free συστήματα αυτοκινήτων, ενώ το BLE είναι η επικρατέστερη επιλογή για smartwatches, fitness trackers και αισθητήρες θερμοκρασίας. Το Zigbee εφαρμόζεται σε έξυπνες λάμπες, αισθητήρες κίνησης και θερμοστάτες (IEEE 802.15.4-2020; Farahani, 2008).

Επιπλέον, το Thread αποτελεί μία από τις βασικές τεχνολογίες δικτύωσης για συσκευές Matter (το πρότυπο που επιτρέπει σε συσκευές διαφορετικών κατασκευαστών να λειτουργούν μαζί), όπως τα Google Nest και Apple HomePod (Thread Group, 2022). Επίσης, το Z-Wave χρησιμοποιείται σε έξυπνες κλειδαριές, ρολά και συναγερμούς (Z-Wave Alliance, 2020).

Ο Πίνακας 2.2 συνοψίζει τα κυριότερα WPAN πρωτόκολλα και τις ενδεικτικές εφαρμογές τους (IEEE 802.15.4-2020; Gómez et al., 2012; Farahani, 2008; Thread Group, 2022; Z-Wave Alliance, 2020).

Πίνακας 2.2: Κύρια πρωτόκολλα WPAN και χρήση

Πρωτόκολλο	Ενδεικτική χρήση
Bluetooth / BLE	Κινητές συσκευές, wearables, αισθητήρες, IoT συσκευές
Zigbee	Έξυπνα σπίτια, αισθητήρες και ενεργοποιητές, αυτοματισμοί
Thread	Έξυπνα σπίτια με υποστήριξη IPv6 και Matter

Z-Wave	Έξυπνα σπίτια, mesh σε κτίρια με <1 GHz συχνότητα
NFC	Πληρωμές, έλεγχος πρόσβασης, γρήγορο pairing
IEEE 802.15.4	Βασικό πρωτόκολλο PHY/MAC για Zigbee, Thread και 6LoWPAN
UWB	Ακριβής εντοπισμός θέσης σε εσωτερικούς χώρους και παρακολούθηση αντικειμένων, συσκευές Apple (AirTag, iPhone)

Αξίζει να αναφερθούν και ορισμένες επιπλέον τεχνολογίες. Η υπέρυθη επικοινωνία (IrDA) αποτέλεσε από τις πρώτες τεχνολογίες WPAN, αν και σήμερα έχει αντικατασταθεί σε μεγάλο βαθμό από το Bluetooth (IrDA, 2019). Το NFC (Near Field Communication) είναι τεχνολογία επικοινωνίας πολύ κοντινής εμβέλειας, που επιτρέπει ασφαλή και γρήγορη ανταλλαγή δεδομένων με απλή επαφή δύο συσκευών. Χρησιμοποιείται κυρίως σε ανέπαφες πληρωμές, κάρτες πρόσβασης και γρήγορη σύζευξη συσκευών (NFC Forum, 2020). Τέλος, το UWB (Ultra-Wideband) χρησιμοποιεί πολύ ευρύ φάσμα για ακριβή εντοπισμό θέσης σε εσωτερικούς χώρους και βρίσκει εφαρμογή σε συσκευές όπως το iPhone και AirTag της Apple (IEEE 802.15.4a; IEEE 802.15.4-2020c).

Πίνακας 2.3: Ποσοτική σύνοψη βασικών WPAN

Πρωτόκολλο	Ενδεικτική Εμβέλεια	Τυπικός και μέγιστος ρυθμός	Κύρια χαρακτηριστικά
Bluetooth Classic	Κλάση 1: έως 100m Κλάση 2: έως 10m Κλάση 3: έως 1m	έως 3 Mbps (Classic/EDR), έως 24 Mbps (3.0+HS)	Ευρεία συμβατότητα, κατάλληλο για μετάδοση ήχου και περιφερειακές συσκευές
BLE	~10–100+ m (με PHY long range όπου υποστηρίζεται)	~1–2 Mbps (BLE 5.0+)	Πολύ χαμηλή κατανάλωση, ιδανικό για αισθητήρες/wearables
Zigbee (802.15.4)	~10–100 m ανά άλμα	έως 250 kb/s	Mesh τοπολογία, χαμηλό κύκλο λειτουργίας, αυτοματισμοί
Thread (802.15.4 + 6LoWPAN)	~10–100 m ανά άλμα	έως 250 kb/s	Mesh τοπολογία με υποστήριξη IPv6, ασφαλής και IP-native επικοινωνία
Z-Wave	~30 m (καλή διείσδυση σε τοίχους)	~100 kbps (εξαρτάται από την έκδοση)	<1 GHz, mesh τοπολογία, εφαρμογές έξυπνου σπιτιού
NFC	< 10 cm	έως 424 kb/s	Ανέπαφες πληρωμές και ασφαλής σύζευξη συσκευών
UWB	~10–30 m (εσωτερικοί χώροι)	έως ~27 Mbps (802.15.4z)	Ακριβής εντοπισμός θέσης, παρακολούθηση αντικειμένων

2.3.1 Εξειδικευμένα και Λιγότερο Διαδεδομένα WPAN

Πέρα από τα κύρια πρωτόκολλα WPAN, υπάρχουν εξειδικευμένες τεχνολογίες που απευθύνονται σε συγκεκριμένα περιβάλλοντα και απαιτήσεις. Το 6LoWPAN επιτρέπει την ενσωμάτωση IPv6 σε δίκτυα χαμηλής ισχύος μέσω συμπίεσης επικεφαλίδων (RFC 6282), καθιστώντας τους αισθητήρες απευθείας προσβάσιμους μέσω IP (Hui & Thubert, 2011). Το WirelessHART είναι αξιόπιστο βιομηχανικό πρότυπο με mesh τοπολογία και ακριβή χρονισμό, κατάλληλο για απαιτητικά παραγωγικά περιβάλλοντα (IEEE 802.15.4-2020; IEC, 2016).

Επιπλέον, το EnOcean λειτουργεί χωρίς μπαταρία, αξιοποιώντας περιβαλλοντική ενέργεια, όπως φως, κίνηση και θερμοκρασία, και χρησιμοποιείται κυρίως σε έξυπνα κτίρια (EnOcean Alliance, 2021). Το ANT/ANT+ είναι πρωτόκολλο χαμηλής κατανάλωσης, σχεδιασμένο για τηλεμετρία σε fitness συσκευές και wearables (ANT Wireless, 2020). Το RuBee είναι κατάλληλο για βιομηχανικά περιβάλλοντα με μέταλλα και υγρά, όπου άλλα πρωτόκολλα παρουσιάζουν χαμηλή απόδοση (IEEE 1902.1-2009). Ο Πίνακας 2.4 συνοψίζει τα βασικά χαρακτηριστικά τους (ANT Wireless, 2020; EnOcean Alliance, 2021; Hui & Thubert, 2011; IEEE 1902.1-2009; IEC, 2016; IEEE 802.15.4-2020).

Πίνακας 2.4: Εξειδικευμένα WPAN

Πρωτόκολλο	Πεδίο εφαρμογής	Πλεονεκτήματα
6LoWPAN	IoT χαμηλής ισχύος	IP/IPv6 σε 802.15.4 δίκτυα, header compression
WirelessHART	Βιομηχανία	Υψηλή αξιοπιστία, εναλλαγή συχνότητας και προβλέψιμη απόδοση
EnOcean	Έξυπνα κτίρια	Λειτουργεί χωρίς μπαταρία, αξιοποιώντας περιβαλλοντική ενέργεια
ANT/ANT+	Συσκευές fitness και wearables	Πολύ χαμηλή κατανάλωση, τηλεμετρία
RuBee	Βιομηχανικά περιβάλλοντα	Αξιόπιστη λειτουργία κοντά σε μέταλλα και υγρά, asset tracking

2.4 Πρωτόκολλα Ασύρματων Τοπικών Δικτύων (WLAN)

Τα WLAN καλύπτουν αποστάσεις από λίγες δεκάδες έως μερικές εκατοντάδες μέτρα, εξυπηρετώντας τόσο μεμονωμένους χώρους όσο και ολόκληρα κτίρια. Λειτουργούν κυρίως στις ζώνες 2,4 GHz και 5 GHz, ενώ οι νεότερες επεκτάσεις αξιοποιούν και τα 6 GHz (Wi-Fi 6E/7) για περισσότερα κανάλια και μικρότερη συμφόρηση.

Ο Πίνακας 2.5 παρουσιάζει τα βασικά πρότυπα Wi-Fi και τα χαρακτηριστικά τους (IEEE 802.11-2007; IEEE 802.11n-2009; IEEE 802.11ac-2013; IEEE 802.11ax-2021; IEEE 802.11be-2024).

Πίνακας 2.5: Επισκόπηση βασικών προτύπων Wi-Fi

Πρότυπο	Ζώνη	Ενδεικτική Ταχύτητα	Κύρια χαρακτηριστικά
802.11b	2,4 GHz	11 Mb/s	Πρώτη μαζική διάδοση, μεγάλη συμβατότητα, εύαλωτο σε θόρυβο, εύρος καναλιού 22 MHz
802.11a	5 GHz	54 Mb/s	OFDM, λιγότερες παρεμβολές, εύρος καναλιού 20 MHz
802.11g	2,4 GHz	54 Mb/s	OFDM, συμβατό με 802.11b, εύρος καναλιού 20 MHz
802.11n	2,4/5 GHz	600 Mb/s	MIMO, βελτίωση ταχύτητας και σταθερότητας, εύρος καναλιού 20 ή 40 MHz
802.11ac (Wi-Fi 5)	5 GHz	~6,9 Gb/s	256-QAM, beamforming, MU-MIMO (μόνο downlink), εύρος καναλιού 20, 40, 80 ή 160 MHz
802.11ax (Wi-Fi 6/6E)	2,4/5/6 GHz	9,6 Gb/s	OFDMA, MU-MIMO σε uplink και downlink, TWT, βελτιωμένη απόδοση σε πυκνά δίκτυα, εύρος καναλιού 20, 40, 80 ή 160 MHz

802.11be (Wi-Fi 7)	2,4/5/6 GHz	~46 Gb/s	4096-QAM, MLO, χαμηλή καθυστέρηση, εύρος καναλιού έως 320 MHz
-----------------------	----------------	----------	--

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι ταχύτητες του πίνακα αποτελούν θεωρητικά μέγιστα του φυσικού επιπέδου (PHY) και στην πράξη επηρεάζονται από παράγοντες όπως ο λόγος σήματος προς θόρυβο (SNR), οι παρεμβολές, το εύρος καναλιού και ο φόρτος του δικτύου (Gast, 2005; IEEE 802.11ax-2021). Οι τεχνολογίες που αναφέρονται στον πίνακα, όπως OFDMA, MU-MIMO, MLO και TWT, αναλύονται εκτενέστερα στα επόμενα κεφάλαια.

2.4.1 Εξειδικευμένες Παραλλαγές 802.11

Πέρα από τα κύρια πρότυπα Wi-Fi, υπάρχουν εξειδικευμένες παραλλαγές του 802.11 που απευθύνονται σε συγκεκριμένες ανάγκες. Το 802.11ad (WiGig) κυκλοφόρησε στις αρχές της δεκαετίας του 2010 και λειτουργεί στα 60 GHz με πολύ υψηλές ταχύτητες, αλλά με μικρή εμβέλεια και απαίτηση οπτικής επαφής. Σχεδιάστηκε για ασύρματη σύνδεση βάσης (docking) και εφαρμογές VR/AR, αν και είχε περιορισμένη εμπορική διάδοση (IEEE 802.11ad-2012).

Το 802.11ah (HaLow), τυποποιήθηκε στα μέσα της δεκαετίας του 2010, λειτουργεί κάτω από 1 GHz, προσφέροντας μεγαλύτερη εμβέλεια, καλύτερη διείσδυση σε εμπόδια και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, καθιστώντας το ιδανικό για IoT, όπως αισθητήρες, ασύρματες IP κάμερες μεγάλης εμβέλειας, παρακολούθηση περιβάλλοντος και έξυπνη στάθμευση (IEEE 802.11ah-2016; Baños-Gonzalez et al., 2016).

Ο Πίνακας 2.6 συνοψίζει τα βασικά χαρακτηριστικά τους (IEEE 802.11ah-2016; Baños-Gonzalez et al., 2016).

Πίνακας 2.6: Εξειδικευμένες παραλλαγές 802.11

Πρότυπο	Ζώνη	Ενδεικτική Ταχύτητα	Ενδεικτική Εμβέλεια	Κύρια χαρακτηριστικά
802.11ad (WiGig)	60 GHz	~7 Gb/s	έως ~10 m	Πολύ υψηλές ταχύτητες, μικρή εμβέλεια, απαιτεί οπτική επαφή, εφαρμογές VR/AR και μεταφορά αρχείων
802.11ah (HaLow)	<1 GHz	~347 Mb/s	έως ~1 km	Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, IoT εφαρμογές και αισθητήρες μεγάλης εμβέλειας

2.5 Πρωτόκολλα Μητροπολιτικών Ασύρματων Δικτύων WMAN

Τα WMAN σχεδιάστηκαν ως εναλλακτική λύση ευρυζωνικής πρόσβασης σε περιοχές όπου η εγκατάσταση ενσύρματης υποδομής ήταν δύσκολη ή ασύμφορη. Καλύπτουν μητροπολιτική κλίμακα (πόλη ή περιοχή), συνήθως για ευρυζωνική πρόσβαση, διασύνδεση κτιρίων ή backhaul.

Ιστορικά, το βασικό πρότυπο που συνδέεται άμεσα με WMAN είναι το Worldwide Interoperability for Microwave Access ή αλλιώς WiMAX (IEEE 802.16). Αρχικά σχεδιάστηκε για σταθερή ευρυζωνική πρόσβαση, ενώ αργότερα επεκτάθηκε με υποστήριξη κινητικότητας μέσω του Mobile WiMAX (IEEE 802.16e) (IEEE 802.16-2004, IEEE 802.16e-2005; IEEE 802.16-2017).

Το WiBro αναπτύχθηκε στη Νότια Κορέα ως παραλλαγή του Mobile WiMAX (IEEE 802.16e) με υποστήριξη κινητικότητας (IEEE 802.16e-2005). Αξίζει να σημειωθεί ότι οι περισσότερες τεχνολογίες WMAN έχουν πλέον περιορισμένη χρήση, καθώς αντικαταστάθηκαν σε μεγάλο βαθμό από τα δίκτυα 4G/5G.

Επιπλέον, τεχνολογίες όπως το LMDS (Local Multipoint Distribution Service) χρησιμοποιήθηκαν για αστικό broadband point-to-multipoint, με άμεση οπτική επαφή (line of sight - LOS) μεταξύ πομπού και δέκτη (Stallings, 2013). Το LMDS λειτουργεί σε συχνότητες άνω των 20 GHz, προσφέροντας μεγάλη χωρητικότητα αλλά με περιορισμένη εμβέλεια λόγω της υψηλής εξασθένησης σε αυτές τις συχνότητες (Stallings, 2013).

Ο Πίνακας 2.7 παρουσιάζει τις κύριες τεχνολογίες WMAN (IEEE 802.16-2004; IEEE 802.16e-2005; IEEE 802.16-2017; Stallings, 2013).

Πίνακας 2.7: Τεχνολογίες WMAN

Τεχνολογία	Ενδεικτική εμβέλεια	Ενδεικτική ταχύτητα	Τυπική χρήση
WiMAX (IEEE 802.16)	έως αρκετά km	δεκάδες Mbps	Σύνδεση σε περιοχές χωρίς καλωδίωση, ζεύξη σταθμών βάσης με το κεντρικό δίκτυο, ασύρματη διασύνδεση κτιρίων
LMDS (Local Multipoint Distribution Service)	~1–5 km	εκατοντάδες Mbps έως ~1,5 Gbps	Αστική ευρυζωνική πρόσβαση από ένα σημείο σε πολλούς χρήστες, απαιτεί οπτική επαφή
WiBro (Wireless Broadband)	~5–10 km	δεκάδες Mbps	Κορεατική έκδοση του Mobile WiMAX (802.16e) με υποστήριξη κινητικότητας (πλέον ανενεργό)

Ο κύριος λόγος που οι τεχνολογίες WMAN δεν είχαν ευρεία εμπορική επιτυχία ήταν ο ανταγωνισμός από τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας (3G/4G) τα οποία προσέφεραν παρόμοιες ταχύτητες με καθολική κάλυψη και χωρίς ανάγκη ξεχωριστής υποδομής (Dahlman et al., 2011).

2.6 Πρωτόκολλα WWAN (Wireless Wide Area Networks)

Τα WWAN αποτελούν δίκτυα ευρείας περιοχής με κυψελοειδή αρχιτεκτονική και υποστήριξη κινητικότητας, περιλαμβάνοντας τις γενιές κινητής τηλεφωνίας από το 2G (GSM/EDGE) έως το 5G NR. Η εξέλιξή τους ακολούθησε μια σειρά γενεών: το GSM εισήγαγε την ψηφιακή κινητή επικοινωνία, το GPRS πρόσφερε βασική πρόσβαση στο διαδίκτυο, το UMTS επέκτεινε τις δυνατότητες με υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, ενώ το LTE καθιέρωσε την ευρυζωνική κινητή πρόσβαση στο διαδίκτυο (Mouly & Pautet, 1992; Sauter, 2021; Dahlman et al., 2011).

Επιπλέον, το 5G εισάγει τρία βασικά προφίλ υπηρεσιών: eMBB για υψηλές ταχύτητες, URLLC για χαμηλή καθυστέρηση και mMTC για μαζική διασύνδεση συσκευών. Για εφαρμογές IoT σε αδειοδοτημένο φάσμα χρησιμοποιούνται επίσης το NB-IoT και το LTE-M, που προσφέρουν μεγάλη κάλυψη και πολυετή αυτονομία μπαταρίας (3GPP, 2024a; Dahlman et al., 2018). Τα πρωτόκολλα WWAN αναλύονται εκτενέστερα στο Κεφάλαιο 11.

Ο Πίνακας 2.8 παρουσιάζει συνοπτικά τα κύρια πρωτόκολλα WWAN (Dahlman et al., 2018; Sauter, 2021; 3GPP, 2023b; Mouly & Pautet, 1992; Chen et al., 2017; Ahmad et al., 2022).

Πίνακας 2.8: Κύρια πρωτόκολλα WWAN

Πρωτόκολλο	Ενδεικτική εμβέλεια ανά κυψέλη	Ενδεικτική ταχύτητα	Ενδεικτική χρήση
GSM/EDGE (2G/2.5G)	~5–35 km	9.6–384 kbps	Κλήσεις, γραπτά μηνύματα και βασική πρόσβαση στο διαδίκτυο

UMTS/HSPA (3G)	~5–20 km	384 kbps–42 Mbps	Πρόσβαση στο διαδίκτυο και μετάδοση πολυμεσικού περιεχομένου
LTE/LTE-A (4G)	~5–30 km	50 Mbps – ~1 Gbps (LTE-A)	Ευρυζωνική πρόσβαση στο διαδίκτυο και φωνή μέσω LTE (VoLTE)
5G NR	~100 m – 10 km	100 Mbps–10 Gbps	Υψηλές ταχύτητες, κρίσιμες εφαρμογές χαμηλής καθυστέρησης, μαζική διασύνδεση IoT και έξυπνες πόλεις
NB-IoT / LTE-M	έως ~35 km	10 kbps–1 Mbps	Αισθητήρες και συσκευές IoT με μεγάλη εμβέλεια και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας

2.7 Άλλα Πρωτόκολλα Χαμηλής Ισχύος και IoT

Η εξάπλωση του IoT οδήγησε σε πρωτόκολλα που βελτιστοποιούν την κατανάλωση, την κάλυψη και την απλότητα, χωρίς να απαιτούν υψηλές ταχύτητες (LoRa Alliance, 2020; Chen et al., 2017; Ahmad et al., 2022). Τα Short-range IoT είναι πρωτόκολλα μικρής εμβέλειας που συνδέουν συσκευές εντός κτιρίου ή χώρου, όπως αισθητήρες, έξυπνες λάμπες και θερμοστάτες.

Από την άλλη, τα LPWAN (Low Power Wide Area Networks) είναι δίκτυα μεγάλης εμβέλειας με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, κατάλληλα για συσκευές που μεταδίδουν μικρά πακέτα δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις (LoRa Alliance, 2020; 3GPP, 2023b; Iqbal et al., 2020).

Τα πρωτόκολλα μικρής εμβέλειας, όπως τα Zigbee και Thread, παρουσιάστηκαν στην Ενότητα 2.3, ενώ οι κυψελωτές τεχνολογίες NB-IoT και LTE-M αναλύθηκαν στην Ενότητα 2.6. Η παρούσα ενότητα επικεντρώνεται στις τεχνολογίες LPWAN και ειδικότερα στο LoRaWAN, το οποίο λειτουργεί σε μη αδειοδοτημένο φάσμα συχνοτήτων, υιοθετεί τοπολογία αστέρα (star topology) και παρέχει επικοινωνία μεγάλης εμβέλειας με ιδιαίτερα χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, καθιστώντας το κατάλληλο για εφαρμογές IoT μεγάλης κλίμακας (LoRa Alliance, 2020; Iqbal et al., 2020).

Ο Πίνακας 2.9 συνοψίζει τις κύριες τεχνολογίες IoT χαμηλής ισχύος, τη κάλυψή τους και τις τυπικές εφαρμογές τους (IEEE 802.15.4-2020; LoRa Alliance, 2020; Chen et al., 2017; Ahmad et al., 2022; Iqbal et al., 2020).

Πίνακας 2.9: Πρωτόκολλα IoT χαμηλής ισχύος

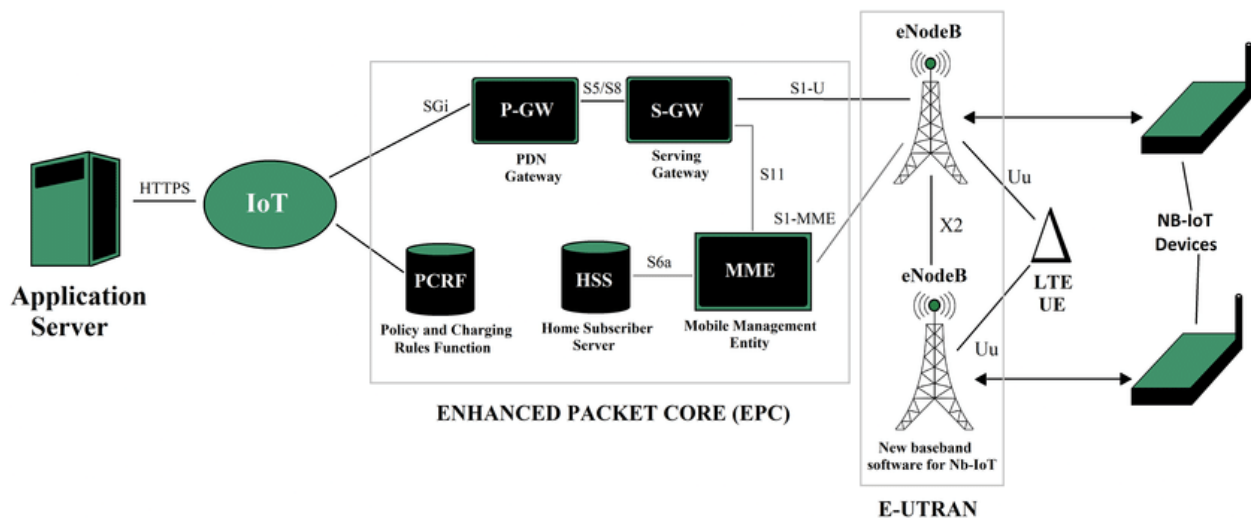
Τεχνολογία	Κατηγορία	Κάλυψη	Πλεονεκτήματα	Εφαρμογές
Zigbee	Short-range IoT	εντός κτιρίου	χαμηλή κατανάλωση, mesh τοπολογία, αξιόπιστα πρότυπα	Αισθητήρες και αυτοματισμοί κτιρίων
Thread (6LoWPAN)	Short-range IoT με IPv6	εντός κτιρίου	IPv6, ασφαλής επικοινωνία, υποστήριξη Matter	Έξυπνο σπίτι και διασύνδεση IP συσκευών
LoRaWAN	LPWAN (ISM)	γειτονιά-πόλη	μεγάλη κάλυψη, πολυετής αυτονομία	Μετρητές νερού, ηλεκτρισμού και αερίου, περιβαλλοντική παρακολούθηση και γεωργία ακριβείας
NB-IoT	LPWAN (cellular)	εθνική	Εγγυημένη κάλυψη και ασφάλεια μέσω παρόχου	Μετρητές νερού και ηλεκτρισμού, παρακολούθηση

				αποστολών και δεμάτων
LTE-M	LPWAN (cellular)	εθνική	Υψηλότερος ρυθμός και υποστήριξη κινητικότητας σε σχέση με NB-IoT	Κινητές IoT εφαρμογές, παρακολούθηση οχημάτων και φορητές ιατρικές συσκευές

Τα LPWAN (Low Power Wide Area Networks) είναι τεχνολογίες που σχεδιάστηκαν για επικοινωνία IoT συσκευών με πολύ χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και μεγάλη εμβέλεια. Εκτός από τη βασική τους διάκριση σε ISM (όπως LoRaWAN) και cellular (όπως NB-IoT και LTE-M), διαφέρουν και στον τρόπο λειτουργίας και στην απόδοσή τους (Iqbal et al., 2020).

Για παράδειγμα, το LoRaWAN προσφέρει μεγάλη ευελιξία και χαμηλό κόστος, αλλά συνήθως έχει μικρότερο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Αντίθετα, τα NB-IoT και LTE-M βασίζονται σε υποδομές κινητής τηλεφωνίας, προσφέροντας μεγαλύτερη αξιοπιστία και καλύτερη κάλυψη σε αστικές περιοχές. Γενικά, κάθε τεχνολογία επιλέγεται ανάλογα με την εφαρμογή, όπως έξυπνες πόλεις, αισθητήρες περιβάλλοντος ή συστήματα παρακολούθησης (Iqbal et al., 2020).

Η Εικόνα 2.2 δείχνει πώς οι συσκευές IoT συνδέονται μέσω του δικτύου NB-IoT σε σταθμούς βάσης και στο κεντρικό δίκτυο. Οι συσκευές στέλνουν δεδομένα στους σταθμούς βάσης (eNodeB), τα οποία στη συνέχεια περνούν στο βασικό δίκτυο (core network) και καταλήγουν σε πλατφόρμες και εφαρμογές IoT. Μέσα από αυτή τη δομή επιτυγχάνεται αξιόπιστη επικοινωνία με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και δυνατότητα κάλυψης μεγάλων αποστάσεων (Chen et al., 2017; Ahmad et al., 2022; 3GPP, 2023b).



Εικόνα 2.2: Αρχιτεκτονική δικτύου NB-IoT (Networking System). Πηγή: Iqbal et al. (2020).

2.8 Στοιβα Πρωτοκόλλων και Αρχιτεκτονική

Η στοιβα πρωτοκόλλων είναι ένα σύνολο κανόνων οργανωμένων σε επίπεδα που συνεργάζονται ώστε τα δεδομένα να μεταφέρονται αξιόπιστα ανάμεσα σε συσκευές. Κάθε επίπεδο έχει σαφώς ορισμένη αρμοδιότητα (μετάδοση σήματος, έλεγχος πρόσβασης στο μέσο, δρομολόγηση, από άκρο σε άκρο μεταφορά, υπηρεσίες εφαρμογών) και επικοινωνεί μόνο με τα γειτονικά του.

Η αρχιτεκτονική δικτύου, από την άλλη, περιγράφει πώς δομείται και λειτουργεί το σύστημα ως σύνολο (ρόλοι πελατών και εξυπηρετητών, σημεία πρόσβασης, δρομολογητές, ροές ελέγχου και δεδομένων). Στα ασύρματα δίκτυα ακολουθείται η λογική του μοντέλου OSI με πρακτικές προσαρμογές ή συνενώσεις επιπέδων όταν αυτό βελτιώνει την απόδοση και την ενεργειακή αποτελεσματικότητα (Gast, 2005; Kurose & Ross, 2021; OASIS, 2019; Stallings, 2013).

Πίνακας 2.10: Επίπεδα OSI σε ασύρματα δίκτυα: λειτουργίες και πρωτόκολλα

Φυσικό επίπεδο (Physical Layer)	Είναι υπεύθυνο για τη μετάδοση δεδομένων ως ηλεκτρομαγνητικά σήματα, καθορίζοντας τα σχήματα διαμόρφωσης, την ισχύ μετάδοσης και τις ζώνες συχνοτήτων. Στο Wi-Fi, για παράδειγμα, χρησιμοποιείται OFDM, ενώ στο Bluetooth FHSS για διαχείριση συχνότητας και πρόσβαση στο κανάλι.
Επίπεδο Ζεύξης Δεδομένων (Data Link Layer)	Χωρίζεται σε δύο υποστρώματα: το MAC για τον έλεγχο πρόσβασης στο κανάλι και το LLC για την ανίχνευση σφαλμάτων. Το Wi-Fi χρησιμοποιεί CSMA/CA για την αποφυγή συγκρούσεων, ενώ το Bluetooth χρησιμοποιεί FHSS και TDD για τη διαχείριση της πρόσβασης στο κανάλι. Η κρυπτογράφηση σε επίπεδο ζεύξης γίνεται μέσω WPA2/WPA3.
Επίπεδο δικτύου (Network Layer)	Υπεύθυνο για τη διευθυνσιοδότηση IP και τη δρομολόγηση πακέτων μεταξύ διαφορετικών δικτύων, χρησιμοποιώντας πρωτόκολλα όπως IPv4, IPv6 και 6LoWPAN. Για την ασφάλεια αξιοποιείται το IPSec.
Επίπεδο μεταφοράς (Transport Layer)	Εξασφαλίζει αξιόπιστη επικοινωνία από άκρο σε άκρο. Τα βασικά πρωτόκολλα είναι το TCP για αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων και το UDP για ταχύτερη αλλά λιγότερο αξιόπιστη επικοινωνία.
Επίπεδο Συνόδου (Session Layer)	Διαχειρίζεται τη δημιουργία, τη διατήρηση και τον τερματισμό συνόδων επικοινωνίας μεταξύ συσκευών. Ενδεικτικά πρωτόκολλα είναι το SIP (Session Initiation Protocol) για φωνή και βίντεο και το RTP (Real-time Transport Protocol).
Επίπεδο Παρουσίασης (Presentation Layer)	Υπεύθυνο για την κωδικοποίηση, τη συμπίεση και την κρυπτογράφηση δεδομένων, ώστε να είναι κατανοητά από τις εφαρμογές. Ενδεικτικά πρωτόκολλα είναι τα TLS/SSL, ενώ μορφές δεδομένων είναι τα JSON και XML.
Επίπεδο εφαρμογής (Application Layer)	Υποστηρίζει υπηρεσίες που απευθύνονται στον χρήστη, όπως HTTP, FTP, DNS, MQTT και CoAP. Στο IoT ειδικότερα, το MQTT χρησιμοποιείται ευρέως για ελαφριά επικοινωνία μεταξύ αισθητήρων και διακομιστών, ενώ το CoAP εξυπηρετεί συσκευές με περιορισμένους πόρους.

Στην πρακτική εφαρμογή, τα ασύρματα δίκτυα δεν ακολουθούν πάντα αυστηρά και τα 7 επίπεδα του OSI. Τα επίπεδα Συνόδου και Παρουσίασης συχνά ενσωματώνονται στο επίπεδο Εφαρμογής, ενώ τα κρίσιμα επίπεδα για τα ασύρματα δίκτυα είναι το Φυσικό και το Ζεύξης Δεδομένων, όπου ορίζονται η διαμόρφωση σήματος, η πρόσβαση στο κανάλι και η ασφάλεια. Τα υπόλοιπα επίπεδα (Δικτύου, Μεταφοράς, Εφαρμογής) λειτουργούν ανεξάρτητα από το αν η σύνδεση είναι ενσύρματη ή ασύρματη (Gast, 2005; Kurose & Ross, 2021).

2.9 Πρωτόκολλα Ασφαλείας (WEP, WPA, WPA2, WPA3, SSP)

Τα ασύρματα δίκτυα παρουσιάζουν αυξημένη ευπάθεια σε σχέση με τα ενσύρματα, καθώς τα δεδομένα μεταδίδονται μέσω του αέρα και μπορούν να υποκλαπούν ή να αλλοιωθούν από μη εξουσιοδοτημένους χρήστες. Για τον λόγο αυτό, είναι απαραίτητη η χρήση μηχανισμών ασφαλείας που διασφαλίζουν την εμπιστευτικότητα, την ακεραιότητα και την αυθεντικοποίηση των δεδομένων (Gast, 2005).

Η πρώτη προσπάθεια ασφαλείας στα ασύρματα δίκτυα ήταν το Wired Equivalent Privacy (WEP), το οποίο εισήχθη στο πρότυπο IEEE 802.11. Το WEP βασιζόταν στον αλγόριθμο RC4 με κλειδιά 40 ή 104 bit και χρησιμοποιούσε ένα 24-bit initialization vector (IV). Ωστόσο, λόγω στατικής διαχείρισης κλειδιών και επαναλαμβανόμενων διανύσματος αρχικοποίησης IVs, παρουσίαζε σοβαρές

κρυπτογραφικές αδυναμίες που το καθιστούσαν ευάλωτο σε επιθέσεις. Ως αποτέλεσμα, κρίθηκε ανασφαλές και αποσύρθηκε επίσημα το 2004 (Gast, 2005; Frankel et al., 2007).

Ο διάδοχος του WEP ήταν το Wi-Fi Protected Access (WPA), το οποίο σχεδιάστηκε ως προσωρινή λύση ασφαλείας. Το WPA εισήγαγε το πρωτόκολλο TKIP (Temporal Key Integrity Protocol), βελτιώνοντας τη διαχείριση κλειδιών και την ακεραιότητα δεδομένων, χωρίς να απαιτείται αντικατάσταση του εξοπλισμού. Παρόλα αυτά, συνέχιζε να βασίζεται στον αλγόριθμο RC4 και θεωρήθηκε μεταβατική λύση (Edney & Arbaugh, 2003).

Το WPA2, που βασίζεται στο πρότυπο IEEE 802.11i, αντικατέστησε πλήρως το TKIP με το AES-CCMP, προσφέροντας ισχυρή κρυπτογράφηση και βελτιωμένο έλεγχο ακεραιότητας. Παρότι θεωρείται ασφαλές, εντοπίστηκε η ευπάθεια KRACK, η οποία εκμεταλλεύεται αδυναμίες στη διαδικασία handshake, επιτρέποντας την παρακολούθηση ή τροποποίηση δεδομένων ακόμη και κρυπτογραφημένα με AES (Vanhoeft & Piessens, 2017). Η ευπάθεια έχει αντιμετωπιστεί σε μεγάλο βαθμό με ενημερώσεις λογισμικού, αλλά συσκευές χωρίς ενημέρωση παραμένουν ευάλωτες.

Το WPA3 (Wi-Fi Protected Access 3) αποτελεί τη νεότερη γενιά ασφάλειας Wi-Fi και εισήχθη από τη Wi-Fi Alliance το 2018. Χρησιμοποιεί τον μηχανισμό SAE (Simultaneous Authentication of Equals), ο οποίος προσφέρει ισχυρότερη αυθεντικοποίηση και προστασία από επιθέσεις brute-force και dictionary attacks. Επιπλέον, υποστηρίζει forward secrecy και προαιρετική λειτουργία υψηλής ασφάλειας (WPA3-Enterprise 192-bit mode), με χρήση AES-256 και ισχυρών κρυπτογραφικών αλγορίθμων (Wi-Fi Alliance, 2018a; Vanhoeft & Ronen, 2020). Το forward secrecy σημαίνει ότι κάθε σύνδεση δημιουργεί μοναδικό ζεύγος κλειδιών, ώστε η παραβίαση ενός κλειδιού να μην επιτρέπει την αποκρυπτογράφηση παλαιότερων δεδομένων (Vanhoeft & Ronen, 2020; Wi-Fi Alliance, 2018a).

Στα σύγχρονα δίκτυα χρησιμοποιείται individualized encryption, όπου κάθε χρήστης έχει ξεχωριστό κλειδί κρυπτογράφησης. Επιπλέον, το OWE (Opportunistic Wireless Encryption) παρέχει κρυπτογράφηση ακόμη και σε ανοικτά δίκτυα χωρίς κωδικό πρόσβασης, αυξάνοντας την ασφάλεια των δημόσιων Wi-Fi (Wi-Fi Alliance, 2018b).

Στα δίκτυα Bluetooth, η ασφάλεια ενισχύθηκε σημαντικά με την εισαγωγή του Secure Simple Pairing (SSP) στην έκδοση 2.1. Το SSP βασίζεται στον αλγόριθμο Diffie-Hellman για την ασφαλή ανταλλαγή κλειδιών χωρίς μετάδοση ευαίσθητων δεδομένων μέσω του καναλιού επικοινωνίας (NIST, 2021).

Το SSP υποστηρίζει διαφορετικές μεθόδους σύζευξης, όπως Numeric Comparison, όπου οι συσκευές εμφανίζουν τον ίδιο αριθμό για επιβεβαίωση, Out-of-Band (OOB), όπου χρησιμοποιείται ξεχωριστό κανάλι (π.χ. NFC ή QR code) για ασφαλή ανταλλαγή πληροφοριών, Passkey Entry, όπου εισάγεται εξαψήφιος κωδικός, και Just Works, που λειτουργεί χωρίς αλληλεπίδραση χρήστη αλλά δεν προστατεύει από επιθέσεις MITM (NIST, 2021). Οι μηχανισμοί αυτοί μειώνουν σημαντικά τον κίνδυνο επιθέσεων Man-in-the-Middle (NIST, 2021).

Πίνακας 2.11: Σύγκριση πρωτοκόλλων ασφαλείας σε ασύρματα δίκτυα

Πρωτόκολλο	Κύρια Κρυπτογράφηση	Σημαντικά Χαρακτηριστικά
WEP	RC4	Πλέον μη ασφαλές, αποσύρθηκε το 2004
WPA	TKIP	Προσωρινή λύση ασφαλείας, αντικαταστάθηκε από το WPA2
WPA2	AES-CCMP	Ευρέως χρησιμοποιούμενο, ισχυρή κρυπτογράφηση, ευάλωτο σε KRACK
WPA3	AES-GCMP / AES-CCMP	SAE, OWE, forward secrecy, προστασία από brute-force και dictionary attacks
Bluetooth SSP	ECDH	Ασφαλής σύζευξη, προστασία από MITM, μέθοδοι: Numeric Comparison, OOB, Passkey Entry, Just Works

Η εξέλιξη των πρωτοκόλλων ασφαλείας από το WEP έως το WPA3 δείχνει τη συνεχή ενίσχυση της προστασίας στα ασύρματα δίκτυα, με στόχο την αντιμετώπιση σύγχρονων απειλών. Παράλληλα, στα συστήματα Bluetooth, το SSP προσφέρει ασφαλή μηχανισμό σύζευξης συσκευών, ενισχύοντας την εμπιστοσύνη και την ασφάλεια στην επικοινωνία.

2.10 Ποιότητα Υπηρεσίας (QoS) και Αξιοπιστία

Στα ασύρματα δίκτυα, η Ποιότητα Υπηρεσίας (Quality of Service – QoS) αναφέρεται στο σύνολο των μηχανισμών που διαχειρίζονται τους πόρους του δικτύου ώστε να εξασφαλίζεται αξιόπιστη και σταθερή μετάδοση δεδομένων. Είναι ιδιαίτερα σημαντική για εφαρμογές ευαίσθητες στον χρόνο, όπως VoIP, ροή βίντεο, online παιχνίδια και βιομηχανικά συστήματα ελέγχου, όπου παράμετροι όπως η καθυστέρηση (latency), η διακύμανση καθυστέρησης (jitter) και η απώλεια πακέτων (packet loss) επηρεάζουν άμεσα την ποιότητα της υπηρεσίας (Sauter, 2021). Για παράδειγμα, σε μια κλήση VoIP, υψηλό jitter μπορεί να προκαλέσει αστάθεια στη φωνή. Μέσω της προτεραιοποίησης της κίνησης και της αποδοτικής κατανομής του εύρους ζώνης, οι μηχανισμοί QoS διατηρούν σταθερή απόδοση ακόμη και σε περιβάλλοντα συμφόρησης (IEEE Std 802.11e-2005).

Στα δίκτυα Wi-Fi, το πρότυπο IEEE 802.11e εισάγει μηχανισμούς QoS μέσω του Enhanced Distributed Channel Access (EDCA). Η EDCA κατηγοριοποιεί τα δεδομένα σε τέσσερις κατηγορίες προτεραιότητας: Voice (φωνή), Video (βίντεο), Best Effort (βέλτιστη προσπάθεια) και Background (υπόβαθρο). Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται οι κατηγορίες AC_VO, AC_VI, AC_BE και AC_BK (IEEE 802.11e-2005; Gast, 2013; Kurose & Ross, 2021).

Κάθε κατηγορία έχει διαφορετική προτεραιότητα πρόσβασης στο μέσο, ώστε η κίνηση φωνής και βίντεο να εξυπηρετείται με προτεραιότητα έναντι λιγότερο κρίσιμων δεδομένων. Με αυτόν τον τρόπο βελτιώνεται η απόδοση σε περιβάλλοντα υψηλής πυκνότητας ή σε περιβάλλοντα επιχειρήσεων όπου πολλές συσκευές ανταγωνίζονται για εύρος ζώνης (IEEE 802.11e-2005; Gast, 2013; Kurose & Ross, 2021). Στα σημερινά δίκτυα Wi-Fi 6, ο συγκεκριμένος μηχανισμός ενισχύεται περισσότερο με την τεχνολογία OFDMA, που επιτρέπει την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση διαφορετικών κατηγοριών κίνησης στο ίδιο κανάλι.

Αντίστοιχα, το Bluetooth υποστηρίζει μηχανισμούς QoS μέσω του L2CAP (Logical Link Control and Adaptation Protocol), το οποίο λειτουργεί πάνω από το Host Controller Interface (HCI). Το L2CAP διαχειρίζεται τη μετάδοση δεδομένων και προσαρμόζει παραμέτρους επικοινωνίας ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής. Για παράδειγμα, εφαρμογές ήχου απαιτούν χαμηλή καθυστέρηση, ενώ η μεταφορά αρχείων απαιτεί μεγαλύτερη αξιοπιστία. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται προσαρμοστική ποιότητα υπηρεσίας ανά περίπτωση.

Στα κυψελοειδή δίκτυα, η QoS είναι ενσωματωμένη στην αρχιτεκτονική του συστήματος. Στα δίκτυα LTE, η διαχείρισή της γίνεται μέσω του QCI (QoS Class Identifier), το οποίο καθορίζει την προτεραιότητα και τα χαρακτηριστικά κάθε τύπου κίνησης, όπως φωνή, βίντεο ή δεδομένα παρασκήνιου. Έτσι, οι υπηρεσίες πραγματικού χρόνου εξυπηρετούνται με χαμηλή καθυστέρηση, ενώ λιγότερο κρίσιμες εφαρμογές μπορούν να ανεχθούν μεγαλύτερες καθυστερήσεις, όπως η λήψη αρχείων ή emails (3GPP, 2023a).

Συνοψίζοντας, οι μηχανισμοί QoS αποτελούν βασικό στοιχείο τόσο σε δίκτυα Wi-Fi και Bluetooth όσο και σε κυψελοειδή δίκτυα, διασφαλίζοντας ότι κάθε τύπος κίνησης λαμβάνει τους κατάλληλους πόρους ανάλογα με τις απαιτήσεις του. Καθώς οι εφαρμογές πραγματικού χρόνου αυξάνονται, η αποτελεσματική διαχείριση QoS γίνεται ολοένα και πιο κρίσιμη.

2.11 Σύγκριση και Επιλογή Πρωτοκόλλων Ασύρματων Δικτύων

Η επιλογή του κατάλληλου πρωτοκόλλου ασύρματης επικοινωνίας εξαρτάται από το πλαίσιο εφαρμογής και από παράγοντες όπως η εμβέλεια, η κατανάλωση ενέργειας, ο ρυθμός μετάδοσης, το κόστος και οι απαιτήσεις ασφαλείας. Από προσωπικές συσκευές μικρής εμβέλειας έως παγκόσμια κυψελοειδή δίκτυα, κάθε πρωτόκολλο έχει σχεδιαστεί για συγκεκριμένες ανάγκες.

Το IrDA αποτέλεσε μία από τις πρώτες τεχνολογίες ασύρματης επικοινωνίας μικρής εμβέλειας, με περιορισμό περίπου στο ένα μέτρο. Σήμερα έχει αντικατασταθεί σε μεγάλο βαθμό από το Bluetooth και το Wi-Fi. Το Bluetooth είναι ιδανικό για σύνδεση κοντινών συσκευών, όπως smartphones, ακουστικά, smartwatches και συστήματα αυτοκινήτου. Το Zigbee, με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και υποστήριξη δικτύων mesh, χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές έξυπνου σπιτιού και βιομηχανικών αισθητήρων, όπου απαιτείται συνεχής λειτουργία με ελάχιστη ενεργειακή κατανάλωση (Tsantilas et al., 2020).

Το Wi-Fi έχει καθιερωθεί ως το βασικό πρωτόκολλο ασύρματης πρόσβασης στο διαδίκτυο για συσκευές εντός περιορισμένης εμβέλειας. Η υψηλή ταχύτητα μετάδοσης, η αξιοπιστία και η ευρεία συμβατότητα το καθιστούν κυρίαρχη επιλογή σε οικιακά, επιχειρησιακά και δημόσια περιβάλλοντα. Ωστόσο, η περιορισμένη εμβέλειά του οδήγησε στην ανάπτυξη του WiMAX για ευρύτερη κάλυψη. Παρότι το WiMAX αποτέλεσε σημαντική τεχνολογία WMAN τη δεκαετία του 2000, η υιοθέτησή του μειώθηκε σημαντικά με την εξάπλωση των δικτύων LTE (Andrews et al., 2007).

Αντίθετα, τα κυψελοειδή δίκτυα 4G και 5G παρέχουν μεγάλη γεωγραφική κάλυψη, υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης και σταθερή συνδεσιμότητα. Οι εφαρμογές τους περιλαμβάνουν πρόσβαση στο διαδίκτυο, τηλεφωνία, streaming βίντεο, έξυπνες πόλεις και αυτόνομα οχήματα. Παράλληλα, Η έρευνα για το 6G βρίσκεται ήδη σε εξέλιξη και αναμένεται να αποτελέσει το επόμενο βήμα στην εξέλιξη των ασύρματων επικοινωνιών (Saad et al., 2020; Alsabab et al., 2021).

Συμπερασματικά, κάθε πρωτόκολλο ασύρματης επικοινωνίας έχει συμβάλει στη διαμόρφωση της σύγχρονης ψηφιακής επικοινωνίας. Από το IrDA έως το Bluetooth και το Zigbee για εφαρμογές μικρής εμβέλειας, και από το Wi-Fi έως τα κυψελοειδή δίκτυα που αποτελούν τη βάση της σύγχρονης συνδεσιμότητας, κάθε τεχνολογία έχει διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο.

Ο Πίνακας 2.13 συνοψίζει τις τεχνικές παραμέτρους και τις τυπικές χρήσεις των κύριων ασύρματων τεχνολογιών, διευκολύνοντας την επιλογή πρωτοκόλλου ανάλογα με τις απαιτήσεις εμβέλειας, ρυθμού μετάδοσης, κατανάλωσης ενέργειας και κινητικότητας.

Πίνακας 2.12: Σύγκριση κύριων πρωτοκόλλων ασύρματης επικοινωνίας

Πρωτόκολλο	Ενδεικτική Ταχύτητα	Ενδεικτική Εμβέλεια	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Wi-Fi (IEEE 802.11)	έως ~9.6 Gbps (Wi-Fi 6)	30–100 m	Υψηλές ταχύτητες, εύκολη εγκατάσταση, ευρεία συμβατότητα	Περιορισμένη εμβέλεια, επηρεάζεται από τοίχους και εμποδία
Bluetooth (Classic/BLE)	ως 3 Mbps (Classic), έως 2 Mbps (BLE)	1–100 m (ανάλογα με κλάση)	Χαμηλή κατανάλωση, ευρεία υποστήριξη από smartphones και wearables	Περιορισμένη ταχύτητα για μεγάλα δεδομένα
Zigbee (IEEE 802.15.4)	20–250 Kbps	10–100 m	Πολύ χαμηλή κατανάλωση, ιδανικό για αισθητήρες και έξυπνο σπίτι	Πολύ χαμηλές ταχύτητες, ακατάλληλο για εφαρμογές με υψηλές απαιτήσεις εύρους ζώνης (π.χ. βίντεο, streaming)
LoRaWAN	0.3–50 Kbps	2–15 km (αστική περιοχή), >20 km (αγροτική)	Μεγάλη εμβέλεια, χαμηλή κατανάλωση	Πολύ χαμηλές ταχύτητες, όχι για πραγματικό χρόνο
LTE (4G)	έως ~1 Gbps	1–10 km	Καλή κάλυψη, κινητικότητα	Κόστος, υψηλότερη κατανάλωση
5G	έως >10 Gbps	100 m – 10 km	Πολύ χαμηλή	Απαιτεί υποδομή,

Πρωτόκολλο	Ενδεικτική Ταχύτητα	Ενδεικτική Εμβέλεια	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
			καθυστέρηση, πολύ υψηλές ταχύτητες	περιορισμένη κάλυψη
NFC	424 Kbps	<10 cm	Ασφαλές για πληρωμές και αυθεντικοποίηση	Πολύ περιορισμένο εύρος, χαμηλή ταχύτητα

2.12 Μελλοντικές Εξελίξεις στα Πρωτόκολλα Ασύρματων Δικτύων

Η εξέλιξη των ασύρματων δικτύων συνεχίζεται με ταχείς ρυθμούς. Ενώ τα 4G και 5G έχουν ήδη βελτιώσει σημαντικά την ταχύτητα, την κάλυψη και τη σταθερότητα της επικοινωνίας, η έρευνα για το 6G βρίσκεται ακόμη σε ερευνητικό στάδιο και διαδικασία προτυποποίησης. Το 6G αναμένεται να υποστηρίξει προηγμένες εφαρμογές όπως έξυπνες πόλεις, τεχνητή νοημοσύνη, αυτόνομα οχήματα και μαζικό Internet of Things (IoT), προσφέροντας ακόμη υψηλότερες ταχύτητες, εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση και αυξημένη ενεργειακή αποδοτικότητα (Dahlman et al., 2018).

Παράλληλα, οι μελλοντικές ασύρματες αρχιτεκτονικές στοχεύουν στη βελτίωση της ενεργειακής κατανάλωσης των IoT συσκευών, ώστε να υποστηρίζεται η μακροχρόνια λειτουργία τους με ελάχιστες απαιτήσεις φόρτισης. Επιπλέον, εξετάζεται η χρήση υψηλότερων συχνοτήτων, όπως mmWave και THz, οι οποίες προσφέρουν πολύ μεγάλο εύρος ζώνης αλλά παρουσιάζουν περιορισμούς λόγω αυξημένων απωλειών διάδοσης και μειωμένης διείσδυσης σε εμπόδια (Saad et al., 2020; Alsabab et al., 2021). Για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων, προτείνονται τεχνικές όπως το beamforming και η ανάπτυξη εξαιρετικά πυκνών δικτύων μικροκυβελών.

Σε επίπεδο πρωτοκόλλων, η επόμενη γενιά Wi-Fi, το IEEE 802.11be (Wi-Fi 7), εισάγει σημαντικές βελτιώσεις στην απόδοση. Υποστηρίζει θεωρητικές ταχύτητες έως 46 Gbps, χρήση διαμόρφωσης 4096-QAM και εύρος καναλιών έως 320 MHz, βελτιώνοντας σημαντικά τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων (IEEE 802.11be-2024; Deng et al., 2020). Επιπλέον, η τεχνολογία MLO επιτρέπει την ταυτόχρονη χρήση πολλαπλών ζωνών συχνοτήτων, μειώνοντας την καθυστέρηση και αυξάνοντας την αξιοπιστία της σύνδεσης (IEEE 802.11be-2024).

Συνολικά, οι μελλοντικές εξελίξεις στα ασύρματα δίκτυα στοχεύουν σε υψηλότερες ταχύτητες, μεγαλύτερη αξιοπιστία, ενισχυμένη ασφάλεια και βελτιωμένη ενεργειακή αποδοτικότητα. Η σύγκλιση τεχνολογιών όπως το Wi-Fi 7 και τα κυψελοειδή δίκτυα 5G/6G αναμένεται να δημιουργήσει ένα πιο ολοκληρωμένο και αποδοτικό οικοσύστημα ασύρματης επικοινωνίας.

Κεφάλαιο 3ο: Επίπεδο Ζεύξης και Προσπέλαση στο Μέσο

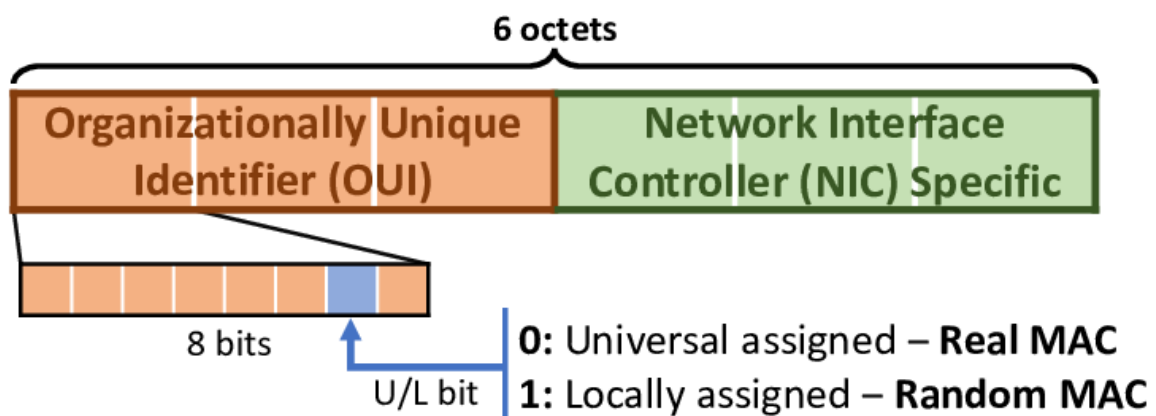
3.1 Λειτουργίες Επιπέδου Ζεύξης

Το Επίπεδο Ζεύξης Δεδομένων (Data Link Layer) είναι το δεύτερο επίπεδο στο Μοντέλο Αναφοράς Open Systems Interconnection (OSI) και αποτελεί κρίσιμο τμήμα της διαδικασίας επικοινωνίας μεταξύ υπολογιστικών συστημάτων. Το μοντέλο OSI αναπτύχθηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1970 και τυποποιήθηκε το 1984 ως ISO 7498, εισάγοντας μια τυποποιημένη αρχιτεκτονική που προωθεί τη διαλειτουργικότητα και την ενοποίηση των επικοινωνιακών προτύπων (ISO, 1984; Imperva, 2024; Zimmermann, 1980).

Το Επίπεδο Ζεύξης λειτουργεί ως ενδιάμεσο στρώμα ανάμεσα στο Φυσικό Επίπεδο (Physical Layer) και το Επίπεδο Δικτύου (Network Layer), αναλαμβάνοντας την αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων μεταξύ δύο άμεσα γειτονικών κόμβων (Stallings, 2013). Διαιρείται σε δύο υποεπίπεδα, το LLC (Logical Link Control), που συνδέει το Επίπεδο Ζεύξης με το Επίπεδο Δικτύου και επιτρέπει σε διαφορετικά πρωτόκολλα όπως το IPv4 και το IPv6 να χρησιμοποιούν το ίδιο φυσικό μέσο, και το MAC (Media Access Control), που ελέγχει την πρόσβαση στο φυσικό μέσο και τη διευθυνσιοδότηση (Stallings, 2013).

Κάθε συσκευή δικτύου διαθέτει μια μοναδική MAC διεύθυνση 48 bits, η οποία εκχωρείται από τον κατασκευαστή και χρησιμοποιείται για την αναγνώριση της συσκευής στο τοπικό δίκτυο και τη σωστή παράδοση δεδομένων. Η MAC διεύθυνση αναπαριστάται σε δεκαεξαδική μορφή (π.χ. AA:BB:CC:DD:EE:FF), όπου τα πρώτα 3 bytes (24 bits) αποτελούν το Organizationally Unique Identifier (OUI) και προσδιορίζουν τον κατασκευαστή, ενώ τα τελευταία 3 bytes (24 bits) αποτελούν το Network Interface Controller (NIC) identifier και είναι μοναδικά για κάθε διεπαφή δικτύου (Stallings, 2013).

Η Εικόνα 3.1 παρουσιάζει τη δομή μιας διεύθυνσης MAC, η οποία αποτελείται από 6 octets (48 bits) και χωρίζεται σε δύο μέρη: το OUI και το NIC identifier. Το U/L bit καθορίζει αν η διεύθυνση είναι παγκοσμίως μοναδική (0), δηλαδή εκχωρημένη από τον κατασκευαστή, ή τοπικά αποδοσμένη (1), δηλαδή δημιουργημένη από το λειτουργικό σύστημα της συσκευής, όπως συμβαίνει στις τυχαίες



(randomized) MAC διευθύνσεις που χρησιμοποιούνται για λόγους ιδιωτικότητας.

Εικόνα 3.1: Δομή διεύθυνσης MAC. Πηγή: Pérez-Hernández et al. (2024).

Το Επίπεδο Ζεύξης αναλαμβάνει τέσσερις βασικές λειτουργίες: Πλαισίωση (Framing), Διευθυνσιοδότηση (Addressing), Έλεγχος Ροής (Flow control), Διαχείριση Σφαλμάτων (Error Control).

Πίνακας 3.1: Οι τέσσερις θεμελιώδεις λειτουργίες του Επιπέδου Ζεύξης.

Λειτουργία	Περιγραφή
Πλαισίωση	Τα πακέτα από το Επίπεδο Δικτύου μετατρέπονται σε πλαίσια (frames). Κάθε πλαίσιο αποτελείται από Header (κεφαλίδα), Payload (ωφέλιμο φορτίο), Trailer (περιέχει τον έλεγχο σφαλμάτων)
Διευθυνσιοδότηση	Χρήση μοναδικών MAC διευθύνσεων 48-bit για την αναγνώριση αποστολέα και παραλήπτη εντός του τοπικού δικτύου.
Έλεγχος Ροής	Διασφαλίζει ότι ο αποστολέας δεν υπερφορτώνει τον παραλήπτη στέλνοντας περισσότερα δεδομένα από όσα μπορεί να επεξεργαστεί, αποτρέποντας απώλεια πακέτων.
Διαχείριση Σφαλμάτων	Ανίχνευση σφαλμάτων που προκύπτουν κατά τη μετάδοση, και διόρθωσή τους όταν υποστηρίζεται από τον μηχανισμό FEC (Forward Error Correction).

Στο τέλος κάθε πλαισίου δεδομένων τοποθετείται το Trailer, το οποίο περιέχει τον κωδικό Cyclic Redundancy Check (CRC). Ο CRC αποτελεί έναν από τους βασικούς μηχανισμούς ανίχνευσης σφαλμάτων σε σύγχρονα πρωτόκολλα όπως το Ethernet και το Wi-Fi, καθώς μπορεί να ανιχνεύσει ένα ευρύ φάσμα μοτίβων σφαλμάτων με μικρό υπολογιστικό κόστος. Ο δέκτης επαληθεύει την ακεραιότητα των δεδομένων υπολογίζοντας εκ νέου τον CRC και, εάν η επαλήθευση αποτύχει, το πλαίσιο απορρίπτεται. Απλούστερες τεχνικές, όπως τα parity bits, χρησιμοποιούνται πλέον κυρίως σε εκπαιδευτικά παραδείγματα, καθώς προσφέρουν περιορισμένη ικανότητα ανίχνευσης και δεν υποστηρίζουν διόρθωση σφαλμάτων (Stallings, 2013; Kurose & Ross, 2021).

Πέρα από την ανίχνευση, η διόρθωση σφαλμάτων (Error Correction) επιτρέπει στο σύστημα να ανακτήσει την αρχική πληροφορία χωρίς επαναμετάδοση, μέσω τεχνικών Forward Error Correction (FEC). Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν ο κώδικας Hamming, που μπορεί να διορθώσει σφάλματα ενός bit, και οι κώδικες Reed-Solomon, οι οποίοι χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε δορυφορικές επικοινωνίες και οπτικά μέσα αποθήκευσης χάρη στην ικανότητά τους να διορθώνουν διαδοχικά σφάλματα (burst errors) (Proakis & Salehi, 2008).

Στα ασύρματα δίκτυα, το μέσο μετάδοσης είναι κοινόχρηστο και ευάλωτο σε παρεμβολές, με αποτέλεσμα πολλές συσκευές να διεκδικούν ταυτόχρονα πρόσβαση στο ίδιο κανάλι. Σε αντίθεση με πολλά ενσύρματα δίκτυα, όπου η μετάδοση είναι συχνά αφιερωμένη ανά ζεύξη, η ιδιαιτερότητα αυτή καθιστά το υποεπίπεδο MAC κρίσιμο για την αποφυγή συγκρούσεων και την αποδοτική αξιοποίηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης.

Για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων, το υποεπίπεδο MAC υλοποιεί εξειδικευμένους μηχανισμούς ελέγχου πρόσβασης, όπως το Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA) στα ασύρματα τοπικά δίκτυα, οι οποίοι μειώνουν την πιθανότητα συγκρούσεων και εξασφαλίζουν τη σωστή λειτουργία του κοινόχρηστου μέσου (Stallings, 2013; IEEE 802.11-1999).

3.2 Τεχνικές Μέθοδοι Προσπέλασης Μέσου

Η πρόσβαση στο κοινό μέσο μετάδοσης (Medium Access Control, MAC) καθορίζει πώς πολλές συσκευές μοιράζονται το ίδιο κανάλι επικοινωνίας, αποφεύγοντας συγκρούσεις και αξιοποιώντας το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Η πρώτη τεχνική που εισήγαγε αυτή την αρχή ήταν το ALOHA (Abramson, 1970), οι ιδέες του ALOHA επηρέασαν τα πρωτόκολλα πολλαπλής πρόσβασης που χρησιμοποιήθηκαν αργότερα το Ethernet, το Wi-Fi (IEEE 802.11) και τα κυψελοειδή δίκτυα.

Στα ασύρματα τοπικά δίκτυα χρησιμοποιούνται τόσο μηχανισμοί αποκεντρωμένης πρόσβασης, όπου κάθε συσκευή αποφασίζει μόνη της πότε θα μεταδώσει, όπως το DCF με CSMA/CA, όσο και συντονισμένα σχήματα πρόσβασης, όπου ένα σημείο πρόσβασης (AP) μπορεί να ελέγχει ή να προγραμματίζει την πρόσβαση στο κανάλι, όπως στο PCF, το οποίο όμως έχει περιορισμένη χρήση στα σύγχρονα δίκτυα.

Με την επέκταση IEEE 802.11e εισήχθη το Enhanced Distributed Channel Access (EDCA), το οποίο επεκτείνει το DCF εισάγοντας κατηγορίες πρόσβασης και διαφορική προτεραιότητα για διαφορετικούς τύπους κίνησης. Με αυτόν τον τρόπο, κυκλοφορία που είναι ευαίσθητη στην καθυστέρηση, όπως φωνή και βίντεο, αποκτά προτεραιότητα έναντι best-effort δεδομένων, βελτιώνοντας την ποιότητα εξυπηρέτησης (Quality of Service, QoS) σε πολυμεσικές εφαρμογές (Gast, 2013; Stallings, 2013).

Πέρα από τους μηχανισμούς τυχαίας πρόσβασης, τα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα υιοθετούν και συντονισμένες μορφές πρόσβασης (scheduled access mechanisms). Το Time Division Multiple Access (TDMA) κατανέμει σε κάθε χρήστη συγκεκριμένες χρονοθυρίδες μετάδοσης, μειώνοντας τις συγκρούσεις με κόστος πρόσθετου συγχρονισμού. Το Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) και οι τεχνικές Multi-User MIMO (MU-MIMO) υλοποιούνται στο φυσικό επίπεδο (PHY), ενώ η κατανομή και ο προγραμματισμός των πόρων τους πραγματοποιούνται από το υποεπίπεδο MAC μέσω δυναμικού scheduling, το οποίο καθορίζει ποιος χρήστης μεταδίδει, πότε και με ποιους πόρους φάσματος και χωρικών διαστάσεων (Stallings, 2013; Dahlman et al., 2018).

Στο Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax), το υποεπίπεδο MAC αξιοποιεί προηγμένους μηχανισμούς προγραμματισμού πόρων για την αποδοτική χρήση του καναλιού. Συγκεκριμένα, τεχνολογίες του φυσικού επιπέδου (PHY), όπως το OFDMA και το MU-MIMO, επιτρέπουν την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλών συσκευών. Το MAC αναλαμβάνει τον δυναμικό προγραμματισμό (resource scheduling), κατανέμοντας Resource Units στο OFDMA και χωρικούς πόρους στο MU-MIMO, καθορίζοντας ποιος χρήστης μεταδίδει, πότε και με ποια μέσα, βελτιώνοντας έτσι την απόδοση σε περιβάλλοντα υψηλής πυκνότητας (IEEE 802.11ax-2021; Dahlman et al., 2018).

Στα δίκτυα IoT και ασύρματων αισθητήρων, όπως αυτά που βασίζονται στο IEEE 802.15.4 (π.χ. Zigbee), χρησιμοποιείται μηχανισμός πρόσβασης στο μέσο βασισμένος στο CSMA/CA, προσαρμοσμένος για χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Το πρότυπο αυτό σχεδιάστηκε για χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης, μικρές αποστάσεις και συσκευές με περιορισμένους ενεργειακούς πόρους. Υποστηρίζει τόσο beacon-enabled λειτουργία, όπου η επικοινωνία οργανώνεται σε superframes και μπορεί να περιλαμβάνει χρονικά προγραμματισμένη πρόσβαση (GTS), όσο και non-beacon λειτουργία με ασύγχρονο CSMA/CA, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής (IEEE 802.15.4-2006; IEEE 802.15.4-2020).

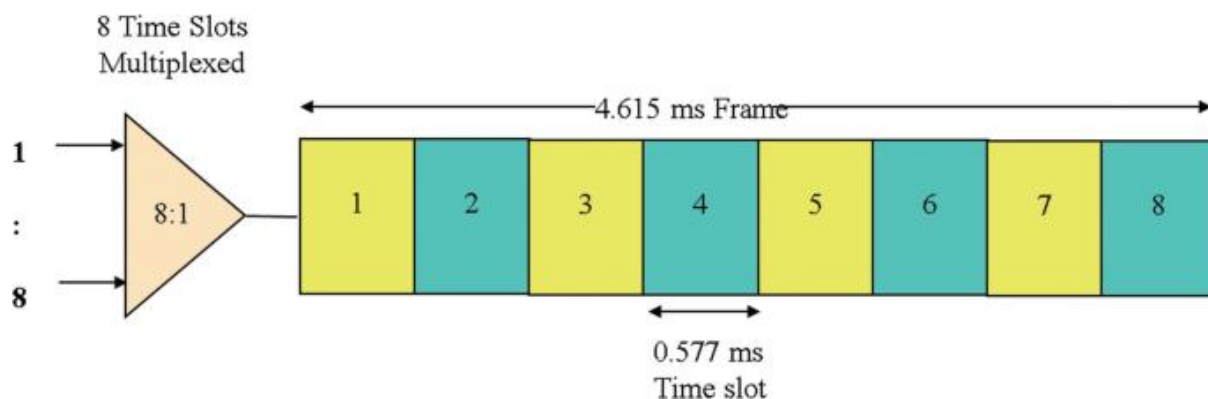
Στο LTE, το downlink χρησιμοποιεί OFDMA, ενώ το uplink χρησιμοποιεί SC-FDMA, με τον σταθμό βάσης (eNodeB) να αναλαμβάνει τον προγραμματισμό και την κατανομή των πόρων (resource blocks) στους χρήστες. Αντίστοιχα, στο 5G NR χρησιμοποιείται OFDMA και στις δύο κατευθύνσεις (uplink και downlink), επιτρέποντας μεγαλύτερη ευελιξία στον προγραμματισμό πόρων και υποστηρίζοντας ταυτόχρονα υπηρεσίες υψηλής ταχύτητας, χαμηλής καθυστέρησης και μαζικής συνδεσιμότητας συσκευών (Dahlman et al., 2018).

Συμπερασματικά, περιβάλλοντα υψηλής πυκνότητας και αυστηρών απαιτήσεων ποιότητας υπηρεσίας τείνουν προς μηχανισμούς scheduled access, όπου η μετάδοση οργανώνεται μέσω χρονικού και φασματικού προγραμματισμού πόρων, όπως στην περίπτωση TDMA και των τεχνολογιών OFDMA και MU-MIMO, οι οποίες αποτελούν τεχνολογίες του φυσικού επιπέδου. Αντίθετα, δίκτυα με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και δυναμικό αριθμό κόμβων βασίζονται περισσότερο σε αποκεντρωμένους μηχανισμούς όπως το CSMA/CA. Στην πράξη, τα σύγχρονα ασύρματα συστήματα υιοθετούν υβριδικές προσεγγίσεις, συνδυάζοντας πολλαπλές τεχνικές για τη βελτιστοποίηση της φασματικής αποδοτικότητας, της καθυστέρησης και της ενεργειακής κατανάλωσης.

3.2.1 Χρονική Διαίρεση Πολλαπλής Πρόσβασης (Time Division Multiple Access – TDMA)

Η TDMA (Time Division Multiple Access) είναι μια κλασική μέθοδος πρόσβασης στο μέσο όπου πολλοί χρήστες μοιράζονται το ίδιο κανάλι με χρονική εναλλαγή. Το κανάλι χωρίζεται σε χρονοθυρίδες (time slots), και κάθε χρήστης μεταδίδει μόνο στη δική του θυρίδα, ενώ στις υπόλοιπες παραμένει ανενεργός. Έτσι αποφεύγονται οι συγκρούσεις, υπό την προϋπόθεση ότι οι συσκευές είναι χρονικά συγχρονισμένες μέσω κοινού μηχανισμού χρονισμού ή κεντρικού ελέγχου (Stallings, 2013; Rappaport, 2022).

Η TDMA απαιτεί ακριβή συγχρονισμό μεταξύ σταθμού βάσης και συσκευών, καθώς και μικρά χρονικά κενά (guard intervals) μεταξύ των χρονοθυρίδων για την αποφυγή επικαλύψεων. Όταν το δίκτυο έχει χαμηλή κίνηση, πολλές θυρίδες παραμένουν αχρησιμοποίητες, με αποτέλεσμα μειωμένη αξιοποίηση του διαθέσιμου φάσματος, ενώ σε συνθήκες πλήρους φόρτου κάθε θυρίδα αξιοποιείται αποδοτικά. Για τον λόγο αυτό, η TDMA είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για εφαρμογές πραγματικού χρόνου, όπως η φωνητική επικοινωνία (Stallings, 2013). Η Εικόνα 2.3 αποτελεί παράδειγμα διαίρεσης καναλιού σε 8 χρονοθυρίδες (TDMA frame) όπου κάθε χρήστης μεταδίδει σε συγκεκριμένο χρονικό slot.



Εικόνα 3.2: Ενδεικτικό πλαίσιο TDMA τύπου GSM με 8 χρονοθυρίδες/πλαίσιο. Πηγή: Faruque (2018).

Στην ιδανική περίπτωση της TDMA, δεν εμφανίζονται συγκρούσεις πακέτων, ο χρόνος πρόσβασης στο μέσο είναι προκαθορισμένος και οι τερματικές συσκευές μπορούν να εξοικονομούν ενέργεια, καθώς εκπέμπουν μόνο κατά τη διάρκεια της καθορισμένης χρονικής θυρίδας τους. Ωστόσο, η τεχνική απαιτεί αυστηρό χρονικό συγχρονισμό μεταξύ των σταθμών, ενώ εισάγει επιπλέον overhead λόγω guard times και framing. Επιπλέον, η απόδοση μειώνεται σε συνθήκες χαμηλής ή μεταβλητής κίνησης, καθώς οι χρονικές θυρίδες παραμένουν προκαθορισμένες και δεν κατανέμονται δυναμικά με βάση τη ζήτηση, οδηγώντας σε πιθανή υπο-αξιοποίηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης (Stallings, 2013; Rappaport, 2022).

Η TDMA έχει ενσωματωθεί σε αρκετά πρότυπα ασύρματων επικοινωνιών. Στο GSM, κάθε φέρουσα ραδιοσυχνότητα (RF carrier) οργανώνεται σε πλαίσια TDMA με οκτώ χρονικές θυρίδες, επιτρέποντας την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση έως οκτώ χρηστών στο ίδιο φάσμα (Stallings, 2013; Rappaport, 2022). Στο TETRA (Terrestrial Trunked Radio), κάθε φέρουσα των 25 kHz υποδιαιρείται σε τέσσερις χρονικές θυρίδες ανά πλαίσιο, υποστηρίζοντας κρίσιμες υπηρεσίες όπως αστυνομία και πυροσβεστική (ETSI, 2017). Αντίστοιχα, στο DECT (Digital Enhanced Cordless Telecommunications), κάθε πλαίσιο διάρκειας 10 ms περιλαμβάνει 24 χρονικές θυρίδες, οι οποίες οργανώνονται σε ζεύγη για την υποστήριξη full-duplex επικοινωνίας (ETSI, 2018).

Επιπλέον, η TDMA εφαρμόζεται και σε δορυφορικά συστήματα τύπου VSAT (Very Small Aperture Terminal), όπου χρησιμοποιούνται παραλλαγές όπως Demand Assigned TDMA (D-TDMA) ή MF-TDMA. Σε αυτά τα συστήματα, η κατανομή των χρονικών θυρίδων μπορεί να γίνεται δυναμικά, ανάλογα με τη ζήτηση κάθε σταθμού, επιτρέποντας πιο αποδοτική αξιοποίηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης σε περιβάλλοντα με μεταβαλλόμενη κίνηση (Stallings, 2013; Rappaport, 2022; ETSI, 2024).

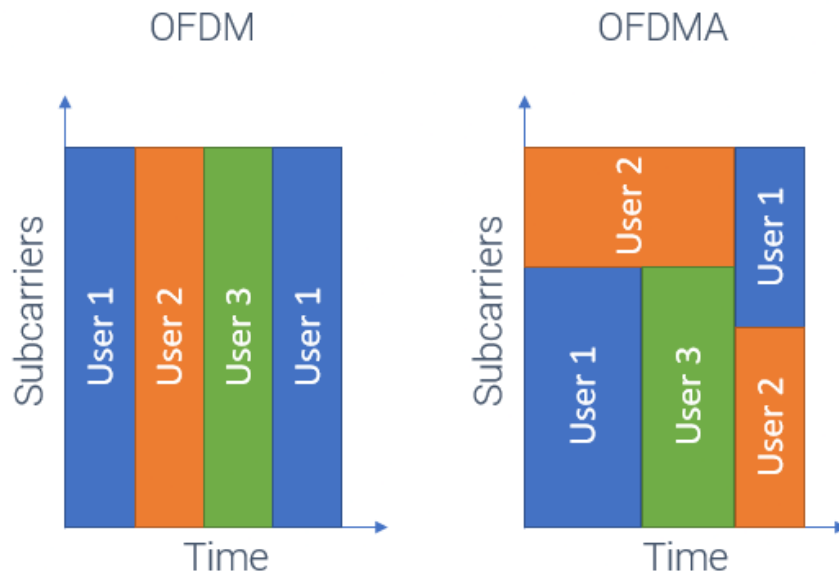
3.2.2 Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA)

Η OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) είναι μια τεχνική πολλαπλής πρόσβασης που βασίζεται στην OFDM. Το διαθέσιμο φάσμα (available spectrum) χωρίζεται σε ορθογώνια subcarriers που σχηματίζουν ένα πλέγμα χρόνου-συχνότητας (time-frequency grid), από το οποίο ο χρονοπρογραμματιστής (scheduler) εκχωρεί τμήματα σε διαφορετικούς χρήστες ταυτόχρονα. Αυτό επιτρέπει την παράλληλη μετάδοση στο ίδιο κανάλι.

Το κυκλικό πρόθεμα (Cyclic Prefix - CP) χρησιμοποιείται για τη μείωση των επιπτώσεων της διασυμβολικής παρεμβολής (Inter-Symbol Interference - ISI) που προκαλείται από την πολυδιαδρομική διάδοση. Η τεχνική OFDMA χρησιμοποιείται ευρέως σε συστήματα όπως το LTE

(4G), το 5G NR και το Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax), όπου οι πόροι κατανέμονται δυναμικά σε κάθε χρονική στιγμή ανάλογα με τις απαιτήσεις των χρηστών (Dahlman et al., 2018; Rappaport, 2022).

Η βασική διαφορά μεταξύ OFDM και OFDMA έγκειται στον τρόπο κατανομής των διαθέσιμων πόρων. Στην OFDM, όλα τα subcarriers ενός καναλιού εκχωρούνται σε έναν μόνο χρήστη ανά χρονική στιγμή, ενώ στην OFDMA κατανέμονται δυναμικά σε πολλούς χρήστες ταυτόχρονα. Η διαφορά αυτή απεικονίζεται στην Εικόνα 3.3.



Εικόνα 3.3: Σύγκριση της κατανομής πόρων μεταξύ OFDM και OFDMA. Πηγή: Buczkowski (2023)

Η OFDMA παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα, δηλαδή επιτρέπει την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλών χρηστών στο ίδιο κανάλι, αξιοποιεί δυναμικά το φάσμα (εκχωρώντας περισσότερους πόρους εκεί που χρειάζονται κάθε στιγμή) και συνδυάζεται με τεχνικές MIMO και beamforming. Από την άλλη, απαιτεί αυστηρό συγχρονισμό, έχει υψηλό λόγο μέγιστης προς μέση ισχύ (Peak-to-Average Power Ratio - PAPR) που αυξάνει την κατανάλωση ενέργειας, και αυξημένη υπολογιστική ισχύ (Dahlman et al., 2018; IEEE 802.11ax-2021; IEEE 802.16e-2005).

Η OFDMA εφαρμόζεται σε πολλά σύγχρονα πρότυπα ασύρματης επικοινωνίας. Στο LTE (4G - Long Term Evolution) χρησιμοποιείται στο downlink, ενώ το uplink αξιοποιεί SC-FDMA (Single Carrier FDMA) για να καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια τα κινητά. Στο 5G NR (New Radio) εφαρμόζεται και στην αποστολή και στη λήψη δεδομένων, με υψηλή ταχύτητα, χαμηλή καθυστέρηση και σύνδεση πολλών συσκευών ταυτόχρονα.

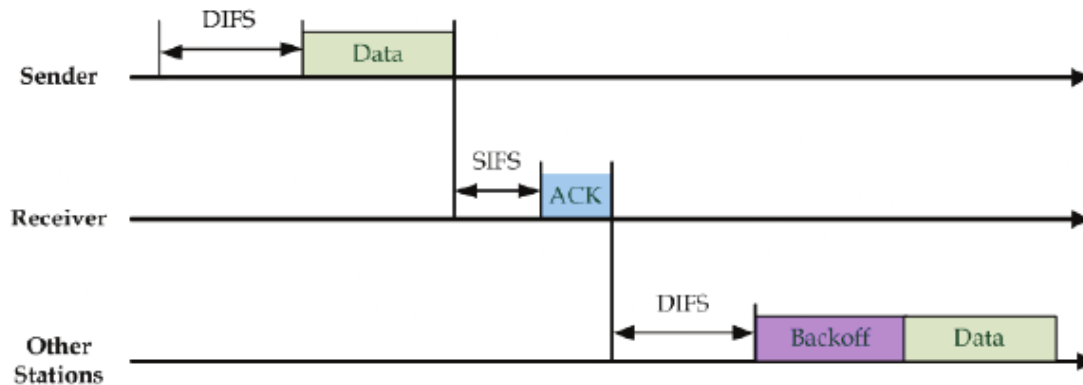
Στο Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax) η OFDMA επιτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση πολλών συσκευών στο ίδιο κανάλι, σε συνδυασμό με MU-MIMO για περαιτέρω αύξηση της απόδοσης. Τέλος, χρησιμοποιήθηκε και στο WiMAX για γρήγορη ασύρματη πρόσβαση στο διαδίκτυο, αν και η τεχνολογία αυτή έχει πλέον αντικατασταθεί από το LTE (Dahlman et al., 2018; IEEE 802.11ax-2021; IEEE 802.16e-2005).

3.2.3 Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA)

Το CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) αποτελεί τον βασικό μηχανισμό πρόσβασης στο μέσο στα ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLANs). Έχει σχεδιαστεί ειδικά για ασύρματα περιβάλλοντα, όπου ένας σταθμός δεν μπορεί να ανιχνεύσει αξιόπιστα συγκρούσεις κατά τη διάρκεια της μετάδοσης, λόγω της ισχυρής παρουσίας του δικού του σήματος.

Πριν μεταδώσει, ο σταθμός ελέγχει αν το κανάλι είναι ελεύθερο. Αν το κανάλι είναι ελεύθερο, ο σταθμός περιμένει ένα σύντομο χρονικό διάστημα (DIFS — Distributed Inter-Frame Space) για να βεβαιωθεί ότι κανείς άλλος δεν εκπέμπει, και στη συνέχεια ξεκινά την αντίστροφη μέτρηση (backoff), επιλέγοντας τυχαία έναν αριθμό από ένα παράθυρο ανταγωνισμού (Contention Window).

Ο μετρητής backoff μειώνεται όσο το κανάλι παραμένει ελεύθερο και όταν φτάσει στο μηδέν, ο σταθμός ξεκινά τη μετάδοση. Μετά από κάθε επιτυχή λήψη δεδομένων, ο δέκτης αποστέλλει ένα πλαίσιο επιβεβαίωσης (ACK – Acknowledgement), ενημερώνοντας τον αποστολέα για την επιτυχή παραλαβή. Σε περίπτωση μη λήψης ACK, ο αποστολέας θεωρεί ότι η μετάδοση απέτυχε και επαναμεταδίδει το πλαίσιο. Η διαδικασία αυτή απεικονίζεται στην Εικόνα 3.4.



Εικόνα 3.4: Μηχανισμός χρονισμού πρόσβασης CSMA/CA. Πηγή: Dini et al. (2011).

Το CSMA/CA αποτελεί έναν αποκεντρωμένο μηχανισμό πρόσβασης στο μέσο, καθώς λειτουργεί χωρίς κεντρικό έλεγχο και βασίζεται σε ανταγωνισμό μεταξύ των σταθμών. Η χρήση πλαισίων επιβεβαίωσης (ACK) ενισχύει την αξιοπιστία της μετάδοσης, ενώ η επέκταση IEEE 802.11e εισάγει τον μηχανισμό Enhanced Distributed Channel Access (EDCA), ο οποίος υποστηρίζει QoS μέσω διαφορετικών κατηγοριών προτεραιότητας (voice, video, best effort, background), επιτρέποντας την εξυπηρέτηση ευαίσθητων ροών με μειωμένη καθυστέρηση (IEEE 802.11e-2005).

Από την άλλη πλευρά, σε περιβάλλοντα υψηλής πυκνότητας αυξάνεται η πιθανότητα συγκρούσεων και ο μέσος χρόνος αναμονής, ενώ το πρόβλημα των κρυφών τερματικών (hidden terminal problem) μπορεί να προκαλέσει συγκρούσεις στον δέκτη, παρότι οι σταθμοί δεν ανιχνεύουν δραστηριότητα στο κανάλι. Επιπλέον, η συνεχής παρακολούθηση του καναλιού αυξάνει την κατανάλωση ενέργειας, ενώ σε συνθήκες κακής ποιότητας καναλιού ή μεγάλων κυψελών η απόδοση μειώνεται λόγω αυξημένων λαθών και επαναμεταδόσεων (Bianchi, 2000; Gast, 2013; Stallings, 2013).

Το CSMA/CA αποτελεί τον βασικό μηχανισμό MAC στα ασύρματα τοπικά δίκτυα IEEE 802.11 (IEEE 802.11-2020a), ενώ στο Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax-2021) λειτουργεί συνδυαστικά με OFDMA και MU-MIMO για αποδοτικότερη εξυπηρέτηση υψηλής πυκνότητας χρηστών. Στα δίκτυα χαμηλής κατανάλωσης IoT, όπως το IEEE 802.15.4, χρησιμοποιείται παραλλαγή CSMA/CA (slotted ή unslotted), προσαρμοσμένη σε συσκευές με περιορισμένη μπαταρία. Τέλος, το Wi-Fi Direct αξιοποιεί τον ίδιο μηχανισμό MAC του IEEE 802.11 για peer-to-peer συνδέσεις χωρίς την ανάγκη κεντρικού σημείου πρόσβασης, επιτρέποντας άμεση επικοινωνία μεταξύ συσκευών (IEEE 802.11-2020a; Stallings, 2013; Wi-Fi Alliance, 2025).

3.2.4 Σύγκριση Πρωτοκόλλων Προσπέλασης: CSMA/CA και CSMA/CD

Το CSMA (Carrier Sense Multiple Access) αποτελεί βασικό μηχανισμό πρόσβασης σε κοινόχρηστα κανάλια, όπου κάθε συσκευή πραγματοποιεί ανίχνευση του μέσου πριν επιχειρήσει μετάδοση δεδομένων. Οι δύο κύριες εκδοχές του είναι το CSMA/CD (Collision Detection), το οποίο χρησιμοποιήθηκε σε παραδοσιακά ενσύρματα δίκτυα Ethernet, και το CSMA/CA (Collision

Avoidance), το οποίο εφαρμόζεται σε ασύρματα δίκτυα IEEE 802.11 για τη μείωση της πιθανότητας συγκρούσεων (Tanenbaum & Wetherall, 2011; Stallings, 2013; IEEE 802.3).

Το CSMA/CD χρησιμοποιήθηκε σε περιβάλλοντα shared medium και half-duplex λειτουργίας, όπως δίκτυα που βασίζονταν σε hubs. Στο πλαίσιο αυτό, οι σταθμοί ελέγχουν τη διαθεσιμότητα του καναλιού πριν από τη μετάδοση και ξεκινούν την αποστολή όταν αυτό είναι ελεύθερο. Ωστόσο, εάν δύο σταθμοί μεταδώσουν ταυτόχρονα, προκύπτει σύγκρουση, η οποία ανιχνεύεται κατά τη διάρκεια της μετάδοσης μέσω του μηχανισμού Collision Detection. Στη συνέχεια, η μετάδοση διακόπτεται και εφαρμόζεται μηχανισμός binary exponential backoff πριν από την επαναμετάδοση του πλαισίου (Tanenbaum & Wetherall, 2011; Stallings, 2013; IEEE 802.3).

Το backoff στο Ethernet εφαρμόζεται μετά από την ανίχνευση σύγκρουσης και επιτρέπει στους σταθμούς να επανεκπέμπουν μετά από τυχαία χρονική καθυστέρηση, βάσει του μηχανισμού binary exponential backoff. Αντίθετα, στο Wi-Fi (CSMA/CA), ο μηχανισμός backoff χρησιμοποιείται πριν την έναρξη της μετάδοσης σε ένα κοινό ασύρματο μέσο, με στόχο τη μείωση της πιθανότητας σύγκρουσης. Με την ευρεία υιοθέτηση switched full-duplex Ethernet και τη χρήση switches που διαχωρίζουν τα collision domains σε επίπεδο θύρας, οι συγκρούσεις έχουν καταστεί πρακτικά ανύπαρκτες στα σύγχρονα ενσύρματα δίκτυα, καθιστώντας το CSMA/CD ουσιαστικά ανενεργό (Tanenbaum & Wetherall, 2011; Stallings, 2013; IEEE 802.3).

Στα ασύρματα δίκτυα, το CSMA/CD δεν είναι εφικτό. Μια συσκευή δεν μπορεί να ανιχνεύσει σύγκρουση την ώρα που εκπέμπει, γιατί το δικό της σήμα καλύπτει οποιοδήποτε άλλο. Γι' αυτό το IEEE 802.11 χρησιμοποιεί CSMA/CA, που αποφεύγει τις συγκρούσεις αντί να τις ανιχνεύει. Έτσι, ελέγχει το κανάλι πριν εκπέμψει και εφαρμόζει τυχαία καθυστέρηση αν είναι κατειλημμένο. Προαιρετικά, η ακολουθία RTS/CTS μειώνει τις συγκρούσεις από κρυφούς σταθμούς (IEEE 802.11; Stallings, 2013).

Πίνακας 3.2: Συγκριτική σύνοψη CSMA/CD–CSMA/CA

Χαρακτηριστικό	CSMA/CD	CSMA/CA
Περιβάλλον Χρήσης	Ενσύρματα δίκτυα	Ασύρματα δίκτυα
Μέθοδος Ανίχνευσης	Ανίχνευση σύγκρουσης κατά τη μετάδοση	Αποφυγή σύγκρουσης πριν τη μετάδοση
Απόδοση σε υψηλό φορτίο	Μειωμένη λόγω συγκρούσεων	Καλύτερη λόγω αποφυγής συγκρούσεων
Εφαρμογή σε Σύγχρονα Δίκτυα	Σπάνια χρησιμοποιείται λόγω μετάβασης σε full-duplex Ethernet	Ευρέως χρησιμοποιούμενο
Πρότυπο IEEE	IEEE 802.3 (Ethernet)	IEEE 802.11 (Wi-Fi)

Πέρα από τα CSMA/CD και CSMA/CA, χρησιμοποιούνται και άλλες τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης. Το TDMA κατανέμει το μέσο σε χρονικές θυρίδες ανά χρήστη, το FDMA αποδίδει διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων σε κάθε χρήστη, ενώ το OFDMA βασίζεται σε frequency-domain subcarriers, επιτρέποντας ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλών χρηστών και χρησιμοποιείται σε σύγχρονα συστήματα όπως LTE, 5G NR και Wi-Fi 6 (Stallings, 2013; Rappaport, 2022).

Κάθε κατηγορία δικτύου χρησιμοποιεί διαφορετική τεχνική πρόσβασης, ανάλογα με τις ανάγκες της εφαρμογής. Τα κυψελοειδή δίκτυα 2G χρησιμοποίησαν κυρίως TDMA για σταθερή καθυστέρηση, τα ενσύρματα Ethernet βασίστηκαν στο CSMA/CD, ενώ τα ασύρματα Wi-Fi στο CSMA/CA για πρόσβαση σε κοινόχρηστο κανάλι. Τα κυψελοειδή δίκτυα 4G/5G αξιοποιούν OFDMA για ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλών χρηστών στο ίδιο φάσμα, ενώ τα δίκτυα IoT χαμηλής κατανάλωσης, όπως αυτά που βασίζονται στο IEEE 802.15.4 (π.χ. Zigbee stack), χρησιμοποιούν παραλλαγές του CSMA-CA προσαρμοσμένες σε περιορισμένους πόρους και συσκευές με μπαταρίες.

Ο Πίνακας 3.3 συνοψίζει ενδεικτικά αυτές τις αντιστοιχίσεις (Stallings, 2013; Rappaport, 2022; IEEE 802.3; IEEE 802.11; IEEE 802.15.4).

Πίνακας 3.3: Τεχνολογίες πρόσβασης και πεδία εφαρμογής

Εφαρμογή	Τεχνική	Λόγος
Φωνή/real-time	TDMA	Σταθερή καθυστέρηση
Wi-Fi σπιτιού	CSMA/CA	Απλο και χωρίς κεντρικό έλεγχο
4G/5G κινητό	OFDMA	Πολλοί χρήστες ταυτόχρονα
Παλιό Ethernet	CSMA/CD	Ανίχνευση σύγκρουσης
IoT/Zigbee	CSMA/CA	Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας

3.3 Τεχνικές DCF και PCF

Στο πρότυπο IEEE 802.11 ορίζονται δύο βασικοί τρόποι πρόσβασης στο ασύρματο μέσο. Ο ανταγωνιστικός μέσω του DCF (Distributed Coordination Function), όπου κάθε συσκευή αποφασίζει μόνη της, και ο κεντρικός μέσω του PCF (Point Coordination Function), όπου το AP ελέγχει ποιος μεταδίδει (Molisch, 2011).

3.3.1 Τεχνική DCF

Η λειτουργία του DCF βασίζεται στο CSMA/CA, δηλαδή ο σταθμός ελέγχει το κανάλι, εφαρμόζει τυχαίο backoff, χρησιμοποιεί χρονικά διαστήματα (SIFS/DIFS) για να καθορίσει ποιος εκπέμπει πρώτος, και λαμβάνει ACK για επιβεβαίωση λήψης (Stallings, 2013). Σε αντίθεση με το CSMA/CD, το CSMA/CA δεν ανιχνεύει συγκρούσεις άμεσα. Αν δεν φτάσει το ACK, ο αποστολέας συμπεραίνει ότι έγινε σύγκρουση και επαναμεταδίδει το ίδιο πακέτο (Kurose & Ross, 2021).

Τα Interframe Spaces (IFS) είναι χρονικά διαστήματα που καθορίζουν ποιος εκπέμπει πρώτος. Το SIFS (Short Interframe Space) είναι το μικρότερο και χρησιμοποιείται για κρίσιμα πλαίσια όπως ACK και CTS (Clear To Send), εξασφαλίζοντας ότι εκπέμπονται πριν οποιαδήποτε άλλη συσκευή προλάβει να αρχίσει να εκπέμπει στο κανάλι (Molisch, 2011). Το DIFS (DCF Interframe Space) είναι μεγαλύτερο από το SIFS και χρησιμοποιείται για κανονικές μεταδόσεις δεδομένων, έτσι τα κρίσιμα πλαίσια (ACK και CTS) εξυπηρετούνται πάντα πρώτα (Rappaport, 2022).

Το DCF είναι απλό και αποδοτικό σε δίκτυα μικρού έως μεσαίου φόρτου. Σε υψηλό φορτίο, οι συσκευές περιμένουν περισσότερο (μεγαλύτερο backoff) πριν στείλουν δεδομένα, αυξάνοντας την καθυστέρηση (Kurose & Ross, 2021).

Για τον λόγο αυτό δημιουργήθηκε το PCF, ένας κεντρικός μηχανισμός όπου το AP αποφασίζει ποιος μεταδίδει κατά την Contention-Free Period, προσφέροντας υπηρεσίες με χρονικές απαιτήσεις μέσω polling (Molisch, 2011). Το PCF όμως παρέμεινε προαιρετικό και σπάνια υλοποιήθηκε στην πράξη, καθώς απαιτεί κεντρικό έλεγχο, αυστηρό συγχρονισμό και πιο πολύπλοκη υλοποίηση από τους κατασκευαστές. Στα νεότερα πρότυπα, οι ανάγκες QoS καλύπτονται κυρίως από το IEEE 802.11e μέσω του HCF/EDCA, το οποίο επεκτείνει το DCF (Molisch, 2011; IEEE 802.11e-2005; IEEE 802.11ax-2021).

3.3.2 Τεχνική PCF

Το PCF είναι ένας προαιρετικός μηχανισμός χωρίς ανταγωνισμό, ο οποίος σπάνια υλοποιήθηκε, και λειτουργεί ως θεωρητική εναλλακτική του DCF (Molisch, 2011; IEEE 802.11-2020a). Στο PCF, υπάρχει ο κεντρικός συντονιστής Point Coordinator (PC), συνήθως είναι το Access Point, και καθορίζει τον τρόπο και την σειρά μετάδοσης των δεδομένων. Ο PC ελέγχει ποιος σταθμός θα μεταδώσει δεδομένα κατά τη διάρκεια της Contention-Free Period (CFP), καθώς οι υπόλοιποι σταθμοί δεν εκπέμπουν. Ο PC ορίζει διαδοχικά ποια συσκευή θα μεταδώσει και πότε (polling), εξασφαλίζοντας σταθερή μετάδοση (Molisch, 2011; IEEE 802.11-2020a).

Το PCF βασίζεται στο DCF και το δίκτυο χωρίζεται σε δύο περιόδους. Η πρώτη είναι η Contention Period (CP), όπου εφαρμόζεται DCF και οι συσκευές ανταγωνίζονται για το κανάλι μέσω CSMA/CA, και η δεύτερη η Contention-Free Period (CFP), όπου το PCF ελέγχει ποιος μεταδίδει χωρίς συγκρούσεις. Το PIFS (Priority Interframe Space) είναι μεγαλύτερο από το SIFS αλλά μικρότερο από το DIFS, και δίνει προτεραιότητα στον PC έναντι των σταθμών DCF (Molisch, 2011; IEEE 802.11-2020a). Ο PC καλεί κάθε συσκευή με CF-Poll (Contention-Free Poll) δίνοντάς της άδεια να μεταδώσει χωρίς ανταγωνισμό. Μετά τη μετάδοση, ο παραλήπτης στέλνει ACK για επιβεβαίωση. Αν δεν φτάσει ACK, ο Point Coordinator επαναλαμβάνει το CF-Poll ή επαναμεταδίδει το πλαίσιο (Molisch, 2011; IEEE 802.11-2020a).

3.3.3 Σύγκριση Τεχνικών DCF και PCF

Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου πρόσβασης στο ασύρματο μέσο εξαρτάται άμεσα από τις απαιτήσεις της εφαρμογής. Το DCF αποτελεί τον βασικό, απλούστερο και ευρύτερα χρησιμοποιούμενο μηχανισμό πρόσβασης στα δίκτυα Wi-Fi. Λειτουργεί αποκεντρωμένα, χωρίς κεντρικό έλεγχο, και βασίζεται στον μηχανισμό CSMA/CA, όπου κάθε σταθμός αποφασίζει αυτόνομα πότε θα μεταδώσει, αφού πρώτα ελέγξει τη διαθεσιμότητα του καναλιού και εφαρμόσει τυχαίο backoff (Gast, 2013; Kurose & Ross, 2021; Molisch, 2011).

Επιπλέον, το DCF προσφέρει ευελιξία και απλότητα, ωστόσο σε συνθήκες υψηλού φόρτου πολλών χρηστών αυξάνονται οι καθυστερήσεις και η πιθανότητα συγκρούσεων. Το DCF δεν παρέχει εγγυήσεις χρόνου πρόσβασης ή QoS, επειδή η πρόσβαση βασίζεται σε τυχαίο backoff, γεγονός που το καθιστά λιγότερο κατάλληλο για εφαρμογές πραγματικού χρόνου με αυστηρές απαιτήσεις QoS (Molisch, 2011).

Αντίθετα, το PCF απαιτεί κεντρικό έλεγχο και συγχρονισμό που αυξάνουν την πολυπλοκότητα. Το Access Point λειτουργεί ως Point Coordinator (PC) και καλεί διαδοχικά τις συσκευές μέσω CF-Poll κατά τη διάρκεια της CFP, εξασφαλίζοντας μετάδοση χωρίς ανταγωνισμό και σχεδόν σταθερή αναμονή, κάτι που το καθιστά θεωρητικά κατάλληλο για υπηρεσίες με αυστηρές χρονικές απαιτήσεις, όπως φωνή και βίντεο (Gast, 2013; Molisch, 2011). Στην πράξη όμως, ο ρόλος αυτός καλύπτεται πλέον κυρίως από τους QoS μηχανισμούς του IEEE 802.11e (EDCA/HCF), οι οποίοι επεκτείνουν το DCF αντί να βασίζονται στο PCF (IEEE 802.11e-2005).

Πέρα από τη διαχείριση πρόσβασης, το Επίπεδο Ζεύξης διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην ασφάλεια. Μηχανισμοί όπως η αυθεντικοποίηση μέσω του IEEE 802.1X port-based network access control και η κρυπτογράφηση των πλαισίων (π.χ. WEP, WPA/WPA2/WPA3) προστατεύουν τις μεταδόσεις από υποκλοπές σε ασύρματα περιβάλλοντα όπου το μέσο είναι ανοικτό (IEEE 802.1X-2020b; IEEE 802.11-2020a; Stallings, 2020; Molisch, 2011).

Πίνακας 3.4: Σύγκριση DCF και PCF

Χαρακτηριστικό	DCF	PCF
Τύπος πρόσβασης	Με ανταγωνισμό (contention-based)	Χωρίς ανταγωνισμό (contention-free)
Έλεγχος	Αποκεντρωμένος	Κεντρικός (Point Coordinator)
Πολυπλοκότητα	Χαμηλή	Υψηλότερη
Καθυστέρηση	Μεταβλητή	Πιο προβλέψιμη
QoS	Περιορισμένο	Θεωρητικά καλύτερο
Συγκρούσεις	Υπάρχουν	Δεν υπάρχουν (CFP)
Υιοθέτηση	Ευρέως χρησιμοποιούμενο	Σχεδόν μη χρησιμοποιούμενο

Η κατανόηση των μηχανισμών DCF και PCF αποτελεί θεμέλιο για το σχεδιασμό αποδοτικών και ασφαλών ασύρματων δικτύων, τόσο στα σύγχρονα συστήματα Wi-Fi όσο και στις τεχνολογίες επόμενης γενιάς.

3.4 Μέθοδοι Πρόσβασης (βασική και Request To Send / Clear To Send)

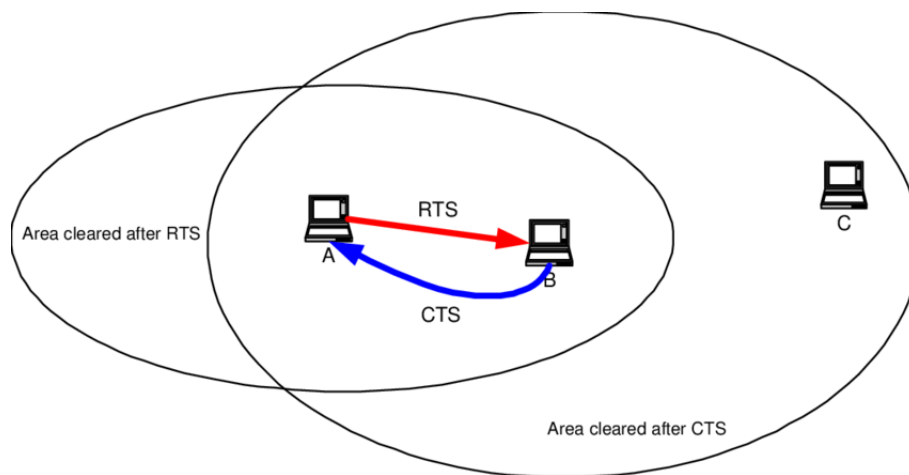
Στα ασύρματα δίκτυα IEEE 802.11, η πρόσβαση στο κοινόχρηστο μέσο μετάδοσης υλοποιείται μέσω του μηχανισμού CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance). Στο πλαίσιο αυτό, το πρότυπο ορίζει δύο βασικές διαδικασίες πρόσβασης, τη βασική μέθοδο πρόσβασης (Basic Access Method) και τη διαδικασία Request To Send / Clear To Send (RTS/CTS), η οποία λειτουργεί ως προαιρετικός μηχανισμός ελέγχου (Bianchi, 2000).

Η βασική μέθοδος αποτελεί την προεπιλεγμένη διαδικασία λειτουργίας του CSMA/CA. Κάθε σταθμός, πριν μεταδώσει δεδομένα, ελέγχει αν το ασύρματο κανάλι είναι ελεύθερο (carrier sensing). Εάν το κανάλι παραμένει ελεύθερο για χρονικό διάστημα ίσο με το DIFS, ο σταθμός ξεκινά αντίστροφη μέτρηση (backoff), επιλέγοντας τυχαία έναν αριθμό από το παράθυρο ανταγωνισμού (Contention Window). Η αντίστροφη μέτρηση μειώνεται μόνο όσο το κανάλι παραμένει ελεύθερο. Αν το κανάλι καταληφθεί, η μέτρηση παγώνει και συνεχίζεται όταν το κανάλι ξαναγίνει ελεύθερο. Η αντίστροφη μέτρηση μειώνεται μόνο όταν το κανάλι είναι πάλι ελεύθερο. Αν κάποιος άλλος σταθμός εκπέμπει, η μέτρηση παγώνει και συνεχίζεται όταν το κανάλι ξαναγίνει ελεύθερο. Όταν ο μετρητής φτάσει στο μηδέν, ο σταθμός εκπέμπει (Bianchi, 2000). Επιπλέον, κάθε συσκευή διατηρεί ένα Network Allocation Vector (NAV), ένα εικονικό μετρητή χρονισμού που, με βάση τα πεδία duration των πλαισίων (π.χ. RTS/CTS), δείχνει για πόσο χρόνο το μέσο θα είναι δεσμευμένο, ώστε να αποφεύγονται συγκρούσεις κατά προγραμματισμένες μεταδόσεις (Stallings, 2013).

Κάθε φορά που συμβαίνει αποτυχία μετάδοσης (π.χ. λόγω σύγκρουσης), το μέγεθος του Contention Window (CW) διπλασιάζεται μέχρι ένα ανώτατο όριο CW_{max} (Binary Exponential Backoff). Έτσι, οι συσκευές επιλέγουν το backoff από μεγαλύτερο εύρος, μειώνοντας την πιθανότητα νέας σύγκρουσης· το CW όμως δεν ξεπερνά το CW_{max} (Bianchi, 2000; IEEE 802.11-2020a; Stallings, 2013).

Μετά τη μετάδοση, ο παραλήπτης στέλνει το ACK μετά από το SIFS. Αν δεν φτάσει το ACK, ο αποστολέας θεωρεί ότι έγινε σύγκρουση ή κάποιο σφάλμα, και επαναμεταδίδει με μεγαλύτερο contention window. Η βασική μέθοδος είναι κατάλληλη για μικρά ή αραιά δίκτυα με μικρά πακέτα, καθώς δεν επιβαρύνει το κανάλι με επιπλέον πλαίσια ελέγχου (Kurose & Ross, 2021; IEEE 802.11-2020a; Stallings, 2013).

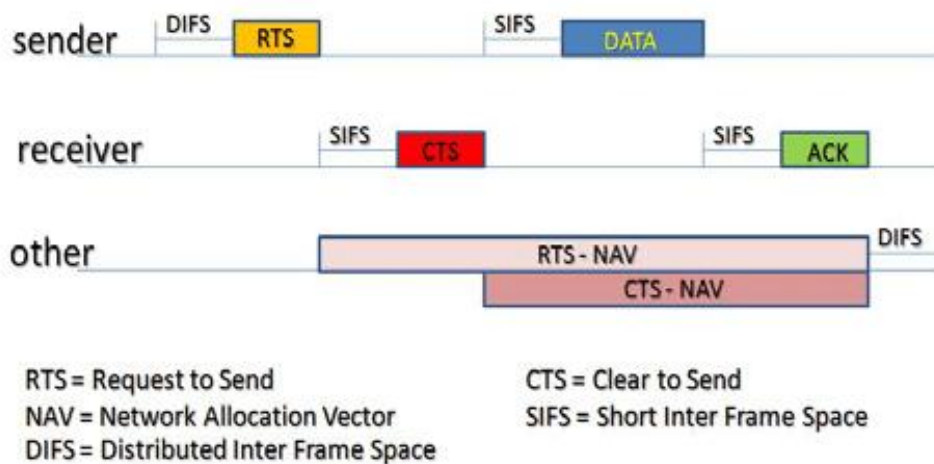
Η διαδικασία RTS/CTS αποτελεί επέκταση της βασικής μεθόδου και χρησιμοποιείται κυρίως για την αντιμετώπιση του προβλήματος των κρυφών σταθμών (hidden node problem), όπου δύο σταθμοί που δεν βρίσκονται εντός εμβέλειας μεταξύ τους προκαλούν συγκρούσεις στον κοινό δέκτη/Access Point (Bianchi, 2000; Gast, 2013). Πριν μεταδώσει, ο αποστολέας στέλνει ένα σύντομο RTS (Request To Send) που δηλώνει πόσο χρόνο θα χρειαστεί για τη μετάδοση, και ο δέκτης απαντά με CTS (Clear To Send), το οποίο λαμβάνουν όλες οι γειτονικές συσκευές. Έτσι, ακόμη και οι κρυφοί σταθμοί (που δεν ακούν τον αποστολέα) λαμβάνουν το CTS και, μέσω του NAV, αποφεύγουν μετάδοση για το συγκεκριμένο διάστημα, μειώνοντας σημαντικά την πιθανότητα συγκρούσεων στον δέκτη (Kurose & Ross, 2021; IEEE 802.11-2020a; Stallings, 2013).



Εικόνα 3.5: Αντιμετώπιση του προβλήματος κρυφών σταθμών μέσω RTS/CTS. Πηγή: Ergen (2002).

Ωστόσο, το RTS/CTS προσθέτει επιπλέον πλαίσια ελέγχου πριν από κάθε μετάδοση, αυξάνοντας την καθυστέρηση (overhead). Για μικρά πακέτα, το επιπλέον overhead του RTS/CTS επιβαρύνει το κανάλι περισσότερο από όσο ωφελεί. Για μεγάλα πακέτα όμως, μια σύγκρουση κοστίζει πολύ, άρα το RTS/CTS αξίζει. Γι' αυτό το RTS/CTS ενεργοποιείται μόνο όταν το πακέτο υπερβαίνει ένα συγκεκριμένο μέγεθος (RTS threshold), το οποίο καθορίζεται ως όριο πέρα από το οποίο το όφελος από την αποφυγή συγκρούσεων υπερκαλύπτει το επιπλέον overhead των πλαισίων ελέγχου (Bianchi, 2000; Gast, 2013; IEEE 802.11-2020a).

Η χρονική ακολουθία RTS/CTS/DATA/ACK φαίνεται στην Εικόνα 3.6.



Εικόνα 3.6: Χρονική ακολουθία πλαισίων RTS/CTS/DIFS/ACK με SIFS, DIFS και NAV. Πηγή: Yaw & Keeratiwintakorn (2011)

Στην πράξη, ο μηχανισμός RTS/CTS χρησιμοποιείται κυρίως σε δίκτυα υψηλής πυκνότητας χρηστών ή σε περιβάλλοντα με έντονο πρόβλημα κρυφών σταθμών, σε μεταδόσεις μεγάλων πακέτων και σε περιοχές με πολλές παρεμβολές ή κινητές συσκευές, όπου η τοπολογία αλλάζει συχνά (Bianchi, 2000; Gast, 2013; Stallings, 2013).

Αντίθετα, σε μικρά ή αραιά οικιακά δίκτυα, όπου οι συγκρούσεις είναι σπάνιες και τα πακέτα μικρά, η βασική μέθοδος CSMA/CA χωρίς RTS/CTS επιτυγχάνει συνήθως καλύτερη απόδοση, αποφεύγοντας το επιπλέον overhead των πλαισίων ελέγχου (IEEE 802.11-2020a; Bianchi, 2000; Gast, 2013; Stallings, 2013).

Συνολικά, η επιλογή μεταξύ βασικής μεθόδου και RTS/CTS εξαρτάται από τις συνθήκες του δικτύου και στοχεύει στην καλύτερη ισορροπία μεταξύ απόδοσης, καθυστέρησης και αξιοπιστίας. Για παράδειγμα, ένα γραφείο με πολλές συσκευές, έντονο πρόβλημα κρυφών σταθμών και μεγάλα πακέτα μπορεί να ωφεληθεί από το RTS/CTS, ενώ ένα μικρό οικιακό δίκτυο με λίγες συσκευές και μικρά πακέτα συνήθως λειτουργεί καλύτερα με τη βασική μέθοδο, χωρίς το επιπλέον overhead.

3.5 Κρυφοί και Εκτεθειμένοι Σταθμοί

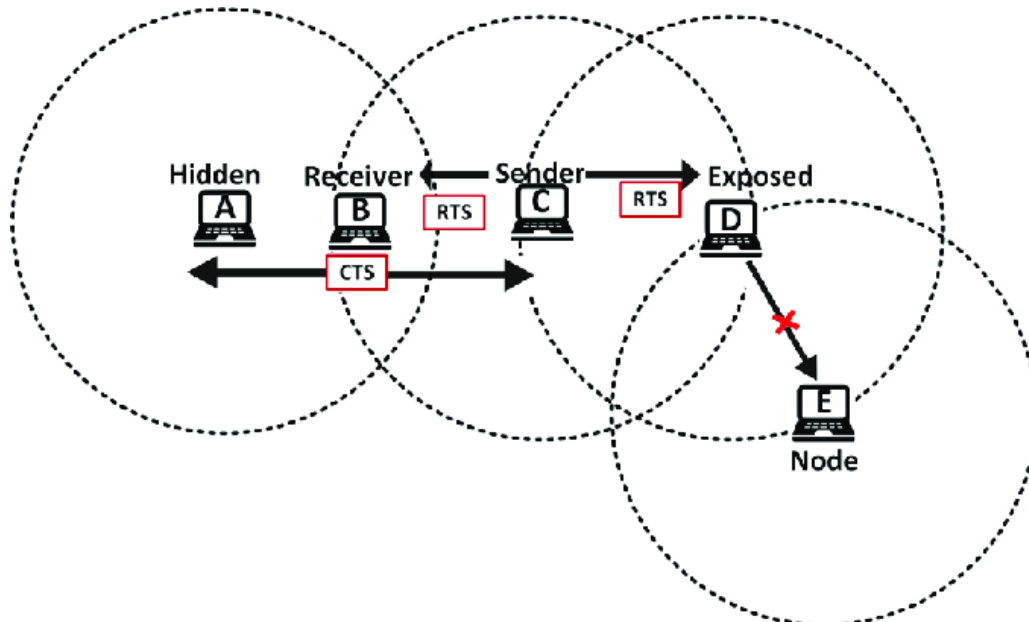
Στα ασύρματα δίκτυα IEEE 802.11, η κοινόχρηστη φύση του καναλιού δημιουργεί δύο χαρακτηριστικά φαινόμενα που επηρεάζουν την αποδοτικότητα, το πρόβλημα των κρυφών σταθμών (hidden stations) και το πρόβλημα των εκτεθειμένων σταθμών (exposed stations) (Bianchi, 2000; Gast, 2013; Kurose et al., 2021; Tinnirello & Choi, 2005).

Οι κρυφοί σταθμοί εμφανίζονται όταν δύο συσκευές δεν βρίσκονται εντός εμβέλειας η μία της άλλης, αλλά επικοινωνούν με τον ίδιο δέκτη. Επειδή δεν ακούν η μία την άλλη, θεωρούν λανθασμένα ότι το κανάλι είναι ελεύθερο και εκπέμπουν ταυτόχρονα, προκαλώντας σύγκρουση στον δέκτη (Kurose et al., 2021). Αυτό οδηγεί σε αυξημένες επαναμεταδόσεις και μειωμένη απόδοση του δικτύου (Bianchi, 2000; Stallings, 2013).

Οι εκτεθειμένοι σταθμοί είναι συσκευές που αποφεύγουν να στείλουν δεδομένα, επειδή λαμβάνουν το σήμα μιας γειτονικής μετάδοσης και νομίζουν λανθασμένα ότι θα προκαλέσουν παρεμβολή στον δέκτη της, παρόλο που στην πραγματικότητα η μετάδοσή τους δεν θα προκαλούσε καμία παρεμβολή (Gast, 2013; Stallings, 2013; Tinnirello & Choi, 2005).

Η Εικόνα 3. 7 απεικονίζει και τα δύο φαινόμενα ταυτόχρονα. Ο σταθμός C στέλνει RTS προς τον B. Ο σταθμός A (hidden) δεν βρίσκεται εντός εμβέλειας του C, οπότε δεν ακούει ούτε το RTS ούτε το

CTS και θεωρεί λανθασμένα ότι το κανάλι είναι ελεύθερο. Έτσι μπορεί να ξεκινήσει μετάδοση προς τον B ταυτόχρονα με τον C, προκαλώντας σύγκρουση στον δέκτη B. Από την άλλη, ο σταθμός D (exposed) λαμβάνει το RTS του C και αποφεύγει να στείλει δεδομένα στον E. Παρόλο που ο E βρίσκεται εκτός εμβέλειας του B, η μετάδοσή του D στον E δεν θα προκαλούσε καμία παρεμβολή.



Εικόνα 3.7: Κρυφοί και εκτεθειμένοι σταθμοί σε ασύρματο δίκτυο Πηγή: Weyulu et al., (2018).

Ο μηχανισμός RTS/CTS επιλύει σε μεγάλο βαθμό το πρόβλημα του κρυφού σταθμού, καθώς το πλαίσιο CTS ενημερώνει τους γειτονικούς κόμβους να αναβάλουν τις μεταδόσεις τους μέσω του δείκτη NAV (Bianchi, 2000; Stallings, 2013; IEEE 802.11-2020a).

Ωστόσο, ο μηχανισμός αυτός δεν επιλύει το πρόβλημα του εκτεθειμένου σταθμού. Ωστόσο, ο μηχανισμός αυτός δεν επιλύει το πρόβλημα του εκτεθειμένου σταθμού. Σε ορισμένες τοπολογίες, ένας εκτεθειμένος σταθμός που λαμβάνει το CTS (ή το RTS) θεωρεί λανθασμένα ότι το κανάλι είναι δεσμευμένο για όλο το διάστημα της μετάδοσης και παραμένει αδρανής, παρόλο που η μετάδοσή του προς τον δικό του δέκτη δεν θα προκαλούσε καμία σύγκρουση (Gast, 2013; Tinnirello & Choi, 2005).

3.6 Σύγκριση και Επιλογή Πρωτοκόλλων

Η επιλογή της κατάλληλης τεχνικής πρόσβασης στο μέσο εξαρτάται από τις απαιτήσεις του εκάστοτε δικτύου, το είδος της εφαρμογής και τους περιορισμούς του περιβάλλοντος λειτουργίας. Κάθε πρωτόκολλο παρουσιάζει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, τα οποία καθορίζουν την αποτελεσματικότητά του σε διαφορετικά σενάρια χρήσης.

Η επιλογή πρέπει να λαμβάνει υπόψη παραμέτρους όπως:

- η χωρητικότητα του δικτύου και η ανάγκη ταυτόχρονης εξυπηρέτησης πολλών χρηστών
- η κατανάλωση ενέργειας, κρίσιμη για εφαρμογές IoT
- η ανοχή σε παρεμβολές και θόρυβο
- η απαιτούμενη ποιότητα υπηρεσίας (QoS).

Το TDMA χρησιμοποιείται σε τηλεφωνικές κλήσεις (GSM), επικοινωνίες δημόσιας ασφάλειας όπως αστυνομία, πυροσβεστική και ασθενοφόρα (TETRA), καθώς και σε ασύρματα τηλέφωνα (DECT) και δορυφορικές επικοινωνίες. Το OFDMA είναι η βάση των 4G/5G δικτύων και του Wi-Fi 6, επιτρέποντας υψηλές ταχύτητες σε πυκνά περιβάλλοντα όπως αεροδρόμια και στάδια.

Το CSMA/CA χρησιμοποιείται στο οικιακό και εταιρικό Wi-Fi, στις προσωρινές απευθείας συνδέσεις (ad-hoc) όπως η κοινή χρήση αρχείων μεταξύ δύο κινητών, καθώς και σε δίκτυα IoT χαμηλής κατανάλωσης, παρόμοιοι μηχανισμοί CSMA/CA χρησιμοποιούνται και σε άλλα πρότυπα, όπως το IEEE 802.15.4 (Zigbee), το οποίο όμως είναι διαφορετικό από το IEEE 802.11 (IEEE, 2020; IEEE, 2020a; Stallings, 2013).

Πίνακας 3.5: Συγκριτική ανάλυση τεχνικών πολλαπλής πρόσβασης στο μέσο (TDMA, OFDMA, CSMA/CA)

	TDMA	OFDMA	CSMA/CA
Πλεονεκτήματα	Σταθερός χρόνος αναμονής, Χωρίς συγκρούσεις, Δυνατότητα εξοικονόμησης ενέργειας (με sleep modes εκτός του slot)	Παράλληλη μετάδοση πολλών χρηστών, Καλύτερη χρήση φάσματος, Ανθεκτικότητα σε multipath/fading, Δυναμική κατανομή πόρων	Απλό και αποκεντρωμένο, Κατάλληλο για μικρές και σύντομες μεταδόσεις, Χαμηλό κόστος υλοποίησης
Μειονεκτήματα	Απαιτεί συγχρονισμό, Αναποτελεσματικό σε χαμηλό φορτίο, Περιορίζεται από τον αριθμό slots	Πολύπλοκο, Υψηλό PAPR, Αυξημένη υπολογιστική ισχύς	Καθυστερήσεις σε υψηλό φορτίο, Δεν εγγυάται QoS
Χρήση	Φωνή, real-time, GSM/TETRA	4G/5G, Wi-Fi 6	Wi-Fi, IoT, ad-hoc

Η καταλληλότητα κάθε πρωτοκόλλου συνδέεται άμεσα με τον τύπο του δικτύου και τις προτεραιότητες του σχεδιαστή. Σε εφαρμογές όπου η χαμηλή καθυστέρηση και η QoS είναι κρίσιμες, προτιμώνται τεχνικές όπως η TDMA (σε δίκτυα όπως GSM/TETRA) ή QoS μηχανισμοί όπως το EDCA/HCF του IEEE 802.11e (στα δίκτυα Wi-Fi), αντί για το σπάνιο PCF.

Σε περιβάλλοντα υψηλής πυκνότητας χρηστών, το OFDMA προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα. Αντίστοιχα, σε δίκτυα με περιορισμένους πόρους, το CSMA/CA εξακολουθεί να αποτελεί μια αποδεκτή λύση, παρά τους περιορισμούς του. Η τελική επιλογή επομένως βασίζεται σε μια ισορροπία μεταξύ πολυπλοκότητας, αποδοτικότητας και απαιτήσεων εφαρμογής (Dahlman et al., 2018; Molisch, 2011; Rappaport, 2022; Stallings, 2013).

3.7 Συμπεράσματα

«Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκαν οι βασικές λειτουργίες του Επιπέδου Ζεύξης και οι τεχνικές πρόσβασης στο μέσο που χρησιμοποιούνται κυρίως σε ασύρματα δίκτυα, με αναφορά και σε ενσύρματα περιβάλλοντα. Αναλύθηκαν οι μηχανισμοί πλαισίωσης, διευθυνσιοδότησης, ελέγχου ροής και διαχείρισης σφαλμάτων, καθώς και ο ρόλος του MAC στην αποδοτική αξιοποίηση του κοινόχρηστου μέσου μετάδοσης. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στις τεχνικές πρόσβασης TDMA, OFDMA και CSMA/CA, οι οποίες καλύπτουν διαφορετικές απαιτήσεις ως προς την καθυστέρηση, τη φασματική αποδοτικότητα, την ενεργειακή κατανάλωση και την υποστήριξη πολλών χρηστών.

Επιπλέον, εξετάστηκαν οι μηχανισμοί DCF και PCF, καθώς και οι βασικές διαδικασίες πρόσβασης με ή χωρίς RTS/CTS, οι οποίες συμβάλλουν στην αντιμετώπιση προβλημάτων όπως οι κρυφοί και οι

εκτεθειμένοι σταθμοί. Η ανάλυση έδειξε ότι δεν υπάρχει μία ενιαία μέθοδος πρόσβασης που να είναι βέλτιστη για όλα τα περιβάλλοντα. Αντιθέτως, η επιλογή εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της εφαρμογής και τις απαιτήσεις του δικτύου.

Συνολικά, το Επίπεδο Ζεύξης αποτελεί κρίσιμο μηχανισμό για την αξιοπιστία και την αποδοτικότητα της επικοινωνίας, ενώ οι μέθοδοι προσπέλασης στο μέσο καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την επίδοση των σύγχρονων δικτύων. Η κατανόηση των τεχνικών αυτών είναι απαραίτητη για τον σχεδιασμό αποδοτικών, αξιόπιστων και προσαρμόσιμων δικτυακών συστημάτων, τόσο σε τοπικό όσο και σε ευρύτερο επίπεδο.

Κεφάλαιο 4ο: Φυσικό Επίπεδο και Τεχνικές Μετάδοσης

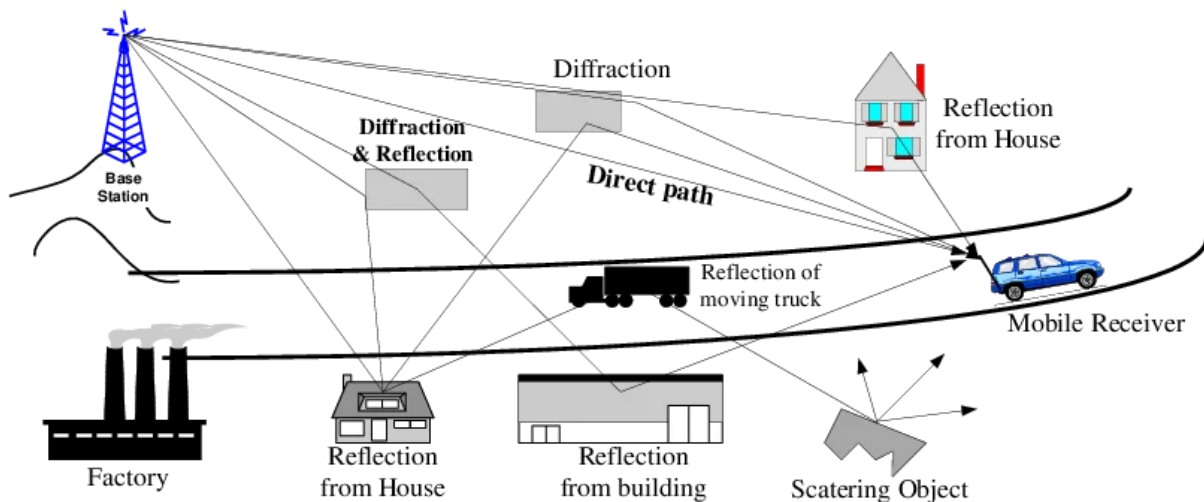
Το φυσικό επίπεδο (Physical Layer) αποτελεί τη βάση της ασύρματης επικοινωνίας, καθώς καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο μεταδίδονται τα bit μέσω του καναλιού. Ορίζει τις τεχνολογίες που καθορίζουν την απόδοση, την αξιοπιστία και την ποιότητα της επικοινωνίας. Σε αυτό το κεφάλαιο εξετάζονται οι θεωρητικές αρχές διάδοσης των ραδιοκυμάτων, οι κύριες τεχνικές διαμόρφωσης, διασποράς και πολυπλεξίας που χρησιμοποιούνται στα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα, καθώς και οι προηγμένες χωρικές τεχνικές. Επιπλέον, παρουσιάζονται οι βασικές πηγές παρεμβολών και θορύβου, όπως και ζητήματα που σχετίζονται με την ενεργειακή απόδοση και τις επιπτώσεις στην υγεία.

4.1 Μηχανισμοί και Απώλειες Διάδοσης

Η ασύρματη επικοινωνία βασίζεται στη χρήση ραδιοκυμάτων, τα οποία ανήκουν στο ευρύτερο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα και καλύπτουν συχνότητες από μερικά kHz έως και εκατοντάδες GHz. Η μετάδοσή τους αποτελεί θεμελιώδη μηχανισμό για τα περισσότερα δίκτυα επικοινωνιών, από τα πρώτα συστήματα κινητής τηλεφωνίας έως τις σύγχρονες τεχνολογίες 5G και Wi-Fi 6 (Goldsmith, 2005).

Η διάδοση των ραδιοκυμάτων εξαρτάται από την απόσταση, τα εμπόδια στο χώρο και τις συνθήκες της ατμόσφαιρας. Το σήμα μπορεί να φτάσει στον δέκτη μέσω ευθείας διάδοσης, ανάκλασης, περίθλασης και σκέδασης. Στην ευθεία διάδοση (Line-of-Sight - LOS) το σήμα πηγαίνει κατευθείαν από τον πομπό στον δέκτη. Η ανάκλαση και η περίθλαση το βοηθούν να παρακάμπτει εμπόδια. Η σκέδαση το διασκορπίζει όταν χτυπά ανώμαλες επιφάνειες (Goldsmith, 2005; Molisch, 2011; Rappaport, 2022).

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.1, το σήμα μπορεί να φτάσει στον δέκτη μέσω διαφόρων μηχανισμών διάδοσης, όπως η ευθεία διάδοση (LOS), η ανάκλαση σε επιφάνειες και η περίθλαση γύρω από



εμπόδια.

Εικόνα 4.1: Μηχανισμοί διάδοσης σήματος – LOS. Πηγή: Ugweje, O. C. (2004)

Σε χαμηλές συχνότητες (κάτω από 1 GHz) τα ραδιοκύματα καλύπτουν μεγάλες αποστάσεις και ακολουθούν την καμπυλότητα της Γης. Σε υψηλότερες συχνότητες, όπως τα μικροκύματα και τα

κύματα χιλιοστομετρικού μήκους (mmWave - millimeter waves), η διάδοση είναι κυρίως ευθύγραμμη και η διείσδυση σε εμπόδια περιορισμένη (Rappaport, 2022).

Οι απώλειες διάδοσης (path loss) αυξάνονται με την απόσταση και τα εμπόδια. Για την εκτίμηση της απόδοσης χρησιμοποιούνται απλά μοντέλα όπως το μοντέλο απωλειών ελεύθερου χώρου (free-space path loss) για ιδανικές συνθήκες, και πιο σύνθετα όπως τα log-distance, Okumura-Hata και COST 231 για αστικά περιβάλλοντα (Molisch, 2011; Rappaport, 2022).

Σημαντικό φαινόμενο είναι το πολλαπλό μονοπάτι (multipath propagation), όπου το σήμα φτάνει στον δέκτη μέσω πολλαπλών διαδρομών λόγω ανακλάσεων και περιθλάσεων (Molisch, 2011). Αυτό προκαλεί παρεμβολές (fading) και καθυστερήσεις που υποβαθμίζουν την επικοινωνία (Rappaport, 2022).

Σε ορισμένα συστήματα, όπως το MIMO, η πολυδιαδρομικότητα μπορεί να αξιοποιηθεί ώστε να βελτιωθεί η χωρητικότητα και η αξιοπιστία της ζεύξης. Οι πολλαπλές διαδρομές χρησιμοποιούνται σαν ξεχωριστά κανάλια που μεταφέρουν διαφορετικά δεδομένα ταυτόχρονα, αυξάνοντας έτσι την ταχύτητα μετάδοσης (Goldsmith, 2005; Sauter, 2021).

Η διάδοση σε εσωτερικούς χώρους είναι πιο περίπλοκη λόγω των ανακλάσεων σε τοίχους, οροφές και έπιπλα. Γι' αυτό χρησιμοποιείται το OFDM, που μειώνει τις παρεμβολές και εξασφαλίζει αξιόπιστη επικοινωνία (Dahlman et al., 2018).

4.2 Φυσικά Μέσα Ασύρματης Μετάδοσης

Τα ασύρματα συστήματα χρησιμοποιούν τέσσερα κύρια φυσικά μέσα μετάδοσης. Η υπέρυθρη ακτινοβολία (IR) για μικρές αποστάσεις με χαμηλό κόστος, τα ραδιοκύματα (RF) για τα περισσότερα ασύρματα δίκτυα, τα μικροκύματα για ζεύξεις σημείο-προς-σημείο και δορυφορικά κανάλια, και η οπτική μετάδοση ελεύθερου χώρου (FSO) για πολύ υψηλούς ρυθμούς.

Οι χαμηλότερες συχνότητες προσφέρουν καλύτερη κάλυψη και διείσδυση σε εμπόδια, ενώ οι υψηλότερες παρέχουν μεγαλύτερη χωρητικότητα αλλά απαιτούν κατευθυντικές κεραίες. Καιρικά φαινόμενα όπως βροχή και ομίχλη επηρεάζουν τα μικροκύματα και το FSO, ενώ ο έντονος φωτισμός επηρεάζει το IR (Molisch, 2011; Rappaport, 2014; Stallings, 2013). Η επιλογή του κατάλληλου μέσου εξαρτάται από την εμβέλεια, την ταχύτητα, την αξιοπιστία και το κόστος.

4.2.1 Υπέρυθη Μετάδοση

Η υπέρυθρη (IR) μετάδοση χρησιμοποιεί αόρατη ακτινοβολία (~850–950 nm). Επειδή δεν διαπερνά τοίχους, απαιτεί οπτική επαφή (LOS) μεταξύ πομπού και δέκτη (Molisch, 2011; Stallings, 2013).

Η IR μετάδοση δεν επηρεάζεται από ραδιοπαρεμβολές, επειδή λειτουργεί εκτός του RF φάσματος και περιορίζεται στον φυσικό χώρο μετάδοσης. Επιπλέον, είναι ασφαλές, επειδή το σήμα παραμένει εντός του χώρου. Με αυτόν τον τρόπο, το σήμα παραμένει περιορισμένο στον χώρο λειτουργίας, μειώνοντας την πιθανότητα κλοπής. Ο εξοπλισμός είναι απλός, χαμηλού κόστους και κατανάλωσης (Stallings, 2013). Οι κύριοι περιορισμοί είναι η μικρή εμβέλεια, η ευαισθησία σε εμπόδια και έντονο φωτισμό, και οι χαμηλοί ρυθμοί μετάδοσης σε σχέση με τις RF τεχνολογίες (Molisch, 2011; Rappaport, 2014).

Χρησιμοποιείται κυρίως σε τηλεχειριστήρια, νοσοκομεία και εργαστήρια όπου απαγορεύονται οι RF εκπομπές, σε βιομηχανικούς αισθητήρες, συστήματα βοηθητικής ακρόασης σε αίθουσες και θέατρα, ελέγχους πρόσβασης εντός δωματίου και σύνδεση συσκευών με εκτυπωτές χωρίς καλώδιο (Stallings, 2013).

4.2.2 Ραδιοκύματα

Τα ραδιοκύματα (RF - Radio Frequency), με εύρος συχνοτήτων από 3 kHz έως 300 GHz, είναι το βασικό μέσο για όλες σχεδόν τις ασύρματες επικοινωνίες, Wi-Fi, Bluetooth, κυψελοειδή δίκτυα και δορυφορικές υπηρεσίες. Στις χαμηλές ζώνες (<1 GHz) επιτυγχάνεται μεγάλη κάλυψη και διείσδυση σε εμπόδια, ενώ στις υψηλές ζώνες συχνοτήτων επιτυγχάνονται πολύ υψηλές ταχύτητες αλλά με μικρότερη εμβέλεια. Σε ζώνες mmWave η βροχή και οι υδρατμοί προκαλούν επιπλέον εξασθένηση του σήματος.

Στην πράξη, οι ζώνες κάτω του 1 GHz χρησιμοποιούνται για ευρεία κάλυψη (π.χ. κυψελοειδή δίκτυα), οι ζώνες 2.4/5/6 GHz για Wi-Fi, και τα mmWave για 5G και σύνδεση σταθμών βάσης με το κεντρικό δίκτυο (backhaul). Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται αναλυτικά οι ζώνες RF με τις ιδιότητες και τις εφαρμογές τους (Stallings, 2013; Molisch, 2011; Rappaport, 2022).

Πίνακας 4.1: Ενδεικτικές ζώνες RF, εύρος και χρήσεις

Ζώνη	Ενδεικτικό Εύρος	Χρήσεις
LF (Low Frequency), MF (Medium Frequency), HF (High Frequency)	30 kHz–30 MHz	AM ραδιόφωνο, στρατιωτικές επικοινωνίες, πλοήγηση πλοίων και αεροσκαφών
VHF (Very High Frequency)	30–300 MHz	FM ραδιόφωνο, τηλεόραση, επικοινωνίες αεροσκαφών
UHF (Ultra High Frequency)	300 MHz–1 GHz	Κινητή τηλεφωνία (GSM/LTE), IoT
ISM 2.4 GHz	2.400–2.4835 GHz	Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee
U-NII (Unlicensed National Information Infrastructure) 5 GHz	5.15–5.85 GHz	Video streaming, online gaming, τηλεδιασκέψεις
6 GHz	5.925–7.125 GHz	VR, AR, μεταφορά μεγάλων αρχείων
SHF (Super High Frequency) (μικροκύματα)	3–30 GHz	5G, backhaul, δορυφορικές επικοινωνίες (C-band, Ku-band), ραντάρ μετεωρολογίας
EHF (Extremely High Frequency) (mmWave)	24–100+ GHz	Χώροι με πολλούς χρήστες ταυτόχρονα, όπως στάδια, αεροδρόμια, εμπορικά κέντρα

Συνοψίζοντας, οι ζώνες κάτω του 1 GHz προσφέρουν μεγάλη κάλυψη με χαμηλότερες ταχύτητες, ενώ οι ζώνες 5/6 GHz και mmWave επιτρέπουν πολύ υψηλές ταχύτητες σε μικρότερες αποστάσεις. Οι καιρικές συνθήκες επηρεάζουν κυρίως τα μικροκύματα και τα mmWave. Η επιλογή ζώνης εξαρτάται από την εμβέλεια, τη διείσδυση και τις απαιτήσεις της εφαρμογής (Stallings, 2013; Molisch, 2011; Rappaport, 2022).

4.2.3 Μικροκύματα

Τα μικροκύματα (1–30 GHz) απαιτούν οπτική επαφή (LOS) μεταξύ πομπού και δέκτη και χαρακτηρίζονται από υψηλή κατευθυντικότητα κεραιών. Αυτό επιτρέπει πολύ υψηλές ταχύτητες σε συνδέσεις σημείου προς σημείο, αλλά απαιτεί οπτική επαφή και ακριβή ευθυγράμμιση των κεραιών. Η βροχή και οι υδρατμοί προκαλούν εξασθένηση, ιδίως πάνω από 10 GHz (ITU-R, 2005; Molisch, 2011; Rappaport, 2014).

Χρησιμοποιούνται κυρίως για σύνδεση σταθμών βάσης με το κεντρικό δίκτυο (backhaul) από 2G έως 5G, για συνδέσεις μεταξύ κτιρίων και εγκαταστάσεων, και για δορυφορικές επικοινωνίες στις ζώνες

C-band, Ku-band και Ka-band. Επίσης χρησιμοποιούνται σε ραντάρ μετεωρολογίας και σταθερή ασύρματη πρόσβαση όπου δεν φτάνει η οπτική ίνα (Molisch, 2011; Rappaport, 2014).

Οι πιο συνηθισμένες ζώνες σε εμπορικά δίκτυα είναι οι 6–38 GHz. Οι ζώνες E-band (71–86 GHz) χρησιμοποιούνται για πολύ υψηλές ταχύτητες σε μικρές αποστάσεις (ETSI, 2020). Στις δορυφορικές επικοινωνίες χρησιμοποιούνται οι ζώνες C-band, Ku-band και Ka-band (Molisch, 2011; Rappaport, 2014). Στον Πίνακα 4.2 συνοψίζονται ενδεικτικές ζώνες, βασικές ιδιότητες και τυπικές χρήσεις των μικροκυμάτων.

Πίνακας 4.2: Ενδεικτικές μικροκυματικές ζώνες, ιδιότητες και χρήσεις

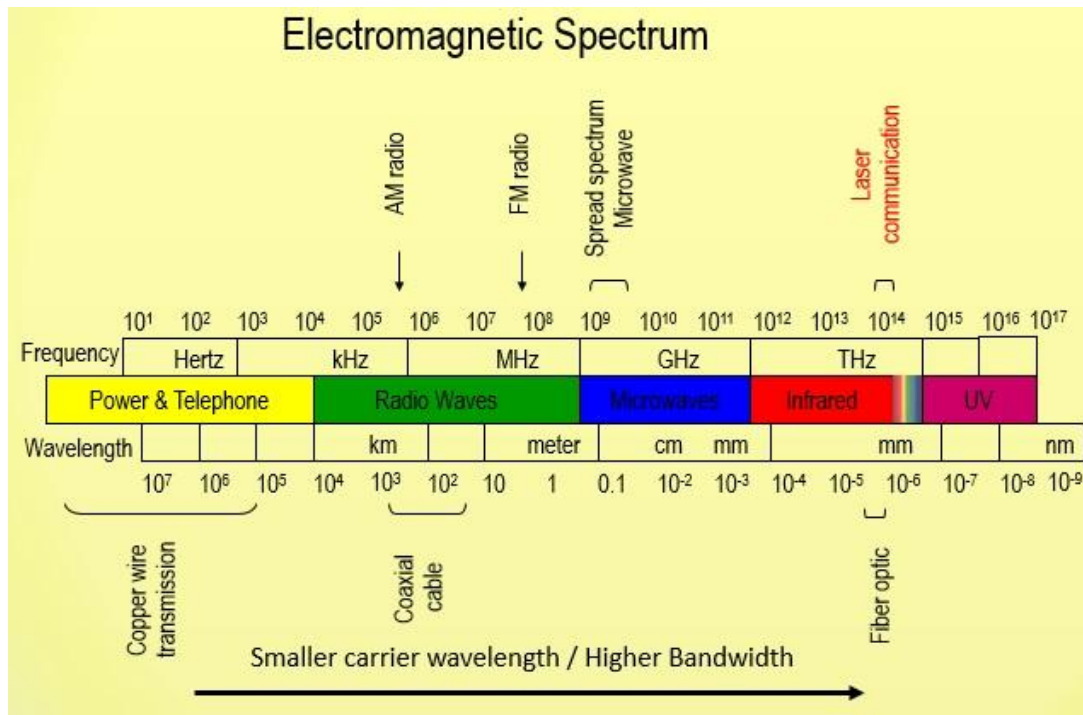
Ζώνη/Συχνότητες	Ενδεικτικό εύρος	Ιδιότητες	Ενδεικτικές εφαρμογές
6–11 GHz	7–56 MHz	Μεγάλες αποστάσεις (10–50 km), λιγότερη εξασθένηση από βροχή	Backhaul σε αγροτικές περιοχές
13–23 GHz	14–56 MHz	Ισορροπία εμβέλειας-ταχύτητας, 3–15 km	Σύνδεση δικτύων σε πόλεις
24–40 GHz	28–112 MHz	Σύντομες ζεύξεις 0.5–3 km, Gbps ταχύτητες	Μικρές κεραιές σε πυκνές περιοχές και πανεπιστήμια
E-band 71–86 GHz	250–2000 MHz	10+ Gbps, αυστηρή ευθυγράμμιση	Υψηλές ταχύτητες σε πόλεις
Δορυφορικά C/Ku/Ka	36–500 MHz (transponder)	Παγκόσμια κάλυψη, μεγάλη καθυστέρηση	Δορυφορική TV, VSAT, απομακρυσμένες περιοχές

Συνοψίζοντας, τα μικροκύματα προσφέρουν πολύ υψηλές ταχύτητες σε μικρές και μεσαίες αποστάσεις, υπό την προϋπόθεση οπτικής επαφής. Η απόδοσή τους επηρεάζεται κυρίως από βροχόπτωση, ιδίως πάνω από 18 GHz, ενώ η υψηλή κατευθυντικότητα των κεραιών μειώνει τις παρεμβολές (Molisch, 2011; Rappaport, 2014).

4.2.4 Laser / Free Space Optics (FSO)

Η οπτική μετάδοση ελεύθερου χώρου (FSO - Free-Space Optics) μεταδίδει δεδομένα μέσω στενής δέσμης laser (τυπικά στα 850, 1310 ή 1550 nm) χωρίς καλώδιο και χωρίς αδειοδότηση φάσματος, αρκεί να υπάρχει οπτική επαφή (LOS). Σε αποστάσεις από λίγες εκατοντάδες μέτρα έως λίγα χιλιόμετρα επιτυγχάνει ρυθμούς πολλών Gbps με γρήγορη εγκατάσταση (Khalighi & Uysal, 2014).

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.2, η FSO μεταδίδει δεδομένα μέσω στενής laser δέσμης απευθείας από τον πομπό στον δέκτη, απαιτώντας οπτική επαφή.



Εικόνα 4.2: Μετάδοση δεδομένων μέσω FSO. Πηγή: Alkholidi, A. G., & Altowij, K. S. (2014).

Βασικό πλεονέκτημα της FSO είναι ότι χρησιμοποιεί φως αντί για ραδιοκύματα. Άρα δεν απαιτείται άδεια φάσματος, δεν δημιουργούνται ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές προς RF συστήματα και το σήμα δεν διαρρέει αλλά πηγαίνει μόνο στον δέκτη, ενισχύοντας την ασφάλεια της πληροφορίας. Σε αποστάσεις από μερικές εκατοντάδες μέτρα έως λίγα χιλιόμετρα μπορούν να επιτευχθούν ρυθμοί πολλών Gbps με πολύ μικρό χρόνο εγκατάστασης ιδιαίτερα χρήσιμο για διασύνδεση κτιρίων και εγκαταστάσεων (π.χ. πανεπιστημιούπολη), καθώς και για προσωρινές υποδομές (Khalighi & Uysal, 2014; Rappaport, 2014).

Το κύριο μειονέκτημα είναι ότι οι καιρικές συνθήκες επηρεάζουν πολύ την απόδοση της FSO. Η απόδοση της FSO επηρεάζεται έντονα από την ομίχλη και τα νέφη, ενώ οι μηχανικές ταλαντώσεις των κτιρίων απαιτούν σταθερή ευθυγράμμιση της δέσμης. Γι' αυτό σε περιοχές με συχνή ομίχλη συνιστάται συνδυασμός FSO με μικροκύματα (RF/FSO), ώστε αν η FSO δεν λειτουργεί, τα μικροκύματα να διατηρούν τη σύνδεση (Khalighi & Uysal, 2014; Majumdar & Ricklin, 2008).

Χρησιμοποιείται για διασύνδεση κτιρίων και πανεπιστημιούπολεων, backhaul 4G/5G όπου δεν υπάρχει οπτική ίνα, προσωρινά δίκτυα σε εκδηλώσεις ή μετά από βλάβες, και ζεύξεις μεταξύ δορυφόρων (Andrews & Phillips, 2005; Majumdar & Ricklin, 2008).

Για την επιτυχή λειτουργία των συστημάτων FSO απαιτείται ακριβής υπολογισμός των απωλειών διάδοσης, σωστή επιλογή μήκους κύματος και αυστηρή τήρηση των διεθνών προτύπων ασφαλείας, όπως το IEC 60825-1 για την προστασία των οφθαλμών από την ακτινοβολία laser (IEC, 2014a). Υπό αυτές τις προϋποθέσεις, η τεχνολογία FSO αποτελεί μια ταχεία και ασφαλή λύση ασύρματης διασύνδεσης, ιδιαίτερα χρήσιμη για την αποκατάσταση δικτύων σε περιπτώσεις βλαβών ή φυσικών καταστροφών (Khalighi & Uysal, 2014).

4.2.5 Σύγκριση Φυσικών Μέσων Ασύρματης Μετάδοσης

Η επιλογή φυσικού μέσου εξαρτάται από την εμβέλεια, την ανάγκη οπτικής επαφής (LOS), την αντοχή στις καιρικές συνθήκες, το κόστος, τον χρόνο εγκατάστασης και την αδειοδότηση. Στους Πίνακες 4.3α και 4.3β συνοψίζονται τα τέσσερα βασικά μέσα.

Πίνακας 4.3α: Βασικά χαρακτηριστικά φυσικών μέσων ασύρματης μετάδοσης

Μέσο	Τυπικό φάσμα	Εμβέλεια & Ταχύτητα	Απαίτηση LOS	Ευαισθησία περιβάλλοντος
Υπέρυθρα (IR)	Υπέρυθρο φως, 300 GHz–400 THz	1–10 m, Kbps–Mbps	Ναι	Έντονος φωτισμός, δεν διαπερνά τοίχους
Ραδιοκύματα (RF)	3 kHz–300 GHz	m–km, Kbps–Gbp	Όχι	Καλή διείσδυση, θόρυβος/συμφόρηση
Μικροκύματα	~1–30 GHz	1–50 km, Mbps–Gbps	Ναι	Βροχή/σκίαση (ιδίως >18 GHz)
FSO (Laser)	850/1310/1550 nm	εκατοντάδες m – λίγα km, Gbps	Ναι	Ομίχλη/νέφη επηρεάζουν έντονα

Πίνακας 4.3β: Πλεονεκτήματα, μειονεκτήματα και εφαρμογές

Μέσο	Κύρια πλεονεκτήματα	Κύρια μειονεκτήματα	Ενδεικτικές εφαρμογές
Υπέρυθρα (IR)	Πολύ χαμηλό κόστος, μηδενικές RF παρεμβολές, το σήμα παραμένει εντός χώρου	Μικρή εμβέλεια, αυστηρή στόχευση προς τον δέκτη, χαμηλές ταχύτητες	Τηλεχειριστήρια, συνδέσεις IrDA, ιατρικοί/βιομηχανικοί χώροι χωρίς RF
Ραδιοκύματα (RF)	Ευελιξία, φορητότητα, ευρεία υποστήριξη	Παρεμβολές σε κοινόχρηστες ζώνες, αδειοδότηση στις υπόλοιπες	Wi-Fi, Bluetooth, κυψελοειδή (2G–5G), IoT
Μικροκύματα	Υψηλές ταχύτητες, μικρές παρεμβολές	Απαιτεί ακριβή ευθυγράμμιση, αδειοδότηση φάσματος, επηρεάζεται από βροχή	Backhaul, εταιρικές ζεύξεις κτιρίων
FSO (Laser)	Πολύ υψηλές ταχύτητες, χωρίς άδεια φάσματος, γρήγορη εγκατάσταση, υψηλή κατευθυντικότητα	Ευαισθησία σε καιρό, απαιτεί αυστηρή ευθυγράμμιση	Διασύνδεση κτιρίων, backhaul, δορυφορικές επικοινωνίες

Η IR ταιριάζει σε πολύ μικρές αποστάσεις και χώρους που αποφεύγουν RF. Τα RF είναι η γενική λύση για πρόσβαση και κινητικότητα με καλή διείσδυση εμποδίων. Τα μικροκύματα προτιμώνται για σταθερές ζεύξεις και backhaul. Η FSO προσφέρει πολύ υψηλές ταχύτητες χωρίς καλώδια, αλλά απαιτεί οπτική επαφή, αλλά είναι ευαίσθητη στον καιρό και συνδυάζεται συχνά με μικροκύματα ως εφεδρική υβριδική λύση. Η επιλογή εξαρτάται πάντα από την εφαρμογή.

4.3 Τεχνικές Διαμόρφωσης Σήματος

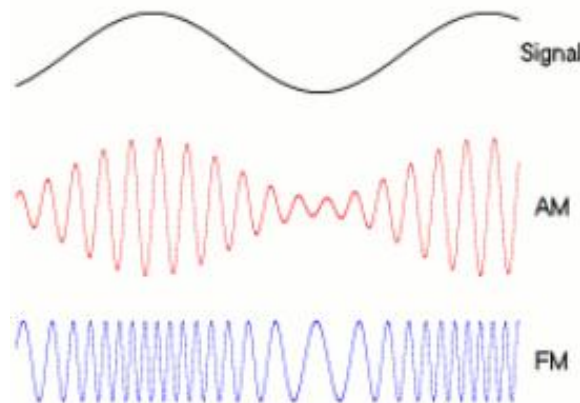
Η διαμόρφωση σήματος μεταφέρει την πληροφορία αλλάζοντας χαρακτηριστικά, όπως το πλάτος, η συχνότητα ή η φάση, ώστε ο δέκτης να την ανακτήσει σωστά. Η επιλογή της τεχνικής καθορίζει την ταχύτητα μετάδοσης, την ενεργειακή κατανάλωση και την ανθεκτικότητα σε θόρυβο (Proakis & Salehi, 2008; Sklar, 2001; Molisch, 2011).

4.3.1 Αναλογικές τεχνικές

Η διαμόρφωση πλάτους (AM - Amplitude Modulation) μεταβάλλει το πλάτος της φέρουσας (carrier) ανάλογα με την πληροφορία. Είναι απλή στην υλοποίηση αλλά ευάλωτη σε θόρυβο, γι' αυτό χρησιμοποιείται κυρίως σε AM ραδιόφωνο. Υπάρχουν δύο εκδοχές, η DSB-LC (Double Sideband with Large Carrier) που είναι απλή αλλά σπαταλά ενέργεια, και η SSB (Single Sideband) που είναι πιο αποδοτική αλλά απαιτεί πιο περίπλοκο εξοπλισμό (Couch, 2012; Haykin, 2009).

Η FM χρησιμοποιεί μεγαλύτερο εύρος ζώνης, αλλά προσφέρει καλύτερη αντοχή στον θόρυβο και σταθερότερη ποιότητα ήχου, καθιστώντας την ιδανική για μουσικές εκπομπές (Sklar, 2001).

Όπως φαίνεται στο Εικόνα 4.4, στο AM το πλάτος του κύματος αλλάζει ανάλογα με το σήμα, οπότε ο θόρυβος το επηρεάζει άμεσα. Στο FM αλλάζει η συχνότητα, οπότε ο θόρυβος πλάτους δεν επηρεάζει την πληροφορία, γι' αυτό το FM προσφέρει καλύτερη ποιότητα ήχου (Sklar, 2001).



Εικόνα 4.3: Σύγκριση AM και FM διαμόρφωσης. Πηγή: Wikimedia Commons, “Am Fm”

Η διαμόρφωση φάσης (PM - Phase Modulation) μεταβάλλει τη φάση της φέρουσας και αποτέλεσε τη βάση για τις ψηφιακές τεχνικές PSK (Phase Shift Keying). Γενικά, οι αναλογικές τεχνικές χρησιμοποιούνται σήμερα κυρίως σε ραδιοφωνία, ενώ τα δίκτυα δεδομένων έχουν μεταβεί σε ψηφιακές διαμορφώσεις (Rappaport, 2014).

4.3.2 Ψηφιακές Τεχνικές

Στις ψηφιακές διαμορφώσεις, η πληροφορία των bit αντιστοιχίζεται σε διακριτές αλλαγές της κυματομορφής. Υπάρχουν τρεις βασικές κατηγορίες: ASK/OOK (αλλαγή πλάτους), FSK/GFSK (αλλαγή συχνότητας) και PSK/QAM (αλλαγή φάσης), καθεμία με διαφορετικά πλεονεκτήματα ανάλογα με τις συνθήκες.

Η ASK/OOK (Amplitude Shift Keying / On-Off Keying) κωδικοποιεί την πληροφορία μέσω παρουσίας ή απουσίας σήματος για να μεταδώσει bits, "on" = bit 1, "off" = bit 0. Είναι η πιο απλή τεχνική αλλά ευαίσθητη σε θόρυβο. Συναντάται σε υπέρυθρα/οπτικά κανάλια μικρής εμβέλειας (όπου

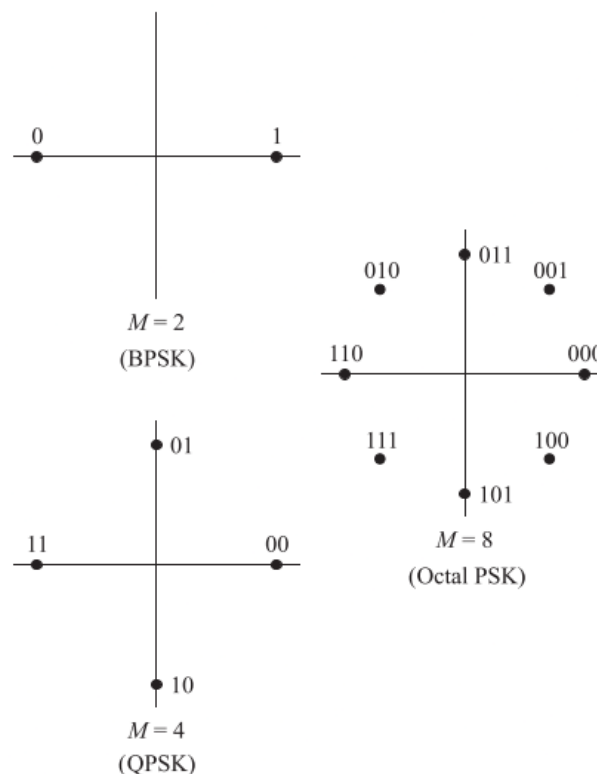
η απλότητα υπερτερεί), RFID (Radio Frequency Identification) tags και χαμηλού κόστους ασύρματα συστήματα, όπως τηλεχειριστήρια και αισθητήρες (Couch, 2012).

Έπειτα, η διαμόρφωση FSK/GFSK (Frequency Shift Keying / Gaussian Frequency Shift Keying) κωδικοποιεί bits ως διαφορετικές συχνότητες (π.χ. f_1 για bit 0 και f_2 για bit 1). Είναι ανθεκτική σε θόρυβο πλάτους και εύκολη στην υλοποίηση, αλλά καταναλώνει μεγαλύτερο εύρος ζώνης από την PSK. Χρησιμοποιείται στο Bluetooth Classic και σε IoT δίκτυα (LoRa) (Molisch, 2011; Rappaport, 2014).

Επιπλέον, η διαμόρφωση PSK (Phase Shift Keying) κωδικοποιεί bits αλλάζοντας τη φάση του σήματος, προσφέροντας καλύτερη φασματική αποδοτικότητα και ενεργειακή απόδοση από την FSK. Υπάρχουν διάφορες εκδοχές ανάλογα με τον αριθμό των φάσεων:

- Η BPSK (Binary PSK) χρησιμοποιεί δύο φάσεις (0° και 180°) για 1 bit/σύμβολο και είναι ιδανική για αδύναμο σήμα (χαμηλό SNR).
- Η QPSK (Quadrature PSK) χρησιμοποιεί τέσσερις φάσεις (0° , 90° , 180° , 270°) για 2 bits/σύμβολο, διπλασιάζοντας την ταχύτητα στο ίδιο εύρος ζώνης.
- Παραλλαγές όπως η $\pi/4$ -QPSK αποφεύγει απότομες αλλαγές φάσης, κάτι που βοηθά τους ενισχυτές να λειτουργούν πιο αποδοτικά.
- Υψηλότερες τάξεις όπως 8-PSK και 16-PSK επιτυγχάνουν μεγαλύτερες ταχύτητες αλλά απαιτούν καλύτερο σήμα (Proakis & Salehi, 2008).

Όπως φαίνεται στο Εικόνα 4.4, τα διαγράμματα χώρου σήματος για BPSK, QPSK και 8-PSK δείχνουν την κατανομή των συμβόλων στο επίπεδο σήματος (Proakis & Salehi, 2008).

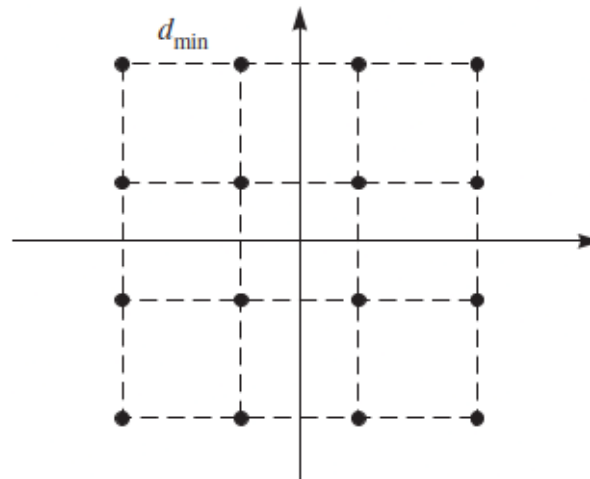


Εικόνα 4.4: Διαγράμματα χώρου σήματος για BPSK, QPSK και 8-PSK. Πηγή: Proakis & Salehi (2008).

Τέλος, η διαμόρφωση QAM (Quadrature Amplitude Modulation) συνδυάζει αλλαγές πλάτους και φάσης, επιτρέποντας πολλά bits ανά σύμβολο:

- 16-QAM (4 bits/σύμβολο): ισορροπία ταχύτητας και αξιοπιστίας
- 64-QAM (6 bits/σύμβολο): καλές συνθήκες σήματος
- 256-QAM (8 bits/σύμβολο): πολύ καλό σήμα
- 1024-QAM (10 bits/σύμβολο): σχεδόν ιδανικές συνθήκες.

Το Εικόνα 4.5 απεικονίζει το constellation της 16-QAM, όπου τα 16 σύμβολα κατανέμονται σε κανονικό πλέγμα (Proakis & Salehi, 2008).



Εικόνα 4.5: Constellation 16-QAM. Πηγή: Proakis & Salehi (2008)

Όσο υψηλότερη η τάξη, τόσο μεγαλύτερη η ταχύτητα αλλά και η απαίτηση για καλό σήμα. Είναι η κυρίαρχη διαμόρφωση σε Wi-Fi 5/6/7, LTE και 5G (Dahlman et al., 2018; Sauter, 2021).

4.3.3 Επιλογή Τεχνικής Διαμόρφωσης

Η επιλογή διαμόρφωσης εξαρτάται από την ποιότητα του σήματος, που μετριέται με τον λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR -Signal-to-Noise Ratio). Όσο καλύτερο το SNR, τόσο υψηλότερη διαμόρφωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί και άρα μεγαλύτερη ταχύτητα (Goldsmith, 2005). Τα σύγχρονα συστήματα (Wi-Fi 6, LTE, 5G) επιλέγουν αυτόματα τη βέλτιστη διαμόρφωση ανάλογα με τις συνθήκες: 1024-QAM για πολύ καλό σήμα, BPSK για πολύ αδύναμο σήμα (Dahlman et al., 2018).

Εξίσου σημαντικός είναι ο προϋπολογισμός ζεύξης (link budget), δηλαδή ο υπολογισμός της ισχύος που φτάνει στον δέκτη. Για παράδειγμα, σε Wi-Fi 2.4 GHz στα 50 μέτρα επιτυγχάνονται ~65 Mbps με 64-QAM, ενώ στα 100 μέτρα η ταχύτητα πέφτει στα 39 Mbps με 16-QAM (Goldsmith, 2005; Rappaport, 2022).

Σε πραγματικές συνθήκες απαιτείται 5–15 dB καλύτερο σήμα σε σχέση με τις θεωρητικές τιμές, λόγω multipath και fading (Goldsmith, 2005). Τα σύγχρονα συστήματα (Wi-Fi 6, LTE, 5G) χρησιμοποιούν προσαρμοστική διαμόρφωση (AMC - Adaptive Modulation and Coding) που επιλέγει αυτόματα:

- Υψηλό SNR (>30 dB): 1024-QAM για μέγιστη ταχύτητα
- Μέτριο SNR (20-25 dB): 64-256-QAM
- Χαμηλό SNR (10-15 dB): QPSK/16-QAM για αξιοπιστία
- Πολύ χαμηλό SNR (<10 dB): BPSK για βασική συνδεσιμότητα (Dahlman et al., 2018).

Στον Πίνακα 4.4 παρουσιάζονται οι απαιτήσεις SNR, η φασματική αποδοτικότητα και οι τυπικές εφαρμογές κάθε διαμόρφωσης.

Πίνακας 4.4: Απαιτήσεις SNR και φασματική αποδοτικότητα ανά διαμόρφωση

Διαμόρφωση	Απαιτούμενο SNR (dB)	Bits/σύμβολο	Φασματική Αποδοτικότητα	Εφαρμογές & Ποιότητα Σήματος
BPSK	~9.6 dB	1	1 bit/s/Hz	Δορυφορικές επικοινωνίες, LPWAN, IoT μεγάλης εμβέλειας
QPSK	~10.5 dB	2	2 bits/s/Hz	LTE σε αδύναμο σήμα, Bluetooth, GSM
8-PSK	~14 dB	3	3 bits/s/Hz	Δορυφορική τηλεόραση και internet
16-QAM	~17 dB	4	4 bits/s/Hz	LTE και Wi-Fi σε μέτριες συνθήκες σήματος
64-QAM	~23 dB	6	6 bits/s/Hz	Wi-Fi 5/6 και LTE με καλό σήμα
256-QAM	~28 dB	8	8 bits/s/Hz	Wi-Fi 6 και 5G σε καλές συνθήκες
1024-QAM	~33 dB	10	10 bits/s/Hz	Wi-Fi 6E/7 πολύ κοντά στον router (Ιδανικές συνθήκες)

Συνοψίζοντας, η επιλογή της σωστής διαμόρφωσης είναι κρίσιμη για την ισορροπία μεταξύ ταχύτητας και αξιοπιστίας. Από την απλή ASK έως την πολύπλοκη 1024-QAM, κάθε τεχνική έχει τη θέση της ανάλογα με τις συνθήκες του καναλιού (Dahlman et al. (2018); Goldsmith, 2005; Proakis & Salehi, 2008).

4.4 Τεχνικές Διασποράς Φάσματος

Οι τεχνικές διασποράς φάσματος (spread spectrum) αποτελούν μια βασική κατηγορία τεχνικών μετάδοσης που «απλώνουν» σκόπιμα το σήμα σε ευρύτερο φάσμα συχνοτήτων από το απαραίτητο για τη μετάδοση της πληροφορίας (Tortieri, 2022). Αυτή η χρήση του φάσματος προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως την εξαιρετική ανθεκτικότητα σε παρεμβολές (τόσο τυχαίες όσο και εσκεμμένες), τη βελτιωμένη ασφάλεια επικοινωνίας λόγω της δυσκολίας υποκλοπής, και τη δυνατότητα πολλαπλών χρηστών να μοιράζονται το ίδιο φάσμα χωρίς συντονισμό.

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της διασποράς είναι το κέρδος επεξεργασίας (processing gain), που ορίζεται ως ο λόγος του εύρους ζώνης του διασπαρμένου σήματος προς το εύρος ζώνης του αρχικού σήματος δεδομένων. Όσο μεγαλύτερο, τόσο καλύτερη η ανθεκτικότητα σε θόρυβο και παρεμβολές.

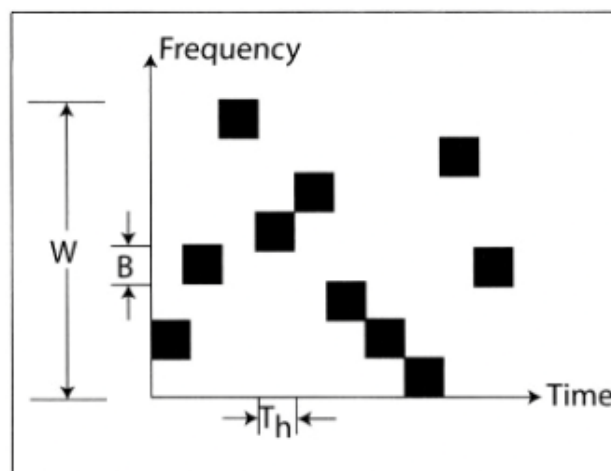
Δύο είναι οι κύριες τεχνικές διασποράς που έχουν επικρατήσει στην πράξη. Η πρώτη είναι το Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS), όπου η συχνότητα αλλάζει γρήγορα σύμφωνα με μια ψευδοτυχαία ακολουθία, και το Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS), όπου κάθε bit πληροφορίας πολλαπλασιάζεται με μια ταχεία ψευδοτυχαία ακολουθία. Κάθε προσέγγιση έχει τα δικά της πλεονεκτήματα, το FHSS προσφέρει απλότητα και ευελιξία, ενώ το DSSS παρέχει καλύτερη

απόδοση σε περιβάλλοντα με έντονο θόρυβο και αποτελεί τη βάση των συστημάτων CDMA (Code Division Multiple Access) όπου πολλοί χρήστες μοιράζονται το ίδιο φάσμα με διαφορετικούς κώδικες διασποράς.

4.4.1 Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS)

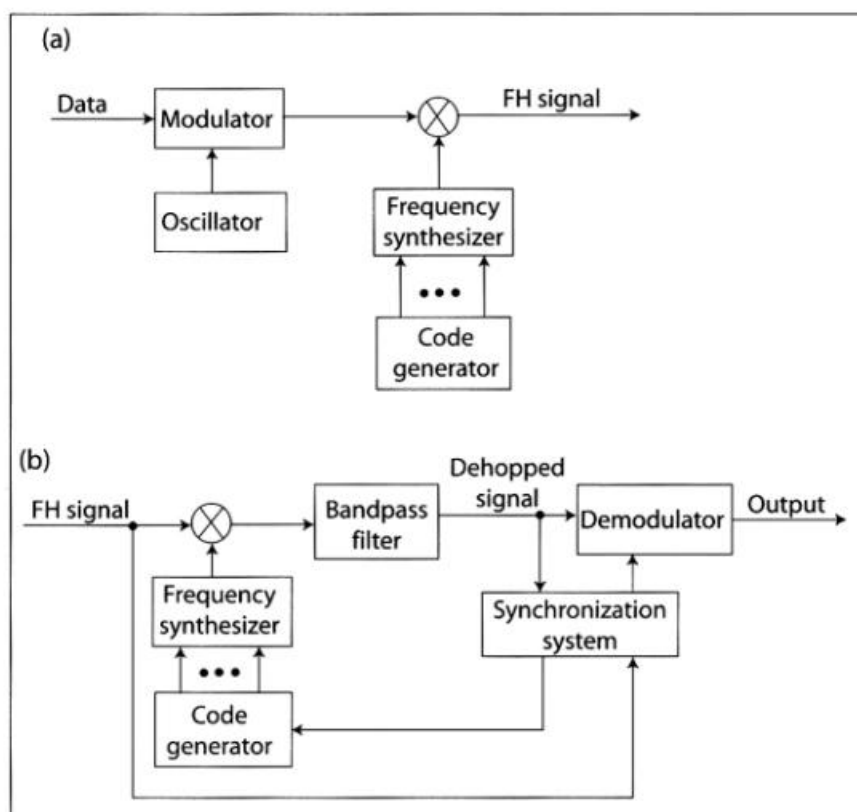
Στο FHSS, η συχνότητα μετάδοσης μεταβάλλεται σύμφωνα με μια ψευδοτυχαία ακολουθία που είναι γνωστή σε πομπό και δέκτη. Κάθε φορά το σήμα μεταδίδεται σε διαφορετικό κανάλι και στη συνέχεια «πηδά» στο επόμενο. Το διαθέσιμο φάσμα (hopset) χωρίζεται σε υποκανάλια. Το σήμα μεταδίδεται σε κάθε κανάλι για μικρό χρονικό διάστημα (dwell time) και μετά αλλάζει στο επόμενο (Torrieri, 2022).

Όπως φαίνεται στο Εικόνα 4.6, το σήμα μεταδίδεται σε διαφορετική συχνότητα κάθε φορά μέσα στο διαθέσιμο εύρος ζώνης W , με κάθε hop να διαρκεί T_h δευτερόλεπτα (Torrieri, 2022).



Εικόνα 4.6: Μοτίβο εναλλαγής συχνοτήτων FHSS Πηγή: Torrieri (2022)

Όπως φαίνεται στο Εικόνα 4.7, ο πομπός FHSS αλλάζει συνέχεια συχνότητα βάσει ψευδοτυχαίας ακολουθίας που παράγει ο code generator, ενώ ο δέκτης χρησιμοποιεί την ίδια ακολουθία για να αφαιρέσει το hopping και να ανακτήσει τα δεδομένα (Torrieri, 2022).



Εικόνα 4.7: Πομπός (a) και δέκτης (b) FHSS Πηγή: Torrieri (2022)

Υπάρχουν δύο εκδοχές, το slow hopping όπου πολλά σύμβολα μεταδίδονται ανά άλμα, δηλαδή απλούστερος συγχρονισμός, και το fast hopping όπου γίνονται πολλά άλματα ανά σύμβολο, άρα μεγαλύτερη ανθεκτικότητα σε παρεμβολές (Molisch, 2011; Sklar, 2001). Σε κάθε άλμα χρησιμοποιείται απλή διαμόρφωση (π.χ. GFSK, BFSK) για αξιόπιστη μετάδοση ακόμα και σε δύσκολες συνθήκες.

Η συνεχής εναλλαγή συχνοτήτων αυξάνει την ανθεκτικότητα του συστήματος σε στενής ζώνης παρεμβολές και επιλεκτικές εξασθενήσεις. Όταν μια παρεμβολή ή εξασθένηση επηρεάζει μια συγκεκριμένη συχνότητα, καταστρέφεται μόνο το τμήμα των δεδομένων που μεταδόθηκε σε εκείνη τη συχνότητα. Επειδή το σύστημα μεταπηδά γρήγορα σε άλλες συχνότητες, τα υπόλοιπα δεδομένα μεταδίδονται επιτυχώς και μπορούν να ανακτηθούν (Torrieri, 2022). Με αυτόν τον τρόπο, το FHSS επιτυγχάνει υψηλή ανθεκτικότητα σε τοπικές παρεμβολές και επιλεκτικές εξασθενήσεις (Molisch, 2011; Proakis & Salehi, 2008; Rappaport, 2022; Sklar, 2001).

Στις κοινόχρηστες ζώνες ISM (Industrial, Scientific and Medical), οι κανονισμοί (π.χ. FCC, ETSI) ορίζουν ελάχιστο αριθμό καναλιών και όρια χρόνου παραμονής, ώστε όλες οι συσκευές να έχουν δίκαιη πρόσβαση στο φάσμα (Molisch, 2011; Rappaport, 2014).

Το FHSS υπερέχει όταν προέχει η ανθεκτικότητα. Σε περιβάλλον με στενής ζώνης θορύβους ή εσκεμμένη παρεμβολή (jamming), ένας παρεμβολέας δυσκολεύεται να καλύψει ολόκληρο το hopset και να συγχρονιστεί με την ψευδοτυχαία ακολουθία αλμάτων, καθιστώντας το σύστημα εγγενώς ανθεκτικό. Επίσης, με την υιοθέτηση προσαρμοστικού hopping (Adaptive Frequency Hopping -

AFH), το σύστημα παρακολουθεί ποια κανάλια είναι θορυβώδη και τα αποφεύγει δυναμικά, μειώνοντας περαιτέρω τις συγκρούσεις και τις επανεκπομπές (Proakis & Salehi, 2008; Sklar, 2001).

Το κύριο μειονέκτημα είναι η χαμηλότερη ταχύτητα σε σχέση με OFDM/OFDMA, καθώς κάθε στιγμή χρησιμοποιείται μόνο ένα στενό κανάλι. Επίσης, απαιτεί ακριβή συγχρονισμό, που αυξάνει την πολυπλοκότητα και την κατανάλωση ενέργειας (Molisch, 2011; Rappaport, 2014).

Ως προς τις εφαρμογές, το Bluetooth Classic (BR/EDR) αποτελεί το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα τεχνολογίας που λειτουργεί στη ζώνη των 2,4 GHz. Χρησιμοποιεί τη μέθοδο FHSS με ταχύ ρυθμό αλμάτων (1600 hops/sec), ώστε να επιτυγχάνει διαφοροποίηση στο πεδίο της συχνότητας και να καθιστά το σήμα ανθεκτικό σε παρεμβολές από σταθερές πηγές, όπως τα access points του Wi-Fi. Επιπλέον, μέσω του μηχανισμού AFH, ο οποίος εισήχθη για να βελτιστοποιήσει τη συνύπαρξη, το Bluetooth εντοπίζει και εξαιρεί από τη λίστα των αλμάτων τα κανάλια που εμφανίζουν έντονη δραστηριότητα. Ο συνδυασμός της διαμόρφωσης GFSK και του προσαρμοστικού αυτού μηχανισμού επιτρέπει στο Bluetooth να συνυπάρχει αποτελεσματικά με άλλα ασύρματα δίκτυα (Haartsen, 2000; Molisch, 2011).

Σε συχνότητες κάτω από 1 GHz (sub-GHz), βιομηχανικά και κοινοτικά δίκτυα αξιοποιούν FHSS για μεγάλες αποστάσεις με χαμηλή ισχύ και αυξημένη ανθεκτικότητα. Παραδείγματα είναι τα δίκτυα Wi-SUN (Wireless Smart Utility Network) για έξυπνες πόλεις και υποδομές, όπως έξυπνοι μετρητές ρεύματος, νερού και φυσικού αερίου, και τα συστήματα SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) για παρακολούθηση υποδομών όπως σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής, δίκτυα νερού και αγωγοί φυσικού αερίου.

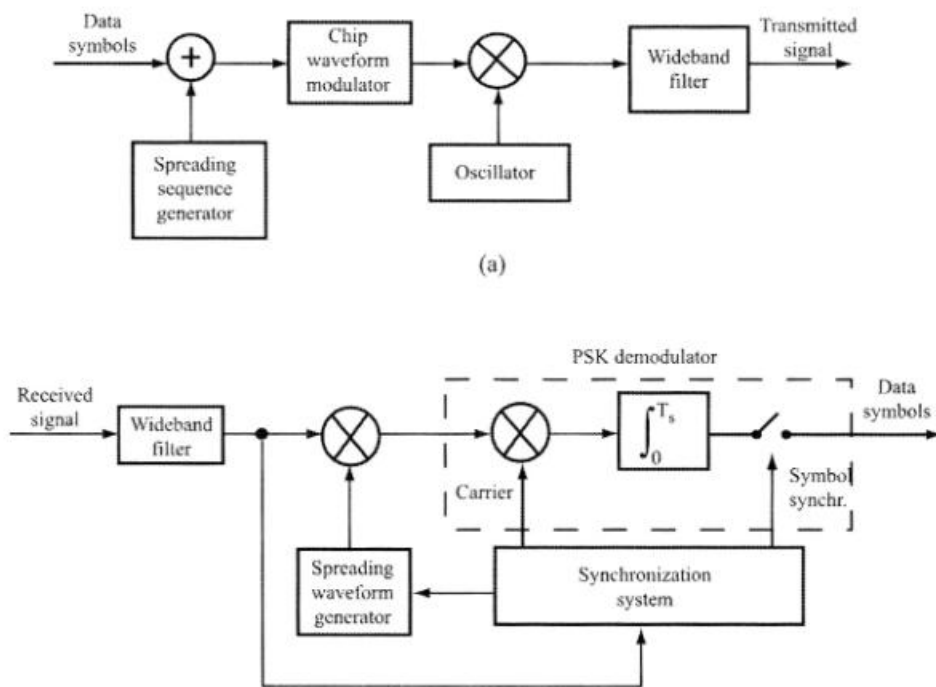
Στο στρατιωτικό πεδίο, κλασικά συστήματα ανθεκτικά σε παρεμβολές (anti-jam) (π.χ. HAVE QUICK, SINCGARS - Single Channel Ground and Airborne Radio System) χρησιμοποιούν hopping για προστασία από παρεμβολή και υποκλοπή (Rappaport, 2014; Sklar, 2001).

Συνολικά, το FHSS παραμένει πολύτιμο όπου ζητείται ανθεκτικότητα και απλότητα με χαμηλή ισχύ, ενώ για μέγιστη χωρητικότητα και φασματική αποδοτικότητα τα σύγχρονα συστήματα (Wi-Fi, LTE, 5G) χρησιμοποιούν OFDM για πολλά υποκανάλια, QAM για υψηλές ταχύτητες και MIMO για πολλαπλές κεραίες, όλα μαζί για μέγιστη απόδοση (Molisch, 2011; Proakis & Salehi, 2008; Rappaport, 2014).

4.4.2 Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)

Στο DSSS, κάθε bit πολλαπλασιάζεται με μια ταχεία ψευδοτυχαία ακολουθία, με στόχο τη διασπορά του σήματος σε μεγαλύτερο εύρος ζώνης. Η άμεση διασπορά ακολουθίας, DSSS, είναι τεχνική διασποράς φάσματος, κάθε bit πολλαπλασιάζεται με μια ταχεία ψευδοτυχαία ακολουθία PN code (Pseudo-Noise code) αποτελούμενη από N chips (Torrieri, 2022). Όσο μεγαλύτερο το N (παράγοντας διασποράς), τόσο ευρύτερο το φάσμα και μεγαλύτερη η ανθεκτικότητα. Στον δέκτη, το σήμα «συμπυκνώνεται» πίσω στο αρχικό φάσμα μέσω συσχέτισης με τον ίδιο PN κώδικα, ενώ ο θόρυβος παραμένει διασπαρμένος. Αυτό δημιουργεί κέρδος επεξεργασίας (processing gain), δηλαδή το σήμα γίνεται πιο ξεκάθαρο σε σχέση με τον θόρυβο χάρη στην εξάπλωση του σήματος σε ευρύ φάσμα (Molisch, 2011; Proakis & Salehi, 2008; Torrieri, 2022).

Όπως φαίνεται στο Εικόνα 4.8, ο πομπός DSSS πολλαπλασιάζει τα δεδομένα με τον PN code για διασπορά, ενώ ο δέκτης χρησιμοποιεί τον ίδιο κώδικα για ανάκτηση (Torrieri, 2022).



Εικόνα 4.8: Πομπός (a) και δέκτης DSSS. Πηγή: Torrieri (2022)

Τα κύρια πλεονεκτήματα είναι η ανθεκτικότητα σε παρεμβολές και η χαμηλή πιθανότητα υποκλοπής, καθώς το σήμα έχει τόσο χαμηλή ισχύ που μοιάζει με θόρυβο. Επίσης, με τη χρήση μοναδικών κωδικών ανά χρήστη (CDMA), πολλοί χρήστες μπορούν να μεταδίδουν ταυτόχρονα στην ίδια συχνότητα και ο δέκτης αναγνωρίζει μόνο τον δικό του κώδικα (Proakis & Salehi, 2008; Sklar, 2001).

Το κύριο μειονέκτημα είναι η μεγάλη κατανάλωση εύρους ζώνης, άρα χαμηλότερη φασματική αποδοτικότητα σε σχέση με OFDM. Επίσης το DSSS απαιτεί ακριβή συγχρονισμό και αν αποτύχει χάνεται το κέρδος επεξεργασίας. Σε CDMA με πολλούς χρήστες, ένας ισχυρός πομπός μπορεί να καλύψει τους ασθενέστερους (near-far πρόβλημα) (Molisch, 2011; Proakis & Salehi, 2008).

Το DSSS αποτελεί τη βάση πολλών σημαντικών τεχνολογιών επικοινωνίας, από τα πρώιμα Wi-Fi δίκτυα έως τα παγκόσμια συστήματα δορυφορικής πλοήγησης. Ενδεικτικά παραδείγματα χρήσης περιλαμβάνουν:

- IEEE 802.11b: Τα πρώτα Wi-Fi στα 2.4 GHz χρησιμοποιούσαν DSSS με ταχύτητες 1–11 Mb/s. Το DSSS επιλέχθηκε γιατί προσέφερε ανθεκτικότητα σε παρεμβολές και αξιόπιστη μετάδοση στις συνθήκες της εποχής. Αργότερα αντικαταστάθηκε από OFDM, που επέτρεπε υψηλότερες ταχύτητες και καλύτερη φασματική αποδοτικότητα (Gast, 2005; Molisch, 2011).
- IEEE 802.15.4 / Zigbee: Στο 2,4 GHz υιοθετείται O-QPSK (Offset QPSK) με DSSS mapping (32 chips ανά σύμβολο 4 bits), συνδυάζοντας χαμηλή κατανάλωση ισχύος με ανθεκτικότητα για δίκτυα αισθητήρων και IoT εφαρμογές (Molisch, 2011).
- CDMA κινητής (IS-95/cdma2000): Κάθε χρήστης έχει μοναδικό κώδικα, επιτρέποντας μεγαλύτερη χωρητικότητα και αποδοτικότερη χρήση φάσματος σε σχέση με τα παλαιότερα συστήματα TDMA/FDMA (Proakis & Salehi, 2008; Rappaport, 2014).
- Δορυφορική Πλοήγηση GPS: Χρησιμοποιεί DSSS και λειτουργεί ακόμα και με πολύ αδύναμο σήμα, κάτω από το επίπεδο θορύβου, επιτρέποντας παγκόσμια κάλυψη (Kaplan & Hegarty, 2006).

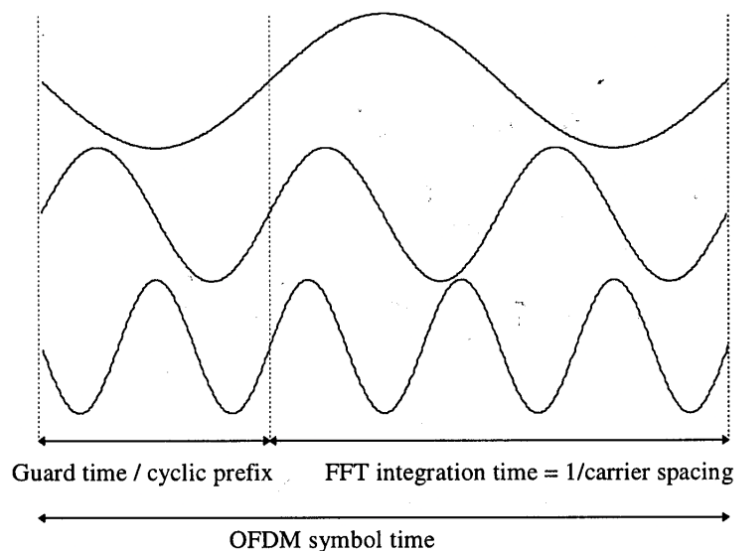
- Στρατιωτικές επικοινωνίες και βιομηχανικές εφαρμογές: Το DSSS προσφέρει προστασία από παρεμβολές και υποκλοπή, και ασφαλή επικοινωνία σε εχθρικά περιβάλλοντα (Sklar, 2001).
- Συνοψίζοντας, το DSSS είναι ιδανικό για ανθεκτικότητα σε παρεμβολές, λειτουργία σε αδύναμο σήμα και συνύπαρξη πολλών χρηστών στο ίδιο φάσμα μέσω CDMA. Για μέγιστη ταχύτητα τα σύγχρονα συστήματα προτιμούν OFDM και MIMO, αλλά το DSSS παραμένει κρίσιμο για IoT και συστήματα πλοήγησης όπως το GPS.

4.5 Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)

Όταν το σήμα καταλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων, είναι ευάλωτο σε παρεμβολές και εξασθένηση. Η OFDM αντιμετωπίζει τις επιδράσεις της πολυδιαδρομικότητας χωρίζοντας το διαθέσιμο εύρος ζώνης σε πολλά στενά και ορθογώνια υποκανάλια. Επιτυγχάνει υψηλή φασματική αποδοτικότητα χωρίς την ανάγκη περίπλοκης ισοστάθμισης στο πεδίο του χρόνου (Molisch, 2011; Proakis & Salehi, 2008 Van Nee & Prasad, 2000). Η λειτουργία της OFDM βασίζεται σε δύο βασικά στάδια επεξεργασίας σήματος, τον πομπό, που κωδικοποιεί και μεταδίδει τα δεδομένα, και τον δέκτη, που τα ανακτά και αποκωδικοποιεί.

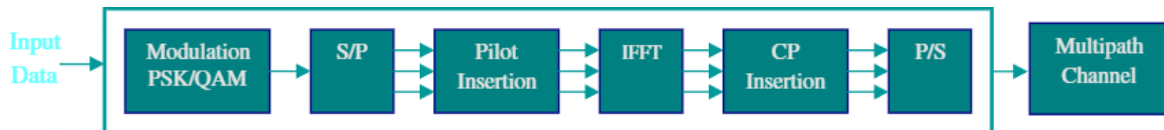
Στον πομπό, τα σύμβολα διαμόρφωσης (π.χ. QPSK, 16/64/256-QAM) χαρτογραφούνται στα υποφέροντα και συνδυάζονται μέσω IFFT (Inverse Fast Fourier Transform) σε ένα πολυτονικό σήμα. Στη συνέχεια προστίθεται κυκλικό πρόθεμα (Cyclic Prefix - CP), δηλαδή αντιγράφεται το τέλος του συμβόλου στην αρχή του. Αυτό εμποδίζει τα καθυστερημένα αντίγραφα του σήματος λόγω multipath να επηρεάσουν το επόμενο σύμβολο, αποφεύγοντας τη διασυμβολική παρεμβολή (Inter-Symbol Interference - ISI), με την προϋπόθεση ότι η καθυστέρηση του καναλιού (delay spread) δεν υπερβαίνει το μήκος του CP (van Nee & Prasad, 2000).

Όπως φαίνεται στο Εικόνα 4.9, το OFDM σύμβολο αποτελείται από δύο τμήματα: το κυκλικό πρόθεμα (guard time / cyclic prefix) και το χρήσιμο τμήμα (FFT integration time). Το κυκλικό πρόθεμα εξασφαλίζει ότι τα καθυστερημένα αντίγραφα του σήματος λόγω multipath δεν επηρεάζουν το επόμενο σύμβολο (van Nee & Prasad, 2000).



Εικόνα 4.9: OFDM σύμβολο με κυκλικό πρόθεμα. Πηγή: Van Nee & Prasad (2000)

Όπως φαίνεται στο Εικόνα 4.10, ο πομπός OFDM περιλαμβάνει διαδοχικά βήματα επεξεργασίας: διαμόρφωση (PSK/QAM), μετατροπή σειριακού σε παράλληλο (S/P), εισαγωγή πιλοτικών συμβόλων, IFFT, προσθήκη κυκλικού προθέματος (CP) και τέλος μετατροπή παράλληλου σε σειριακό (P/S) πριν τη μετάδοση (Golriz, 2009).



Εικόνα 4.10: Βήματα πομπού OFDM (Πηγή: Golriz, A., 2009)

Στον δέκτη, το CP αφαιρείται και τα δεδομένα ανακτώνται μέσω FFT (Fast Fourier Transform). Έτσι, κάθε υποφέρων ισοσταθμίζεται ξεχωριστά με απλό τρόπο, αντί να χρειάζεται πολύπλοκη επεξεργασία ολόκληρου του σήματος. Για την εκτίμηση του καναλιού χρησιμοποιούνται πιλότοι, δηλαδή γνωστά σύμβολα που εισάγονται στο σήμα και βοηθούν τον δέκτη να κατανοήσει τις συνθήκες μετάδοσης. Επιπλέον, απαιτείται προσεκτικός συγχρονισμός, καθώς μικρές αποκλίσεις συχνότητας ή φάσης μπορούν να προκαλέσουν παρεμβολές μεταξύ των υποφερόντων (Inter-Carrier Interference - ICI), υποβαθμίζοντας την απόδοση του συστήματος. Για την ορθή λειτουργία της OFDM απαιτείται ακριβής συγχρονισμός χρόνου και συχνότητας, συνήθως με χρήση πιλότων και γνωστών προτύπων στην αρχή του πλαισίου. (Molisch, 2011; Rappaport, 2014).

Το κύριο πλεονέκτημα της OFDM είναι η ανθεκτικότητά της στην πολυδιαδρομικότητα, δηλαδή στο φαινόμενο όπου το σήμα φτάνει στον δέκτη μέσω πολλαπλών διαδρομών. Το κυκλικό πρόθεμα σε συνδυασμό με τη μεγάλη διάρκεια συμβόλου περιορίζει αρκετά το ISI, επιτρέποντας την εύκολη διόρθωση του σήματος σε κάθε υποκανάλι ξεχωριστά (Molisch, 2011; Proakis & Salehi, 2008).

Επιπλέον, η OFDM είναι προσαρμοστική. Κάθε υποκανάλι μπορεί να χρησιμοποιεί διαφορετική διαμόρφωση ανάλογα με την ποιότητα του σήματος (Adaptive Modulation and Coding - AMC). Έτσι, τα υποκανάλια με καλό σήμα μεταφέρουν περισσότερα bits (π.χ. 256-QAM), ενώ αυτά με κακό σήμα χρησιμοποιούν πιο ανθεκτικές διαμορφώσεις (π.χ. QPSK) ή απενεργοποιούνται (Molisch, 2011; Proakis & Salehi, 2008). Η πολυχρηστική εκδοχή της OFDM, η OFDMA, κατανέμει δυναμικά υποκανάλια σε πολλούς χρήστες ταυτόχρονα, μειώνοντας την καθυστέρηση και βελτιώνοντας την αποδοτικότητα σε πυκνά περιβάλλοντα (Dahlman et al., 2018).

Οι βασικοί περιορισμοί της OFDM σχετίζονται με την υψηλή αναλογία κορυφής προς μέση ισχύ (Peak-to-Average Power Ratio - PAPR). Επειδή το σήμα προκύπτει από το άθροισμα πολλών υποκαναλιών, μπορεί να εμφανίσει απότομες κορυφές ισχύος (van Nee & Prasad, 2000). Αυτό αναγκάζει τους ενισχυτές να λειτουργούν με μειωμένη ισχύ (back-off), μειώνοντας την ενεργειακή αποδοτικότητα, ιδίως σε συσκευές με περιορισμένη μπαταρία. Επιπλέον, η OFDM είναι ευαίσθητη σε αποκλίσεις συχνότητας και φάσης, καθώς και στο Doppler shift (δηλαδή την αλλαγή συχνότητας που προκαλείται από την κίνηση του χρήστη) που μπορούν να προκαλέσουν παρεμβολές μεταξύ των υποκαναλιών (Inter-Carrier Interference - ICI) (Molisch, 2011; Rappaport, 2014).

Ένας ακόμα περιορισμός είναι το κυκλικό πρόθεμα (CP), το οποίο καταναλώνει μέρος του διαθέσιμου εύρους ζώνης χωρίς να μεταφέρει χρήσιμα δεδομένα (van Nee & Prasad, 2000). Αυτό γίνεται πιο έντονο σε περιβάλλοντα όπου το σήμα δεν καθυστερεί πολύ, οπότε θα αρκούσε μικρότερο CP (Molisch, 2011). Επιπλέον, η επεξεργασία FFT/IFFT και οι απαιτήσεις συγχρονισμού αυξάνουν την υπολογιστική πολυπλοκότητα και την κατανάλωση ενέργειας. Παρόλα αυτά, οι σύγχρονες συσκευές έχουν βελτιστοποιήσει σημαντικά αυτές τις απαιτήσεις, καθιστώντας την OFDM πρακτικά υλοποιήσιμη (Molisch, 2011; Rappaport, 2014).

Καθώς οι απαιτήσεις για υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, χαμηλή καθυστέρηση και ανθεκτικότητα σε πολυδιάδρομη διάδοση αυξάνονται διαρκώς στα σύγχρονα δίκτυα, η OFDM έχει καθιερωθεί ως το θεμέλιο των σύγχρονων φυσικών επιπέδων ασύρματης επικοινωνίας:

- WLAN (Wi-Fi): Τα πρότυπα 802.11a/g εισήγαγαν την OFDM, ενώ τα νεότερα 802.11n/ac/ax την επεκτείνουν με μεγαλύτερα εύρη ζώνης, υψηλότερες διαμορφώσεις (έως 1024-QAM) και MIMO. Στο Wi-Fi 6 (802.11ax) χρησιμοποιείται OFDMA για ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλών χρηστών (Gast, 2005; Molisch, 2011).

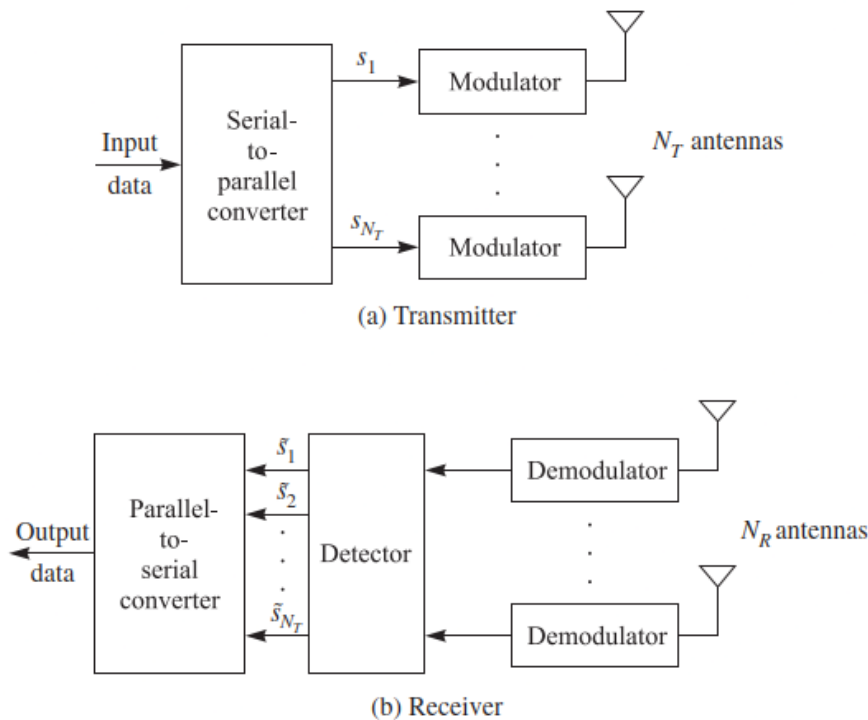
- Κυψελοειδή Δίκτυα (LTE & 5G): Το LTE χρησιμοποιεί OFDMA στην κάτω ζεύξη (downlink - από σταθμό βάσης προς χρήστη), ενώ στην άνω ζεύξη (uplink - από χρήστη προς σταθμό) εφαρμόζεται SC-FDMA για μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Το 5G NR επεκτείνει τη χρήση της OFDM και στις δύο κατευθύνσεις με ευέλικτες αποστάσεις υποφερόντων (15–240 kHz), υποστηρίζοντας εφαρμογές που απαιτούν πολύ χαμηλή καθυστέρηση (URLLC), όπως τα αυτόνομα οχήματα (3GPP TS 36.211, 2017; 3GPP TS 38.306, 2025; Dahlman et al., 2018).
- Ψηφιακή Ευρυεκπομπή (εκπομπή σήματος προς πολλούς δέκτες ταυτόχρονα): Η OFDM χρησιμοποιείται ευρέως στην επίγεια ψηφιακή τηλεόραση (DVB-T/T2) και στο ψηφιακό ραδιόφωνο (DAB), προσφέροντας ανθεκτικότητα σε φαινόμενα πολυδιαδρομικότητας (multipath fading) (Molisch, 2011). Παράλληλα, εφαρμόζεται στα συστήματα xDSL μέσω της τεχνικής Discrete Multitone (DMT), επιτρέποντας την αποτελεσματική μετάδοση δεδομένων υψηλής ταχύτητας μέσω καλωδίων χαλκού, αξιοποιώντας το διαθέσιμο εύρος συχνοτήτων (Molisch, 2011).

Συνοψίζοντας, η OFDM έχει επικρατήσει στα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα επειδή συνδυάζει υψηλή φασματική αποδοτικότητα, ανθεκτικότητα στην πολυδιαδρομικότητα και συμβατότητα με τεχνικές όπως OFDMA και MIMO. Τα μειονεκτήματά της, όπως το PAPR και ο συγχρονισμός, αντιμετωπίζονται με κατάλληλο σχεδιασμό υλικού και λογισμικού, επιτρέποντάς της να υποστηρίζει τις απαιτήσεις των σύγχρονων δικτύων για υψηλές ταχύτητες (eMBB), χαμηλή καθυστέρηση (URLLC) και μαζική συνδεσιμότητα συσκευών (mMTC).

4.6 Multiple Input Multiple Output (MIMO)

Στα συστήματα μίας κεραίας (SISO - Single Input Single Output), η ταχύτητα και η αξιοπιστία της επικοινωνίας περιορίζονται από τη μοναδική διαδρομή μετάδοσης. Η τεχνολογία πολλαπλές είσοδοι - πολλαπλές εξοδοι (MIMO) χρησιμοποιεί πολλαπλές κεραίες τόσο στον πομπό όσο και στον δέκτη, δημιουργώντας πολλαπλές ανεξάρτητες διαδρομές μετάδοσης. Αυτό επιτρέπει την ταυτόχρονη αποστολή πολλαπλών ροών δεδομένων, αυξάνοντας την ταχύτητα και την αποδοτικότητα της επικοινωνίας.

Όπως φαίνεται στο Εικόνα 4.11, ο πομπός MIMO χωρίζει τα δεδομένα σε παράλληλες ροές που μεταδίδονται από NT κεραίες, ενώ ο δέκτης τις ανακτά μέσω NR κεραιών (Proakis & Salehi, 2008).



Εικόνα 4.11: Σύστημα MIMO με πολλαπλές κεραίες πομπού και δέκτη (Proakis & Salehi, 2008)

Μαθηματικά, το κανάλι περιγράφεται από έναν πίνακα H , του οποίου ο βαθμός (rank) καθορίζει τον αριθμό των ανεξάρτητων διαδρομών. Όσο υψηλότερος ο βαθμός, τόσο περισσότερες παράλληλες ροές δεδομένων μπορούν να μεταδοθούν ταυτόχρονα, δηλαδή όσο περισσότερες κεραίες και καλύτερο σήμα, τόσο μεγαλύτερη η χωρητικότητα (Goldsmith, 2005; Tse & Viswanath, 2005).

Η MIMO υποστηρίζει επίσης δύο επιπλέον λειτουργίες. Η χωρική διαφοροποίηση (spatial diversity), μέσω τεχνικών όπως το Alamouti και το STBC (Space-Time Block Codes), μειώνει τα σφάλματα σε περιβάλλοντα με έντονη εξασθένηση σήματος (fading). Η διαμόρφωση δέσμης, beamforming, εστιάζει το σήμα προς τον χρήστη, αυξάνοντας την ισχύ και μειώνοντας τις παρεμβολές (Molisch, 2011).

Κρίσιμος παράγοντας για την αποδοτική λειτουργία της MIMO είναι η διαθεσιμότητα πληροφορίας καναλιού (Channel State Information - CSI) στον πομπό. Σε συστήματα TDD (Time Division Duplexing), αποστολή και λήψη χρησιμοποιούν την ίδια συχνότητα, οπότε ο πομπός μπορεί να εκτιμήσει το κανάλι όταν λαμβάνει και να το χρησιμοποιήσει όταν στέλνει. Απαιτείται όμως βαθμονόμηση του εξοπλισμού για ακρίβεια (Molisch, 2011).

Σε συστήματα FDD (Frequency Division Duplexing), αποστολή και λήψη χρησιμοποιούν διαφορετικές συχνότητες, οπότε ο δέκτης πρέπει να στέλνει πληροφορία καναλιού πίσω στον πομπό. Η πληροφορία αυτή κωδικοποιείται σε έναν δείκτη βάσει προκαθορισμένων βιβλίων κωδικών (codebooks), που γνωρίζουν και οι δύο πλευρές, και μεταδίδεται πίσω στον πομπό, καταναλώνοντας επιπλέον εύρος ζώνης (Molisch, 2011).

Σε συστήματα που βασίζονται σε OFDM, η MIMO εφαρμόζεται ξεχωριστά σε κάθε υποκανάλι. Οι συνθήκες του καναλιού εκτιμώνται μέσω πιλοτικών συμβόλων και η μετάδοση προσαρμόζεται ανάλογα με την ποιότητα του σήματος κάθε υποκαναλιού. Για τη βέλτιστη κατανομή ισχύος στις

χωρικές ροές χρησιμοποιείται η τεχνική SVD (Singular Value Decomposition), η οποία κατανέμει περισσότερη ισχύ στις καλύτερες διαδρομές μετάδοσης (Proakis & Salehi, 2008).

Η επέκταση της MIMO σε MU-MIMO (Multi-User MIMO) επιτρέπει την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλαπλών χρηστών στην ίδια συχνότητα, αυξάνοντας την ποσότητα δεδομένων που μεταδίδονται ανά μονάδα φάσματος. Οι παρεμβολές μεταξύ των χρηστών αντιμετωπίζονται μέσω τεχνικών προκωδικοποίησης, όπως το zero-forcing, σε συνδυασμό με αλγορίθμους που καθορίζουν πότε και πώς εξυπηρετείται κάθε χρήστης (Dahlman et al., 2018).

Το massive MIMO αποτελεί εξέλιξη της κλασικής MIMO, χρησιμοποιώντας δεκάδες ή και εκατοντάδες κεραίες στους σταθμούς βάσης. Αυτό προσφέρει υψηλότερη χωρητικότητα και καλύτερη ενεργειακή αποδοτικότητα, καθώς κάθε κεραία χρησιμοποιεί χαμηλή ισχύ. Ωστόσο, παρουσιάζει προκλήσεις όπως η μόλυνση πιλότων (pilot contamination), δηλαδή παρεμβολές από γειτονικά κελιά που χρησιμοποιούν τα ίδια πιλοτικά σήματα, και η ανάγκη συνεχούς βαθμονόμησης των κεραίων. Αυτές οι προκλήσεις αντιμετωπίζονται μέσω προηγμένων αλγορίθμων επεξεργασίας σήματος και τεχνικών συνεργατικής επικοινωνίας μεταξύ σταθμών βάσης (Marzetta et al., 2016).

Στις ζώνες χιλιοστομετρικού μήκους κύματος (mmWave), κάθε RF chain (ραδιοσυχνотική αλυσίδα), δηλαδή η πλήρης διαδρομή του σήματος από την ψηφιακή επεξεργασία μέχρι την κεραία, έχει υψηλό κόστος και κατανάλωση ενέργειας. Για παράδειγμα, στην αποστολή, το ψηφιακό σήμα μετατρέπεται σε αναλογικό (DAC - Digital-to-Analog Converter), ενισχύεται και στέλνεται στην κεραία, ενώ στη λήψη η διαδικασία είναι αντίστροφη. Επειδή κάθε κεραία χρειάζεται τη δική της RF chain, χρησιμοποιούνται υβριδικές αρχιτεκτονικές beamforming (Hybrid Beamforming) που συνδυάζουν αναλογική και ψηφιακή επεξεργασία, επιτυγχάνοντας υψηλή απόδοση με λιγότερες RF chains και χαμηλότερο κόστος (Rappaport, 2014).

Η απόδοση των συστημάτων MIMO εξαρτάται από τρεις βασικούς παράγοντες. Αυτοί είναι, η χωρική συσχέτιση του καναλιού, η κινητικότητα των χρηστών που προκαλεί αλλαγές στις συνθήκες μετάδοσης (channel aging), και ο διαθέσιμος προϋπολογισμός ισχύος και υλικού. Η επιλογή των κατάλληλων τεχνικών MIMO πρέπει να λαμβάνει υπόψη αυτούς τους παράγοντες ανάλογα με το περιβάλλον εφαρμογής, όπως αστικό ή αγροτικό, εσωτερικοί ή εξωτερικοί χώροι, σταθεροί ή κινητοί χρήστες.

Στον Πίνακα 4.6 συνοψίζονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των βασικών τεχνικών MIMO (Goldsmith, 2005; Molisch, 2011).

Πίνακας 4.6: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα MIMO

Τεχνική	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Spatial Multiplexing	Αύξηση χωρητικότητας ανάλογα με τον μικρότερο αριθμό κεραίων πομπού/δέκτη	Απαιτεί ανεξάρτητες διαδρομές μετάδοσης, δεν αποδίδει καλά σε περιβάλλοντα με απευθείας οπτική επαφή (LoS)
Spatial Diversity (STBC)	Αυξημένη αξιοπιστία μετάδοσης μέσω πολλαπλών διαδρομών	Μικρότερη αύξηση χωρητικότητας
Beamforming	Εστίαση σήματος προς τον χρήστη, υψηλότερη ποιότητα σήματος (SNR), μειωμένες παρεμβολές	Απαιτεί ακριβή γνώση των συνθηκών του καναλιού (CSI)
MU-MIMO	Εξυπηρέτηση πολλών χρηστών ταυτόχρονα, καλύτερη αξιοποίηση	Πολύπλοκη επεξεργασία σήματος για

	του φάσματος	αποφυγή παρεμβολών μεταξύ χρηστών
Massive MIMO	Ενεργειακή αποδοτικότητα, υψηλή χωρητικότητα, στενές δέσμες	Pilot contamination, δύσκολη βαθμονόμηση, υψηλό κόστος
TDD MIMO	Εκτίμηση καναλιού χωρίς επιπλέον κόστος εύρους ζώνης	Απαιτεί βαθμονόμηση του εξοπλισμού για ακρίβεια
FDD MIMO	Ταυτόχρονη αποστολή και λήψη σε διαφορετικές συχνότητες	Overhead feedback, απαιτεί codebooks
Hybrid Beamforming (mmWave)	Μειωμένο κόστος και κατανάλωση (λιγότερες RF chains)	Πολυπλοκότητα σχεδίασης, μειωμένη ευελιξία

Στον Πίνακα 4.7 παρουσιάζονται ενδεικτικές εφαρμογές της τεχνολογίας MIMO στα σύγχρονα ασύρματα πρότυπα (Dahlman et al., 2018; Rappaport, 2014; Torrieri, 2022).

Πίνακας 4.7: Ενδεικτικές εφαρμογές MIMO σε σύγχρονα ασύρματα πρότυπα

Τεχνολογία	Χρήση MIMO	Σύντομη περιγραφή
Wi-Fi 4/5/6/6E (802.11n/ac/ax)	SU-/MU-MIMO, beamforming	Πολλαπλές χωρικές ροές ανά σύνδεση, MU-MIMO και OFDMA στο Wi-Fi 6 για πυκνά περιβάλλοντα
LTE (4G)	DL MIMO, UL SC-FDMA	2×2 έως 8×8 κεραίες στο downlink
5G NR	Massive MIMO, beamforming	Massive MIMO και υβριδικό beamforming σε χαμηλές συχνότητες και mmWave
Σταθερή ασύρματη πρόσβαση/Backhaul	MIMO P2P/P2MP	Χωρητικότητες πολλών Gbit/s με χωρική πολυπλεξία
Βιομηχανικά/Ιδιωτικά δίκτυα	Diversity/Beamforming	Αξιοπιστία και κάλυψη σε εσωτερικούς χώρους

Συνοψίζοντας, η MIMO λειτουργεί ως «πολλαπλασιαστής δυνατοτήτων» στα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα. Αυξάνει τη χωρητικότητα μέσω χωρικής πολυπλεξίας, βελτιώνει την αξιοπιστία μέσω διαφοροποίησης, στέλνοντας το σήμα μέσω πολλαπλών διαδρομών, και επεκτείνει την κάλυψη μέσω beamforming. Για να αποδώσει σωστά, απαιτεί ακριβή γνώση των συνθηκών του καναλιού (CSI), κατάλληλη επεξεργασία σήματος και προσεκτικό σχεδιασμό υλικού, ιδίως σε περιβάλλοντα με κινητούς χρήστες και σε massive MIMO (Goldsmith, 2005; Molisch, 2011).

4.7 Σύγκριση τεχνικών

Η επιλογή της κατάλληλης τεχνικής εξαρτάται από το περιβάλλον, τις παρεμβολές, τη διαθέσιμη ζώνη συχνοτήτων και την κατανάλωση ενέργειας. Το FHSS ταιριάζει σε περιβάλλοντα με παρεμβολές και

ανάγκη προστασίας από υποκλοπή. Το DSSS προσφέρει ανθεκτικότητα σε θόρυβο. Το OFDM μεγιστοποιεί την αποδοτικότητα και αντιμετωπίζει το multipath. Το MIMO αυξάνει χωρητικότητα και αξιοπιστία χρησιμοποιώντας πολλαπλές κεραιές, με αντίτιμο υψηλότερο κόστος και πολυπλοκότητα. Στον Πίνακα 4.8 συνοψίζονται όλες οι τεχνικές (Dahlman et al., 2018; Molisch, 2011; Rappaport, 2014).

Πίνακας 4.8: Σύγκριση τεχνικών διασποράς/πολυπλεξίας

Τεχνική	Βασική Αρχή	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Παραδείγματα Εφαρμογής
FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum)	Το σήμα αλλάζει συνέχεια συχνότητα με ψευδοτυχαία ακολουθία	Ανθεκτικότητα σε παρεμβολές, Βελτιωμένη ασφάλεια λόγω hopping, Απλότητα υλοποίησης	Χαμηλή φασματική απόδοση, Περιορισμένες ταχύτητες μετάδοσης	Bluetooth, στρατιωτικές επικοινωνίες, Wi-SUN, SCADA
DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)	Διασπορά σήματος με ψευδοτυχαία ακολουθία (PN code)	Ανθεκτικότητα σε θόρυβο και παρεμβολές, Ενισχυμένη ασφάλεια μέσω κωδικών, Αξιόπιστη μετάδοση σε θορυβώδη περιβάλλοντα	Υψηλές απαιτήσεις εύρους ζώνης, Χαμηλότερη φασματική αποδοτικότητα σε σχέση με OFDM	IEEE 802.11b, GPS, Zigbee, CDMA
OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)	Διαίρεση του φάσματος σε πολλά μικρά ορθογώνια υποκανάλια	Υψηλή φασματική αποδοτικότητα, Ανθεκτικότητα στο multipath, Δυνατότητα δυναμικής κατανομής πόρων (OFDMA)	Αυξημένη πολυπλοκότητα υλοποίησης, Υψηλό PAPR, Μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας	LTE, 5G NR, Wi-Fi (802.11a/g/n/ac/ax)
MIMO (Multiple Input Multiple Output)	Χρήση πολλαπλών κεραιών σε πομπό και δέκτη	Αύξηση χωρητικότητας χωρίς επιπλέον φάσμα, Αξιοποίηση multipath προς όφελος, Βελτιωμένη κάλυψη και αξιοπιστία	Μεγάλο κόστος εξοπλισμού, Πολυπλοκότητα επεξεργασίας σήματος, Απαιτεί γνώση συνθηκών καναλιού (CSI)	Wi-Fi 6, 5G NR

4.8 Παρεμβολές, θόρυβος και ενεργειακή απόδοση

Η κατανόηση των πηγών θορύβου και παρεμβολών είναι απαραίτητη για τον σχεδιασμό αποδοτικών ασύρματων συστημάτων και τη βέλτιστη κατανομή καναλιών του διαθέσιμου φάσματος συχνοτήτων. Χωρίς αυτή τη γνώση, είναι αδύνατο να σχεδιαστούν συστήματα που εξασφαλίζουν αξιόπιστη επικοινωνία σε πραγματικές συνθήκες (Goldsmith, 2005; Rappaport, 2022).

Η ποιότητα των ασύρματων επικοινωνιών επηρεάζεται από τρεις βασικές πηγές υποβάθμισης σήματος:

- Θερμικός θόρυβος: Οφείλεται στη θερμική κίνηση των ηλεκτρονίων και υπάρχει σε κάθε ηλεκτρονική συσκευή. Η ισχύς του εξαρτάται από τη θερμοκρασία και το εύρος ζώνης του συστήματος ($N = kTB$) και αποτελεί το βασικό όριο απόδοσης κάθε ασύρματου συστήματος (Goldsmith, 2005).
- Παρεμβολές ίδιου καναλιού (Co-channel Interference): Εμφανίζονται όταν πολλές συσκευές μεταδίδουν ταυτόχρονα στην ίδια συχνότητα, υποβαθμίζοντας την ποιότητα του σήματος και μειώνοντας τη χωρητικότητα του δικτύου. Το φαινόμενο είναι αρκετά έντονο σε πυκνά περιβάλλοντα (Stallings, 2013).
- Παρεμβολές γειτονικών καναλιών (Adjacent-channel Interference): Προκύπτουν όταν ο δέκτης δεν μπορεί να διαχωρίσει πλήρως το σήμα που θέλει να λάβει από τα σήματα των γειτονικών καναλιών. Το πρόβλημα εντείνεται όταν το γειτονικό σήμα είναι πολύ ισχυρότερο (Stallings, 2013; Molisch, 2011).

Η ενεργειακή απόδοση είναι σημαντική παράμετρος, ιδιαίτερα για φορητές συσκευές. Τεχνικές όπως η προσαρμοστική διαχείριση ισχύος, η λειτουργία χαμηλής κατανάλωσης (sleep mode) και η βελτιστοποίηση πρωτοκόλλων μειώνουν την κατανάλωση ενέργειας (Goldsmith, 2005; Molisch, 2011). Τεχνολογίες όπως το MIMO και το OFDMA, αν και αποδοτικές, απαιτούν μεγάλη υπολογιστική ισχύ, οπότε χρειάζονται αλγόριθμοι που εξισορροπούν απόδοση και κατανάλωση ενέργειας (Dahlman et al., 2018; Rappaport, 2022). Συνολικά, η αντιμετώπιση θορύβου, παρεμβολών και ενεργειακών περιορισμών αποτελεί κρίσιμη πρόκληση για τα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα.

4.9 Συμπεράσματα

Το παρόν κεφάλαιο ανέδειξε τις βασικές αρχές και τεχνικές που επηρεάζουν την ποιότητα και την αποδοτικότητα των ασύρματων επικοινωνιών, με έμφαση στις μεθόδους διασποράς, πολλαπλής πρόσβασης και αντιμετώπισης παρεμβολών. Οι τεχνικές FHSS, DSSS, OFDM και MIMO αποτελούν βασικά εργαλεία για τη βελτίωση της απόδοσης των ασύρματων δικτύων, καθώς κάθε μία εξυπηρετεί διαφορετικές ανάγκες ως προς την ανθεκτικότητα σε παρεμβολές, τη φασματική αποδοτικότητα, τη χωρητικότητα και την αξιοπιστία.

Η επιλογή της κατάλληλης τεχνικής εξαρτάται από το εκάστοτε περιβάλλον λειτουργίας, το διαθέσιμο φάσμα, την παρουσία θορύβου και τις απαιτήσεις κατανάλωσης ενέργειας. Παράλληλα, η κατανόηση των πηγών υποβάθμισης του σήματος, όπως ο θερμικός θόρυβος, οι παρεμβολές ίδιου και γειτονικού καναλιού, είναι απαραίτητη για τον σχεδιασμό αποδοτικών και αξιόπιστων συστημάτων. Συνεπώς, η ισορροπία μεταξύ απόδοσης, ανθεκτικότητας και ενεργειακής αποδοτικότητας αποτελεί κεντρικό στόχο στα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα.

Κεφάλαιο 5ο: Bluetooth

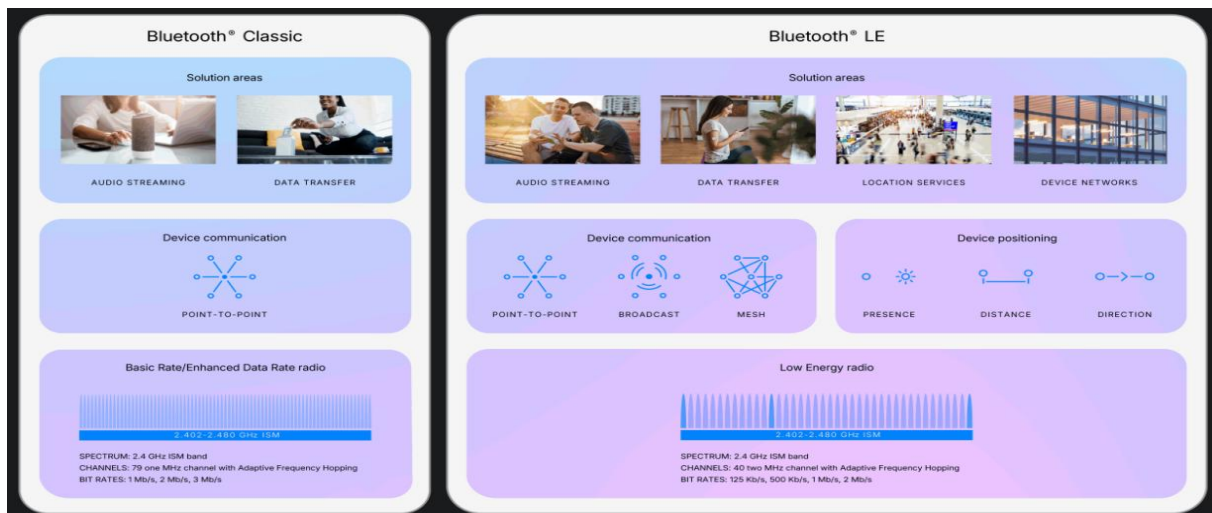
5.1 Ανάπτυξη και Πρόοδος του Προτύπου Bluetooth

Η τεχνολογία Bluetooth καθιερώθηκε στις αρχές της δεκαετίας του 2000 ως ένα πρωτόκολλο ασύρματης επικοινωνίας μικρής εμβέλειας, με στόχο την αντικατάσταση ενσύρματων συνδέσεων ανάμεσα σε φορητές συσκευές. Οι πρώτες εκδόσεις 1.0 και 1.1 παρείχαν περιορισμένη ταχύτητα (μέχρι 721 kbps) και παρουσίαζαν δυσκολίες διαλειτουργικότητας μεταξύ συσκευών διαφορετικών κατασκευαστών (Sauter, 2021). Η έκδοση 1.2 (2003) προσέφερε τεχνολογίες όπως το Adaptive Frequency Hopping (AFH), που περιόρισε τις παρεμβολές σε περιβάλλοντα με πολλαπλές ασύρματες συσκευές (Goldsmith, 2005). Επιπλέον, βελτιώθηκε η καθυστέρηση κατά τη σύνδεση και η ποιότητα φωνητικών εφαρμογών, γεγονός που συνέβαλε στη διεύρυνση της χρήσης του Bluetooth σε κινητά τηλέφωνα και hands-free συστήματα.

Η συνέχεια της εξέλιξης φάνηκε στην έκδοση 2.0 + EDR (2004), η οποία επέφερε σημαντική αύξηση της ταχύτητας στα 3 Mbps και χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας ανά bit δεδομένων (Stallings, 2013). Το Bluetooth 3.0 + HS (2009), συνδυάζοντας το πρωτόκολλο Bluetooth με τη μετάδοση μέσω IEEE 802.11, παρείχε θεωρητικές ταχύτητες έως και 24 Mbps, παρότι η εφαρμογή του σε πραγματικά προϊόντα ήταν περιορισμένη λόγω της πολυπλοκότητας του υβριδικού σχεδιασμού (Haartsen, 2000). Οι εξελίξεις αυτές άνοιξαν τον δρόμο για πιο απαιτητικές εφαρμογές πολυμέσων και streaming, προετοιμάζοντας το έδαφος για τις μεταγενέστερες εκδόσεις χαμηλής κατανάλωσης.

Κομβικό σημείο στην ιστορία της τεχνολογίας, ήταν η μετάβαση στην έκδοση 4.0 (2010), με την εισαγωγή του Bluetooth Low Energy (BLE), κατάλληλο για συσκευές IoT χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, όπως αισθητήρες, wearables και έξυπνα ρολόγια (Faragher, 2014; Al-Fuqaha et al., 2015). Οι εκδόσεις 4.1 και 4.2 ενίσχυσαν περαιτέρω τη λειτουργικότητα, προσθέτοντας βελτιωμένες δυνατότητες IP συνδεσιμότητας (IPv6/6LoWPAN), ενώ αύξησαν την ασφάλεια επικοινωνίας. Χάρη στις βελτιώσεις αυτές, το Bluetooth καθιερώθηκε ως θεμελιώδης τεχνολογία για το IoT, διευρύνοντας σημαντικά την υιοθέτησή του τόσο στη βιομηχανία όσο και στην καθημερινή ζωή (Faragher, 2014; Al-Fuqaha et al., 2015).

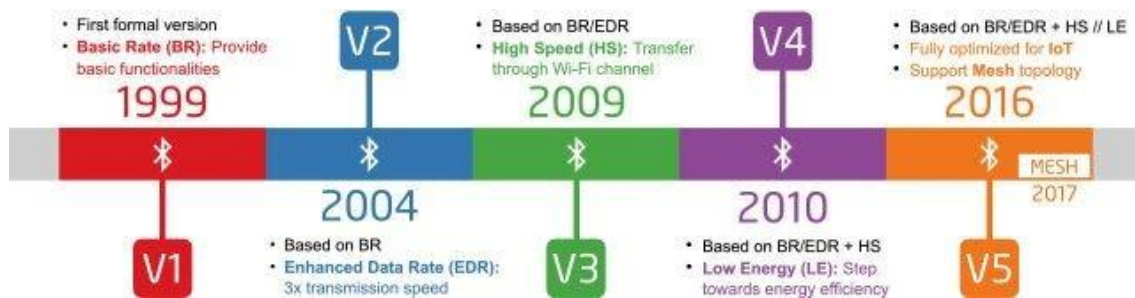
Η διαφοροποίηση μεταξύ Bluetooth Classic και Bluetooth Low Energy (BLE) αποτελεί κομβικό σημείο στην εξέλιξη του προτύπου. Το Bluetooth Classic σχεδιάστηκε για συνεχή ροή δεδομένων και εφαρμογές με υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης, όπως ήχος και μεταφορά αρχείων, ενώ το BLE βελτιστοποιήθηκε για εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και ασύμμετρη επικοινωνία μικρών πακέτων δεδομένων. Η αρχιτεκτονική του BLE υποστηρίζει επιπλέον λειτουργίες όπως η ομαδική εκπομπή σήματος προς πολλές συσκευές ταυτόχρονα (broadcast), η δικτύωση πλέγματος όπου οι συσκευές μεταφέρουν δεδομένα η μία μέσω της άλλης (mesh), καθώς και υπηρεσίες εντοπισμού θέσης, καθιστώντας το ιδιαίτερα κατάλληλο για εφαρμογές IoT, wearables και έξυπνες υποδομές. Οι βασικές διαφορές των δύο τεχνολογιών απεικονίζονται σχηματικά στην Εικόνα 5.1, η οποία συγκρίνει τις υποστηριζόμενες τοπολογίες επικοινωνίας, τα χαρακτηριστικά του ραδιοφάσματος και τις δυνατότητες εντοπισμού θέσης (παρουσία, απόσταση και κατεύθυνση) που προσφέρει αποκλειστικά το BLE.



Εικόνα 5.1: Σύγκριση Bluetooth Classic και Bluetooth Low Energy. Πηγή: Bluetooth SIG (<https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/tech-overview/>)

Από το 2016 και έπειτα, η σειρά 5.x έφερε σημαντικές βελτιώσεις στο Bluetooth. Το Bluetooth 5.0 τετραπλασίασε την εμβέλεια επικοινωνίας σε σύγκριση με την προηγούμενη γενιά, διπλασίασε την ταχύτητα μετάδοσης (μέχρι 2 Mbps) και αύξησε τη χωρητικότητα των broadcast πακέτων κατά 800% (Sauter, 2021). Η έκδοση 5.1 εισήγαγε δυνατότητες εντοπισμού θέσης μέσω του Direction Finding, ενώ οι 5.2 και 5.3 βελτίωσαν την ενεργειακή αποδοτικότητα και υποστήριξαν εξελεγμένες υπηρεσίες ήχου όπως το LE Audio (Stallings, 2013). Η εξέλιξη του Bluetooth καταδεικνύει την ικανότητά του να ανανεώνεται διαρκώς, διατηρώντας την επικαιρότητα και τη χρησιμότητά του σε ένα οικοσύστημα τεχνολογιών που μεταβάλλεται αδιάκοπα.

Η συνολική εξέλιξη του προτύπου παρουσιάζεται γραφικά στην Εικόνα 5.2, όπου αποτυπώνονται οι κυριότερες δυνατότητες κάθε έκδοσης Bluetooth από την V1 (1999) έως την V5 (2016).



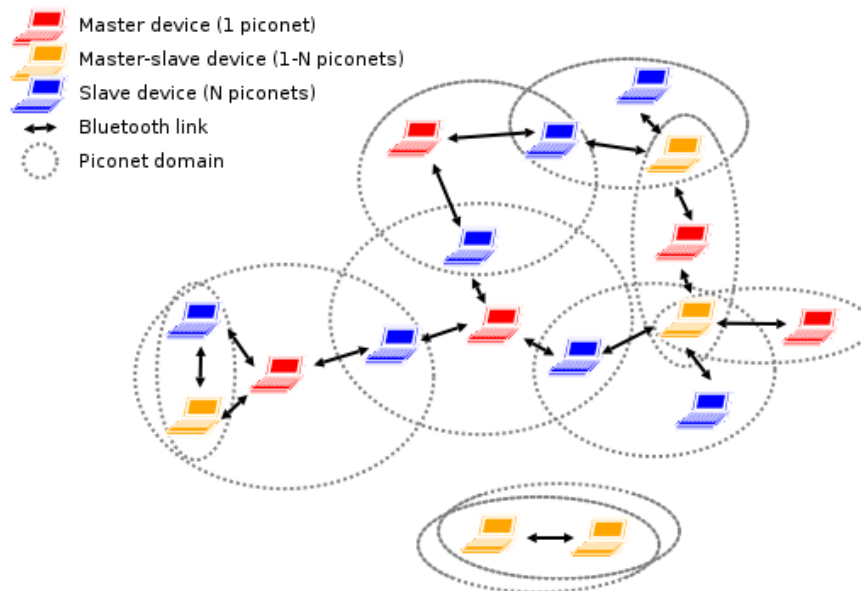
Εικόνα 5.2: Χρονολογική εξέλιξη των εκδόσεων Bluetooth (V1–V5). Πηγή: Sreenivas, J. (2020).

Συνολικά, το Bluetooth χαρακτηρίζεται από απλότητα χρήσης, χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και ευρεία συμβατότητα μεταξύ ετερογενών συσκευών. Με την πάροδο του χρόνου, εξελίχθηκε ώστε να υποστηρίζει υψηλότερες ταχύτητες, αυξημένη εμβέλεια, βελτιωμένη ασφάλεια και νέες λειτουργίες, όπως η μετάδοση ήχου χαμηλής καθυστέρησης και η ενσωμάτωση σε συσκευές IoT.

Προϋπόθεση για την επικοινωνία μέσω Bluetooth είναι η ύπαρξη ειδικού ολοκληρωμένου κυκλώματος (Bluetooth chip) στο υλικό κάθε συσκευής, το οποίο είναι υπεύθυνο για την εκπομπή, τη λήψη, την κωδικοποίηση και την αποκωδικοποίηση των δεδομένων (Haartsen, 2000). Χωρίς αυτό το κύκλωμα, καμία επικοινωνία μέσω Bluetooth δεν είναι εφικτή.

Τα WPAN που βασίζονται στο Bluetooth χρησιμοποιούν τοπολογίες τύπου piconet και scatternet. Στο piconet, μία κύρια συσκευή (master) συντονίζει την επικοινωνία με τις δευτερεύουσες (slave) συσκευές, ενώ στο scatternet πολλαπλά piconets διασυνδέονται, επεκτείνοντας την εμβέλεια και τη

χωρητικότητα του δικτύου (Haartsen, 2000). Οι τοπολογίες αυτές προσφέρουν ευελιξία και αξιοπιστία, καθιστώντας το Bluetooth ιδανικό για προσωπικά δίκτυα που απαιτούν χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, διαλειτουργικότητα και κινητικότητα (Al-Fugaha et al., 2015). Η Εικόνα 5.3 απεικονίζει δύο scatternets όπου οι συσκευές αναλαμβάνουν διαφορετικούς ρόλους: Master (κόκκινο), Master-Slave (πορτοκαλί) και Slave (μπλε). Οι διακεκομμένοι κύκλοι ορίζουν τα επιμέρους piconets, ενώ οι συνδέσεις μεταξύ τους σχηματίζουν το scatternet.



Εικόνα 5.3: Τοπολογίες Bluetooth piconet και scatternet. Πηγή: Wikimedia Commons “Bluetooth network topology”

5.2 Τοπολογίες Bluetooth

5.2.1 Piconet (Master–Slave): Πλεονεκτήματα και Περιορισμοί

Το piconet αποτελεί το βασικό ασύρματο μικροδίκτυο του Bluetooth και βασίζεται στην αρχιτεκτονική Master–Slave. Σε αυτό, μία συσκευή αναλαμβάνει τον ρόλο του Master και έως επτά άλλες λειτουργούν ως Slaves, με συνολικά έως οκτώ ενεργές συσκευές. Ο Master ελέγχει τον συγχρονισμό, τη ροή των δεδομένων και την πρόσβαση στο μέσο επικοινωνίας, αποτρέποντας συγκρούσεις στο ασύρματο περιβάλλον (Haartsen, 2000; Whitaker et al., 2005). Οι Slaves ακολουθούν τις εντολές του Master και δεν επικοινωνούν απευθείας μεταξύ τους χωρίς τη μεσολάβησή του. Αν και η ιεραρχική αυτή δομή εξασφαλίζει αποτελεσματική διαχείριση των πόρων του δικτύου, μπορεί να προκαλέσει αυξημένη καθυστέρηση σε εφαρμογές που απαιτούν άμεση επικοινωνία μεταξύ Slave συσκευών.

Προκειμένου να συνδεθούν δύο συσκευές, πρέπει αρχικά να γίνουν ορατές μεταξύ τους. Η διαδικασία ζεύξης (pairing) διασφαλίζει ότι οι συσκευές αναγνωρίζουν η μία την άλλη και ότι η σύνδεση πραγματοποιείται με ασφαλή τρόπο. Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας αυτής, οι συσκευές σχηματίζουν ένα μικροδίκτυο, γνωστό ως piconet. Ο χρόνος επικοινωνίας χωρίζεται σε χρονικά διαστήματα (time slots), στα οποία κάθε Slave ανταποκρίνεται μόνο όταν του έχει εκχωρηθεί αντίστοιχο slot από τον Master. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγονται συγκρούσεις κατά τη μετάδοση

και εξασφαλίζεται ο αποτελεσματικός συντονισμός της επικοινωνίας (Haartsen, 2000; Whitaker et al., 2005).

Οι Slave συσκευές στο Bluetooth διακρίνονται σε active και parked. Οι active συσκευές συμμετέχουν ενεργά στην ανταλλαγή δεδομένων, ενώ οι parked παραμένουν συγχρονισμένες με το piconet χωρίς να συμμετέχουν στην επικοινωνία και χωρίς να καταλαμβάνουν χρονικά slots (Haartsen, 2000). Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει στο δίκτυο να υποστηρίξει περισσότερες συσκευές από όσες είναι ταυτόχρονα ενεργές, χωρίς να χάνεται ο συγχρονισμός. Επιπλέον, οι Slave συσκευές δεν ξεκινούν αυτόνομα τη μετάδοση δεδομένων, αλλά επικοινωνούν μόνο κατόπιν συντονισμού από τον Master, γεγονός που συμβάλλει στη σωστή ροή των δεδομένων και στην αποφυγή συγκρούσεων.

Η επικοινωνία εντός ενός piconet βασίζεται στην τεχνική αλλαγής συχνότητας (frequency hopping), κατά την οποία ο Master καθορίζει το πρότυπο εναλλαγής συχνοτήτων και τον ρυθμό μετάδοσης (Haartsen, 2000). Οι Slaves ακολουθούν αυτό το πρότυπο και ανταλλάσσουν δεδομένα μόνο όταν τους δοθεί η δυνατότητα από τον Master. Εάν κάποιος Slave δεν ακολουθήσει το καθορισμένο μοτίβο εναλλαγής συχνοτήτων, χάνει τον συγχρονισμό του με το δίκτυο και, κατά συνέπεια, τη σύνδεσή του. Η διαδικασία αυτή συμβάλλει στην αξιόπιστη λειτουργία του δικτύου, αν και περιορίζει την άμεση και αυτόνομη επικοινωνία μεταξύ των Slave συσκευών (Haartsen, 2000; Whitaker et al., 2005).

Η αρχιτεκτονική Master-Slave παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα. Ο Master λειτουργεί ως κεντρικός κόμβος ελέγχου, διευκολύνοντας τον συντονισμό των επικοινωνιών και τη διαχείριση των πόρων του δικτύου (Haartsen, 2000). Παράλληλα, οι Slave συσκευές μπορούν να παραμένουν σε κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας όταν δεν συμμετέχουν ενεργά στην επικοινωνία, ενώ ο κεντρικός έλεγχος συμβάλλει στη μείωση των συγκρούσεων κατά τη μετάδοση.

Ωστόσο, η αρχιτεκτονική αυτή συνοδεύεται και από περιορισμούς. Ένα piconet υποστηρίζει έως επτά ενεργές Slave συσκευές, γεγονός που περιορίζει την επεκτασιμότητά του, ενώ οποιαδήποτε δυσλειτουργία του Master επηρεάζει τη λειτουργία ολόκληρου του δικτύου (Haartsen, 2000). Επιπλέον, η έλλειψη άμεσης επικοινωνίας μεταξύ των Slave συσκευών μπορεί να αυξήσει την καθυστέρηση κατά την ανταλλαγή δεδομένων.

Συνολικά, η τοπολογία piconet προσφέρει απλότητα, χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και αξιόπιστη λειτουργία για δίκτυα μικρής κλίμακας (Haartsen, 2000). Παράλληλα, αποτέλεσε τη βάση για την ανάπτυξη πιο σύνθετων τοπολογιών, όπως τα scatternets, τα οποία επεκτείνουν τη χωρητικότητα και τις δυνατότητες των Bluetooth δικτύων (Whitaker et al., 2005).

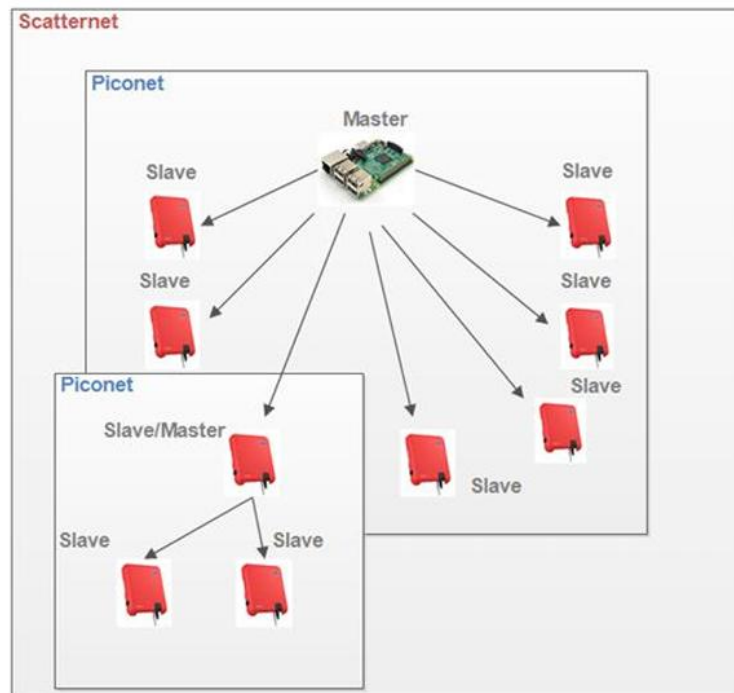
5.2.2 Scatternets: Επέκταση και διαχείριση πολυπλοκότητας

Η έννοια του scatternet αναπτύχθηκε προκειμένου να ξεπεραστούν οι περιορισμοί των μεμονωμένων piconets, προσφέροντας τη δυνατότητα επέκτασης της χωρητικότητας και της εμβέλειας του δικτύου μέσω της διασύνδεσης πολλαπλών piconets (Whitaker et al., 2005). Στην πράξη, μια συσκευή μπορεί να συμμετέχει σε περισσότερα από ένα piconets, αναλαμβάνοντας διαφορετικούς ρόλους και διευκολύνοντας τη μεταφορά δεδομένων μεταξύ τους.

Οι συσκευές που επιτελούν αυτόν τον ρόλο ονομάζονται bridge devices και μπορούν να λειτουργούν ως Slave σε ένα piconet και ταυτόχρονα ως Master σε ένα άλλο. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ διαφορετικών piconets και η δημιουργία μεγαλύτερων και πιο ευέλικτων δικτυακών δομών (Whitaker et al., 2005; Persson et al., 2005).

Παρά τα πλεονεκτήματά τους, τα scatternets παρουσιάζουν αυξημένη πολυπλοκότητα σε σύγκριση με τα piconets. Η αποτελεσματική λειτουργία τους απαιτεί προηγμένους μηχανισμούς χρονικής εναλλαγής, προσεκτικό προγραμματισμό της επικοινωνίας και αυξημένες δυνατότητες συγχρονισμού

μεταξύ των κόμβων. Ως αποτέλεσμα, η διαχείριση ενός scatternet είναι πιο απαιτητική και η συνολική απόδοση του δικτύου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον τρόπο οργάνωσης και συντονισμού των επιμέρους piconets (Mišić & Mišić, 2004; Persson et al., 2005).



Εικόνα 5.4: Τοπολογία Bluetooth: Piconet και Scatternet, Πηγή: Bikrat et al. (2019).

Περαιτέρω επιπλοκές προκύπτουν από τους χρονικούς περιορισμούς του πρωτοκόλλου Bluetooth σε συνδυασμό με την ανάγκη για εξοικονόμηση ενέργειας. Αυτό καθιστά δύσκολη την αποτελεσματική λειτουργία των scatternets, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις που απαιτείται συνεχής και αξιόπιστη επικοινωνία μεταξύ κόμβων (Mišić & Mišić, 2004). Οι περισσότερες εμπορικές εφαρμογές, κυρίως αυτές που βασίζονται στο Bluetooth Low Energy, τείνουν να υιοθετούν πιο απλές τοπολογίες τύπου star (central-peripheral), που διασφαλίζουν σταθερότητα και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας (Zeadally et al., 2019).

Η χρήση scatternets αποκτά ιδιαίτερη σημασία σε περιβάλλοντα όπου είναι αναγκαία η σύνδεση πολλών αισθητήρων ή συσκευών, όπως συμβαίνει σε εφαρμογές του IoT. Σε ένα έξυπνο οικιακό περιβάλλον ή σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις, οι συσκευές καλούνται να ανταλλάσσουν πληροφορίες μεταξύ τους χωρίς να βασίζονται σε μία και μόνο πύλη. Σε αυτό το πλαίσιο, η αρχιτεκτονική scatternet ενισχύει τη δυνατότητα αποκεντρωμένης επικοινωνίας, αρκεί να εφαρμόζονται αποδοτικοί αλγόριθμοι για δρομολόγηση, συγχρονισμό και αποφυγή παρεμβολών.

Όσον αφορά την ασφάλεια, η πολυπλοκότητα αυξάνεται καθώς οι συσκευές μεταβαίνουν από το ένα piconet στο άλλο. Αυτό δημιουργεί αυξημένες απαιτήσεις για αποτελεσματικούς μηχανισμούς ελέγχου πρόσβασης, αυθεντικοποίησης και κρυπτογράφησης. Η συνύπαρξη πολλαπλών master κόμβων στο ίδιο scatternet ενισχύει την πιθανότητα κακόβουλων επιθέσεων, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις ανεπαρκούς προστασίας της επικοινωνίας (Mišić & Mišić, 2004).

Παρότι η υλοποίηση scatternets παραμένει περιορισμένη σε εμπορικό επίπεδο, η ερευνητική κοινότητα συνεχίζει να διερευνά τρόπους βελτίωσης της αποδοτικότητας και της ευρωστίας τους. Οι νεότερες εκδόσεις του πρωτοκόλλου Bluetooth, όπως η έκδοση 5.0 και μεταγενέστερες, προσφέρουν αυξημένες δυνατότητες εμβέλειας, ταχύτητας μετάδοσης και διαχείρισης ενέργειας, ενισχύοντας τη βιωσιμότητα των scatternets σε πιο απαιτητικά σενάρια (Zeadally et al., 2019).

5.3 Τεχνική Υποδομή και Στοιβά Πρωτοκόλλων

Η τεχνολογία Bluetooth λειτουργεί στη μη αδειοδοτημένη ζώνη συχνοτήτων ISM των 2,4 GHz, καλύπτοντας το φάσμα από 2,402 GHz έως 2,480 GHz. Για την αντιμετώπιση παρεμβολών και την αύξηση της αξιοπιστίας της μετάδοσης, χρησιμοποιεί την τεχνική Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS), με 79 κανάλια εύρους 1 MHz το καθένα και ρυθμό εναλλαγής συχνότητας 1.600 hops ανά δευτερόλεπτο (Goldsmith, 2005; Muller, 2000; Pahlavan & Krishnamurthy, 2002).

Το BLE εισήχθη με το Bluetooth 4.0 και στοχεύει σε συσκευές χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, όπως IoT, wearables και έξυπνα σπία. Λειτουργεί στην ίδια ζώνη συχνοτήτων, αλλά με 40 κανάλια των 2 MHz, κάτι που το έκανε ιδανικό για καταναλωτικές, ιατρικές, αθλητικές και βιομηχανικές εφαρμογές (Heydon, 2012).

Η Τεχνολογία Bluetooth χρησιμοποιεί διαφορετικές μεθόδους διαμόρφωσης ανάλογα με την έκδοση και τον σκοπό της μετάδοσης. Οι παλαιότερες εκδόσεις (1.x–2.0) βασίζονται στο Gaussian Frequency Shift Keying (GFSK), ενώ οι εκδόσεις με Enhanced Data Rate (EDR) εφαρμόζουν Phase Shift Keying ($\pi/4$ -DQPSK και 8DPSK) για υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης (Haartsen, 2000, Stallings, 2013).

Στο Bluetooth Classic, ο GFSK είναι μια απλή και σταθερή μέθοδος που επιτρέπει αξιόπιστη μετάδοση με χαμηλές απαιτήσεις σε ενέργεια και υπολογιστική ισχύ. Μετατρέπει τα ψηφιακά δεδομένα (bits) σε μικρές αλλαγές στη συχνότητα του ραδιοσήματος, καθώς το σήμα περνάει από ένα Gaussian φίλτρο πριν τη μετάδοση. Αυτό μειώνει το εύρος ζώνης και τις παρεμβολές στα κανάλια. Το GFSK είναι αξιόπιστο, σταθερό και ενεργειακά αποδοτικό, ιδανικό για συσκευές με μικρές μπαταρίες, όπως αισθητήρες και wearables (Muller, 2000).

Επιπλέον, το Enhanced Data Rate (EDR) είναι μια τεχνολογία του Bluetooth που αυξάνει την ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων έως 3Mbps, σε σχέση με το βασικό Bluetooth που φτάνει το 1Mbps. Ιδανικό για εφαρμογές που απαιτούν μεγαλύτερο εύρος ζώνης, όπως ασύρματα ακουστικά, streaming ήχου και μεταφορά αρχείων (Stallings, 2013). Έτσι, το Bluetooth Low Energy (BLE) υιοθετεί μια πιο απλοποιημένη GFSK διαμόρφωση, ώστε να εξασφαλίζεται χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, με μακρά διάρκεια μπαταρίας για εφαρμογές χωρίς διαρκείς σύνδεση (Heydon, 2012).

Το Bluetooth βασίζεται σε μια ιεραρχική στοιβά πρωτοκόλλων που διασφαλίζουν την επικοινωνία μεταξύ διαφορετικών συσκευών. Το φυσικό επίπεδο είναι υπεύθυνο για τη μετάδοση ραδιοσημάτων, ενώ το επίπεδο ζεύξης (Link Layer/Link Manager) διαχειρίζεται τη δημιουργία και τον έλεγχο των συνδέσεων (Gómez et al., 2012). Το πρωτόκολλο L2CAP κατέχει κεντρικό ρόλο, καθώς αναλαμβάνει την τμηματοποίηση των μεγάλων πακέτων δεδομένων σε μικρότερα (segmentation) για τη μετάδοση και την επανασύνθεσή τους (reassembly) στον παραλήπτη, υποστηρίζοντας την πολυπλεξία διαφορετικών πρωτοκόλλων (Bluetooth SIG, 2023).

Όσον αφορά το πρωτόκολλο RFCOMM, αυτό παρέχει εξομίωση σειριακής θύρας (serial port emulation). Λειτουργεί ουσιαστικά ως εικονική σύνδεση RS-232, επιτρέποντας σε εφαρμογές που απαιτούν σειριακή ροή δεδομένων να λειτουργούν ασύρματα χωρίς αλλαγές στον κώδικά τους (Bluetooth SIG, 2023). Ωστόσο, υπάρχει μια σημαντική ακαδημαϊκή διευκρίνιση: ενώ το RFCOMM χρησιμοποιείται ευρέως από modem και συσκευές που βασίζονται στο Serial Port Profile, οι σύγχρονες συσκευές εισόδου όπως τα ποντίκια και τα πληκτρολόγια χρησιμοποιούν το προφίλ HID. Το προφίλ HID προσφέρει χαμηλότερη καθυστέρηση (latency) και καλύτερη απόδοση σε σχέση με το SPP, καθώς επικοινωνεί απευθείας με το επίπεδο L2CAP (Bluetooth SIG, 2015). Επιπλέον, το RFCOMM στηρίζεται στις υπηρεσίες του L2CAP για τη διαχείριση της μεταφοράς των δεδομένων του (Heydon, 2012).

Παράλληλα, το πρωτόκολλο SDP (Service Discovery Protocol) επιτρέπει τον εντοπισμό διαθέσιμων υπηρεσιών μεταξύ συσκευών (Faragher, 2014). Χρησιμοποιείται για να βρει μια συσκευή τι υπηρεσίες υποστηρίζει πριν συνδεθεί μαζί της, π.χ. A2DP για ήχο, HFP για hands-free. Επιτρέπει στις εφαρμογές να συνδέονται μόνο με τις υπηρεσίες που χρειάζονται, χωρίς να χρειάζεται να γνωρίζουν από πριν τις λεπτομέρειες της άλλης συσκευής. Όλα αυτά τα πρωτόκολλα επιτρέπουν αξιόπιστη, ευέλικτη και πολυλειτουργική επικοινωνία μεταξύ των συσκευών Bluetooth.

Η λειτουργική αυτή διαστρωμάτωση εξασφαλίζει συμβατότητα μεταξύ συσκευών διαφορετικών κατασκευαστών και επιτρέπει την παράλληλη υποστήριξη πολλαπλών προφίλ Bluetooth, όπως Audio, HID, PAN και Health. Παρέχει ευελιξία, επεκτασιμότητα, σταθερή και αξιόπιστη επικοινωνία, διαχειριζόμενη την παράλληλη μετάδοση δεδομένων μεταξύ πολλαπλών συσκευών, και μειώνει τις παρεμβολές (Stallings, 2013).

Το ATT αποτελεί το βασικό πρωτόκολλο ανταλλαγής δεδομένων στο BLE. Κάθε δεδομένο ορίζεται ως "attribute" και περιλαμβάνει μια λαβή (handle), ένα μοναδικό αναγνωριστικό και μια τιμή (value), επιτρέποντας για παράδειγμα τη μετάδοση μετρήσεων καρδιακού παλμού. Πάνω από το ATT λειτουργεί το GATT, το οποίο οργανώνει τα attributes σε δομημένες υπηρεσίες και χαρακτηριστικά. Με αυτόν τον τρόπο, οι εφαρμογές μπορούν να ερμηνεύουν την πληροφορία και να εκτελούν συναλλαγές μεταξύ servers (αισθητήρες) και clients (συσκευές ελέγχου) σε περιβάλλοντα IoT. Συνολικά, η διαστρωμάτωση αυτή επιτρέπει στο BLE να λειτουργεί με εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, καθιστώντας το ιδανικό για wearables και αισθητήρες υγείας που απαιτούν μακρά διάρκεια ζωής μπαταρίας (Gómez et al., 2012; Al-Fuqaha et al., 2015).

5.3.1 Εφαρμογές Bluetooth σε Wearables, Hands-free Συσκευές και IoT

Η υιοθέτηση του Bluetooth σε ποικίλες εφαρμογές ενισχύθηκε από την ευελιξία του πρωτοκόλλου, τη χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και την υποστήριξη πολλαπλών προφίλ. Στον χώρο των wearables, το Bluetooth Low Energy έχει καταστεί το βασικό πρωτόκολλο για τη διασύνδεση συσκευών όπως έξυπνα ρολόγια, βραχιόλια υγείας και αισθητήρες φυσικής κατάστασης. Η δυνατότητα συνεχούς λειτουργίας με μικρές μπαταρίες καθιστά το Bluetooth ιδανικό για τέτοιου τύπου εφαρμογές (Faragher, 2014; Gómez et al., 2012).

Στα hands-free συστήματα, το προφίλ HFP (Hands-Free Profile) έχει ενσωματωθεί ευρέως σε περιβάλλοντα αυτοκινήτου για φωνητικές κλήσεις και αναπαραγωγή ήχου. Η τεχνολογία LE Audio, που βασίζεται στο BLE, προσφέρει υψηλότερη ποιότητα ήχου, χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας και υποστήριξη multi-stream audio, δηλαδή ανεξάρτητες ροές ήχου σε πολλές συσκευές ταυτόχρονα, όπως stereo earbuds (Bluetooth SIG, 2020; Bluetooth SIG, 2023).

Το BLE έχει αναπτυχθεί στον τομέα του IoT και των wearables, επιτρέποντας την ασύρματη επικοινωνία αισθητήρων και ελεγκτών σε εφαρμογές όπως έξυπνα σπίτια, βιομηχανικός αυτοματισμός και smartwatches. Επιπλέον, στον ιατρικό τομέα, χρησιμοποιείται σε φορητές συσκευές παρακολούθησης ασθενών και wearable health devices, ενώ στον αθλητισμό εφαρμόζεται σε αισθητήρες καρδιακών παλμών και fitness trackers. Χάρη στην αρχιτεκτονική ATT/GATT του BLE, η οποία υποστηρίζει αποδοτική μεταφορά μικρών δεδομένων, το Bluetooth έχει καθιερωθεί ως βασικό πρότυπο για IoT συσκευές με περιορισμένη μπαταρία (Gómez et al., 2012; Al-Fuqaha et al., 2015).

Επιπλέον, το Bluetooth Low Energy (BLE) χρησιμοποιείται και σε συστήματα εντοπισμού θέσης σε εσωτερικούς χώρους (IPS - Indoor Positioning Systems), επιτελώντας ρόλο ανάλογο με το GPS για εξωτερικούς χώρους. Το IPS αξιοποιεί τεχνικές όπως το RSSI (Received Signal Strength Indicator),

που εκτιμά την απόσταση με βάση την ισχύ του σήματος, το AoA (Angle of Arrival), που μετρά τη γωνία άφιξης, και το AoD (Angle of Departure), όπου ο πομπός παρέχει πληροφορία γωνίας στον δέκτη. Οι τεχνικές αυτές συχνά συνδυάζονται για μεγαλύτερη ακρίβεια και βρίσκουν εφαρμογή σε εμπορικά κέντρα, μουσεία, νοσοκομεία και αποθήκες (Faragher, 2014).

5.4 Οφέλοι και Περιορισμοί

Η τεχνολογία Bluetooth παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα που συνέβαλαν στην ευρεία της αποδοχή. Αρχικά, διευκολύνει την επικοινωνία μεταξύ συσκευών χωρίς τη χρήση καλωδίων (π.χ. κινητά τηλέφωνα, ακουστικά, ηλεκτρολόγια), προσφέροντας ασύρματη συνδεσιμότητα κοντινής εμβέλειας, γεγονός που την καθιστά ιδανική για προσωπικά ασύρματα δίκτυα (WPANs) (Stallings, 2013). Επιπλέον, χαρακτηρίζεται από χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, ιδιαίτερα στις εκδόσεις Bluetooth Low Energy (BLE), γεγονός που την καθιστά κατάλληλη για φορητές και ενεργειακά περιορισμένες συσκευές (Faragher, 2014). Παράλληλα, λειτουργεί στη μη αδειοδοτημένη ζώνη συχνοτήτων των 2.4 GHz, εξαλείφοντας το κόστος χρήσης φάσματος και διευκολύνοντας την παγκόσμια υιοθέτησή της (Bluetooth SIG, 2020).

Ένα ακόμη σημαντικό πλεονέκτημα είναι η ευρεία διαλειτουργικότητα μεταξύ διαφορετικών κατηγοριών συσκευών, καθώς το πρότυπο Bluetooth υποστηρίζεται από σχεδόν όλους τους κατασκευαστές κινητών τηλεφώνων, υπολογιστών και περιφερειακών συσκευών, όπως smartphones, φορητοί υπολογιστές, smartwatches και συσκευές IoT. Η ευκολία σύζευξης και η απλή υλοποίηση υπηρεσιών όπως φωνητική επικοινωνία, μεταφορά δεδομένων και αναπαραγωγή ήχου καθιστούν το Bluetooth ιδιαίτερα φιλικό προς τον τελικό χρήστη (Stallings, 2013).

Παράλληλα, από την πλευρά της ασφάλειας, το Bluetooth ενσωματώνει μηχανισμούς κρυπτογράφησης και αυθεντικοποίησης (authentication) για την προστασία της επικοινωνίας. Στις σύγχρονες εκδόσεις, οι μηχανισμοί αυτοί έχουν ενισχυθεί με τη χρήση κρυπτογραφίας ελλειπτικών καμπυλών, όπως το ECDH (Elliptic Curve Diffie–Hellman), προσφέροντας αυξημένη ανθεκτικότητα έναντι παθητικών υποκλοπών και επιθέσεων τύπου Man-in-the-Middle (Granjal et al., 2015; Zeadally et al., 2019). Η ενίσχυση αυτή κρίθηκε απαραίτητη, καθώς οι παλαιότεροι μηχανισμοί ζεύξης παρουσίαζαν ευπάθειες που δεν ανταποκρίνονταν στις απαιτήσεις ασφάλειας των σύγχρονων δικτύων IoT.

Ωστόσο, το Bluetooth παρουσιάζει περιορισμούς στην εμβέλεια ανάλογα με την κατηγορία ισχύος της συσκευής. Η επιλογή της κατάλληλης κλάσης εξαρτάται από τις απαιτήσεις της εφαρμογής: η Class 1 (100 mW) χρησιμοποιείται για συνδέσεις μεγάλης εμβέλειας έως περίπου 100 μέτρα, η Class 2 (2,5 mW) αποτελεί το πρότυπο για φορητές συσκευές με εμβέλεια περίπου 10 μέτρα, ενώ η Class 3 (1 mW) περιορίζεται σε εφαρμογές πολύ κοντινής απόστασης, περίπου 1 μέτρο (Bluetooth SIG, 2020).

Παρότι οι νεότερες εκδόσεις, όπως το Bluetooth 5.0 και μεταγενέστερες, προσφέρουν σημαντικά βελτιωμένη εμβέλεια, αυτό επιτυγχάνεται κυρίως μέσω της χρήσης του LE Coded PHY, το οποίο αυξάνει την αξιοπιστία της σύνδεσης μέσω ενισχυμένης κωδικοποίησης (coding gain), εις βάρος του ωφέλιμου ρυθμού μετάδοσης δεδομένων (Bluetooth SIG, 2020).

Ένα ακόμη μειονέκτημα είναι η ευαισθησία σε παρεμβολές, λόγω της κοινής χρήσης της ζώνης συχνοτήτων 2,4 GHz με άλλες ασύρματες τεχνολογίες, όπως Wi-Fi και ZigBee, καθώς και άλλες συσκευές που λειτουργούν στην ίδια περιοχή φάσματος, όπως φούρνοι μικροκυμάτων. Παρά τη χρήση του FHSS για τον μετριασμό των παρεμβολών, το πρόβλημα της συνύπαρξης (coexistence) παραμένει σημαντική πρόκληση σε περιβάλλοντα με υψηλή πυκνότητα ασύρματης δραστηριότητας

(Bluetooth SIG, 2020). Παρόλο που όλες οι εκδόσεις Bluetooth είναι backward-compatible, η σύνδεση περιορίζεται από τις δυνατότητες της παλαιότερης συσκευής, με αποτέλεσμα μειωμένη ταχύτητα, εμβέλεια ή ποιότητα ήχου (Bluetooth SIG, 2023).

Σε μεγάλα δίκτυα (scatternets), η ταχύτητα επικοινωνίας μπορεί να μειωθεί και να υπάρξουν περιορισμοί όταν συνδέονται πολλές συσκευές ταυτόχρονα. Αυτό μπορεί να αυξήσει την επιφάνεια επίθεσης, καθώς περισσότερες συσκευές σημαίνουν περισσότερα πιθανά σημεία εισόδου (Montori et al., 2018).

Επιπλέον, παλαιότερες εκδόσεις Bluetooth δεν υποστηρίζουν νεότερα χαρακτηριστικά, όπως εξελιγμένους audio codecs (π.χ. LC3 για Bluetooth Low Energy Audio) ή codecs όπως το aptX, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένη ποιότητα ήχου και περιορισμούς στη λειτουργικότητα. Επίσης, η συμβατότητα μεταξύ διαφορετικών εκδόσεων μπορεί να επηρεάσει τη διαδικασία ζεύξης, καθώς το σύστημα προσαρμόζεται στις δυνατότητες της παλαιότερης συσκευής. Η διαδικασία pairing στο Bluetooth μπορεί να είναι ευάλωτη σε downgrade attacks, τα οποία στοχεύουν στην υποβάθμιση των μηχανισμών ασφαλείας ώστε να παρακαμφθούν οι προστασίες των Secure Connections (Padgett et al., 2017).

Η συμβατότητα μεταξύ εκδόσεων δεν εγγυάται πλήρη ασφάλεια ή λειτουργικότητα, καθώς η προστασία της επικοινωνίας εξαρτάται τόσο από την έκδοση του πρωτοκόλλου όσο και από την υλοποίησή του (Zeadally et al., 2019).

Πίνακας 5.2: Σύνοψη ισχυρών σημείων και περιορισμών του Bluetooth/BLE για προσωπικά δίκτυα

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας (ειδικά BLE)	Περιορισμένη εμβέλεια (συνήθως 10-30 μέτρα)
Μη αδειοδοτούμενη ζώνη 2.4 GHz	Παρεμβολές από άλλες ασύρματες τεχνολογίες
Ευρεία διαλειτουργικότητα και υποστήριξη	Χαμηλότεροι ρυθμοί μετάδοσης σε σχέση με Wi-Fi
Εύκολη σύζευξη και χρήση	Πολυπλοκότητα σε μεγάλα δίκτυα (Scatternets)
Ευρεία υποστήριξη από κατασκευαστές	Εξάρτηση από συμβατότητα εκδόσεων και πιθανότητα downgrade/legacy επιθέσεων

5.5 Ασφάλεια, Προστασία και Κίνδυνοι

Η ασφάλεια του Bluetooth αποτελεί συνεχή πρόκληση, ιδιαίτερα καθώς το πρωτόκολλο ενσωματώνεται σε κρίσιμες υποδομές όπως ιατρικές συσκευές, συστήματα ελέγχου πρόσβασης και βιομηχανικούς αισθητήρες.

Παλαιότερες εκδόσεις και διαμορφώσεις Bluetooth που χρησιμοποιούν αδύναμους μηχανισμούς ζεύξης ή δεν υποστηρίζουν σύγχρονες μεθόδους κρυπτογράφησης μπορεί να είναι ευάλωτες σε επιθέσεις υποκλοπής δεδομένων (eavesdropping), ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα IoT και embedded συστημάτων (Antonioli et al., 2020; Barua et al., 2022).

Στο BLE, η ασφάλεια βασίζεται στο πρωτόκολλο LE Secure Connections, το οποίο χρησιμοποιεί μηχανισμούς κρυπτογράφησης συμμετρικών κλειδιών μέσω AES-CCM και ανταλλαγής κλειδιών με

Elliptic Curve Diffie–Hellman (ECDH), εξασφαλίζοντας ασφαλές pairing και προστασία των δεδομένων κατά τη μετάδοση (Padgette et al., 2017).

Οι δυνατότητες αυτές εισήχθησαν με το Bluetooth 4.2 και ενισχύθηκαν σε μεταγενέστερες εκδόσεις, βελτιώνοντας την ανθεκτικότητα έναντι επιθέσεων υποκλοπής και Man-in-the-Middle. Παράλληλα, λειτουργίες όπως το Data Length Extension (DLE), που εισήχθη στο Bluetooth 5.0, βελτιώνουν την αποδοτικότητα της μετάδοσης, χωρίς να αποτελούν μηχανισμό ασφάλειας. Έτσι, μειώνονται τα passive attacks, όπως το sniffing, δηλαδή συλλογή πακέτων με σκοπό την μελλοντική τους αποκρυπτογράφηση και εκμετάλλευση αδυναμιών (Padgette et al., 2017).

Παράλληλα, η τεχνική του RF fingerprinting αναδεικνύει ότι κάθε συσκευή Bluetooth φέρει ένα μοναδικό αποτύπωμα στο σήμα εκπομπής της, το οποίο προκύπτει από μικρές κατασκευαστικές διαφοροποιήσεις στα ηλεκτρονικά της κυκλώματα (Soltanieh et al., 2020). Όπως κάθε άνθρωπος διαθέτει ένα μοναδικό δακτυλικό αποτύπωμα, έτσι και κάθε συσκευή παρουσιάζει ανεπαίσθητες διαφορές στην εκπομπή του σήματός της. Αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέσο αναγνώρισης, ανεξάρτητα από τη διεύθυνση MAC ή το όνομα Bluetooth, γεγονός που ενισχύει την αντίληψη ότι η ασφάλεια δεν μπορεί να θεωρηθεί απόλυτη. Συνεπώς, αναδεικνύεται η ανάγκη για την υιοθέτηση πολυεπίπεδων στρατηγικών προστασίας (Jagannath & Jagannath, 2022).

Πολλοί κατασκευαστές επιλέγουν τη μέθοδο σύζευξης «Just Works» για λόγους ευχρηστίας, η οποία όμως δεν προσφέρει μηχανισμούς αυθεντικοποίησης, καθιστώντας την επικοινωνία ευάλωτη σε επιθέσεις Man-in-the-Middle και κλοπή δεδομένων (Padgette et al., 2017). Επιπλέον, η απουσία τακτικών ενημερώσεων λογισμικού εκθέτει πλήθος συσκευών σε γνωστά exploits, όπως αδύναμους μηχανισμούς pairing ή παλαιές εκδόσεις πρωτοκόλλων, επιτρέποντας σε επιτιθέμενους να παραβιάσουν συνδέσεις, να υποκλέψουν ευαίσθητες πληροφορίες ή να εγκαταστήσουν κακόβουλο λογισμικό (Padgette et al., 2017). Επιπλέον, η χρήση τυχαίων MAC addresses (address randomization) συμβάλλει στη μείωση του tracking, αν και η αποτελεσματικότητά της εξαρτάται από την υλοποίηση και των δύο πλευρών της επικοινωνίας.

Στο πλαίσιο του IoT, οι απαιτήσεις ασφάλειας είναι ιδιαίτερα αυξημένες, καθώς συσκευές με περιορισμένη υπολογιστική ισχύ και χωρίς οθόνες ή πληκτρολόγια δυσκολεύονται να εφαρμόσουν σύνθετες διαδικασίες αυθεντικοποίησης. Απαιτούνται λύσεις ασφαλείας χαμηλών απαιτήσεων σε υπολογιστική ισχύ, όπως η συμμετρική κρυπτογράφηση AES και η χρήση μεθόδων Out-of-Band pairing. Αυτές οι διαδικασίες μπορούν να ενσωματώνουν PIN ή πρωτόκολλα challenge-response, εξασφαλίζοντας την ακεραιότητα και την εμπιστευτικότητα των δεδομένων χωρίς να επιβαρύνουν την απόδοση του συστήματος (Granjal et al., 2015; Padgette et al., 2017).

Σε επίπεδο στρατηγικής, η ασφάλεια του Bluetooth δεν περιορίζεται στους τεχνικούς μηχανισμούς, καθώς οι κυβερνοεπιθέσεις εκμεταλλεύονται συνήθως παραλείψεις στην αρχική παραμετροποίηση. Επομένως, απαιτείται συνολική πολιτική ενημέρωσης χρηστών και τυποποίηση διαδικασιών αξιολόγησης ασφαλείας ως απαραίτητα συμπληρώματα των τεχνικών λύσεων (Zeadally, Siddiqui, & Baig, 2019).

5.6 Συμπεράσματα

Το Bluetooth αποτελεί μία από τις σημαντικότερες τεχνολογίες ασύρματης επικοινωνίας μικρής εμβέλειας, καθώς προσφέρει μια απλή, αξιόπιστη και χαμηλής κατανάλωσης λύση για τη διασύνδεση προσωπικών και καταναλωτικών συσκευών. Η ευρεία υιοθέτησή του σε κινητά τηλέφωνα, ακουστικά, περιφερειακά και εφαρμογές IoT επιβεβαιώνει τον καθοριστικό ρόλο του στη σύγχρονη καθημερινή διασύνδεση συσκευών.

Παρά τον περιορισμένο του ρόλο σε σχέση με τεχνολογίες ευρύτερης δικτύωσης, όπως Wi-Fi και 5G, το Bluetooth παραμένει θεμελιώδες πρότυπο για προσωπικά ασύρματα δίκτυα και συνεχίζει να εξελίσσεται ώστε να ανταποκρίνεται στις αυξανόμενες απαιτήσεις της αγοράς. Συνολικά, η συνεχής εξέλιξη του προτύπου επιβεβαιώνει ότι αποτελεί βασικό συστατικό των σύγχρονων ασύρματων οικοσυστημάτων.

Κεφάλαιο 6ο: IrDA (Infrared Data Association)

6.1 Εισαγωγή στις Βασικές Αρχές Υπέρυθρης Μετάδοσης

Η υπέρυθρη μετάδοση αποτελεί μια οπτική ασύρματη τεχνολογία που χρησιμοποιεί ακτινοβολία στο εγγύς υπέρυθρο (τυπικά μεταξύ 850-900 nm για το πρότυπο IrDA) για τη μεταφορά ψηφιακής πληροφορίας (Ghassemloooy et al., 2013). Το 1993, ιδρύθηκε η Infrared Data Association από μια ομάδα εταιρειών τεχνολογίας, στις οποίες περιλαμβάνονταν η HP και η IBM, με στόχο την τυποποίηση της υπέρυθρης επικοινωνίας μεταξύ φορητών συσκευών (Williams, 2000). Η ένωση, η οποία σύντομα έφτασε να αριθμεί εκατοντάδες μέλη από τον κλάδο της πληροφορικής, επεδίωκε να προσφέρει μια οικονομική λύση για την ασύρματη μεταφορά δεδομένων σε μικρές αποστάσεις, σε μια εποχή που τα καλώδια αποτελούσαν το κύριο μέσο σύνδεσης για φορητούς υπολογιστές και PDAs (Williams, 2000).

Η τεχνολογία IrDA γνώρισε ευρεία διάδοση τη δεκαετία του 1990 σε προσωπικούς ψηφιακούς βοηθούς (PDAs), φορητούς υπολογιστές, κινητά τηλέφωνα, εκτυπωτές και ψηφιακές κάμερες, προσφέροντας χαμηλό κόστος, απλότητα υλοποίησης και ελάχιστες ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (Pahlavan & Krishnamurthy, 2002; Stallings, 2013). Ωστόσο, η απαίτηση για οπτική επαφή (line-of-sight) και η μικρή εμβέλεια (0.2-1 m) περιόρισαν την εργονομία της, οδηγώντας τελικά στην υποκατάστασή της από ραδιοσυχνικές τεχνολογίες όπως το Bluetooth και το Wi-Fi (Haartsen, 2000; Infrared Data Association, 2000; Molisch, 2011).

Το παρόν κεφάλαιο εξετάζει τις θεμελιώδεις αρχές της υπέρυθρης μετάδοσης, αναλύει τη δομή της στοιβάς πρωτοκόλλων IrDA, παρουσιάζει τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της τεχνολογίας, και εξηγεί τους λόγους της ιστορικής της πορείας από την ευρεία αποδοχή στην παρακμή.

6.2 Αρχές Υπέρυθρης Μετάδοσης

Η υπέρυθρη (Infrared - IR) μετάδοση είναι μια οπτική ασύρματη τεχνολογία που αξιοποιεί ακτινοβολία στο εγγύς υπέρυθρο (τυπικά γύρω από 850–950 nm) για τη μεταφορά ψηφιακής πληροφορίας, με διαμόρφωση έντασης και άμεση ανίχνευση (IM/DD - Intensity Modulation/Direct Detection) (IrDA Physical Layer Specification, 1994). Στην πράξη, ο πομπός (LED ή laser diode) μετατρέπει το δυαδικό σήμα σε σύντομους φωτεινούς παλμούς και ο δέκτης (φωτοδίοδος/φωτοτρανζίστορ) ανιχνεύει τις αλλαγές στην ένταση του υπέρυθρου φωτός που φτάνει σε αυτήν και τις μετατρέπει σε αντίστοιχες μεταβολές ηλεκτρικού ρεύματος (Ghassemloooy et al., 2013; Molisch, 2011).

Στο φυσικό επίπεδο, οι υλοποιήσεις IR χρησιμοποιούν απλούς παλμοκώδικες (π.χ. On-Off Keying, Pulse Position Modulation ή Return-to-Zero Inverted παραλλαγές) με χρονοθυρίδες (time slots) που ισορροπούν μεταξύ ανοχής σε θόρυβο και φασματικής απόδοσης. Ο συνδυασμός link budget, όπως η ισχύς εκπομπής, η απόσταση, η γωνία διασποράς, η επιφάνεια της φωτοδίοδου και τα φίλτρα, καθώς και οι περιορισμοί ασφάλειας για τα μάτια (IEC 60825-1), καθορίζουν στην πράξη πόσο μακριά και πόσο γρήγορα μπορεί να λειτουργήσει το σύστημα, ειδικά όταν χρησιμοποιούνται laser diodes (IrDA Physical Layer Specification, 1994; Molisch, 2011; IEC, 2014a).

Από πλευράς επίδοσης, ο σχεδιασμός IR ζεύξης είναι θέμα ισορροπίας μεταξύ αντίθετων απαιτήσεων. Το στενό εύρος δέσμης και η υψηλή οπτική ισχύς ενισχύουν την ανθεκτικότητα, αλλά αυξάνουν τον κίνδυνο οπτικών παρεμβολών και θέτουν ζητήματα ασφάλειας ανθρώπινου οφθαλμού (eye-safety) (Molisch, 2011). Παράλληλα, οι γρήγοροι παλμοί επιτρέπουν υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης,

απαιτούν όμως ευαίσθητους φωτοανιχνευτές (photodetectors) και περιβάλλον χαμηλού θορύβου (IrDA Physical Layer Specification, 1994).

Τέλος, η διάχυτη διάδοση (diffuse propagation) κάνει το σύστημα πιο εύκολο στη χρήση, δημιουργεί όμως προβλήματα. Συγκεκριμένα, το σήμα φτάνει στον δέκτη μέσω πολλών διαδρομών (multipath) και με χρονική καθυστέρηση (delay spread), με αποτέλεσμα τα σύμβολα να παρεμβάλλονται μεταξύ τους (ISI) και να μειώνεται ο ρυθμός μετάδοσης, εκτός αν χρησιμοποιηθούν τεχνικές διόρθωσης (equalization) (Molisch, 2011; Stallings, 2013). Το φυσικό στρώμα (IrPHY) μετατρέπει τα δεδομένα σε γρήγορες αναλαμπές υπέρυθρου φωτός και φιλτράρει στον δέκτη τον περιβαλλοντικό φωτισμό, ώστε να ανιχνεύονται μόνο οι παλμοί του πομπού (IrDA Physical Layer Specification, 1994; Molisch, 2011).

Οι συνήθεις συσκευές μεταδίδουν με ταχύτητα από μερικές εκατοντάδες kb/s έως μερικά Mb/s, ενώ τα πιο γρήγορα πρότυπα (FIR, VFIR) μπορούν να φτάσουν δεκάδες Mb/s, αλλά μόνο υπό ιδανικές συνθήκες (IrDA Physical Layer Specification, 1994; Molisch, 2011). Στην πράξη, οι τυπικές αποστάσεις είναι 0,2–1 m (έως ~2 m υπό ιδανικές συνθήκες), η απόδοση μειώνεται σε έντονο ηλιακό φως (Molisch, 2011; Rappaport, 2014). Εξειδικευμένες συσκευές με στενή δέσμη μπορούν να καλύψουν μεγαλύτερες αποστάσεις, αλλά απαιτούν ακριβή ευθυγράμμιση και περισσότερη ενέργεια (Molisch, 2011).

Επειδή το υπέρυθρο φως δεν διαπερνά τοίχους, η επικοινωνία περιορίζεται στον ίδιο χώρο και απαιτεί οπτική επαφή ή κατάλληλη ανάκλαση σε τοίχους ή οροφές με κατάλληλη γεωμετρία δέσμης (beam geometry). Οπτικά φίλτρα στον δέκτη αποκλείουν τον περιβαλλοντικό φωτισμό (ήλιο, λάμπες) και αφήνουν να περάσει μόνο η υπέρυθρη ακτινοβολία του πομπού (IrDA Physical Layer Specification, 1994; Molisch, 2011; Stallings, 2013). Ο χωρικός περιορισμός (spatial confinement) μειώνει τις παρεμβολές και εμποδίζει τη διαρροή σήματος εκτός του χώρου, αλλά το σύστημα είναι ευάλωτο σε σκίαση, κακή ευθυγράμμιση και έντονο ηλιακό φως (Molisch, 2011; Rappaport, 2014).

6.3 Ιστορική Εξέλιξη και Σημασία της IrDA

Ιστορικά, η IrDA τυποποίησε από το 1993 ένα σύνολο πρωτοκόλλων για ασύρματες συνδέσεις μικρής εμβέλειας και κυριάρχησε σε φορητούς υπολογιστές, κινητά, εκτυπωτές και ιατρικές συσκευές. Τα πλεονεκτήματά της ήταν το χαμηλό κόστος, η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και η ανεξαρτησία από το φάσμα ραδιοσυχνοτήτων. Ωστόσο, περιορισμοί όπως η απαίτηση ευθυγράμμισης, η ευπάθεια σε εμπόδια και ισχυρό φωτισμό, καθώς και η αδυναμία διέλευσης μέσα από τοίχους, περιορίζουν τη λειτουργικότητά του (Pahlavan & Krishnamurthy, 2002). Με την εξάπλωση του Bluetooth και του Wi-Fi, που προσφέρουν μεγαλύτερη εμβέλεια και δεν γίας μέσα από τοίχους, υποβάθμισαν την εργονομία σε σχέση με λύσεις RF (IrDA Physical Layer Specification, 1994; Molisch, 2011; Pahlavan & Krishnamurthy, 2002; Rappaport, 2014).

Παρόλο που η χρήση της υποχώρησε στις καταναλωτικές συσκευές, η υπέρυθρη τεχνολογία παραμένει εξαιρετικά χρήσιμη σε ειδικά περιβάλλοντα, όπως νοσοκομεία και βιομηχανικούς χώρους, όπου η αποφυγή ραδιοσυχνοτήτων είναι επιβεβλημένη για τη σωστή λειτουργία ευαίσθητου εξοπλισμού (Ghassemloooy et al., 2013). Επιπλέον, αποτέλεσε το θεμέλιο για την ανάπτυξη σύγχρονων οπτικών ασύρματων τεχνολογιών, όπως το LiFi και το Free Space Optics, υιοθετώντας παρόμοιες αρχές διαμόρφωσης και ανίχνευσης (Ghassemloooy et al., 2013; Soltani et al., 2019).

Σε επίπεδο ασφάλειας, το γεγονός ότι το υπέρυθρο σήμα περιορίζεται εντός των τοίχων ενός χώρου προσφέρει ένα σημαντικό πλεονέκτημα προστασίας από υποκλοπές, αν και για κρίσιμες εφαρμογές η

χρήση κρυπτογραφημένων πρωτοκόλλων παραμένει αναγκαία για τη διασφάλιση της ζεύξης (Gfeller & Bapst, 1979).

Συνοψίζοντας, η υπέρυθρη μετάδοση αποτελεί μια ώριμη και χαμηλού κόστους τεχνολογία για ασφαλείς επικοινωνίες μικρής εμβέλειας. Ενώ το Bluetooth και το Wi-Fi επικράτησαν στην καθημερινή χρήση λόγω της μεγαλύτερης εμβέλειας και της έλλειψης απαίτησης για οπτική επαφή, το υπέρυθρο διατηρεί τη σημασία του σε εφαρμογές τηλεχειρισμού και σε ελεγχόμενα περιβάλλοντα όπου η αξιοπιστία και η απουσία ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών είναι κρίσιμες (Ghassemloooy et al., 2013).

6.4 Δομή και Λειτουργία της Στοιβάς IrDA

Η στοιβά της IrDA σχεδιάστηκε για ασύρματες ζεύξεις μικρής εμβέλειας με υπέρυθρη ακτινοβολία, δίνοντας έμφαση στο χαμηλό κόστος, τη μικρή κατανάλωση και τη διαλειτουργικότητα μεταξύ φορητών συσκευών. Χωρίζεται σε στρώματα με συγκεκριμένο ρόλο το καθένα: το IrPHY (Infrared Physical Layer) μετατρέπει τα bits σε φως, το IrLAP (Infrared Link Access Protocol) εξασφαλίζει αξιόπιστη σύνδεση, το IrLMP/LM-IAS (Infrared Link Management Protocol / Link Management Information Access Service) επιτρέπει την ταυτόχρονη λειτουργία πολλών υπηρεσιών και το TinyTP (Tiny Transport Protocol) ελέγχει τη ροή δεδομένων (Infrared Data Association, 1996). Έτσι, οι εφαρμογές (π.χ. OBEX, IrCOMM) τρέχουν πάνω από τη στοιβά IrDA και βλέπουν ένα σταθερό κανάλι μεταφοράς δεδομένων, χωρίς να ασχολούνται με τις ιδιαιτερότητες του οπτικού μέσου (Molisch, 2011; Pahlavan & Krishnamurthy, 2002).

Στη στοιβά IrDA, το IrPHY (Physical Layer) καθορίζει όλα τα ηλεκτρο-οπτικά γνωρίσματα της ζεύξης. Αυτά περιλαμβάνουν τα επιτρεπτά επίπεδα οπτικής ισχύος, τη γωνία της δέσμης εκπομπής και λήψης, τον χρονισμό και το σχήμα των παλμών, την κωδικοποίηση των bit, καθώς και τα φασματικά φίλτρα του δέκτη για απόρριψη του φωτισμού περιβάλλοντος (Infrared Data Association, 1994). Η πρακτική απόδοση εξαρτάται κρίσιμα από τα γεωμετρικά και φυσικά χαρακτηριστικά της ζεύξης.

Η ληφθείσα ισχύς στην IrDA ακολουθεί κατά προσέγγιση τον νόμο του αντιστρόφου τετραγώνου ($1/d^2$), που σημαίνει ότι η ισχύς του σήματος μειώνεται τετραγωνικά με την απόσταση. Όσο μεγαλύτερη η απόσταση, τόσο πιο απότομα πέφτει η ισχύς. Δηλαδή, αν διπλασιαστεί η απόσταση, η ισχύς μειώνεται στο ένα τέταρτο (Molisch, 2011).

Επιπλέον, η μετάδοση επηρεάζεται από τη γωνία μεταξύ πομπού και δέκτη, σύμφωνα με το Lambertian μοντέλο, που περιγράφει πώς ο πομπός εκπέμπει φως δυνατό ευθεία μπροστά και όλο και πιο αδύναμο όσο αυξάνεται η γωνία (IrDA Physical Layer Specification, 1994; Molisch, 2011). Δηλαδή, όσο πιο πλάγια είναι η δέσμη, τόσο λιγότερο φως ανιχνεύεται. Και οι δύο αυτοί παράγοντες επηρεάζουν άμεσα την αξιοπιστία της σύνδεσης.

Οι συνήθεις πομποδέκτες λειτουργούν μέσα σε ένα στενό κώνο ($\pm 15^\circ$ – $\pm 30^\circ$), οπότε αν οι συσκευές δεν είναι σωστά τοποθετημένες και ευθυγραμμισμένες μεταξύ τους, η ποιότητα της σύνδεσης υποβαθμίζεται σημαντικά (IrDA Physical Layer Specification, 1994; Molisch, 2011).

6.4.1 Προφίλ Ταχύτητας (SIR, MIR, FIR, VFIR)

Το IrPHY ορίζει διαφορετικά προφίλ ταχύτητας και απαιτεί η ισχύς εκπομπής να παραμένει σε ασφαλή επίπεδα για τα μάτια, σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60825-1 (Class 1) (IEC, 2014a). Οι εκδόσεις ξεκίνησαν με το SIR (Serial IR), το πιο αργό αλλά απλούστερο προφίλ με ταχύτητες,

πέρασαν στο MIR (Medium IR), στο FIR (Fast IR) και στο VFIR (Very Fast IR), και επεκτάθηκαν ερευνητικά στο UFIR (Ultra Fast IR) και στο Giga-IR, ωστόσο τα δύο τελευταία έμειναν περιορισμένα σε εξειδικευμένα σενάρια (IrDA, n.d.)

Πιο αναλυτικά, κάθε προφίλ διαφέρει στην ταχύτητα, στον τρόπο που κωδικοποιεί τα δεδομένα σε παλμούς φωτός και στην ακρίβεια χρονισμού που απαιτεί (IrDA, 1996; Molisch, 2011):

- SIR: Λειτουργεί σε ταχύτητες ~9,6–115,2 kb/s και κωδικοποιεί τα δεδομένα με σύντομες αναλαμπές φωτός για το bit '1' και απουσία φωτός για το bit '0' (RZI - Return-to-Zero Inverted). Επειδή το LED ανάβει μόνο για κλάσματα του χρόνου, η κατανάλωση ενέργειας είναι πολύ χαμηλή. Είναι το πιο απλό και οικονομικό προφίλ, κατάλληλο για φορητές συσκευές, κινητά, PDAs και εκτυπωτές (IrDA, 1996).
- MIR: Προσφέρει ταχύτητες 0,576–1,152 Mb/s με στενότερους παλμούς και αυστηρότερο χρονισμό σε σχέση με το SIR, απαιτώντας πιο ακριβή εξαρτήματα, όπως ταλαντωτές (oscillators). Παραμένει όμως πιο οικονομικό και απλό από το FIR, και είναι κατάλληλο για εφαρμογές που χρειάζονται υψηλότερη ταχύτητα, όπως η μεταφορά αρχείων (IrDA, 1996; Molisch, 2011).
- FIR: Φτάνει ταχύτητες έως 4 Mb/s κωδικοποιώντας τα δεδομένα ανάλογα με τη χρονική θέση του παλμού (PPM - Pulse Position Modulation). Στο PPM, κάθε ομάδα bits (συνήθως 2 ή 4) κωδικοποιείται ανάλογα με τη χρονική θέση ενός παλμού μέσα σε ένα προκαθορισμένο χρονικό παράθυρο που χωρίζεται σε slots. Δηλαδή το πότε εμφανίζεται ο παλμός καθορίζει ποια bits μεταδίδονται. Τα δεδομένα μεταδίδονται σε αυστηρά πλαισιωμένα blocks με προσθήκη ισχυρού ελέγχου σφαλμάτων (FCS - Frame Check Sequence), προσφέροντας σημαντική αύξηση απόδοσης με καλή αντοχή στις πολλαπλές ανακλάσεις (multipath) που συναντώνται σε εσωτερικούς χώρους (IrDA, 1996; Molisch, 2011).
- VFIR: Φτάνει ταχύτητες έως 16 Mb/s χρησιμοποιώντας κωδικοποίηση NRZ (Non-Return-to-Zero), όπου κάθε bit διατηρεί σταθερό επίπεδο σήματος για όλη τη διάρκειά του (0 = χαμηλό, 1 = υψηλό). Περιορισμοί run-length εξασφαλίζουν ότι δεν υπάρχουν υπερβολικά μεγάλες σειρές συνεχόμενων 0 ή 1, διευκολύνοντας τον συγχρονισμό του δέκτη. Απαιτείται ταχύτερα οπτοηλεκτρονικά εξαρτήματα και εξελιγμένα κυκλώματα φιλτραρίσματος σε σχέση με τα προηγούμενα προφίλ, ώστε ο δέκτης να ξεχωρίζει σωστά τους πολύ στενούς παλμούς (IrDA, 1996; Molisch, 2011).

Πέρα από τα τέσσερα κύρια προφίλ, αναπτύχθηκαν ερευνητικές επεκτάσεις που απέδειξαν ότι είναι εφικτές πολύ υψηλότερες ταχύτητες. Το UFIR έφτασε ~96 Mb/s, αλλά δεν υιοθετήθηκε ευρέως λόγω εξειδικευμένου υλικού και ανταγωνισμού από Wi-Fi και Bluetooth. Και το Giga-IR έφτασε ~1 Gb/s με προηγμένα laser diodes και φωτοδιόδους υψηλής ευαισθησίας (APD - Avalanche PhotoDiode), αλλά έμεινε αποκλειστικά σε εργαστηριακό επίπεδο (Molisch, 2011).

Ο Πίνακας 6.1 συνοψίζει τα προφίλ ταχύτητας IrDA και την τυπική χρήση ανά κατηγορία συσκευής.

Πίνακας 6.1: Προφίλ IrDA

Προφίλ	Ενδεικτική ταχύτητα	Ενδεικτική απόσταση	Ενδεικτικά τεχνικά στοιχεία	Ενδεικτική χρήση
SIR	9,6-115,2 kb/s	1-2 m	RZI (3/16), απλοί δέκτες/LED	Τηλέφωνα 1990s, PDA, εκτυπωτές
MIR	0,576-1,152 Mb/s	0.5-1 m	RZI, αυστηρότερος χρονισμός	Laptops, φορητοί σαρωτές
FIR	έως 4 Mb/s	0.3-0.5 m	PPM, ισχυρό CRC/FCS	Επαγγελματικά laptops, περιφερειακά, ψηφιακές κάμερες

VFIR	έως 16 Mb/s	0.2-0.3 m	NRZ, ταχύτερη πλαισίωση, εξελιγμένα φίλτρα	Εξειδικευμένος βιομηχανικός και ιατρικός εξοπλισμός
------	-------------	-----------	--	---

Πέρα από τα προφίλ ταχύτητας, όλες οι υλοποιήσεις IrDA μοιράζονται ορισμένα θεμελιώδη χαρακτηριστικά που επηρεάζουν τη σχεδίαση και την απόδοσή τους. Η half-duplex λειτουργία, όπου μία συσκευή εκπέμπει κάθε φορά και οι ρόλοι εναλλάσσονται, απλοποιεί την κατασκευή του πομποδέκτη, καθώς δεν χρειάζεται να εκπέμπει και να λαμβάνει ταυτόχρονα. Αυτό διευκολύνει τον έλεγχο ροής δεδομένων σε φορητές συσκευές με περιορισμένη μνήμη προσωρινής αποθήκευσης (buffers). Έτσι, σε συνδυασμό με τους μικρούς χρόνους ενεργοποίησης των παλμών, διατηρεί χαμηλή τη μέση κατανάλωση ενέργειας. Ωστόσο, κάθε εναλλαγή κατεύθυνσης προσθέτει μια μικρή καθυστέρηση (turnaround time), που μειώνει την πραγματική ταχύτητα μετάδοσης (throughput) (IrDA, 1996; Molisch, 2011).

6.4.2 Ανώτερα Επίπεδα Στοιβάς (IrLAP, IrLMP, TinyTP)

Πάνω από το IrPHY, το IrLAP υλοποιεί μια ζεύξη τύπου HDLC (High-level Data Link Control), αναλαμβάνοντας την εύρεση κοντινών συσκευών, συνδέει τις συσκευές και εξασφαλίζει να φτάνουν σωστά τα δεδομένα, επαναστέλλοντας αυτόματα ό,τι χαθεί (ARQ - Automatic Repeat Request). Δηλαδή, αν ένα κομμάτι δεδομένων χαθεί ή καταστραφεί στη μετάδοση, ο πομπός το ξαναστέλλει αυτόματα χωρίς να χρειαστεί να το ζητήσει ο χρήστης. Έτσι, παρέχει στα ανώτερα επίπεδα ένα αξιόπιστο κανάλι χωρίς να επηρεάζονται από τις ιδιαιτερότητες του οπτικού μέσου.

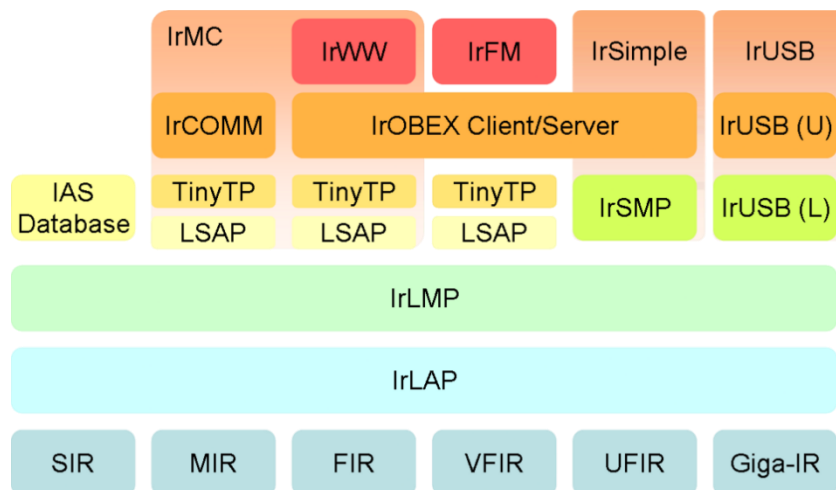
Το IrLMP (Infrared Link Management Protocol) επιτρέπει την ταυτόχρονη υποστήριξη πολλαπλών υπηρεσιών πάνω από μία φυσική σύνδεση υπέρυθρων. Για παράδειγμα, μπορεί να υποστηρίζεται ταυτόχρονα μεταφορά αρχείων και ανταλλαγή επαφών. Κάθε υπηρεσία αναγνωρίζεται μέσω ενός LSAP (Link Service Access Point), παρόμοια με τη λειτουργία των θυρών (ports) στο TCP/IP (Pahlavan & Krishnamurthy, 2002).

Το LM-IAS (Information Access Service) λειτουργεί ως μηχανισμός ανακάλυψης υπηρεσιών (service discovery), παρέχοντας έναν κατάλογο με τις υπηρεσίες που υποστηρίζει κάθε συσκευή, όπως μεταφορά αρχείων ή εκτύπωση (Pahlavan & Krishnamurthy, 2002).

Τέλος, το TinyTP (Tiny Transport Protocol) έχει σχεδιαστεί για χαμηλή κατανάλωση πόρων, ώστε να υποστηρίζει λειτουργία σε φορητές συσκευές με περιορισμένη μνήμη και ενέργεια. Υλοποιεί μηχανισμό ελέγχου ροής βασισμένο σε credits (credit-based flow control), αποτρέποντας την υπερχείλιση του δέκτη και εξασφαλίζοντας ομαλή μετάδοση δεδομένων. Βρίσκεται πάνω από το IrLMP/LM-IAS και παρέχει υπηρεσίες μεταφοράς σε πρωτόκολλα εφαρμογών όπως το OBEX και το IrCOMM (Williams, 2000).

Πέρα από τα βασικά στρώματα της αρχιτεκτονικής IrDA, έχουν αναπτυχθεί εξειδικευμένα πρωτόκολλα εφαρμογών για συγκεκριμένες λειτουργίες, όπως το IrMC (Infrared Mobile Communications) για συγχρονισμό επαφών και ημερολογίων και το IrSimple (Infrared Simple) για ταχύτερη και απλοποιημένη μεταφορά αρχείων (Infrared Data Association, 2000; Pahlavan & Krishnamurthy, 2002). Τα πρωτόκολλα αυτά λειτουργούν πάνω από την ίδια στοίβα πρωτοκόλλων και στοχεύουν σε συγκεκριμένες εφαρμογές, χωρίς να μεταβάλλουν τη βασική αρχιτεκτονική του IrDA.

Η συνολική αρχιτεκτονική της στοίβας IrDA απεικονίζεται στο Εικόνα 6.1, όπου φαίνεται η ιεραρχική οργάνωση των στρωμάτων από το φυσικό επίπεδο έως τα πρωτόκολλα εφαρμογών.



Εικόνα 6.1: Πλήρης στοίβα πρωτοκόλλων IrDA. Πηγή: Wikimedia Commons “IrDA protocol stack basic”

Ο Πίνακας 6.2 παρουσιάζει συνοπτικά τον ρόλο και τα βασικά γνωρίσματα κάθε στρώματος της στοίβας IrDA, ώστε να γίνει σαφές τι επιλύει το καθένα κατά τη μετάδοση δεδομένων μέσω υπέρυθρου.

Πίνακας 6.2: Επίπεδα IrDA

Επίπεδο	Ενδεικτικός ρόλος	Ενδεικτικά χαρακτηριστικά
IrPHY	Μετατροπή bits σε φως, κωδικοποίηση	850–950 nm, παλμοί RZI (3/16), φίλτρα δέκτη, SIR/MIR/FIR/VFIR
IrLAP	Αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων	HDLC πλαίσια, ARQ, εύρεση συσκευών
IrLMP	Πολυπλεξία	LSAP, πολυπλεξία υπηρεσιών πάνω από μία σύνδεση
LM-IAS	Εύρεση υπηρεσιών	Κατάλογος διαθέσιμων υπηρεσιών ανά συσκευή
TinyTP	Έλεγχος ροής και κατακερματισμός	Επανασυναρμολόγηση, έλεγχος υπερφόρτωσης

6.4.3 Δυνατότητες και Περιορισμοί της IrDA

Η IrDA αξιολογείται με βάση τα χαρακτηριστικά του υπέρυθρου μέσου, τα προφίλ ταχύτητας και την απαίτηση οπτικής επαφής. Σε μικρές αποστάσεις και ελεγχόμενο περιβάλλον, προσφέρει απλότητα, χαμηλή κατανάλωση και ασφάλεια, καθώς το σήμα παραμένει εντός του χώρου. Όταν όμως απαιτείται μεγαλύτερη εμβέλεια, ευελιξία κινήσεων ή συνεχής αμφίδρομη επικοινωνία, το Bluetooth και το Wi-Fi υπερτερούν (Molisch, 2011; Pahlavan & Krishnamurthy, 2002).

Τα βασικά πλεονεκτήματα της IrDA είναι το χαμηλό κόστος εξοπλισμού και υλοποίησης, η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και η ανεξαρτησία από το φάσμα ραδιοσυχνοτήτων (Molisch, 2011). Το οπτικό φάσμα 850–950 nm είναι ελεύθερο παγκοσμίως και δεν απαιτεί αδειοδότηση. Δεν επηρεάζεται από τις ραδιοσυχνολικές παρεμβολές των Wi-Fi, Bluetooth, γεγονός που το καθιστά κατάλληλο για ελεγχόμενα περιβάλλοντα, όπως ιατρικούς και βιομηχανικούς χώρους (Rappaport, 2014). Επειδή το υπέρυθρο δεν διαπερνά τοίχους, το σήμα παραμένει εντός του χώρου, προσφέροντας φυσική ασφάλεια μειώνοντας τον κίνδυνο υποκλοπής από τρίτους. Σε ελεγχόμενο φωτισμό η σύνδεση είναι

σταθερή και αξιόπιστη, ενώ η στοίβα πρωτοκόλλων καταλαμβάνει λίγη μνήμη, καθιστώντας την κατάλληλη για φορητές και ενσωματωμένες συσκευές (IrDA, 1996; Molisch, 2011).

Τα μειονεκτήματα της IrDA είναι αρκετά. Απαιτεί ευθυγράμμιση μεταξύ πομπού και δέκτη, ενώ σκιάσεις, εμπόδια και έντονο υπέρυθρο φως υποβαθμίζουν σημαντικά την απόδοση (Molisch, 2011; Rappaport, 2014). Λειτουργεί αξιόπιστα μόνο σε αποστάσεις 0,2-1 m, πέρα από τις οποίες το σήμα εξασθενεί και η σύνδεση χάνεται (IrDA, 1996). Επιπλέον, η half-duplex λειτουργία εισάγει καθυστερήσεις εναλλαγής (turnaround time), μειώνοντας τον πραγματικό ρυθμό μετάδοσης σε σχέση με τον ονομαστικό (Infrared Data Association, 2000; Molisch, 2011). Επίσης, η διαθεσιμότητα συσκευών και drivers έχει μειωθεί σημαντικά λόγω της επικράτησης του Bluetooth και του Wi-Fi (Pahlavan & Krishnamurthy, 2002). Τέλος, τα δεδομένα μεταδίδονται χωρίς κρυπτογράφηση και η φυσική ασφάλεια του LOS δεν αποτρέπει υποκλοπή εντός του χώρου, οπότε για κρίσιμες εφαρμογές απαιτούνται επιπλέον μηχανισμοί ασφάλειας (Pahlavan & Krishnamurthy, 2002; Stallings, 2013).

Το Bluetooth ενσωματώνει μηχανισμούς αυθεντικοποίησης και κρυπτογράφησης, γεγονός που ενισχύει την ασφάλειά του σε πολλές εφαρμογές. Οι πρώιμες εκδόσεις παρουσίασαν κενά ασφαλείας, κυρίως επιθέσεις man-in-the-middle και υποκλοπής κλειδιών, τα οποία αντιμετωπίστηκαν στις εκδόσεις 4.2 και 5.0 (Antonoli et al., 2020). Οι νεότερες εκδόσεις του προτύπου Bluetooth περιλαμβάνουν διορθώσεις και πρόσθετους μηχανισμούς προστασίας για τον περιορισμό τέτοιων επιθέσεων (Padgette et al., 2022).

Η IrDA, αντίθετα, στηρίζεται αποκλειστικά στη φυσική απομόνωση, η υποκλοπή είναι εφικτή μόνο αν ο επιτιθέμενος βρίσκεται στην ίδια οπτική γραμμή με τον δέκτη (Molisch, 2011). Χωρίς κρυπτογράφηση ή αυθεντικοποίηση στο επίπεδο ζεύξης, η ασφάλειά της είναι επαρκής για απλές εφαρμογές, αλλά ανεπαρκής για εφαρμογές που απαιτούν υψηλή εμπιστευτικότητα (Pahlavan & Krishnamurthy, 2002; Stallings, 2013).

6.5 Εφαρμογές και Σύγχρονες Χρήσεις

Παρά τους περιορισμούς της, η IrDA παραμένει χρήσιμη σε περιβάλλοντα όπου η οπτική εγγύτητα, η χαμηλή κατανάλωση και η απουσία RF εκπομπών αποτελούν πλεονεκτήματα. Πριν τη διάδοση του Bluetooth και του Wi-Fi, τα PDAs και οι φορητοί υπολογιστές χρησιμοποιούσαν IrDA για ανταλλαγή επαφών, ημερολογίων και αρχείων μέσω της λειτουργίας «beaming», αποστολή δεδομένων με υπέρυθρες. Αρκούσε να στρέψουν οι χρήστες τις συσκευές τους η μία προς την άλλη, χωρίς καλώδια ή ρυθμίσεις (Molisch, 2011; Pahlavan & Krishnamurthy, 2002).

Ειδικότερα, στα σημεία πώλησης (POS - Point of Sale), η σταθερή τοποθέτηση του τερματικού και του εκτυπωτή αποδείξεων σε προκαθορισμένη θέση και γωνία εξασφαλίζει σταθερή σύνδεση με χαμηλό κόστος (Molisch, 2011). Σε γραφεία και βιομηχανικούς χώρους, συσκευές όπως σαρωτές barcodes, φορητοί εκτυπωτές και τερματικά αποθήκης χρησιμοποιούν IrDA για κοντινή επικοινωνία χωρίς RF παρεμβολές (Rappaport, 2014). Αντίστοιχα, στα ιατρικά συστήματα, όπου απαιτείται ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (πρότυπο IEC 60601-1-2), η IrDA χρησιμοποιείται για ασύρματη μεταφορά δεδομένων, ρυθμίσεων και ενημερώσεων σε οθόνες παρακολούθησης ζωτικών σημείων, αντλίες έγχυσης και διαγνωστικές συσκευές, χωρίς να επηρεάζει άλλα ιατρικά μηχανήματα (Molisch, 2011; IEC, 2014b).

Επιπλέον, σε kiosks αυτοεξυπηρέτησης, η σύνδεση γίνεται μόνο αν ο χρήστης βρίσκεται φυσικά μπροστά στη συσκευή, χωρίς passwords ή pairing, έτσι η φυσική παρουσία είναι η ίδια ο μηχανισμός ασφάλειας (Pahlavan & Krishnamurthy, 2002). Σε γραμμές παραγωγής όπου οι RF εκπομπές μπορούν

να παρεμβάλλονται σε αυτοματισμούς και ευαίσθητο εξοπλισμό, η IrDA αποτελεί την ιδανική επιλογή.

Συνολικά, η IrDA αποτελεί μια αξιόπιστη τεχνολογία για εφαρμογές που απαιτούν φυσική ασφάλεια, χαμηλή κατανάλωση και ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (EMC). Προσφέρει απλότητα υλοποίησης και χαμηλό κόστος, με το σήμα να παραμένει εντός του χώρου. Ωστόσο, απαιτεί οπτική επαφή και έχει περιορισμένη εμβέλεια, χαρακτηριστικά που την καθιστούν ιδανική για ελεγχόμενα περιβάλλοντα, όπου η ακρίβεια και η ασφάλεια υπερέχουν έναντι της ευελιξίας (Molisch, 2011; Rappaport, 2014).

6.6 Δέκτης και Ενεργειακή Απόδοση

Ο δέκτης της IrDA αποτελείται από μια φωτοδίοδο που ανιχνεύει την υπέρυθρη ακτινοβολία και έναν ενισχυτή transimpedance (TIA), ο οποίος τη μετατρέπει σε ηλεκτρικό σήμα (Molisch, 2011). Για την αποφυγή παρεμβολών από περιβαλλοντικό φωτισμό, όπως ηλιακή ακτινοβολία ή τεχνητές πηγές υπέρυθρης ακτινοβολίας, χρησιμοποιούνται οπτικά φίλτρα που απορρίπτουν ανεπιθύμητες συχνότητες, ενώ ο αυτόματος έλεγχος ενίσχυσης (AGC – Automatic Gain Control) προσαρμόζει την ευαισθησία του δέκτη ανάλογα με την ισχύ του λαμβανόμενου σήματος (Molisch, 2011). Όταν δεν υπάρχει ενεργή μετάδοση, η συσκευή εισέρχεται σε κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης και ενεργοποιείται κατά την ανίχνευση έγκυρου υπέρυθρου σήματος (wake-on-IR), συμβάλλοντας στην εξοικονόμηση ενέργειας.

Τα προφίλ μετάδοσης της IrDA (MIR, FIR, VFIR) επιτρέπουν υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης, μειώνοντας τον συνολικό χρόνο εκπομπής και συνεπώς την ενεργειακή κατανάλωση ανά bit, υπό την προϋπόθεση ότι οι συσκευές είναι σωστά ευθυγραμμισμένες και σε μικρή απόσταση (Molisch, 2011).

Η ενεργειακή κατανάλωση εξαρτάται από το duty cycle της συσκευής, δηλαδή τον λόγο του χρόνου ενεργής μετάδοσης προς τον συνολικό χρόνο λειτουργίας. Η ενέργεια ανά bit προκύπτει από το γινόμενο της ισχύος σε κάθε κατάσταση λειτουργίας (εκπομπή, λήψη, αναμονή) επί τον αντίστοιχο χρόνο, κανονικοποιημένο ως προς τον αριθμό των μεταδιδόμενων bits (Molisch, 2011). Συνεπώς, η αύξηση του ρυθμού μετάδοσης μειώνει τον χρόνο ενεργής λειτουργίας και οδηγεί σε χαμηλότερη ενέργεια ανά bit (IrDA, 1996).

Για τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης μπορούν να εφαρμοστούν τεχνικές όπως η προσαρμογή της ισχύος εκπομπής του IR LED ανάλογα με την απόσταση, η χρήση οπτικών φίλτρων και AGC για σταθεροποίηση της λήψης, καθώς και η επιλογή υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης (FIR/VFIR), οι οποίοι μειώνουν τον συνολικό χρόνο εκπομπής και την κατανάλωση ενέργειας (Molisch, 2011).

6.7 Συγκριτική Ανάλυση

Για την πλήρη κατανόηση της IrDA στις ασύρματες τεχνολογίες, είναι χρήσιμη η σύγκρισή της με το Bluetooth Low Energy (BLE) και το Wi-Fi, δηλαδή τις δύο τεχνολογίες που την αντικατέστησαν. Η ανάλυση εξετάζει πρώτα την ενεργειακή κατανάλωση και στη συνέχεια τα τεχνικά χαρακτηριστικά που οδήγησαν στην επικράτηση του Bluetooth έναντι της IrDA.

Το Wi-Fi καταναλώνει σημαντικά περισσότερη ενέργεια από το BLE και την IrDA. Ακόμα και σε αδράνεια (idle mode) καταναλώνει 15–20 mA, καθώς παρακολουθεί συνεχώς το ασύρματο κανάλι (CSMA/CA), ενώ κατά τη μετάδοση η κατανάλωση φτάνει τα 100–300 mA. Απαιτεί επίσης περιοδική

αποστολή πακέτων (keep-alive) για τη διατήρηση της σύνδεσης και διαχείριση στοίβας TCP/IP, που προσθέτει επιπλέον κατανάλωση.

Αν και το Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax) εισάγει μηχανισμούς ενεργειακής αποδοτικότητας, όπως το Target Wake Time (TWT), οι οποίοι επιτρέπουν στις συσκευές να προγραμματίζουν περιόδους αδράνειας (sleep/doze states) και να ξυπνούν σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα για μετάδοση ή λήψη δεδομένων, δεν επιτυγχάνει επίπεδα κατανάλωσης αντίστοιχα τεχνολογιών χαμηλής ισχύος όπως το BLE ή το Zigbee (IEEE 802.11ax-2021; IEEE, 2020; Gast, 2005; IEEE, 2020b).

Το Wi-Fi 6 είναι βελτιστοποιημένο για υψηλές ταχύτητες, χαμηλή καθυστέρηση και συνεχή συνδεσιμότητα, γεγονός που το καθιστά λιγότερο αποδοτικό για συσκευές εξαιρετικά περιορισμένης ενέργειας, όπως αυτόνομοι αισθητήρες IoT με μπαταρία τύπου coin cell (Gast, 2005; IEEE, 2020b).

Το Bluetooth Low Energy (BLE) έχει σχεδιαστεί για εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Η λειτουργία του βασίζεται σε μεγάλα χρονικά διαστήματα χαμηλής κατανάλωσης (sleep/standby), κατά τα οποία η κατανάλωση ρεύματος μπορεί να φτάνει σε επίπεδα της τάξης των μικροαμπερ, και σε σύντομα χρονικά διαστήματα ενεργής μετάδοσης, όπου η κατανάλωση ανέρχεται σε δεκάδες mA για λίγα milliseconds (Bluetooth SIG, 2023).

Το BLE μπορεί να λειτουργεί είτε σε κατάσταση σύνδεσης (connected mode) είτε χωρίς μόνιμη σύνδεση μέσω advertising packets. Στη δεύτερη περίπτωση, οι συσκευές εκπέμπουν περιοδικά μικρά πακέτα αναγγελίας (advertising events) και επιστρέφουν άμεσα σε κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης, μειώνοντας σημαντικά τη συνολική ενεργειακή κατανάλωση.

Η αρχιτεκτονική αυτή καθιστά το BLE ιδιαίτερα κατάλληλο για IoT εφαρμογές χαμηλής ισχύος, όπως αισθητήρες θερμοκρασίας ή βιομετρικές συσκευές (π.χ. καρδιακός παλμός), οι οποίες μπορούν να λειτουργούν για μεγάλα χρονικά διαστήματα με μικρές μπαταρίες τύπου coin cell (π.χ. CR2032).

Ο Πίνακας 6.3 συγκρίνει την ενεργειακή κατανάλωση της IrDA, του Bluetooth Low Energy (BLE) και του Wi-Fi. Η IrDA και το BLE είναι κατάλληλα για σύντομες, ενεργειακά αποδοτικές μεταφορές, ενώ το Wi-Fi προσφέρει υψηλότερους ρυθμούς με μεγαλύτερη κατανάλωση (Bluetooth SIG, 2020; Gast, 2005; IEEE, 2021; Molisch, 2011).

Πίνακας 6.3: Κατανάλωση ενέργειας

Τεχνολογία	Ενδεικτική λειτουργία	Κατανάλωση Εκπομπής	Ενδεικτική Μέση Κατανάλωση
IrDA (SIR/FIR)	Εναλλακτική αποστολή και λήψη με παλμούς φωτός	Έντονες και σύντομες λάμψεις	Χαμηλή
Bluetooth Low Energy	Περιοδική εκπομπή και σύνδεση σε τακτά διαστήματα	Σύντομες εκπομπές	Πολύ χαμηλή
Wi-Fi (802.11n/ac/ax)	Συνεχής σύνδεση και παρακολούθηση δικτύου	Υψηλές εκπομπές	Μεσαία έως υψηλή

Το Bluetooth επικράτησε έναντι της IrDA χάρη στη μεγαλύτερη εμβέλεια, τη δυνατότητα σύνδεσης πολλών συσκευών ταυτόχρονα (piconet/scatternet) και την υποστήριξη εφαρμογών πολυμέσων και IoT. Η IrDA, αν και οικονομική και χωρίς παρεμβολές, περιορίστηκε λόγω της απαίτησης για άμεση οπτική επαφή και της μικρής του εμβέλειας.

Στην πράξη, η IrDA παρέμεινε χρήσιμη κυρίως σε καταναλωτικές συσκευές της δεκαετίας του 1990, όπως τηλεχειριστήρια και φορητοί υπολογιστές, ενώ το Bluetooth συνεχίζει να εξελίσσεται με νέες εκδόσεις που προσφέρουν καλύτερη ενεργειακή απόδοση και υψηλότερες ταχύτητες. Συνολικά, η ευελιξία, η υποστήριξη πολλών χρηστών και η προσαρμοστικότητα είναι οι βασικοί παράγοντες που καθορίζουν την επικράτηση μιας ασύρματης τεχνολογίας (Haartsen, 2000; Molisch, 2011; Padgett et al., 2022; Stallings, 2013).

Πίνακας 6.4: Σύγκριση βασικών χαρακτηριστικών των IrDA, Bluetooth και Wi-Fi

Χαρακτηριστικό	IrDA	Bluetooth	Wi-Fi
Τεχνολογία	Υπέρυθρο φως, απαιτεί οπτική επαφή	Ραδιοκύματα 2,4 GHz	Ραδιοκύματα 2,4/5 GHz
Ενδεικτική εμβέλεια	0,2–1 m	1–100 m (ανάλογα το Class)	10–100 m
Ενδεικτικός ρυθμός μετάδοσης	115 Kbps – 16 Mbps	721 Kbps – 3 Mbps	έως 9,6 Gbit/s (θεωρητικός μέγιστος ρυθμός Wi-Fi 6)
Τοπολογία	Σημείο-προς-σημείο	Piconet/Scatternet	Infrastructure (Access Point) ή Ad-hoc
Παρεμβολές	Ευαίσθητο σε φυσικό και τεχνητό φωτισμό	Ευάλωτο σε συσκευές 2,4 GHz	Ευάλωτο σε συσκευές 2,4/5 GHz
Ασφάλεια	Φυσική ασφάλεια λόγω LOS, χωρίς κρυπτογράφηση	Pairing, κρυπτογράφηση	WPA2/WPA3, κρυπτογράφηση
Κόστος	Πολύ χαμηλό	Χαμηλό	Μεσαίο
Ενδεικτικές χρήσεις	POS, ιατρικές συσκευές, βιομηχανία	Ακουστικά, IoT, Αισθητήρες και τηλεμετρία	Internet, streaming video, online gaming

6.8 Παράγοντες Υποχώρησης της IrDA

Η IrDA, παρά την αρχική της επιτυχία τη δεκαετία του 1990, υποχώρησε σταδιακά έναντι των ραδιοσυχνικών τεχνολογιών. Η παρακμή της δεν οφείλεται σε έναν μόνο παράγοντα, αλλά σε συνδυασμό τεχνολογικών, εργονομικών και οικονομικών λόγων που την έκαναν λιγότερο ανταγωνιστική σε σχέση με το Bluetooth και το Wi-Fi.

Αρχικά, η απαίτηση οπτικής επαφής δημιουργούσε πρακτικές δυσκολίες στην καθημερινή χρήση, καθώς οι συσκευές έπρεπε να ευθυγραμμιστούν, η ζεύξη διακοπτόταν από σκιάσεις ή μικρές μετακινήσεις του χρήστη και η εμβέλεια παρέμενε τυπικά στο 0,2–1 m με εμφανή υποβάθμιση υπό έντονο φυσικό φωτισμό (Molisch, 2011). Αντίθετα, το Bluetooth και το Wi-Fi λειτουργούν χωρίς οπτική επαφή, ακόμα και κατά την κίνηση (Rappaport, 2014).

Σε επίπεδο ταχύτητας και λειτουργικότητας, η IrDA υστερούσε σημαντικά. Ενώ σταθεροποιούνταν στα 4–16 Mb/s, το Wi-Fi είχε ήδη φτάσει σε δεκάδες έως εκατοντάδες Mb/s με ενσωματωμένη IP

συνδεσιμότητα, και το Bluetooth πρόσφερε σύνδεση πολλών συσκευών ταυτόχρονα με αυτόματη ανακάλυψη. Η IrDA παρέμεινε ένα απλό half-duplex κανάλι σημείου-προς-σημείο, χωρίς δυνατότητα ενσωμάτωσής σε ευρύτερα δίκτυα (Gast, 2005; Molisch, 2011).

Καθοριστικό ρόλο έπαιξε και η βιομηχανική υποστήριξη. Καθώς το Bluetooth και το Wi-Fi επικράτησαν στην αγορά, η ενσωμάτωση θυρών IrDA σε νέες φορητές συσκευές μειώθηκε σημαντικά, περιορίζοντας περαιτέρω την υιοθέτηση της τεχνολογίας (Molisch, 2011; Pahlavan & Krishnamurthy, 2002).

Τέλος, οι σύγχρονες εφαρμογές απαιτούν ταυτόχρονες συνδέσεις, streaming και συγχρονισμό με το cloud, κάτι που δεν μπορεί να προσφέρει ένα κανάλι σχεδιασμένο για σύντομες, στιγμιαίες ανταλλαγές δεδομένων (Rappaport, 2014). Η IrDA δεν σχεδιάστηκε για συνεχή δικτυακή συνδεσιμότητα βασισμένη στο Internet Protocol (IP), σε αντίθεση με το Wi-Fi, το οποίο υποστηρίζει άμεσα τη διασύνδεση σε δίκτυα IP. Το γεγονός αυτό περιορίσε την αξιοποίησή της στο νεότερο οικοσύστημα του Internet of Things (IoT) και των έξυπνων συσκευών, όπου απαιτείται συνεχής σύνδεση και διασύνδεση πολλών κόμβων (Molisch, 2011; Rappaport, 2014).

Συνολικά, η IrDA υποχώρησε στις εφαρμογές που απαιτούν ευκολία χρήσης χωρίς στόχευση, ευρεία κάλυψη, συνεχή δικτυακή συνδεσιμότητα και συσκευές που μπορούν να διαχειρίζονται πολλαπλές ροές ταυτόχρονα. Ωστόσο, συνεχίζει να χρησιμοποιείται σε εξειδικευμένες περιπτώσεις, όπως σημεία πώλησης POS ή ιατρικούς χώρους με αυστηρές απαιτήσεις ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (EMC), όπου η κατευθυντικότητα, η απουσία RF και το χαμηλό κόστος παραμένουν σημαντικά πλεονεκτήματα (Molisch, 2011; Rappaport, 2014).

Κεφάλαιο 7ο: Πρότυπα IEEE 802.11

7.1 Γενικά για το IEEE 802.11

Το πρότυπο IEEE 802.11 αποτελεί τη βάση για τα ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLAN), προσφέροντας τις προδιαγραφές για την ασύρματη μετάδοση δεδομένων σε τοπικό επίπεδο. Από την αρχική του έκδοση, το πρότυπο έχει εξελιχθεί σημαντικά, αυξάνοντας τις ταχύτητες μετάδοσης, βελτιώνοντας την αξιοπιστία και επεκτείνοντας το φάσμα συχνοτήτων που χρησιμοποιεί (Sauter, 2021).

Βασικά στοιχεία της αρχιτεκτονικής του IEEE 802.11 είναι τα Access Points, τα Basic Service Sets και τα Extended Service Sets, που καθορίζουν τη δομή και τη λειτουργία των WLAN. Αυτά τα στοιχεία επιτρέπουν τη δημιουργία ευέλικτων δικτύων με διάφορα επίπεδα κάλυψης και σύνθετες τοπολογίες (Stallings, 2013).

Οι ζώνες συχνοτήτων που χρησιμοποιεί το IEEE 802.11 περιλαμβάνουν κυρίως τα 2.4 GHz και 5 GHz, ενώ πρόσφατες προδιαγραφές έχουν επεκτείνει τη χρήση στο φάσμα των 6 GHz. Κάθε ζώνη παρουσιάζει διαφορετικά χαρακτηριστικά όσον αφορά την εμβέλεια, την ταχύτητα και την ευαισθησία σε παρεμβολές (Goldsmith, 2005).

Τα κανάλια στα φάσματα αυτά διακρίνονται σε επικαλυπτόμενα και μη επικαλυπτόμενα, ανάλογα με το εύρος ζώνης και τη γειτνίασή τους, επηρεάζοντας την ποιότητα της ασύρματης σύνδεσης. Η σωστή διαχείριση των καναλιών είναι κρίσιμη για την απόδοση, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα με πυκνή συγκέντρωση ασύρματων συσκευών (Sauter, 2021).

Η συνεχής εξέλιξη του προτύπου IEEE 802.11 στοχεύει στην αύξηση της απόδοσης, την καλύτερη χρήση του διαθέσιμου φάσματος και την υποστήριξη νέων εφαρμογών, διασφαλίζοντας τη διατήρηση της ανταγωνιστικότητας των WLAN σε ένα συνεχώς μεταβαλλόμενο τεχνολογικό περιβάλλον (Sauter, 2021).

7.1.1 Αρχιτεκτονική: AP, BSS, ESS

Η αρχιτεκτονική των δικτύων IEEE 802.11 βασίζεται σε βασικά στοιχεία που οργανώνουν τη δομή και τη λειτουργία των ασύρματων τοπικών δικτύων (WLAN). Τα Access Points (AP) λειτουργούν ως κεντρικοί κόμβοι, επιτρέποντας την ασύρματη σύνδεση των σταθμών (clients) με το ενσύρματο δίκτυο, καθώς και τη διαχείριση της ασύρματης επικοινωνίας (Sauter, 2021).

Το BSS (Basic Service Set) αποτελεί τη βασική μονάδα δικτύου στο πρότυπο IEEE 802.11 και περιλαμβάνει ένα Access Point και όλους τους σταθμούς (stations/clients) που συνδέονται σε αυτό. Κάθε BSS αναγνωρίζεται μοναδικά μέσω ενός BSSID (Basic Service Set Identifier), που συνήθως αντιστοιχεί στη διεύθυνση MAC του Access Point, ενώ όλες οι συσκευές εντός του ίδιου BSS χρησιμοποιούν το ίδιο όνομα δικτύου SSID (Service Set Identifier). Η περιοχή κάλυψης ενός BSS καθορίζεται από την εμβέλεια του Access Point.

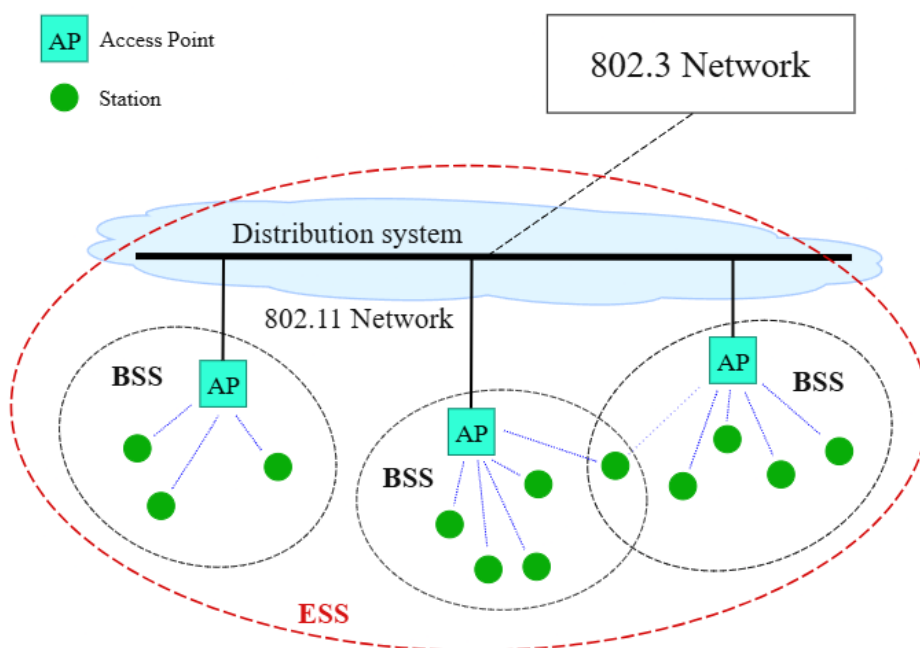
Υπάρχουν δύο τύποι BSS: το Infrastructure BSS, όπου οι σταθμοί επικοινωνούν μέσω Access Point, και το Independent BSS (IBSS - Independent Basic Service Set) ή Ad-hoc, όπου επικοινωνούν απευθείας χωρίς AP. Η επιλογή μεταξύ των δύο εξαρτάται από τις ανάγκες, το περιβάλλον χρήσης και τον αριθμό των σταθμών.

Όταν πολλά BSS συνδέονται μεταξύ τους μέσω ενός ενσύρματου δικτύου, σχηματίζουν ένα ESS (Extended Service Set), όπου όλα τα BSS μοιράζονται το ίδιο SSID. Αυτή η δομή δημιουργεί μια ευρύτερη περιοχή κάλυψης και υποστηρίζει την επέκταση των WLAN σε επίπεδο κτιρίου ή πανεπιστημιούπολης (Sauter, 2021).

Η συνεργασία μεταξύ των Access Points στο ESS επιτρέπει στους χρήστες να μετακινούνται εντός της περιοχής κάλυψης χωρίς διακοπή της σύνδεσης, μέσω της λειτουργίας roaming. Το roaming στο

πλαίσιο του IEEE 802.11 αναφέρεται στη διαδικασία μεταφοράς μιας ενεργής σύνδεσης από ένα Access Point σε άλλο (BSS transition) καθώς ο χρήστης κινείται εντός του ίδιου ESS, εξασφαλίζοντας αδιάλειπτη επικοινωνία. Αυτή η λειτουργία είναι απαραίτητη για τη διασφάλιση ομαλής εμπειρίας χρήσης σε περιβάλλοντα με πολλούς χρήστες (Stallings, 2013).

Το Εικόνα 7.1 απεικονίζει την αρχιτεκτονική δικτύου IEEE 802.11, όπου φαίνονται τα BSS, το ESS και η σύνδεση των Access Points μέσω του Distribution System.



Εικόνα 7.1: Αρχιτεκτονική δικτύου IEEE 802.11. Πηγή: Wikimedia Commons “802.11 Network Architecture”

Η επιλογή μεταξύ Infrastructure Mode και Ad Hoc Mode εξαρτάται από τις ανάγκες του δικτύου, το περιβάλλον χρήσης και τον αριθμό των συμμετεχόντων σταθμών, όπως αναλύεται στον Πίνακα 7.1.

Πίνακας 7.1: Σύγκριση Infrastructure Mode και Ad Hoc Mode

Χαρακτηριστικό	Infrastructure Mode (BSS)	Ad Hoc Mode (IBSS)
Δομή δικτύου	Απαιτείται AP	Δεν υπάρχει AP, οι σταθμοί επικοινωνούν απευθείας
Διαχείριση κυκλοφορίας	Κεντρική διαχείριση από το AP	Κατανεμημένη, κάθε σταθμός διαχειρίζεται τα δεδομένα του
Ασφάλεια	Κεντρική διαχείριση μέσω AP (WPA2/WPA3)	Περιορισμένη, εξαρτάται από τη διαμόρφωση κάθε σταθμού
Εμβέλεια	Καθορίζεται από την κάλυψη του AP	Περιορισμένη στην άμεση εμβέλεια μεταξύ σταθμών
Κλίμακα δικτύου	Υψηλή, εύκολη προσθήκη νέων σταθμών μέσω AP	Περιορισμένη, η προσθήκη πολλών σταθμών μειώνει την απόδοση

Χαρακτηριστικό	Infrastructure Mode (BSS)	Ad Hoc Mode (IBSS)
Πλεονεκτήματα	Σταθερή σύνδεση, υποστήριξη QoS, κεντρική διαχείριση	Χαμηλό κόστος, γρήγορη ανάπτυξη
Μειονεκτήματα	Υψηλότερο κόστος λόγω AP	Χαμηλότερη απόδοση, περιορισμένη ασφάλεια, μικρή εμβέλεια
Ενδεικτικές εφαρμογές	Wi-Fi σπιτιού ή γραφείου, hotspot καφετέριας	Gaming μεταξύ δύο laptop, μοίρασμα φωτογραφιών μεταξύ κινητών, σύνδεση tablet με PC

7.1.2 Φάσμα Συχνοτήτων: 2.4, 5 και 6 GHz

Το πρότυπο IEEE 802.11 χρησιμοποιεί κυρίως τρεις ζώνες συχνοτήτων: 2.4 GHz, 5 GHz και πρόσφατα 6 GHz, κάθε μία με διαφορετικά χαρακτηριστικά που επηρεάζουν την απόδοση και τη χρήση των ασύρματων δικτύων. Η ζώνη των 2.4 GHz είναι η παλαιότερη και πιο διαδεδομένη, προσφέροντας καλή εμβέλεια αλλά με περιορισμένη χωρητικότητα και υψηλή πιθανότητα παρεμβολών λόγω της κοινής χρήσης με άλλες τεχνολογίες όπως Bluetooth και συσκευές μικροκυμάτων (Goldsmith, 2005).

Η ζώνη των 5 GHz παρέχει μεγαλύτερο αριθμό μη επικαλυπτόμενων καναλιών και υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης, μειώνοντας τις παρεμβολές. Παρόλα αυτά, το 5 GHz έχει μικρότερη εμβέλεια λόγω της αυξημένης απορρόφησης από εμπόδια (Sauter, 2021).

Με την εισαγωγή του φάσματος 6 GHz στο πλαίσιο του 802.11ax (Wi-Fi 6E) και 802.11be (Wi-Fi 7), οι διαθέσιμοι πόροι αυξάνονται σημαντικά, προσφέροντας περισσότερα κανάλια και μεγαλύτερες χωρητικότητες. Η νέα ζώνη επιτρέπει την υποστήριξη εφαρμογών με πολύ υψηλές απαιτήσεις σε εύρος ζώνης, όπως η εικονική πραγματικότητα και η μετάδοση βίντεο υψηλής ανάλυσης (IEEE 802.11ax-2021; Wi-Fi Alliance, 2023).

Ταυτόχρονα, η χρήση υψηλότερων συχνοτήτων (5 GHz και 6 GHz) φέρνει προκλήσεις όσον αφορά την εμβέλεια και τη διείσδυση σε εσωτερικούς χώρους. Για την αντιμετώπισή τους αξιοποιούνται τεχνικές όπως το beamforming, που εστιάζει το σήμα προς τον δέκτη μειώνοντας παρεμβολές, και το MIMO, που χρησιμοποιεί πολλαπλές κεραίες για ταυτόχρονη μετάδοση πολλαπλών streams δεδομένων, αυξάνοντας ταχύτητα και αξιοπιστία (Goldsmith, 2005).

Ο Πίνακας 7.2 παρουσιάζει την εξέλιξη των προτύπων IEEE 802.11, από την πρώτη μαζική υιοθέτηση με το 802.11b έως το σύγχρονο 802.11be (Wi-Fi 7), με βασικά χαρακτηριστικά όπως ζώνες συχνοτήτων, μέγιστους θεωρητικούς ρυθμούς και κύριες τεχνολογικές καινοτομίες κάθε γενιάς (Wi-Fi Alliance, 2023). Αξίζει να σημειωθεί, πως οι ονομασίες Wi-Fi 1, Wi-Fi 2 και Wi-Fi 3 είναι αναδρομικές ονομασίες της Wi-Fi Alliance και δεν ήταν επίσημες κατά την κυκλοφορία των προτύπων. Η επίσημη αρίθμηση ξεκίνησε από το Wi-Fi 4 (802.11n) (Wi-Fi Alliance, 2018).

Πίνακας 7.2: Εξέλιξη και βασικά χαρακτηριστικά των προτύπων IEEE 802.11 (Wi-Fi). Πηγή: Wi-Fi Alliance, Wi-Fi Technology Overview, 2023.

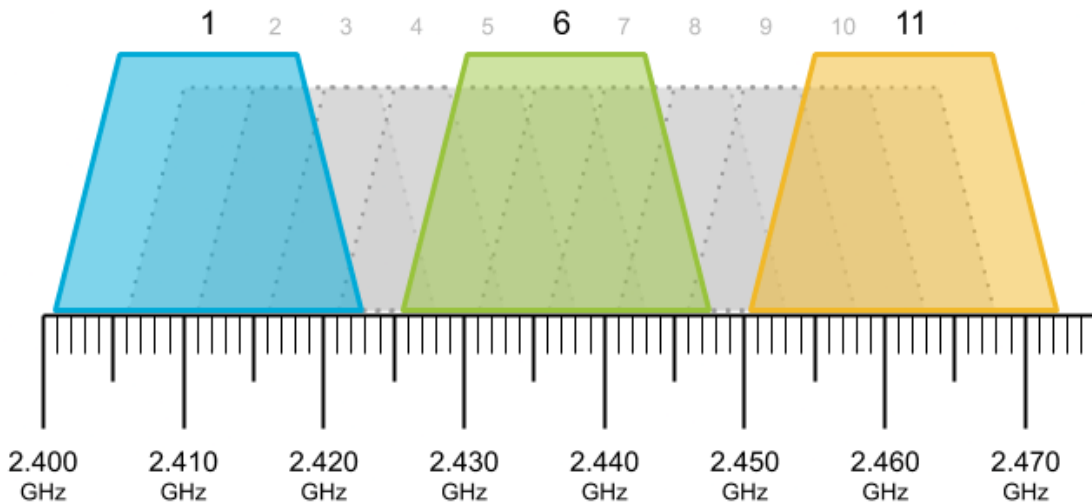
Πρότυπο IEEE	Ονομασία Wi-Fi	Ζώνες Συχνοτήτων	Μέγιστος θεωρητικός ρυθμός	Κύρια χαρακτηριστικά
802.11b	Wi-Fi 1	2.4 GHz	11 Mb/s	Πρώτη μαζική υιοθέτηση
802.11a	Wi-Fi 2	5 GHz	54 Mb/s	OFDM
802.11g	Wi-Fi 3	2.4 GHz	54 Mb/s	Backward compatibility με 802.11b
802.11n	Wi-Fi 4	2.4 / 5 GHz	600 Mb/s	MIMO, 40 MHz
802.11ac	Wi-Fi 5	5 GHz	6.9 Gb/s (Wave 2)	MU-MIMO (DL), 256-QAM
802.11ax	Wi-Fi 6	2.4 / 5 GHz	9.6 Gb/s	OFDMA, UL/DL MU-MIMO
802.11ax (επέκταση 6 GHz)	Wi-Fi 6E	6 GHz	9.6 Gb/s	Νέα ζώνη 6 GHz
802.11be	Wi-Fi 7	2.4 / 5 / 6 GHz	~46 Gb/s	MLO, 4096-QAM

7.1.3 Κανάλια και Εύρος Ζώνης

Στο πρότυπο IEEE 802.11, φερόμενο φάσμα (carrier frequency) αναφέρεται στη συγκεκριμένη συχνότητα ή εύρος συχνοτήτων που χρησιμοποιείται για τη μετάδοση του σήματος, ενώ τα κανάλια αποτελούν υποενότητες αυτού του φάσματος. Η ύπαρξη διακριτών καναλιών επιτρέπει την ταυτόχρονη λειτουργία πολλαπλών δικτύων ή συσκευών, μειώνοντας τις παρεμβολές και βελτιώνοντας την ποιότητα της σύνδεσης (Goldsmith, 2005).

Τα κανάλια χωρίζονται σε μη επικαλυπτόμενα (non-overlapping) και επικαλυπτόμενα (overlapping), ανάλογα με το αν οι ζώνες συχνοτήτων τους αλληλεπικαλύπτονται. Τα επικαλυπτόμενα κανάλια συχνά προκαλούν παρεμβολές και μείωση της απόδοσης, ενώ τα μη επικαλυπτόμενα επιτρέπουν τη βέλτιστη λειτουργία σε περιβάλλοντα υψηλής πυκνότητας (Sauter, 2021).

Η έννοια των επικαλυπτόμενων και μη επικαλυπτόμενων καναλιών γίνεται ιδιαίτερα εμφανής στη ζώνη των 2.4 GHz. Στη ζώνη αυτή μόνο τα κανάλια 1, 6 και 11 θεωρούνται πλήρως μη επικαλυπτόμενα. Η ζώνη των 5 GHz προσφέρει σημαντικά περισσότερα μη επικαλυπτόμενα κανάλια, ενώ η ζώνη 6 GHz (Wi-Fi 6E/7) παρέχει έως 59 πλήρως μη επικαλυπτόμενα κανάλια (Sauter, 2021; IEEE 802.11ax-2021). Η Εικόνα 7.2 δείχνει ότι στη ζώνη 2.4 GHz μόνο τα κανάλια 1, 6 και 11 είναι μη επικαλυπτόμενα, ενώ τα υπόλοιπα (γκρι) προκαλούν παρεμβολές.

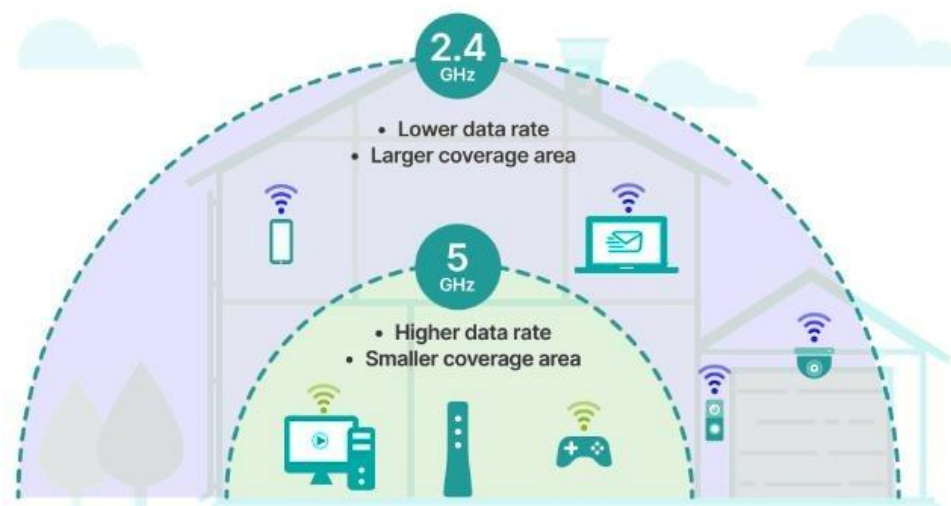


Εικόνα 7.2: Επικαλυπτόμενα και μη επικαλυπτόμενα κανάλια στη ζώνη 2.4 GHz: κανάλια 1, 6 και 11.
Πηγή: Oscium/MetaGeek “Why Channels 1, 6 and 11”

Εκτός από τον αριθμό των διαθέσιμων καναλιών, οι ζώνες συχνοτήτων διαφέρουν ως προς την εμβέλεια και τον ρυθμό μετάδοσης. Η ζώνη των 2.4 GHz προσφέρει μεγαλύτερη κάλυψη και καλύτερη διείσδυση από εμπόδια, με μειονέκτημα τις παρεμβολές από Bluetooth, φούρνους μικροκυμάτων και οικιακές συσκευές.

Αντίθετα, η ζώνη των 5 GHz παρέχει υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης και περισσότερα μη επικαλυπτόμενα κανάλια, αλλά έχει τη μικρότερη εμβέλεια. Για την αντιμετώπιση των παρεμβολών αξιοποιούνται τεχνολογίες όπως το Dynamic Frequency Selection (DFS), που επιλέγει αυτόματα κανάλια μακριά από παρεμβολές, και το Transmit Power Control (TPC), που προσαρμόζει δυναμικά την ισχύ εκπομπής για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης (Stallings, 2013). Ωστόσο, το DFS στα 5 GHz μπορεί να προκαλέσει προσωρινή διακοπή σύνδεσης όταν εντοπίσει ραντάρ.

Η ζώνη των 6 GHz χρησιμοποιείται αποκλειστικά από Wi-Fi 6E/7, χωρίς παρεμβολές από άλλες συσκευές και χωρίς DFS περιορισμούς. Η αυξημένη χωρητικότητα και τα πλήρως μη επικαλυπτόμενα κανάλια την καθιστούν ιδανική για εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων όπως streaming 8K, VR/AR και εταιρικά δίκτυα υψηλής πυκνότητας, αν και απαιτεί νέες συσκευές και έχει μικρότερη εμβέλεια σε σχέση με τις ζώνες 2.4 και 5 GHz (IEEE 802.11ax-2021; IEEE 802.11be-2024).



Εικόνα 7.3: Σύγκριση ζωνών 2.4 GHz και 5 GHz ως προς κάλυψη και ρυθμό μετάδοσης. Πηγή: Cisco (2020). “Wi-Fi Frequency Bands: 2.4 GHz vs 5 GHz”

Οι διάφορες εκδόσεις του προτύπου IEEE 802.11 εισάγουν τη δυνατότητα χρήσης ευρύτερων καναλιών, φτάνοντας τα 80 και 160 MHz (802.11ac/ax) και έως 320 MHz με το 802.11be (IEEE 802.11be-2024), για να εξυπηρετήσουν εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων όπως η μετάδοση βίντεο υψηλής ευκρίνειας και η εικονική πραγματικότητα. Η προσεκτική διαχείριση των καναλιών και η επιλογή των κατάλληλων συχνοτήτων είναι κρίσιμες για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης σε πυκνά αστικά περιβάλλοντα (Sauter, 2021).

Ο Πίνακας 7.3 παρουσιάζει συνοπτικά τις τρεις κύριες ζώνες συχνοτήτων του IEEE 802.11, με βάση τον αριθμό και τον τύπο των διαθέσιμων καναλιών, τα βασικά χαρακτηριστικά και τις τυπικές χρήσεις και προκλήσεις κάθε ζώνης.

Πίνακας 7.3: Σύγκριση ζωνών συχνοτήτων IEEE 802.11

Ζώνη Συχνοτήτων	Αριθμός Καναλιών	Τύπος Καναλιών	Βασικά Χαρακτηριστικά	Προκλήσεις
2.4 GHz	11-14 (ανά χώρα)	Επικαλυπτόμενα & μη επικαλυπτόμενα (1, 6, 11)	Ευρεία συμβατότητα, χαμηλή χωρητικότητα	Παρεμβολές από Bluetooth και οικιακές συσκευές
5 GHz	έως 36 (ανά χώρα, 20 MHz)	Κυρίως μη επικαλυπτόμενα	Περισσότερα κανάλια, εξυπηρέτηση περισσότερων συσκευών, υψηλές ταχύτητες	Διακοπές λόγω DFS, μικρότερη εμβέλεια
6 GHz (Wi-Fi 6E/7)	έως 59	Πλήρως μη επικαλυπτόμενα, έως 320 MHz	Αδέσμευτο φάσμα, χωρίς παρεμβολές από παλαιότερες συσκευές, πολύ υψηλές ταχύτητες	Περιορισμένη εμβέλεια, απαιτεί συσκευές συμβατές με Wi-Fi 6E/7

7.2 Εκδόσεις IEEE 802.11: a / b / g / n / ac / ax / be

Η εξέλιξη των προτύπων IEEE 802.11 αποτυπώνει την ανάπτυξη της ασύρματης δικτύωσης, με κάθε έκδοση να εισάγει βελτιώσεις στην ταχύτητα, την αξιοπιστία και τη χρήση του φάσματος.

Το 802.11a λειτουργούσε στη ζώνη των 5 GHz, προσφέροντας ταχύτητες έως 54 Mbps μέσω OFDM, ενώ το 802.11b χρησιμοποιούσε τη ζώνη 2.4 GHz με ταχύτητες έως 11 Mbps βασιζόμενο σε DSSS (Sauter, 2021). Αν και εκδόθηκαν την ίδια χρονιά, το 802.11b κυκλοφόρησε πρώτο στην αγορά, ενώ τα πρώτα προϊόντα 802.11a εμφανίστηκαν μόλις στα τέλη του 2001 (Gast, 2005). Το 802.11a παρουσιάζεται πρώτο λόγω της τεχνολογικής του σημασίας, καθώς εισήγαγε το OFDM και τη ζώνη 5 GHz που αποτελούν τη βάση των σύγχρονων προτύπων Wi-Fi.

Στη συνέχεια, η έκδοση 802.11g συνδύαζε την ταχύτητα της 802.11a με τη ζώνη 2.4 GHz, προσφέροντας έως 54 Mbps και διατηρώντας πλήρη συμβατότητα με τις συσκευές 802.11b (Stallings, 2013; Gast, 2005). Επιπλέον, η 802.11n εισήγαγε MIMO και channel bonding (20 και 40 MHz) σε ζώνες 2.4 GHz και 5 GHz (dual-band), επιτυγχάνοντας ταχύτητες έως 600 Mbps (Perahia & Stacey, 2013; IEEE 802.11n-2009).

Σημαντικό βήμα προόδου αποτέλεσε η 802.11ac, η οποία λειτουργεί αποκλειστικά στα 5 GHz με εύρος καναλιού έως 160 MHz και MU-MIMO, επιτυγχάνοντας έως 6.93 Gbps (Wave 2), καθιστώντας το ιδανικό για streaming βίντεο υψηλής ανάλυσης και online gaming (Sauter, 2021; IEEE 802.11ac-2013).

Σήμερα, το πιο διαδεδομένο πρότυπο είναι το 802.11ax (Wi-Fi 6), που εγκρίθηκε το 2021, λειτουργεί στις ζώνες 2.4 GHz και 5 GHz και υποστηρίζεται από τις περισσότερες συσκευές, όπως smartphone, laptop και router (Wi-Fi Alliance, 2023). Το 802.11be (Wi-Fi 7), που εγκρίθηκε το 2024, λειτουργεί και στις τρεις ζώνες (2.4, 5 και 6 GHz) και βρίσκεται σε αρχικό στάδιο εμπορικής διάθεσης, με περιορισμένη διαθεσιμότητα συμβατών συσκευών και υψηλό κόστος υλικού, προσφέροντας όμως εξαιρετικές δυνατότητες για εφαρμογές όπως IoT, streaming 4K/8K και VR/AR (IEEE 802.11ax-2021; IEEE 802.11be-2024; Wi-Fi Alliance, 2023).

7.2.1 IEEE 802.11a

Το 802.11a παρουσιάζεται πρώτο λόγω της τεχνολογικής του σημασίας, καθώς εισήγαγε την τεχνική OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) στη ζώνη 5 GHz, επιτυγχάνοντας ταχύτητες έως 54 Mbps. Το OFDM χρησιμοποιεί 52 υποφορείς (subcarriers), εκ των οποίων 48 χρησιμοποιούνται για μετάδοση δεδομένων και 4 ως πιλότοι για συγχρονισμό, λειτουργώντας ταυτόχρονα σε ξεχωριστές συχνότητες για αποδοτικότερη χρήση του φάσματος (Gast, 2005; IEEE 802.11a-1999).

Το πρότυπο υποστήριζε οκτώ ρυθμούς μετάδοσης (6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 και 54 Mbps) με διαφορετικά σχήματα διαμόρφωσης (BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM). Αυτό επέτρεπε στο πρότυπο να επιλέγει αυτόματα χαμηλότερο ρυθμό μετάδοσης όταν το σήμα ήταν αδύναμο, διατηρώντας αξιόπιστη σύνδεση σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Η ζώνη των 5 GHz διέθετε 12 μη επικαλυπτόμενα κανάλια στις ΗΠΑ, έναντι μόλις 3 στη ζώνη των 2.4 GHz, μειώνοντας δραστικά τις παρεμβολές σε πυκνά περιβάλλοντα (Gast, 2005; IEEE 802.11a-1999).

Η υψηλότερη συχνότητα λειτουργίας μείωσε σημαντικά τις παρεμβολές από συσκευές στη ζώνη 2.4 GHz (ασύρματα τηλέφωνα, φούρνοι μικροκυμάτων, Bluetooth), ενισχύοντας τη

σταθερότητα σε περιβάλλοντα με αυξημένο θόρυβο ραδιοσυχνοτήτων (Gast, 2005). Το 802.11a λειτουργεί στα 5 GHz και προσφέρει μικρότερη εμβέλεια σε σχέση με το 802.11b, η οποία μειώνεται περαιτέρω από εμπόδια και παρεμβολές (Tanenbaum et al., 2021; Gast, 2005).

Σημαντικό μειονέκτημα αποτέλεσε η έλλειψη backward compatibility με το 802.11b, καθώς τα δύο πρότυπα λειτουργούσαν σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων (5 GHz έναντι 2.4 GHz), με αποτέλεσμα να απαιτείται ξεχωριστό υλικό και να αυξάνεται το κόστος εγκατάστασης (Stallings, 2013; Gast, 2005). Η έλλειψη backward compatibility οφειλόταν στο ότι τα δύο πρότυπα σχεδιάστηκαν με διαφορετικούς στόχους και λειτουργούν σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων και τεχνικές μετάδοσης (Gast, 2005).

Το 802.11b στόχευε στη μαζική αγορά με χαμηλό κόστος, ενώ το 802.11a στην υψηλή απόδοση για επαγγελματική χρήση, καθιστώντας τη συμβατότητα τεχνικά αδύνατη λόγω των διαφορετικών ζωνών συχνοτήτων και τεχνικών μετάδοσης (Gast, 2005). Επιπλέον, η διαθεσιμότητα του φάσματος 5 GHz διέφερε μεταξύ χωρών, περιορίζοντας την παγκόσμια υιοθέτηση του προτύπου (Gast, 2005).

Συγκριτικά, το 802.11b επικράτησε στην καταναλωτική αγορά λόγω χαμηλότερου κόστους, μεγαλύτερης εμβέλειας και άμεσης εμπορικής διάθεσης, ενώ το 802.11a βρήκε εφαρμογή κυρίως σε επαγγελματικά περιβάλλοντα όπως επιχειρησιακοί χώροι, αεροδρόμια και βιομηχανικές εγκαταστάσεις, όπου η σταθερότητα και η απουσία παρεμβολών είχαν προτεραιότητα έναντι του κόστους (Gast, 2005). Παρά τον περιορισμένο εμπορικό αντίκτυπο, το 802.11a έδειξε ότι η ζώνη 5 GHz μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για επαγγελματική ασύρματη δικτύωση, θέτοντας τις βάσεις για τα μεταγενέστερα πρότυπα 802.11n, 802.11ac και 802.11ax (Stallings, 2013).

Ο Πίνακας 7.4 συνοψίζει τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του προτύπου IEEE 802.11a, όπως η ζώνη συχνοτήτων, η μέγιστη θεωρητική ταχύτητα, η ενδεικτική εμβέλεια και οι κύριες εφαρμογές του (IEEE 802.11a-1999; Gast, 2005).

Πίνακας 7.4: Βασικά χαρακτηριστικά IEEE 802.11a

Χαρακτηριστικό	Στοιχεία
Έτος Έκδοσης	1999
Ζώνη Συχνοτήτων	5 GHz
Ενδεικτική Μέγιστη Ταχύτητα (θεωρητική)	54 Mbps
Κύρια Τεχνική	OFDM (52 υποφορείς)
Κύριες Εφαρμογές	Επιχειρησιακοί χώροι, αεροδρόμια, βιομηχανικά περιβάλλοντα

7.2.2 IEEE 802.11b

Το 802.11b εκδόθηκε το 1999 και λειτουργούσε στη ζώνη ISM 2.4 GHz χρησιμοποιώντας την τεχνική DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum). Η DSSS διασπείρει το σήμα σε ευρύτερο φάσμα

συχνοτήτων, αυξάνοντας την ανθεκτικότητά του σε παρεμβολές. Το πρότυπο υποστήριζε τέσσερις ρυθμούς μετάδοσης (1, 2, 5.5 και 11 Mbps), με τη μέγιστη ενδεικτική ταχύτητα των 11 Mbps να καλύπτει πλήρως τις ανάγκες της εποχής για πρόσβαση στο Internet, email και κοινή χρήση αρχείων (Gast, 2005).

Η ενδεικτική εμβέλεια του 802.11b κυμαίνεται (έως περίπου 46m σε εσωτερικούς χώρους και έως περίπου 91m σε εξωτερικούς), ανάλογα με το περιβάλλον, τα εμπόδια και τις παρεμβολές (Gast, 2005).

Η ζώνη των 2.4 GHz διέθετε 11 κανάλια στις ΗΠΑ (13 στην Ευρώπη), από τα οποία μόνο 3 ήταν πλήρως μη επικαλυπτόμενα (1, 6, 11), διευκολύνοντας την απλή εγκατάσταση, ωστόσο αυξάνοντας την ευαισθησία σε παρεμβολές από Bluetooth, ασύρματα τηλέφωνα και φούρνους μικροκυμάτων (Gast, 2005; Stallings, 2013). Το χαμηλό κόστος υλικού και η ευκολία εγκατάστασης καθιέρωσαν το 802.11b ως την προτιμώμενη λύση για οικιακά δίκτυα και μικρές επιχειρήσεις (Gast, 2005).

Το πρότυπο υποστήριζε τόσο Infrastructure όσο και Ad-hoc Mode, προσφέροντας ευελιξία στην ανάπτυξη μικρών και οικιακών δικτύων (Gast, 2005). Η αρχική ασφάλεια παρεχόταν μέσω του πρωτοκόλλου WEP (Wired Equivalent Privacy), το οποίο όμως αποδείχθηκε ευάλωτο σε κρυπτανάλυση και αντικαταστάθηκε από νεότερα πρωτόκολλα όπως το WPA και WPA2 (Stallings, 2013). Το 802.11b δεν ήταν συμβατό με το 802.11a λόγω των διαφορετικών ζωνών συχνοτήτων, ωστόσο διατήρησε πλήρη συμβατότητα με το μεταγενέστερο 802.11g (Gast, 2005; Stallings, 2013).

Οι κυριότερες εφαρμογές του 802.11b ήταν σε οικιακά WLAN, Wi-Fi hotspots σε καφετέριες και δημόσιους χώρους, καθώς και βασική σύνδεση σε μικρά γραφεία, όπου απαιτούνταν απλή πρόσβαση στο Internet και ηλεκτρονικό ταχυδρομείο χωρίς υψηλές απαιτήσεις εύρους ζώνης (Gast, 2005). Το 802.11b έθεσε τις βάσεις για τη μαζική εξάπλωση των WLAN και την καθιέρωση του Wi-Fi ως καθημερινής τεχνολογίας, ωθώντας την ανάπτυξη υποδομών ασύρματης δικτύωσης και την εξέλιξη προς ταχύτερα πρότυπα όπως το 802.11g και 802.11n (Stallings, 2013).

Ο Πίνακας 7.5 συνοψίζει τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του προτύπου IEEE 802.11b, όπως η ζώνη συχνοτήτων, η μέγιστη θεωρητική ταχύτητα, η ενδεικτική εμβέλεια και οι κύριες εφαρμογές του (IEEE 802.11b-1999; Gast, 2005).

Πίνακας 7.5: Βασικά χαρακτηριστικά IEEE 802.11b

Χαρακτηριστικό	Στοιχεία
Έτος Έκδοσης	1999
Ζώνη Συχνοτήτων	2.4 GHz
Ενδεικτική Μέγιστη Ταχύτητα (θεωρητική)	11 Mbps
Κύρια Τεχνική	DSSS
Κύριες Εφαρμογές	Οικιακά WLAN, Wi-Fi hotspots, μικρά γραφεία

7.2.3 IEEE 802.11g

Το πρότυπο IEEE 802.11g εκδόθηκε το 2003 και λειτουργεί στη ζώνη των 2.4 GHz, υιοθετώντας την τεχνική OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) που χρησιμοποιούσε ήδη το 802.11a. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνει μέγιστη θεωρητική ταχύτητα 54 Mbps, έναντι 11 Mbps του προγενέστερου 802.11b (Stallings, 2013; Gast, 2005). Ωστόσο, η χρήση της ζώνης 2.4 GHz εισάγει περιορισμούς. Υπάρχουν μόνο τρία μη επικαλυπτόμενα κανάλια (1, 6 και 11), ενώ η ζώνη παρουσιάζει ευαισθησία σε παρεμβολές από συσκευές Bluetooth και φούρνους μικροκυμάτων (Stallings, 2013).

Σημαντικό πλεονέκτημα του 802.11g αποτελεί η πλήρης συμβατότητα προς τα πίσω με το 802.11b, επιτρέποντας στις παλαιότερες συσκευές να συνδέονται χωρίς τροποποίηση. Η παρουσία συσκευών 802.11b σε μικτό δίκτυο 802.11g ενεργοποιεί αυτόματα έναν μηχανισμό διαλειτουργικότητας, γνωστό ως protection mechanism, ο οποίος αναγκάζει το σύνολο του δικτύου να λειτουργεί με τους ρυθμούς μετάδοσης που υποστηρίζει το παλαιότερο πρότυπο. Αποτέλεσμα είναι η αισθητή υποβάθμιση της συνολικής απόδοσης, καθώς οι συσκευές 802.11g δεν μπορούν να αξιοποιήσουν πλήρως τις δυνατότητές τους εφόσον υπάρχει έστω και ένας παλαιότερος κόμβος στο δίκτυο (Stallings, 2013). Αντίθετα, το 802.11g δεν είναι διαλειτουργικό με το 802.11a, καθώς τα δύο πρότυπα λειτουργούν σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων (2.4 GHz και 5 GHz αντίστοιχα) (Carney & Solomon, 2002; IEEE 802.11g-2003).

Το 802.11g έχει μεγαλύτερη εμβέλεια από το 802.11a, καθώς τα σήματα στα 2.4 GHz εξασθενούν λιγότερο και διαπερνούν καλύτερα τα εμπόδια (Carney & Solomon, 2002; IEEE 802.11g-2003). Η ενδεικτική εμβέλεια (περίπου στα 30-50m σε εσωτερικούς χώρους και περίπου έως 140m σε εξωτερικούς) στην πράξη μειώνεται σημαντικά από τοίχους, έπιπλα και παρεμβολές από τη ζώνη των 2.4 GHz.

Ο Πίνακας 7.6 συνοψίζει τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του προτύπου IEEE 802.11g, όπως η ζώνη συχνοτήτων, η μέγιστη θεωρητική ταχύτητα, η ενδεικτική εμβέλεια και οι κύριες εφαρμογές του (IEEE 802.11g-2003; Carney & Solomon, 2002; Tanenbaum et al., 2021).

Πίνακας 7.6: Βασικά χαρακτηριστικά IEEE 802.11g

Χαρακτηριστικό	Στοιχεία
Έτος Έκδοσης	2003
Ζώνη Συχνοτήτων	2.4 GHz
Ενδεικτική Μέγιστη Ταχύτητα (θεωρητική)	54 Mbps
Κύρια Τεχνική	OFDM στα 2.4 GHz, πλήρης συμβατότητα με 802.11b
Κύριες Εφαρμογές	Οικιακά και επιχειρησιακά WLAN, Wi-Fi hotspots

Το 802.11g αντικαταστάθηκε κυρίως επειδή η μέγιστη ταχύτητά του (54 Mbps) αποδείχθηκε ανεπαρκής για τις αυξανόμενες ανάγκες σε bandwidth, ενώ η συχνότητα των 2,4 GHz που χρησιμοποιεί είχε έντονες παρεμβολές λόγω του πλήθους συσκευών, με αποτέλεσμα το 802.11n να προσφέρει πολύ υψηλότερες ταχύτητες, υποστήριξη 5 GHz και τεχνολογία MIMO για καλύτερη απόδοση.

7.2.4 IEEE 802.11n

Το πρότυπο 802.11n, το οποίο εκδόθηκε το 2009, εισήγαγε τεχνολογίες όπως το MIMO (διαμορφώσεις 2×2 έως 4×4 κεραιών). Το channel bonding είναι μια τεχνική που συνδυάζει δύο κανάλια των 20 MHz σε ένα κανάλι 40 MHz, διπλασιάζοντας το εύρος ζώνης και ενισχύοντας σημαντικά το throughput. Το πρότυπο υποστηρίζει λειτουργία και στις δύο ζώνες συχνοτήτων, 2.4 GHz και 5 GHz (dual-band), επιτρέποντας θεωρητικές ταχύτητες έως 600 Mbps (Perahia & Stacey, 2013; IEEE 802.11n-2009). Ωστόσο, η πραγματική εμβέλεια (ενδεικτικά περίπου 70 m σε εσωτερικούς χώρους και έως 250 m σε εξωτερικούς χώρους) επηρεάζεται σημαντικά από εμπόδια όπως τοίχοι, οροφές και ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, ιδιαίτερα στη ζώνη των 2.4 GHz.

Το φυσικό επίπεδο (Physical Layer) του 802.11n βασίζεται σε OFDM με 64 υποφορείς (subcarriers), οι οποίοι μεταδίδουν δεδομένα παράλληλα, επιτυγχάνοντας γρηγορότερη και πιο αξιόπιστη μετάδοση. Η τεχνολογία MIMO αξιοποιεί πολλαπλές κεραιές εκπομπής και λήψης για να αυξήσει το throughput μέσω χωρικής πολυπλεξίας (spatial multiplexing) και να βελτιώσει την ανθεκτικότητα σε παρεμβολές μέσω χωρικής διαφοροποίησης (spatial diversity), μειώνοντας την απώλεια πακέτων και ενισχύοντας τη σταθερότητα της σύνδεσης (Perahia & Stacey, 2013).

Η συμβατότητα με τα πρότυπα 802.11b/g επέτρεψε στους χρήστες να αναβαθμίσουν σταδιακά τις υποδομές τους, χωρίς να χρειαστεί άμεση αντικατάσταση των υπάρχουσών συσκευών. Οι κυριότερες εφαρμογές περιελάμβαναν HD video streaming, εφαρμογές cloud, εταιρικά WLAN και VoIP, καθώς το 802.11n παρείχε τη σταθερότητα και το εύρος ζώνης που απαιτούνταν για αυτές τις υπηρεσίες (IEEE 802.11n-2009).

Ο Πίνακας 7.7 συνοψίζει τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του προτύπου IEEE 802.11n, όπως η ζώνη συχνοτήτων, η μέγιστη θεωρητική ταχύτητα, η ενδεικτική εμβέλεια και οι κύριες εφαρμογές του (IEEE 802.11n-2009)

Πίνακας 7.7: Βασικά χαρακτηριστικά IEEE 802.11n

Χαρακτηριστικό	Στοιχεία
Έτος Έκδοσης	2009
Ζώνη Συχνοτήτων	2.4 GHz και 5 GHz (Dual-band)
Ενδεικτική Μέγιστη Ταχύτητα (θεωρητική)	600 Mbps
Κύρια Τεχνική	MIMO (2×2 έως 4×4), Channel bonding (40 MHz)
Κύριες Εφαρμογές	HD streaming, cloud εφαρμογές, εταιρικά WLAN, VoIP

Το πρότυπο 802.11n έθεσε τα θεμέλια για τα μελλοντικά πρότυπα 802.11ac και 802.11ax, καθιερώνοντας τεχνικές όπως το MIMO και το channel bonding που αποτέλεσαν τη βάση για περαιτέρω εξελίξεις όπως το MU-MIMO και τα ευρύτερα κανάλια των επόμενων γενεών (Perahia & Stacey, 2013).

7.2.5 IEEE 802.11ac

Το πρότυπο IEEE 802.11ac, γνωστό και ως Wi-Fi 5, εγκρίθηκε το 2013 και αποτελεί εξέλιξη του 802.11n. Η εμπορική διάθεση (Wave 1) ξεκίνησε το 2014. Το 802.11ac λειτουργεί αποκλειστικά στη ζώνη των 5 GHz και υποστηρίζει ευρύτερα κανάλια έως 80 MHz (Wave 1) και 160 MHz (Wave 2)

μέσω της τεχνικής channel bonding. Επίσης, εισήγαγε την τεχνολογία MU-MIMO (Multi-User MIMO), που επιτρέπει σε πολλαπλούς χρήστες να λαμβάνουν δεδομένα ταυτόχρονα χωρίς μείωση της απόδοσης, καθώς και το σχήμα διαμόρφωσης 256-QAM για υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης, επιτυγχάνοντας θεωρητικές ταχύτητες περίπου έως 6.9 Gbps (Sauter, 2021; IEEE 802.11ac-2013).

Η τεχνολογία beamforming ενισχύει την εμβέλεια και την ποιότητα σήματος, κατευθύνοντας την εκπομπή προς συγκεκριμένες συσκευές αντί για ομοιόμορφη εκπομπή προς όλες τις κατευθύνσεις, βελτιώνοντας την απόδοση σε απαιτητικούς χώρους (Sauter, 2021; IEEE 802.11ac-2013). Ωστόσο, η πραγματική εμβέλεια (ενδεικτικά κυμαίνεται περίπου από 50 έως 100 μέτρα σε εσωτερικούς χώρους και από 100 έως 200 μέτρα σε εξωτερικούς) εξαρτάται από το περιβάλλον εγκατάστασης, τα εμπόδια και τις παρεμβολές.

Η αποκλειστική λειτουργία στη ζώνη 5 GHz μειώνει σημαντικά τις παρεμβολές από παλαιότερες συσκευές που λειτουργούν στα 2.4 GHz, αν και περιορίζει τη συμβατότητα με το 802.11b. Το πρότυπο διατηρεί πλήρη συμβατότητα προς τα πίσω με το 802.11a και 802.11n (στα 5 GHz), επιτρέποντας τη σταδιακή αναβάθμιση των υποδομών χωρίς αντικατάσταση ολόκληρου του εξοπλισμού (IEEE 802.11ac-2013).

Οι κυριότερες εφαρμογές του 802.11ac περιλαμβάνουν streaming βίντεο 4K και υψηλής ευκρίνειας, online gaming, cloud computing, εφαρμογές VR/AR, εταιρικά δίκτυα υψηλών απαιτήσεων και premium οικιακές λύσεις, όπου απαιτείται υψηλό εύρος ζώνης και χαμηλή καθυστέρηση. Το 802.11ac καθιέρωσε νέα πρότυπα για ασύρματη δικτύωση μέσω των βελτιώσεων σε εύρος ζώνης, MU-MIMO και beamforming, αποτελώντας το κυρίαρχο πρότυπο πριν από την εμφάνιση του Wi-Fi 6 (802.11ax) (Sauter, 2021).

Ο Πίνακας 7.8 συνοψίζει τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του προτύπου IEEE 802.11ac, όπως το έτος έκδοσης, τη ζώνη συχνοτήτων, την ενδεικτική μέγιστη ταχύτητα, τις κύριες τεχνικές και τις κυριότερες εφαρμογές του (IEEE 802.11ac-2013; Sauter, 2021).

Πίνακας 7.8: Βασικά χαρακτηριστικά IEEE 802.11ac

Χαρακτηριστικό	Στοιχεία
Έτος Έκδοσης	2013
Ζώνη Συχνοτήτων	5 GHz
Ενδεικτική Μέγιστη Ταχύτητα (θεωρητική)	6.9 Gbps
Κύρια Τεχνική	MU-MIMO, 256-QAM, Beamforming (80/160 MHz)
Κύριες Εφαρμογές	4K streaming, gaming, VR/AR, εταιρικά δίκτυα

7.2.6 IEEE 802.11ax

Το πρότυπο IEEE 802.11ax, γνωστό και ως Wi-Fi 6, εγκρίθηκε το 2021 και στοχεύει στην υποστήριξη περιβαλλόντων υψηλής πυκνότητας χρηστών και εφαρμογών IoT. Εισήγαγε την τεχνική OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), που επιτρέπει την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση

πολλαπλών συσκευών μέσω της διαίρεσης καναλιών σε μικρότερα κομμάτια (Resource Units), μειώνοντας σημαντικά την καθυστέρηση και βελτιώνοντας την αποδοτικότητα του δικτύου (IEEE 802.11ax-2021).

Το πρότυπο επιτυγχάνει θεωρητικές ταχύτητες έως 9.6 Gbps, λειτουργεί στις ζώνες 2.4 GHz και 5 GHz, υποστηρίζει κανάλια έως 160 MHz και ενσωματώνει uplink και downlink MU-MIMO που αυξάνει την αποδοτικότητα τόσο στη λήψη όσο και στην αποστολή δεδομένων (IEEE 802.11ax-2021). Έτσι βελτιώνεται η συνολική χωρητικότητα του δικτύου σε πολυπληθή περιβάλλοντα όπως αεροδρόμια, στάδια και συνεδριακά κέντρα.

Επιπλέον, η λειτουργία Target Wake Time (TWT) βελτιστοποιεί την κατανάλωση ενέργειας των συσκευών IoT, επιτρέποντάς τους να προγραμματίζουν τις μεταδόσεις τους και να παραμένουν σε κατάσταση ύπνου για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα, επεκτείνοντας σημαντικά την αυτονομία τους (IEEE 802.11ax-2021).

Σε περιβάλλοντα υψηλής πυκνότητας, όπου πολλαπλά BSS γειτνιάζουν χωρικά, η τεχνική BSS Coloring επιτρέπει στις συσκευές να αναγνωρίζουν σήματα ξένων δικτύων και να συνεχίζουν τη μετάδοση όταν η ισχύς τους είναι κάτω από ένα κατώφλι, βελτιώνοντας έτσι την αξιοποίηση του φάσματος και μειώνοντας τις αναίτιες καθυστερήσεις που οφείλονται σε ψευδείς ανιχνεύσεις κατειλημμένου καναλιού (IEEE 802.11ax-2021).

Κάθε BSS λαμβάνει έναν μοναδικό αριθμό αναγνώρισης (0-63), επιτρέποντας στις συσκευές να διακρίνουν τα σήματα των γειτονικών δικτύων. Όταν αυτά τα σήματα είναι ασθενή, οι συσκευές μπορούν να συνεχίσουν τη μετάδοση χωρίς να περιμένουν το κανάλι να ελευθερωθεί πλήρως, επιτυγχάνοντας spatial reuse και αυξάνοντας την αποδοτικότητα του φάσματος (IEEE 802.11ax-2021; Cisco Meraki, 2019). Σε συνδυασμό με ευρύτερα κανάλια (20/40/80/160 MHz) και βελτιωμένη διαχείριση φάσματος, το 802.11ax επιτυγχάνει υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης, μικρότερους χρόνους καθυστέρησης και βελτιωμένη εμπειρία χρήστη σε εφαρμογές υψηλής ζήτησης.

Το πρότυπο διατηρεί πλήρη συμβατότητα προς τα πίσω με τα 802.11a/b/g/n/ac, εξασφαλίζοντας ομαλή μετάβαση και υποστήριξη υπάρχουσων συσκευών (IEEE 802.11ax-2021). Οι κυριότερες εφαρμογές περιλαμβάνουν εταιρικά δίκτυα υψηλής πυκνότητας, έξυπνα κτίρια, εφαρμογές AR/VR, streaming βίντεο 4K/8K και IoT, όπου απαιτούνται υψηλές ταχύτητες, χαμηλή καθυστέρηση και υποστήριξη πολλαπλών ταυτόχρονων συνδέσεων.

Ο Πίνακας 7.9 συνοψίζει τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του προτύπου IEEE 802.11ax, όπως το έτος έκδοσης, τις ζώνες συχνοτήτων, την ενδεικτική μέγιστη ταχύτητα, τις κύριες τεχνικές και τις κυριότερες εφαρμογές του (IEEE 802.11ax-2021; Sauter, 2021).

Πίνακας 7.9: Βασικά χαρακτηριστικά IEEE 802.11ax

Χαρακτηριστικό	Στοιχεία
Έτος Έκδοσης	2021
Ζώνη Συχνοτήτων	2.4 GHz και 5 GHz (Dual-band)
Ενδεικτική Μέγιστη Ταχύτητα (θεωρητική)	9.6 Gbps

Κύρια Τεχνική	OFDMA, BSS Coloring, TWT, MU-MIMO (160 MHz)
Κύριες Εφαρμογές	Υψηλή πυκνότητα χρηστών, IoT, smart buildings, 4K/8K streaming

Το Wi-Fi 6 αποτελεί το κυρίαρχο πρότυπο για σύγχρονες απαιτήσεις ασύρματης δικτύωσης, προετοιμάζοντας το έδαφος για την επόμενη γενιά Wi-Fi 7 (802.11be).

7.2.7 IEEE 802.11be

Το πρότυπο IEEE 802.11be, γνωστό και ως Wi-Fi 7, αποτελεί την πιο πρόσφατη εξέλιξη των ασύρματων τοπικών δικτύων (WLAN) και οριστικοποιήθηκε το 2024. Στοχεύει στην επίτευξη εξαιρετικά υψηλής απόδοσης (Extremely High Throughput - EHT), εισάγοντας τεχνολογίες όπως κανάλια εύρους έως 320 MHz, MIMO με έως 16 spatial streams και Multi-Link Operation (MLO), οι οποίες επιτρέπουν σημαντική αύξηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης και της συνολικής χωρητικότητας του δικτύου (IEEE 802.11be-2024; Rohde & Schwarz, 2024). Έτσι, βελτιώνονται σημαντικά η ανθεκτικότητα, η σταθερότητα και η αποδοτική αξιοποίηση του διαθέσιμου φάσματος.

Το βελτιωμένο MU-MIMO παρέχει ταυτόχρονη εξυπηρέτηση περισσότερων χρηστών τόσο σε downlink όσο και σε uplink, μειώνοντας αποδοτικότερα τις καθυστερήσεις σε πυκνά δίκτυα και βελτιώνοντας την κατανομή των spatial streams. Σε συνδυασμό με τη διαμόρφωση 4096-QAM, αυξάνεται η αποδοτικότητα φάσματος και το throughput (IEEE 802.11be-2024; Rohde & Schwarz, 2024).

Για τη βελτίωση της αξιοπιστίας, το 802.11be αξιοποιεί δύο βασικές τεχνικές. Η πρώτη, το preamble puncturing, παρακάμπτει επιλεγμένα υποκανάλια των 20 MHz που παρουσιάζουν παρεμβολές, αλλά διατηρεί τη μετάδοση στα υπόλοιπα διαθέσιμα τμήματα του φάσματος χωρίς διακοπή (IEEE 802.11be-2024). Η δεύτερη, το MLO, επιτρέπει στη συσκευή να χρησιμοποιεί ταυτόχρονα πολλές ζώνες συχνοτήτων (2.4, 5 και 6 GHz), κάνοντας τη σύνδεση πιο αξιόπιστη και γρήγορη (IEEE 802.11be-2024; Rohde & Schwarz, 2024).

Το πρότυπο διατηρεί συμβατότητα προς τα πίσω με τα προηγούμενα 802.11a/b/g/n/ac/ax στις αντίστοιχες ζώνες συχνοτήτων, επιτρέποντας τη σταδιακή υιοθέτηση χωρίς αντικατάσταση της υπάρχουσας υποδομής (IEEE 802.11be-2024). Η ταυτόχρονη επικοινωνία πολλαπλών χρηστών μέσω OFDMA και MU-MIMO προσφέρει βελτιωμένη απόδοση σε απαιτητικές εφαρμογές, όπως cloud gaming, streaming βίντεο 4K/8K και εφαρμογές VR/AR (IEEE 802.11be-2024; Rohde & Schwarz, 2024).

Οι κυριότερες εφαρμογές περιλαμβάνουν εταιρικά δίκτυα υψηλής πυκνότητας, smart home εφαρμογές με πολλές συνδεδεμένες συσκευές. Επιπλέον, το πρότυπο μπορεί να αξιοποιηθεί σε βιομηχανικά συστήματα πραγματικού χρόνου, όπως ρομπότ γραμμής παραγωγής, αυτόνομα οχήματα και ιατρικά μηχανήματα σε χειρουργείο, όπου απαιτείται εγγυημένα χαμηλή καθυστέρηση και υψηλή αξιοπιστία (IEEE 802.11be-2024; Rohde & Schwarz, 2024).

Ο Πίνακας 7.10 συνοψίζει τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του προτύπου IEEE 802.11be, όπως το έτος έκδοσης, τις ζώνες συχνοτήτων, την ενδεικτική μέγιστη ταχύτητα, τις κύριες τεχνικές και τις κυριότερες εφαρμογές του (IEEE 802.11be-2024; Rohde & Schwarz, 2024).

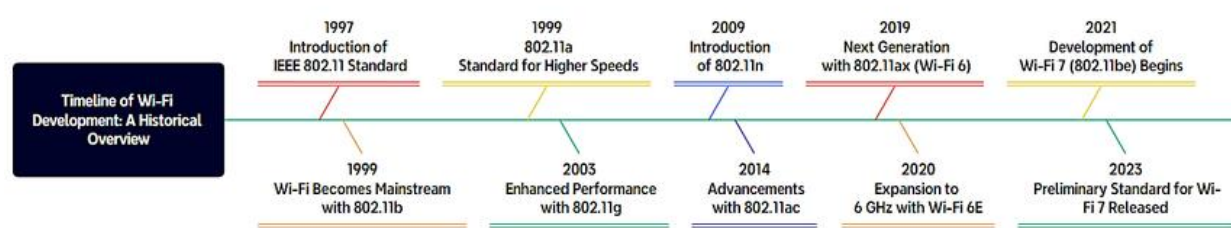
Πίνακας 7.10: Βασικά χαρακτηριστικά IEEE 802.11be

Χαρακτηριστικό	Στοιχεία
Έτος Έκδοσης	2024
Ζώνη Συχνοτήτων	2.4 GHz, 5 GHz και 6 GHz (Tri-band)
Ενδεικτική Μέγιστη Ταχύτητα (θεωρητική)	46 Gbps
Κύρια Τεχνική	Multi-Link Operation (MLO), 4096-QAM, MIMO με 16 spatial streams, κανάλια 320 MHz
Κύριες Εφαρμογές	Cloud gaming, 4K/8K streaming, VR/AR, εταιρικά δίκτυα υψηλής πυκνότητας, smart home

Συνολικά, το IEEE 802.11be αποτελεί σημαντικό βήμα στην εξέλιξη των ασύρματων τοπικών δικτύων, καλύπτοντας τις σύγχρονες απαιτήσεις για υψηλή ταχύτητα, χαμηλή καθυστέρηση και υποστήριξη μεγάλου αριθμού ταυτόχρονων συνδέσεων, διαμορφώνοντας τη βάση για τη νέα γενιά εφαρμογών WLAN.

7.3 Σύγκριση προτύπων IEEE 802.11

Η οικογένεια προτύπων IEEE 802.11 έχει εξελιχθεί δυναμικά τα τελευταία περίπου 30 χρόνια, ακολουθώντας τη ραγδαία αύξηση των απαιτήσεων σε ρυθμό μετάδοσης, χωρητικότητα, αξιοπιστία και ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλών χρηστών. Από τα πρώτα ασύρματα δίκτυα χαμηλών ρυθμών μετάδοσης μέχρι τα σύγχρονα WLAN υψηλής χωρητικότητας, κάθε νέα γενιά Wi-Fi δεν αντικαθιστά απλώς την προηγούμενη, αλλά εισάγει θεμελιώδεις τεχνολογικές καινοτομίες στο φυσικό και στο MAC επίπεδο, όπως OFDM, MIMO, MU-MIMO, OFDMA και πρόσφατα το MLO. Η εικόνα 7.4 παρουσιάζει τη χρονολογική εξέλιξη των προτύπων IEEE 802.11 από το 1997 έως το 2024, αναδεικνύοντας τη συνεχή ανάπτυξη της τεχνολογίας Wi-Fi κατά τη διάρκεια σχεδόν τριών δεκαετιών.



Εικόνα 7.4: Εξέλιξη τεχνολογίας Wi-Fi έως το 2023. Πηγή: Murad et al. (2024)

Η εξέλιξη αυτή είχε ως αποτέλεσμα την εκθετική αύξηση των θεωρητικών ρυθμών μετάδοσης, αλλά και τη βελτίωση της αποδοτικότητας σε περιβάλλοντα υψηλής πυκνότητας, όπως γραφεία, πανεπιστημιούπολεις και αστικά δίκτυα. Ο Πίνακας 7.11 παρουσιάζει βασικά χαρακτηριστικά των κυριότερων προτύπων IEEE 802.11, εστιάζοντας στο έτος έγκρισης, τη ζώνη συχνοτήτων και την ενδεικτική εμβέλεια (IEEE 802.11a-1999; IEEE 802.11n-2009; IEEE 802.11ac-2013; IEEE 802.11ax-

2021; IEEE 802.11be-2024). Η εμβέλεια διακρίνεται σε κλειστούς χώρους (με τοίχους και εμπόδια) και ανοιχτούς χώρους, καθώς η διάδοση του σήματος επηρεάζεται έντονα από το περιβάλλον.

Πίνακας 7.11: Βασικά Χαρακτηριστικά Προτύπων IEEE 802.11

Πρότυπο	Έτος Έγκρισης	Ζώνη Συχνοτήτων	Ενδεικτική Μέγιστη Ταχύτητα (θεωρητική)	Ενδεικτική Εμβέλεια (κλειστοί/ανοιχτοί χώροι)
802.11a	1999	5 GHz	54 Mbps	30-40m / 100-120m
802.11b	1999	2.4 GHz	11 Mbps	35-50m / 100-150m
802.11g	2003	2.4 GHz	54 Mbps	40-50m / 90-120m
802.11n	2009	Dual (2.4/5)	600 Mbps	70-100m / 200-300m
802.11ac	2013	5 GHz	6.9 Gbps	50-100m / 100-200m
802.11ax	2021	Dual (2.4/5)	9.6 Gbps	50-100m / 100-200m
802.11be	2024	Tri-band (2.4/5/6 GHz)	46 Gbps	50-100m / 100-200m

Ο Πίνακας 7.12 συνοψίζει τις βασικές τεχνολογικές καινοτομίες κάθε προτύπου και τις ενδεικτικές εφαρμογές τους (IEEE 802.11a-1999; IEEE 802.11n-2009; IEEE 802.11ac-2013; IEEE 802.11ax-2021; IEEE 802.11be-2024). Η επιλογή προτύπου εξαρτάται από παράγοντες όπως η πυκνότητα χρηστών, οι απαιτήσεις καθυστέρησης και το είδος της κυκλοφορίας.

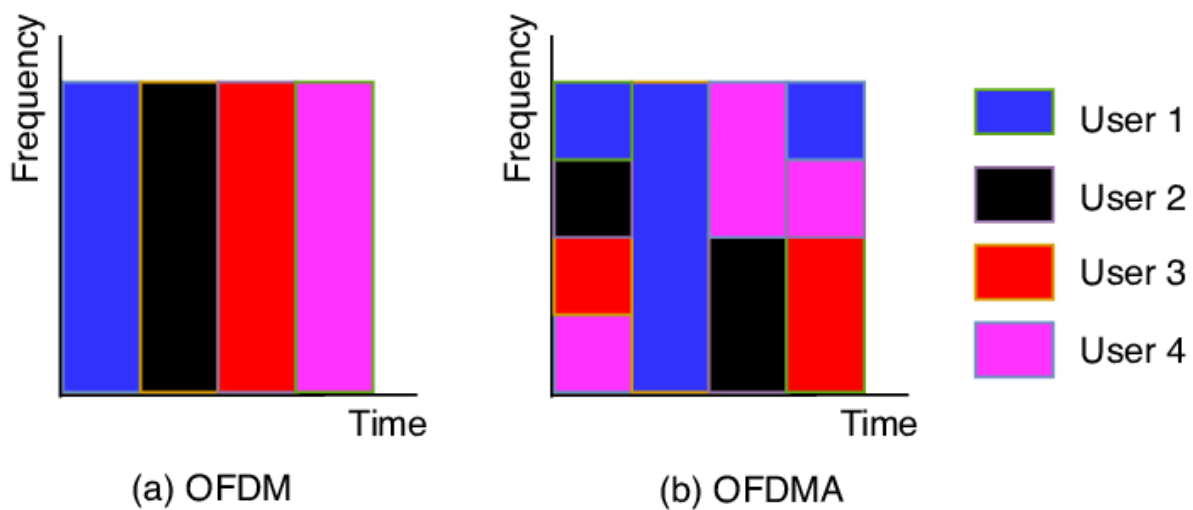
Πίνακας 7.12: Βασικά Χαρακτηριστικά Προτύπων IEEE 802.11

Πρότυπο	Βασικά Πλεονεκτήματα	Κύρια Καινοτομία	Κύριες Εφαρμογές
802.11a	Λιγότερες παρεμβολές λόγω χρήσης της ζώνης 5 GHz, υψηλότερη ταχύτητα από το 802.11b	OFDM (52 υποφορείς)	Επιχειρησιακοί χώροι, αεροδρόμια, βιομηχανικά περιβάλλοντα
802.11b	Μεγαλύτερη εμβέλεια, ευρεία υιοθέτηση	DSSS	Οικιακά WLAN, Wi-Fi hotspots, μικρά γραφεία
802.11g	Συμβατότητα με 802.11b, υψηλότερη ταχύτητα	OFDM στα 2.4 GHz	Οικιακά δίκτυα, μικρά γραφεία, Wi-Fi hotspots
802.11n	Υψηλότερη ταχύτητα και εμβέλεια, διπλή ζώνη συχνοτήτων	MIMO, channel bonding	HD streaming, cloud εφαρμογές, VoIP, εταιρικά WLAN
802.11ac	Πολύ υψηλές ταχύτητες, ευρύτερα κανάλια	MU-MIMO, 256-QAM, Beamforming	4K streaming, gaming, VR/AR, πρώτες cloud εφαρμογές
802.11ax	Εξαιρετικές ταχύτητες, καλύτερη απόδοση σε πυκνά δίκτυα,	OFDMA, BSS Coloring, TWT	Υψηλή πυκνότητα χρηστών, IoT, 4K/8K

	χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας		streaming, smart home
802.11be	Εξαιρετικά υψηλές ταχύτητες, εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση	MLO, Preamble Puncturing, 4096-QAM, 320 MHz	Cloud gaming, VR/AR, βιομηχανικά συστήματα

Μία από τις σημαντικότερες τεχνολογικές τομές στην εξέλιξη των WLAN είναι η μετάβαση από το OFDM στο OFDMA. Η τεχνική αυτή επιτρέπει την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλαπλών συσκευών μέσω της διαίρεσης καναλιών σε μικρότερα κομμάτια (IEEE 802.11ax-2021). Αποτέλεσμα είναι η σημαντική μείωση της καθυστέρησης, η βελτίωση της αποδοτικότητας του δικτύου και η αύξηση της φασματικής απόδοσης, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα υψηλής πυκνότητας χρηστών.

Η Εικόνα 7.5 συγκρίνει τις δύο τεχνικές: στο OFDM (a) κάθε χρήστης χρησιμοποιεί ολόκληρο το κανάλι διαδοχικά, ενώ στο OFDMA (b) πολλοί χρήστες μοιράζονται το κανάλι ταυτόχρονα.



Εικόνα 7.5: Σύγκριση OFDM και OFDMA στο Wi-Fi. Πηγή: Zhang et al. (2019).

Η εξέλιξη των προτύπων Wi-Fi χαρακτηρίζεται από συνεχείς τεχνολογικές βελτιώσεις που στοχεύουν στην αύξηση της ταχύτητας, τη μείωση της καθυστέρησης και τη βελτίωση της απόδοσης σε περιβάλλοντα με πολλές συσκευές. Τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά που καθορίζουν την απόδοση κάθε προτύπου περιλαμβάνουν το εύρος καναλιού (channel width), τη μέθοδο διαμόρφωσης (modulation), την καθυστέρηση (latency) και την ικανότητα εξυπηρέτησης πολλαπλών χρηστών μέσω MU-MIMO.

Ιδιαίτερη σημασία έχει η εξέλιξη από το SU-MIMO στο MU-MIMO. Ο όρος SU-MIMO χρησιμοποιείται αναδρομικά για να περιγράψει την τεχνολογία MIMO των παλαιότερων προτύπων (802.11a/b/g/n), προκειμένου να διακριθεί από το MU-MIMO που εισήχθη με το 802.11ac. Το SU-MIMO επιτρέπει στον router να επικοινωνεί με μία συσκευή τη φορά, χρησιμοποιώντας όλες τις κεραίες του για να μεγιστοποιήσει την ταχύτητα προς αυτή τη συσκευή. Αντίθετα, το MU-MIMO διαιρεί τις κεραίες σε ομάδες, επιτρέποντας την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλαπλών συσκευών και βελτιώνοντας δραστικά την απόδοση σε περιβάλλοντα υψηλής πυκνότητας χρηστών, όπως γραφεία, αεροδρόμια και στάδια (Liao et al., 2016).

Τα νεότερα πρότυπα όπως το 802.11ax και 802.11be εισάγουν σημαντικές καινοτομίες σε όλους αυτούς τους τομείς, προσφέροντας εξαιρετικά υψηλές ταχύτητες, εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση και αποδοτική διαχείριση δεκάδων συσκευών ταυτόχρονα (IEEE 802.11ac-2013; IEEE 802.11ax-2021; IEEE 802.11be-2024).

Πίνακας 7.13: Βασικά Χαρακτηριστικά Προτύπων IEEE 802.11

Πρότυπο	Ενδεικτικό Μέγιστο Εύρος Καναλιού	Διαμόρφωση	Ενδεικτική Καθυστέρηση	Χωρητικότητα MIMO (χρήστες)
802.11a	20 MHz	64-QAM	~30-50 ms	1 (SU-MIMO)
802.11b	20 MHz	CCK/DQPSK	~30-50 ms	1 (SU-MIMO)
802.11g	20 MHz	64-QAM	~30-50 ms	1 (SU-MIMO)
802.11n	40 MHz	64-QAM	~30-50 ms	1 (SU-MIMO)
802.11ac	160 MHz	256-QAM	~20-30 ms	4 (downlink στο Wave 2)
802.11ax	160 MHz	1024-QAM	~10-20 ms	8 (uplink/downlink)
802.11be	320 MHz	4096-QAM	<5 ms	16 (uplink/downlink)

7.4 Συμπεράσματα και Μελλοντικές Τάσεις

Η εξέλιξη των προτύπων IEEE 802.11 αντικατοπτρίζει μια εντυπωσιακή τεχνολογική πρόοδο δύο δεκαετιών. Οι ταχύτητες αυξήθηκαν από 11-54 Mbps το 1999 στα 46 Gbps του 802.11be. Την ίδια στιγμή, η καθυστέρηση μειώθηκε δραματικά από 30-50 ms σε λιγότερο από 5 ms, ενώ το δίκτυο πέρασε από την εξυπηρέτηση μιας συσκευής τη φορά στην ταυτόχρονη εξυπηρέτηση δεκαέξι. Οι τεχνολογίες που έκαναν αυτό εφικτό είναι η τριπλή ζώνη συχνοτήτων (2.4/5/6 GHz), τα ευρύτερα κανάλια (από 20 MHz σε 320 MHz), αποδοτικότερη μετάδοση δεδομένων (από 64-QAM σε 4096-QAM) και η εισαγωγή MU-MIMO και OFDMA.

Τα σύγχρονα Wi-Fi 6 και Wi-Fi 7 δεν στοχεύουν μόνο σε υψηλές ταχύτητες, αλλά στην αποδοτική εξυπηρέτηση πολλών συσκευών ταυτόχρονα. Αυτό τα καθιστά ιδανικά για εφαρμογές όπως IoT, cloud gaming, VR/AR, τηλεργασία και βιομηχανική αυτοματοποίηση. Τα επόμενα πρότυπα Wi-Fi θα συνεχίσουν να βελτιώνονται σε ταχύτητα, καθυστέρηση, ενεργειακή απόδοση και ασφάλεια. Το Wi-Fi δεν είναι πλέον απλώς μια τεχνολογία σύνδεσης αλλά έχει εξελιχθεί σε βασική ψηφιακή υποδομή που υποστηρίζει την καθημερινή ζωή, την επιχειρηματική δραστηριότητα και την ψηφιακή μετάβαση της κοινωνίας.

Η επόμενη γενιά ασύρματων δικτύων IEEE 802.11bn, γνωστή ως Wi-Fi 8, βρίσκεται ακόμη σε στάδιο ανάπτυξης και τυποποίησης, με αναμενόμενη οριστικοποίηση έως το 2028. Εστιάζει στην εξαιρετικά υψηλή αξιοπιστία (Ultra High Reliability - UHR), με ιδιαίτερη έμφαση σε εφαρμογές όπως η ολογραφική επικοινωνία, η ρομποτική χειρουργική και ο βιομηχανικός αυτοματισμός, όπου ακόμα και μικρές διακοπές ή καθυστερήσεις είναι κρίσιμες (Galati-Giordano et al., 2024). Για την επίτευξη αυτών των στόχων το Wi-Fi 8 εισάγει τη λειτουργία συντονισμού πολλαπλών σημείων πρόσβασης (Multi-AP Coordination), μέσω της οποίας γειτονικά Access Points συνεργάζονται για να ελαχιστοποιούν τις παρεμβολές και να βελτιώνουν την απόδοση ακόμα και σε πυκνά περιβάλλοντα.

Συνολικά, το Wi-Fi 8 στοχεύει περισσότερο στην αξιοπιστία και την απόδοση σε πραγματικές συνθήκες παρά στην αύξηση του θεωρητικού ρυθμού μετάδοσης (Galati-Giordano et al., 2024).

Κεφάλαιο 8ο: Τεχνολογία WPAN: Zigbee

8.1 Εισαγωγή στο ZigBee και το IEEE 802.15.4

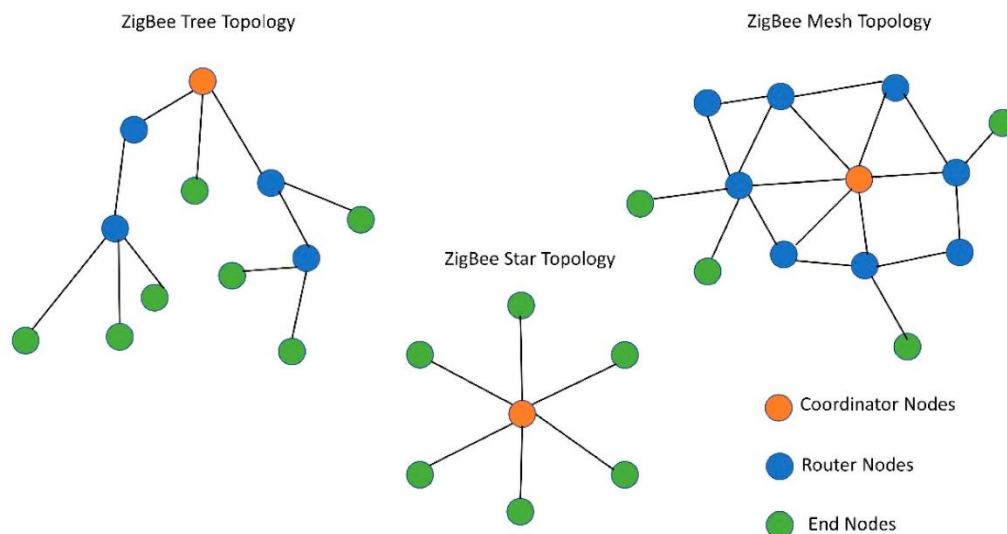
Το Zigbee είναι ένα ασύρματο πρωτόκολλο επικοινωνίας βασισμένο στο πρότυπο IEEE 802.15.4 και σχεδιασμένο για χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και μικρές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων. Είναι ιδανικό για εφαρμογές Internet of Things (IoT) και smart home. Λειτουργεί κυρίως σε μικρές εμβέλειες (10-100 μέτρα) και χρησιμοποιείται συνήθως για αισθητήρες, φωτισμό, έξυπνες κλειδαριές, θερμοστάτες και άλλες συσκευές που απαιτούν χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Είναι σχεδιασμένο για συσκευές που λειτουργούν με μπαταρία για χρόνια, π.χ. αισθητήρες θερμοκρασίας ή φωτισμού (Connectivity Standards Alliance, 2023; Haque et al., 2022b).

Λειτουργεί στη ζώνη ISM 2,4 GHz με 16 κανάλια, 915 MHz με 10 κανάλια και 868 MHz με 1 κανάλι. Επιπλέον, λειτουργεί με ταχύτητα μετάδοσης 20-250 kbps, κατάλληλη για μικρά πακέτα δεδομένων. Παρέχει επίσης AES-128 κρυπτογράφηση για ασφάλεια των δεδομένων και υποστηρίζει mesh δίκτυα, επιτρέποντας την αξιόπιστη επικοινωνία πολλών συσκευών και την επέκταση της εμβέλειας του δικτύου (IEEE 802.15.4-2015; Al-Fuqaha et al., 2015; Haque et al., 2022b).

8.2 Τεχνικά Χαρακτηριστικά

Το ZigBee βασίζεται στο πρότυπο IEEE 802.15.4, το οποίο καθορίζει τα φυσικά επίπεδα (PHY) και το επίπεδο πρόσβασης μέσου (MAC) για ασύρματα δίκτυα χαμηλής ισχύος και μικρής εμβέλειας. Προσθέτει επίπεδα πρωτοκόλλων για την υποστήριξη δικτύωσης, ασφάλειας και εφαρμογών, δημιουργώντας μια ολοκληρωμένη λύση για εφαρμογές Internet of Things (Al-Fuqaha et al., 2015; Haque et al., 2022b).

Το ZigBee υποστηρίζει τρεις τοπολογίες: star, tree και mesh. Η τοπολογία mesh είναι η πιο διαδεδομένη, καθώς επιτρέπει σε πολλές συσκευές να διασυνδέονται και να δρομολογούν δεδομένα μέσω πολλαπλών διαδρομών. Επιπλέον, είναι self-healing, δηλαδή σε περίπτωση αποτυχίας μιας συσκευής, τα δεδομένα δρομολογούνται αυτόματα μέσω εναλλακτικής διαδρομής, ενισχύοντας την αξιοπιστία και την εμβέλεια του δικτύου (Al-Fuqaha et al., 2015; Haque et al., 2022b).



Εικόνα 8.1: Τοπολογίες δικτύου ZigBee (star, tree, mesh). Πηγή: Haque et al. (2022a)

Η αρχιτεκτονική του ZigBee εστιάζει στη χαμηλή κατανάλωση ενέργειας (Low Power), με συσκευές που μπορούν να λειτουργούν σε αδρανή κατάσταση (sleep mode). Αυτό σημαίνει πως οι συσκευές ενεργοποιούνται μόνο κατά τη μετάδοση ή λήψη δεδομένων, παρατείνοντας τη διάρκεια ζωής των μπαταριών, γεγονός που το καθιστά κατάλληλο για εφαρμογές IoT μικρής κατανάλωσης (IEEE Std 802.15.4-2020; Haque et al., 2022b).

Επιπλέον, το ZigBee ενσωματώνει μηχανισμούς κρυπτογράφησης και ελέγχου πρόσβασης, διασφαλίζοντας την ασφάλεια των δεδομένων, γεγονός που το καθιστά κατάλληλο για εφαρμογές σε βιομηχανικούς και smart homes (Al-Fuqaha et al., 2015; Haque et al., 2022b).

8.3 Αρχιτεκτονική και Τύποι Συσκευών

Η αρχιτεκτονική του ZigBee αποτελείται από πολλαπλά επίπεδα πρωτοκόλλων. Το επίπεδο δικτύου (Network Layer) είναι υπεύθυνο για τη δρομολόγηση πακέτων μέσω mesh, star ή tree τοπολογιών, επιτρέποντας την ευελιξία και αξιοπιστία στην επικοινωνία μεταξύ των κόμβων (Al-Fuqaha et al., 2015; Haque et al., 2022b).

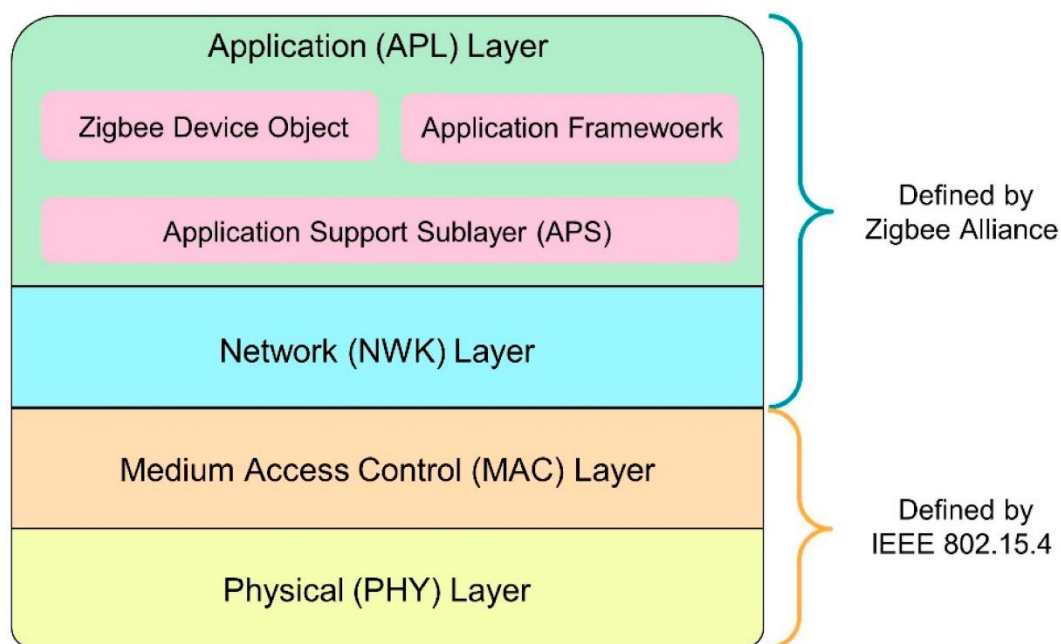
Το IEEE 802.15.4 ορίζει δύο τύπους συσκευών, τις Full Function Devices (FFD) και τις Reduced Function Devices (RFD). Οι FFD μπορούν να λειτουργήσουν είτε ως συντονιστές (coordinators), είτε ως κανονικοί κόμβοι, και υποστηρίζουν όλες τις τοπολογίες (star, tree, mesh). Οι RFD είναι απλούστερες συσκευές χαμηλής κατανάλωσης που επικοινωνούν μόνο με έναν συντονιστή και υποστηρίζουν μόνο τοπολογία αστέρα (star) (Al-Fuqaha et al., 2015; Haque et al., 2022b).

Το ZigBee διακρίνει τρεις βασικούς τύπους συσκευών. Τον Συντονιστή (Coordinator), το μοναδικό κεντρικό κόμβο που δημιουργεί και διαχειρίζεται το δίκτυο εκχωρώντας διευθύνσεις και κλειδιά ασφαλείας. Τους Δρομολογητές (Routers) που δρομολογούν δεδομένα και επεκτείνουν την κάλυψη του δικτύου, και τα End Devices, που αποτελούν τερματικές συσκευές χαμηλής κατανάλωσης που επικοινωνούν, στέλνοντας ή λαμβάνοντας δεδομένα, μέσω των Routers ή του Coordinator (Haque et al., 2022). Η αρχιτεκτονική αυτή κατανέμει αποδοτικά τις λειτουργίες του δικτύου, καθώς οι End Devices μπορούν να παραμένουν σε αδρανή κατάσταση

(sleep mode) εξοικονομώντας ενέργεια, ενώ οι Routers και ο Coordinator αναλαμβάνουν τη δρομολόγηση και τη διαχείριση του δικτύου (Al-Fuqaha et al., 2015).

Το ZigBee υποστηρίζει το Application Support Sublayer (APS), το οποίο διασφαλίζει τη συμβατότητα και τη διαλειτουργικότητα μεταξύ συσκευών διαφορετικών κατασκευαστών. Το APS διαχειρίζεται διευθύνσεις, δρομολόγηση και μηχανισμούς ασφάλειας. Αυτό διευκολύνει την υλοποίηση έξυπνων δικτύων σε οικιακό, βιομηχανικό και ιατρικό περιβάλλον (Connectivity Standards Alliance, 2023). Παράλληλα, το ZDO (ZigBee Device Object) είναι στοιχείο του Application Layer που ορίζει τον τύπο κάθε συσκευής, οργανώνει την ένταξη (joining) και απομάκρυνσή (leaving) τους από το δίκτυο, επιτρέπει την εύρεση άλλων συσκευών και υπηρεσιών, διαχειρίζεται τη σύνδεση εφαρμογών μεταξύ συσκευών (binding), και επικοινωνεί με το Network Layer για την τοπολογία και την ασφάλεια του δικτύου (Connectivity Standards Alliance, 2023).

Η διαχείριση δεδομένων στο ZigBee γίνεται μέσω του Network Layer, το οποίο εφαρμόζει πρωτόκολλα δρομολόγησης προσαρμοσμένα για mesh δίκτυα. Καθορίζει τη διαδρομή που ακολουθούν τα δεδομένα από τον αποστολέα μέχρι τον προορισμό, περνώντας από ενδιάμεσους κόμβους (Al-Fuqaha et al., 2015). Ο πιο συχνά χρησιμοποιούμενος αλγόριθμος δρομολόγησης είναι ο AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector), ο οποίος επιτρέπει την multi-hop επικοινωνία, δημιουργώντας διαδρομές μόνο όταν απαιτείται και διατηρώντας τις όσο χρησιμοποιούνται, εξοικονομώντας έτσι ενέργεια (Al-Fuqaha et al., 2015). Η συνολική αρχιτεκτονική του ZigBee παρουσιάζεται στην Εικόνα 8.2.



Εικόνα 8.2: Στοιβά πρωτοκόλλων ZigBee. Πηγή: Haque et al. (2022a)

8.4 Διαχείριση Ενέργειας

Το ZigBee έχει σχεδιαστεί ειδικά για εφαρμογές που απαιτούν χαμηλή κατανάλωση ενέργειας (Low Power), όπως συστήματα αισθητήρων σε δίκτυα Internet of Things. Αυτό επιτυγχάνεται

μέσω τεχνικών και μηχανισμών που μειώνουν σημαντικά την ενεργειακή κατανάλωση των συσκευών (Connectivity Standards Alliance, 2023; Haque et al., 2022a).

Το ZigBee παρέχει μηχανισμούς διαχείρισης ενέργειας (duty cycling) βασισμένους σε καταστάσεις λειτουργίας, όπως ενεργός λειτουργία (active), αδρανής κατάσταση (sleep) και βαθιά αδρανής κατάσταση (deep sleep) (Haque et al., 2022a). Οι συσκευές ενεργοποιούνται μόνο όταν απαιτείται η μετάδοση ή λήψη δεδομένων, ενώ κατά το υπόλοιπο χρόνο βρίσκονται σε κατάσταση ελάχιστης κατανάλωσης, παρατείνοντας σημαντικά τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας (IEEE 802.15.4-2020; Al-Fuqaha et al., 2015; Haque et al., 2022a).

Η χρήση μικρών πακέτων δεδομένων μειώνει το χρόνο μετάδοσης, ενώ η τοπολογία mesh επιτρέπει τη μετάδοση μέσω κόμβων κοντινής εμβέλειας, αποφεύγοντας τη χρήση υψηλής ισχύος για μεγάλες αποστάσεις (Al-Fuqaha et al., 2015).

Επιπλέον, το ZigBee υποστηρίζει την τεχνική χρονικής διαίρεσης πρόσβασης (TDMA), όπου κάθε συσκευή μεταδίδει σε συγκεκριμένη χρονική περίοδο (time slot). Αυτό περιορίζει τις συγκρούσεις στο κανάλι και βελτιώνει την ενεργειακή αποδοτικότητα και τη σταθερότητα του δικτύου (Al-Fuqaha et al., 2015).

8.5 Ασφάλεια

Η ασφάλεια αποτελεί θεμελιώδες στοιχείο του προτύπου ZigBee, δεδομένου ότι πολλές εφαρμογές του αφορούν ευαίσθητα δεδομένα που μεταδίδονται σε δίκτυα περιορισμένων πόρων. Το ZigBee υιοθετεί το πρότυπο κρυπτογράφησης AES-128 για να διασφαλίσει την εμπιστευτικότητα, την ακεραιότητα και την αυθεντικότητα των δεδομένων που ανταλλάσσονται μεταξύ των συσκευών (IEEE 802.15.4-2020; Haque et al., 2022b).

Στο ZigBee, η κρυπτογράφηση εφαρμόζεται σε πολλαπλά επίπεδα. Στο Network Layer προστατεύει τα πρωτόκολλα δρομολόγησης, ενώ στο Application Layer, μέσω του APS (Application Support Sublayer), διασφαλίζεται η ασφαλής μετάδοση και λήψη δεδομένων (Connectivity Standards Alliance, 2023).

Η διαχείριση κλειδιών (Key Management) γίνεται μέσω ενός Trust Center, το οποίο ελέγχει την πρόσβαση στο δίκτυο και ενημερώνει τα κλειδιά περιοδικά. Η χρήση δυναμικών (Dynamic Keys) και εναλλασσόμενων κλειδιών (Rotating Keys) ενισχύει την προστασία από παραβιάσεις και επιθέσεις υποκλοπής (Connectivity Standards Alliance, 2023).

Επιπλέον, το ZigBee παρέχει προστασία από επαναλαμβανόμενες επιθέσεις (replay attacks), διασφαλίζοντας ότι διπλότυπα μηνύματα εντοπίζονται και απορρίπτονται. Η σχεδίαση λαμβάνει υπόψη τους περιορισμούς των συσκευών ως προς την επεξεργαστική ισχύ και τη μνήμη, επιτρέποντας ασφαλή πρωτόκολλα με ελάχιστη κατανάλωση πόρων (IEEE 802.15.4-2020).

8.6 Εφαρμογές

Η τεχνολογία ZigBee έχει υιοθετηθεί ευρέως στον τομέα του οικιακού αυτοματισμού, όπου χρησιμοποιείται για την ασύρματη σύνδεση και διαχείριση συσκευών όπως φωτισμός, θερμοστάτες, αισθητήρες κίνησης και συστήματα ασφαλείας σε smart homes. Η υποστήριξη mesh δικτύων επιτρέπει την επέκταση της κάλυψης σε ολόκληρο το σπίτι, ενώ η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας διασφαλίζει τη μακροχρόνια λειτουργία χωρίς συχνή αλλαγή μπαταριών (Haque et al., 2022a). Παράλληλα, αισθητήρες ασφάλειας για πόρτες, παράθυρα και ανίχνευση κίνησης, σε συνδυασμό με συναγερμούς, ενισχύουν την προστασία του χώρου (Al-Fuqaha et al., 2015).

Στον τομέα της υγείας, το ZigBee υποστηρίζει ασύρματα συστήματα παρακολούθησης ασθενών, διασφαλίζοντας αξιόπιστη και ασφαλή μεταφορά κρίσιμων βιοϊατρικών δεδομένων. Wearable συσκευές, όπως fitness trackers και smartwatches και άλλοι αισθητήρες υγείας, επιτρέπουν τη συνεχή παρακολούθηση ζωτικών παραμέτρων όπως καρδιακοί παλμοί, επίπεδα οξυγόνου και γλυκόζης. Η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας καθιστά το ZigBee ιδανικό για ιατρικές συσκευές με μπαταρίες (Al-Fuqaha et al., 2015).

Σε βιομηχανικές εφαρμογές, το ZigBee επιτρέπει την παρακολούθηση και τον έλεγχο εξοπλισμού και μηχανημάτων, καθώς και τη συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Αισθητήρες παρακολούθησης πίεσης, θερμοκρασίας και υγρασίας παρακολουθούν συνεχώς τις συνθήκες παραγωγής, ενώ η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας επιτρέπει τη λειτουργία τους σε δυσπρόσιτα σημεία. Οι mesh τοπολογίες εξασφαλίζουν αξιοπιστία και ανθεκτικότητα σε περιβάλλοντα με αυξημένο θόρυβο και απαιτήσεις διαθεσιμότητας (Al-Fuqaha et al., 2015; IEEE 802.15.4-2020; Haque et al., 2022b).

Στον αγροτικό τομέα, το ZigBee χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση παραμέτρων όπως η υγρασία του εδάφους, η θερμοκρασία, το επίπεδο φωτισμού, η ποιότητα του αέρα και τα θρεπτικά συστατικά. Χάρη στα εκτεταμένα mesh δίκτυα, μπορεί να καλύψει απομακρυσμένες αγροτικές περιοχές, μειώνοντας την ανάγκη για ανθρώπινη παρέμβαση και αυξάνοντας την παραγωγικότητα (Al-Fuqaha et al., 2015; IEEE 802.15.4-2020).

Οι βασικές απαιτήσεις επικοινωνίας των παραπάνω τομέων εφαρμογής συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα (Al-Fuqaha et al., 2015; IEEE 802.15.4-2020).

Πίνακας 8.2: Απαιτήσεις ανά τομέα εφαρμογής ZigBee.

Τομέας	Τύποι κόμβων	Ρυθμός Δεδομένων	Απαιτήσεις Εμβέλειας	Ενεργειακές Ανάγκες
Οικία	Έξυπνες λάμπες, αισθητήρες	Χαμηλός	Μεσαία	Πολύ χαμηλές
Βιομηχανία	Αισθητήρες, ελεγκτές αυτοματισμού (PLC)	Μεσαίος	Υψηλή	Χαμηλές
Υγεία	Φορητές συσκευές, ιατρικοί αισθητήρες	Μεσαίος	Κοντινή	Πολύ χαμηλές
Γεωργία	Αισθητήρες εδάφους & άρδευσης	Χαμηλός	Υψηλή	Χαμηλές

8.7 Σύγκριση με Bluetooth

Η τεχνολογία ZigBee ξεχωρίζει για την ικανότητά της να λειτουργεί με πολύ χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, καθιστώντας την κατάλληλη για δίκτυα αισθητήρων και εφαρμογές IoT όπου η αυτονομία των συσκευών είναι κρίσιμη. Η υποστήριξη mesh τοπολογιών επιτρέπει τη δημιουργία δικτύων με μεγάλο αριθμό κόμβων, που μπορούν να επικοινωνούν αξιόπιστα ακόμη και σε περίπτωση αποτυχίας ορισμένων σημείων, εξασφαλίζοντας υψηλή διαθεσιμότητα και ανθεκτικότητα (Al-Fuqaha et al., 2015; IEEE 802.15.4-2020; Haque et al., 2022b).

Αντίθετα, το Bluetooth περιορίζεται σε τοπολογία piconet με μικρότερο αριθμό ταυτόχρονων συνδέσεων (Al-Fuqaha et al., 2015). Παρέχει υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων έως 2

Mbps, καθιστώντας το ιδανικό για εφαρμογές που απαιτούν γρήγορη μεταφορά δεδομένων, όπως η αναπαραγωγή πολυμέσων.

Η εμβέλεια αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα του ZigBee. Ένας μεμονωμένος κόμβος καλύπτει αποστάσεις 10-100 μέτρων, ενώ σε mesh τοπολογία η συνολική κάλυψη μπορεί να φτάσει έως 1 χλμ υπό ευνοϊκές συνθήκες (Al-Fuqaha et al., 2015). Αντίθετα, το Bluetooth Low Energy περιορίζεται σε εμβέλεια περίπου 100 μέτρων, ενώ το classic Bluetooth φτάνει μόλις τα 10 μέτρα (Al-Fuqaha et al., 2015).

Το ZigBee λειτουργεί κυρίως στα 2,4 GHz, αλλά υποστηρίζει και τις ζώνες 868 MHz και 915 MHz, προσφέροντας εναλλακτικές επιλογές για αποφυγή παρεμβολών. Το Bluetooth επίσης λειτουργεί στα 2,4 GHz, γεγονός που σημαίνει ότι και τα δύο πρωτόκολλα μοιράζονται το ίδιο φάσμα με Wi-Fi και Z-Wave, δημιουργώντας παρεμβολές μεταξύ των τεχνολογιών (Cross Technology Interference). Το ZigBee αντιμετωπίζει αυτό το πρόβλημα με μηχανισμούς αλλαγής καναλιού (channel hopping) και ανίχνευσης παρεμβολών, διατηρώντας σταθερή επικοινωνία ακόμα και σε πυκνά δίκτυα (Al-Fuqaha et al., 2015; IEEE 802.15.4-2020).

Η ενεργειακή αποδοτικότητα του ZigBee το καθιστά κατάλληλο για συσκευές με περιορισμένες πηγές ισχύος, όπως αισθητήρες σε απομακρυσμένες περιοχές όπου η αντικατάσταση μπαταριών είναι δύσκολη. Το Bluetooth Low Energy (BLE) είναι επίσης χαμηλής κατανάλωσης, αλλά σε πολύπλοκες δικτυακές συνδέσεις το ZigBee διατηρεί πλεονέκτημα λόγω της mesh αρχιτεκτονικής του (Al-Fuqaha et al., 2015; Haque et al., 2022a).

Οι βασικές διαφορές μεταξύ ZigBee και Bluetooth Low Energy ως προς την τοπολογία, την εμβέλεια, την κατανάλωση ενέργειας και τον ρυθμό μετάδοσης συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα (Al-Fuqaha et al., 2015).

Πίνακας 8.3: Βασικές Διαφορές ZigBee και BLE

Χαρακτηριστικό	ZigBee	BLE
Τοπολογία	Mesh, Star, Tree	Star (Piconet)
Ενδεικτική Εμβέλεια	Έως 1000 μέτρα με mesh	Έως 100 μέτρα
Κατανάλωση Ενέργειας	Πολύ χαμηλή	Εξαιρετικά χαμηλή
Ενδεικτική Ταχύτητα	250 kbps	Έως 2 Mbps
Ασφάλεια	AES-128, Δυναμικό κλειδί	AES-128
Κύριες Εφαρμογές	Smart Home, Βιομηχανία, Γεωργία, Υγεία	Wearables, IoT, Περιφερειακά

Η ευρεία αποδοχή του Bluetooth στον καταναλωτικό τομέα είναι προφανής, λόγω της ενσωμάτωσής του σε κινητά τηλέφωνα, φορητές συσκευές και περιφερειακά. Αυτή η δημοφιλία το καθιστά προτιμώμενη επιλογή για καθημερινή χρήση και γρήγορη ζεύξη (pairing) συσκευών. Αντιθέτως, το ZigBee εστιάζει περισσότερο σε βιομηχανικές, εμπορικές και αγροτικές εφαρμογές, όπου η

αξιοπιστία, η ανθεκτικότητα και η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας έχουν πρωτεύοντα ρόλο (Al-Fuqaha et al., 2015).

8.8 Συμπεράσματα

Το Bluetooth και το ZigBee αποτέλεσαν δύο από τις σημαντικότερες τεχνολογίες ασύρματης επικοινωνίας μικρής εμβέλειας, καλύπτοντας διαφορετικές αλλά συμπληρωματικές ανάγκες. Το Bluetooth καθιερώθηκε ως βασική λύση για τη διασύνδεση προσωπικών και καταναλωτικών συσκευών, χάρη στη χαμηλή κατανάλωση, την απλότητα και τη μεγάλη του διάδοση, ενώ το ZigBee σχεδιάστηκε κυρίως για εφαρμογές χαμηλού ρυθμού μετάδοσης, χαμηλής ενεργειακής απαίτησης και αξιόπιστης λειτουργίας σε δίκτυα αισθητήρων και συστήματα αυτοματισμού.

Η επιτυχία των δύο προτύπων οφείλεται στην ικανότητά τους να ανταποκρίνονται σε συγκεκριμένα σενάρια χρήσης, συμβάλλοντας καθοριστικά στην ανάπτυξη των προσωπικών και των διασυνδεδεμένων συσκευών. Για τον λόγο αυτό, το Bluetooth και το ZigBee παραμένουν βασικοί πυλώνες των σύγχρονων λύσεων ασύρματης επικοινωνίας, ιδιαίτερα στο πεδίο του Internet of Things.

Συνολικά, το ZigBee μπορεί να θεωρηθεί επιτυχημένο πρότυπο ασύρματης επικοινωνίας για εφαρμογές χαμηλής κατανάλωσης και IoT, καθώς υιοθετήθηκε ευρέως σε οικιακούς, βιομηχανικούς και αυτοματιστικούς χώρους. Παρότι δεν απέκτησε τη μαζική καταναλωτική διάδοση του Wi-Fi ή του Bluetooth, κατέχει σημαντική θέση στα δίκτυα αισθητήρων και στα συστήματα χαμηλού ρυθμού μετάδοσης.

Κεφάλαιο 9ο: Άλλα πρότυπα WLAN

9.1 HomeRF

9.1.1 Προέλευση και Στόχοι

Το HomeRF (Home Radio Frequency) αποτέλεσε μια από τις πρώτες συστηματικές βιομηχανικές προσπάθειες να αναπτυχθεί ένα ασύρματο πρότυπο σχεδιασμένο αποκλειστικά για οικιακά περιβάλλοντα. Σε μια εποχή που τα πρώτα πρότυπα IEEE 802.11 εστίαζαν κυρίως στη μεταφορά δεδομένων και το Bluetooth στόχευε στη σύνδεση συσκευών χωρίς καλώδια σε μικρή εμβέλεια, το HomeRF είχε ως στόχο την ταυτόχρονη υποστήριξη φωνής και δεδομένων στο ίδιο οικιακό ασύρματο δίκτυο (Negus et al., 2000).

Το πρότυπο αναπτύχθηκε από το HomeRF Working Group, που ιδρύθηκε το 1997 από μια ομάδα εταιρειών όπως η Intel, η Compaq, η Hewlett-Packard και η Microsoft, με κεντρικό στόχο φθηνή και απλή ασύρματη σύνδεση για τον οικιακό χρήστη (Negus et al., 2000; Lansford, 2000). Η τεχνική του βάση ήταν το πρωτόκολλο SWAP (Shared Wireless Access Protocol), το οποίο λειτουργούσε με FHSS στη ζώνη ISM των 2.4 GHz. Για την πρόσβαση στο μέσο χρησιμοποιούσε TDMA για τη μετάδοση φωνής και CSMA/CA για τη μεταφορά δεδομένων (Lansford, 2000; Negus et al., 1998). Η ενσωμάτωση φωνητικής επικοινωνίας ήταν καινοτόμα για την εποχή, καθώς το HomeRF επέτρεπε τη δημιουργία φωνητικών καναλιών ταυτόχρονα με την αποστολή δεδομένων, χωρίς να απαιτείται εξειδικευμένη εγκατάσταση (Negus et al., 1998).

9.1.2 Αρχιτεκτονική και Τεχνικά Χαρακτηριστικά

Η αρχιτεκτονική του HomeRF βασίστηκε στο πρωτόκολλο SWAP, το οποίο συνδύαζε στοιχεία από τα πρότυπα DECT (Digital Enhanced Cordless Telecommunications) και IEEE 802.11, προσφέροντας υποστήριξη τόσο για φωνητική επικοινωνία όσο και για μεταφορά δεδομένων στο ίδιο δίκτυο (Negus et al., 1998; Lansford, 2000).

Το δίκτυο υποστήριζε πέντε τύπους κόμβων. Ο Control Point (CP) αποτελούσε τον κεντρικό κόμβο του δικτύου, διαχειριζόταν τις φωνητικές συνδέσεις και συνδεόταν με το δημόσιο τηλεφωνικό δίκτυο (PSTN) και τον υπολογιστή μέσω USB. Ένας δεύτερος τύπος CP ήταν υπεύθυνος μόνο για την εξοικονόμηση ενέργειας των φορητών συσκευών. Οι I-nodes επικοινωνούσαν αποκλειστικά με τον CP μέσω TDMA και αντιστοιχούσαν κυρίως σε ασύρματα τηλέφωνα. Οι A-nodes μπορούσαν να επικοινωνούν είτε με τον CP είτε απευθείας μεταξύ τους μέσω CSMA/CA, και αντιστοιχούσαν κυρίως σε υπολογιστές και περιφερειακά. Τέλος, οι Voice and Data nodes μπορούσαν να

χρησιμοποιούν και τους δύο μηχανισμούς πρόσβασης, δηλαδή φωνή μέσω TDMA και δεδομένα μέσω CSMA/CA (Lansford, 2000; Negus et al., 2000).

Το HomeRF λειτούργησε στη μη αδειοδοτούμενη ζώνη ISM των 2.4 GHz με FHSS, αλλάζοντας συχνότητα 50 φορές ανά δευτερόλεπτο σε 79 διαθέσιμα κανάλια, προσφέροντας ανθεκτικότητα σε παρεμβολές (Lansford, 2000; Cooley, 2004; Negus et al., 1998). Υποστήριζε έως τέσσερις fully protected ή οκτώ partially protected ταυτόχρονες φωνητικές συνδέσεις, με ταχύτητες έως 1.6 Mbps επαρκείς για απλές εφαρμογές φωνής και Internet εκείνης της περιόδου, ενώ ταυτόχρονα παρείχε μηχανισμό μετάδοσης ασύγχρονων δεδομένων στο ίδιο ασύρματο περιβάλλον (Lansford, 2000).

Ο παρακάτω πίνακας συνοψίζει τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του HomeRF, όπως αυτά ορίζονται από το πρωτόκολλο SWAP (Lansford, 2000; Cooley, 2004; Negus et al., 2000).

Πίνακας 9.1: Τεχνικά Χαρακτηριστικά HomeRF

Χαρακτηριστικό	Προδιαγραφή
Συχνότητα	2.4 GHz ISM
Τεχνική	FHSS
Ενδεικτική Ταχύτητα	έως 1.6 Mbps
Κανάλια	79
Hops/sec	50
Φωνητικές συνδέσεις	4 fully / 8 partially protected
Ενδεικτική Εμβέλεια	>50 μέτρα
Ισχύς	100 mW

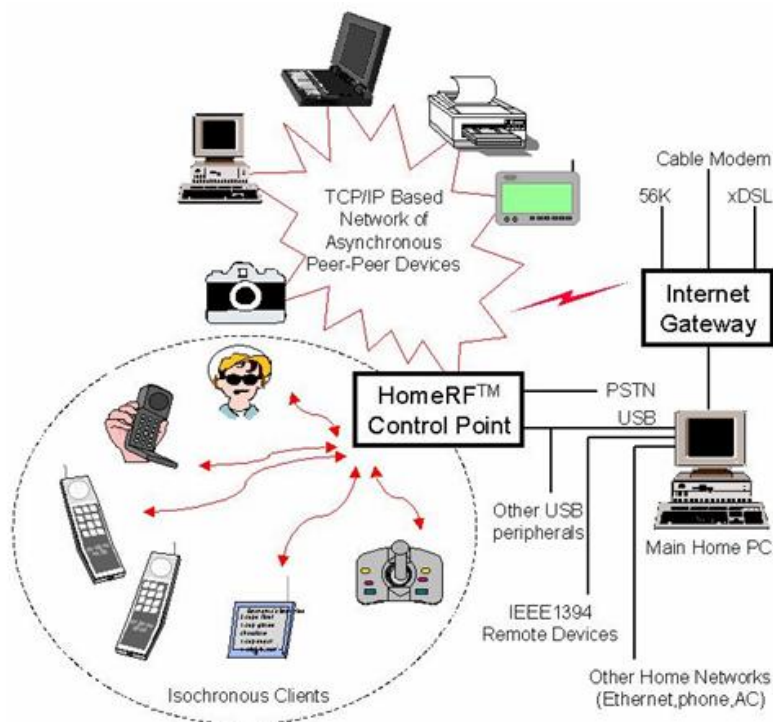
Το SWAP εξελίχθηκε ως προς την ασφάλεια μεταξύ των εκδόσεών του. Στην έκδοση 1.0, υποστηρίζονταν τρία επίπεδα κρυπτογράφησης: κανένα, μέτριο και υψηλό, με το μέτριο να περιλαμβάνει 24-bit Network ID με FHSS και το υψηλό να προσθέτει αλγόριθμο LFSR (Lansford, 1999; Negus et al., 2000). Στην έκδοση 2.0, το Network ID επεκτάθηκε σε 48 bits και η κρυπτογράφηση βασιζόταν σε session-based stream cipher, κάθε σύνδεση είχε το δικό της κλειδί κρυπτογράφησης, δηλαδή κάθε φορά που μια συσκευή συνδεόταν στο δίκτυο δημιουργούνταν ένα νέο μοναδικό κλειδί κρυπτογράφησης για τη συγκεκριμένη σύνδεση (Lansford, 2000).

Αρχιτεκτονικά, το HomeRF υποστήριζε τόσο διαχειριζόμενο δίκτυο με CP όσο και ad hoc λειτουργία χωρίς σταθερό σημείο πρόσβασης, μειώνοντας έτσι το κόστος εγκατάστασης για οικιακούς χρήστες (Lansford, 2000). Ο μηχανισμός πρόσβασης στο μέσο βασιζόταν σε superframe διάρκειας 20 ms, το οποίο αποτελούνταν από δύο περιόδους χωρίς ανταγωνισμό (CFP1 και CFP2) και μια περίοδο ανταγωνισμού (Lansford, 2000; Negus et al., 1998). Η CFP2, στο τέλος του superframe,

χρησιμοποιούνταν για την αρχική αποστολή φωνητικών δεδομένων. Αν κάποια δεδομένα δεν ελήφθησαν σωστά, επαναμεταδίδονταν στην CFP1, στην αρχή του επόμενου superframe (Lansford, 2000; Negus et al., 1998).

Οι δύο αυτές περίοδοι χωρίζονταν από ένα hop συχνότητας, παρέχοντας diversity στη συχνότητα και τον χρόνο μετάδοσης (Negus et al., 1998). Κατά την έναρξη κάθε superframe, ο CP εξέπεμπε ένα Beacon για τον συγχρονισμό των κόμβων, τη διαχείριση των φωνητικών συνδέσεων και την ενημέρωση για τυχόν επαναμεταδόσεις (Lansford, 2000; Negus et al., 2000). Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχανόταν ταυτόχρονη υποστήριξη φωνής και δεδομένων με εγγυημένη καθυστέρηση για τις χρονικά ευαίσθητες εφαρμογές (Negus et al., 2000).

Η παρακάτω εικόνα απεικονίζει την αρχιτεκτονική του HomeRF, με τον Control Point στο κέντρο να συντονίζει τόσο τους isochronous clients (φωνή) όσο και το ασύγχρονο peer-to-peer δίκτυο δεδομένων (Negus et al., 2000).



Εικόνα 9.1: HomeRF Δικτύωση. Πηγή: Negus et al. (2000).

Παρόλο που το HomeRF δεν κατάφερε να επιβιώσει στον ανταγωνισμό με τα πρότυπα IEEE 802.11b και Bluetooth, συνέβαλε σημαντικά στην κατανόηση των απαιτήσεων για τα ασύρματα δίκτυα σε οικιακά περιβάλλοντα (Negus et al., 2000).

9.1.3 Εφαρμογές του HomeRF σε Οικιακά Δίκτυα

Το HomeRF σχεδιάστηκε για να καλύψει τις ανάγκες του μέσου οικιακού χρήστη, προσφέροντας ταυτόχρονη μεταφορά φωνής και δεδομένων σε απλό και οικονομικό περιβάλλον (Negus et al., 2000). Η αρχιτεκτονική του επέτρεπε την ταυτόχρονη ασύρματη μεταφορά φωνής και δεδομένων, καθιστώντας το κατάλληλο για περιβάλλοντα όπου η χρήση ασύρματων τηλεφώνων συνυπήρχε με δικτυακές εφαρμογές όπως η κοινή χρήση αρχείων ή η πρόσβαση στο Διαδίκτυο (Negus et al., 1998; Lansford, 2000). Οι δυνατότητες του SWAP παρείχαν ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον για διασύνδεση

μεταξύ υπολογιστών, οικιακών συσκευών και φωνητικών τερματικών (Negus et al., 1998; Lansford, 2000). Οι κύριες εφαρμογές του περιλάμβαναν την ασύρματη τηλεφωνία, την κοινή χρήση Internet, τη μεταφορά αρχείων και την κοινή χρήση περιφερειακών όπως εκτυπωτές (Negus et al., 1998; Negus et al., 2000).

Επιπλέον, το HomeRF υποστήριζε εφαρμογές οικιακής αυτοματοποίησης, επιτρέποντας τον έλεγχο συσκευών όπως θερμοστάτες, φωτιστικά και κλιματιστικά μέσω του ίδιου ασύρματου δικτύου (Lansford, 1999; Negus et al., 2000). Η μετάδοση ήχου υποστηριζόταν από ασύρματα ηχεία που λάμβαναν μουσική από υπολογιστές, media players και συστήματα home cinema, επιτρέποντας την αναπαραγωγή ήχου σε ολόκληρο το σπίτι με καλή ποιότητα και συγχρονισμό (Lansford, 1999).

Ωστόσο, το HomeRF προοριζόταν για περιβάλλοντα χαμηλής τεχνικής πολυπλοκότητας, όπου η επεκτασιμότητα και η υψηλή απόδοση δεν αποτελούσαν άμεση προτεραιότητα. Ενώ εξυπηρετούσε επαρκώς τις βασικές ανάγκες του μέσου οικιακού χρήστη, δεν κατάφερε να εξελιχθεί ώστε να ανταποκριθεί σε πιο απαιτητικά σενάρια χρήσης (Negus et al., 2000; Stallings, 2013)

9.1.4 Απόσυρση του HomeRF

Το HomeRF αποσύρθηκε από την αγορά λόγω συνδυασμού τεχνολογικών, εμπορικών και στρατηγικών παραγόντων. Βασικός λόγος ήταν ότι το HomeRF δεν κατάφερε να ανταγωνιστεί το IEEE 802.11b, που υιοθετήθηκε μαζικά την ίδια περίοδο. Το IEEE 802.11b έφτανε τα 11 Mbps, έναντι των 1.6 Mbps του HomeRF, περιορίζοντας τη χρηστικότητά του σε εφαρμογές υψηλού bandwidth (Cooley, 2004; Negus et al., 2000). Ο περιορισμός της ταχύτητας οφειλόταν στο ότι το SWAP έδινε προτεραιότητα στη φωνή μέσω TDMA, αφήνοντας λιγότερο εύρος ζώνης για τα δεδομένα (Lansford, 2000).

Σε εσωτερικά περιβάλλοντα, το ασύρματο σήμα δεν φτάνει στον δέκτη μόνο μέσω μιας διαδρομής, αλλά και μέσω ανακλάσεων από τοίχους και αντικείμενα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το σήμα να φτάνει με καθυστερήσεις και παραμορφώσεις, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένα σφάλματα στη λήψη (Goldsmith, 2005; Proakis, 2001). Σε τέτοιες συνθήκες, η απόδοση των ασύρματων συστημάτων μπορεί να επηρεαστεί σημαντικά, ιδιαίτερα όταν δεν υπάρχουν κατάλληλοι μηχανισμοί αντιμετώπισης των καναλικών παραμορφώσεων (Galli, 2004). Σε αυτό το πλαίσιο, συστήματα όπως το HomeRF και το Bluetooth υιοθέτησαν απλοποιημένες αρχιτεκτονικές δεκτών, με στόχο τη μείωση της πολυπλοκότητας και του κόστους.

Η περιορισμένη βιομηχανική υποστήριξη αποτέλεσε επίσης σημαντικό παράγοντα. Καθώς το IEEE 802.11b κέρδιζε έδαφος στην αγορά, οι κατασκευαστές και οι καταναλωτές σταδιακά στράφηκαν προς το Wi-Fi, οδηγώντας στην εγκατάλειψη του HomeRF (Negus et al., 2000).

Επιπλέον, η λειτουργία στη ζώνη των 2.4 GHz, όπου συνυπάρχουν πολλές ασύρματες τεχνολογίες, μπορούσε να οδηγήσει σε παρεμβολές και μείωση της αξιοπιστίας της ζεύξης, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα υψηλής πυκνότητας συσκευών (Gast, 2005; Cooley, 2004). Σε πρακτικό επίπεδο, η συνύπαρξη με άλλες συσκευές του ίδιου φάσματος επηρέαζε την απόδοση και την κάλυψη σε πιο απαιτητικά οικιακά σενάρια.

9.1.5 Σύγκριση IEEE 802.11b και HomeRF

Παρότι υπήρξαν προσπάθειες αναθεώρησης και επέκτασης του προτύπου, αυτές δεν προχώρησαν, καθώς η αγορά στράφηκε καθολικά στις λύσεις βασισμένες στο IEEE 802.11 (Negus et al., 2000). Το HomeRF δεν κατάφερε να ανταγωνιστεί αποτελεσματικά το IEEE 802.11b και αποσύρθηκε σταδιακά από την αγορά μέσα σε λίγα χρόνια (Negus et al., 2000; Cooley, 2004). Η σύγκριση των δύο τεχνολογιών παρουσιάζεται συνοπτικά στον Πίνακα 9.2 (Negus et al., 2000; IEEE, 1999).

Πίνακας 9.2: Σύγκριση HomeRF και IEEE 802.11b

Χαρακτηριστικό	HomeRF	IEEE 802.11b
----------------	--------	--------------

Έτος κυκλοφορίας	1997	1999
Ομάδα Ανάπτυξης	HomeRF Working Group	IEEE 802.11 Working Group
Ενδεικτική Ταχύτητα	Έως 1.6 Mbps για δεδομένα / 4 φωνητικές συνδέσεις	Έως 11 Mbps
Τεχνική διασποράς φάσματος	FHSS	DSSS
Συχνότητα λειτουργίας	2.4 GHz	2.4 GHz
Υποστήριξη φωνής	Ενσωματωμένη μέσω SWAP	Έμμεση μέσω IP-based λύσεων
Ασφάλεια	Session-based Stream cipher	WEP
Υποστήριξη από τη βιομηχανία	Περιορισμένη, αποσύρθηκε σύντομα	Εκτεταμένη, συνεχίστηκε η υποστήριξη για χρόνια
Τρέχουσα κατάσταση	Εκτός αγοράς	Αντικαταστάθηκε από νεότερα πρότυπα (π.χ. 802.11g/n)

9.2 HiperLAN

9.2.1 Ανάπτυξη από ETSI

Το HiperLAN (High Performance Radio LAN) αναπτύχθηκε από το Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων (ETSI - European Telecommunications Standards Institute) στη δεκαετία του 1990, στο πλαίσιο της προσπάθειας της Ευρωπαϊκής Ένωσης να προωθήσει ένα ανταγωνιστικό ασύρματο πρότυπο απέναντι στις αμερικανικές τεχνολογίες, όπως το IEEE 802.11. Η ανάπτυξη αυτή πραγματοποιήθηκε από το έργο BRAN (Broadband Radio Access Networks) με στόχο την τυποποίηση ασύρματων δικτύων υψηλής ταχύτητας (ETSI, 2000a).

Η πρώτη έκδοση, το HiperLAN/1, παρουσιάστηκε το 1996 με ρυθμό μετάδοσης δεδομένων ~23,5 Mbps στη ζώνη των 5 GHz (ETSI, 1998). Η υψηλή ταχύτητα μετάδοσης (HBR) επιτυγχανόταν με χρήση GMSK, ενώ για χαμηλού ρυθμού μετάδοσης (LBR) χρησιμοποιούνταν FSK (ETSI, 1998).

Η δεύτερη έκδοση, το HiperLAN/2, οριστικοποιήθηκε το 1999 και οι αντίστοιχες προδιαγραφές δημοσιεύθηκαν από την ETSI το 2000-2001 (Khun-Jush et al., 2000). Το HiperLAN/2 υιοθέτησε το OFDM ως τεχνική διαμόρφωσης, επιτυγχάνοντας ταχύτητες έως 54 Mbps (ETSI, 2001). Παρείχε μηχανισμούς QoS για πολυμέσα και συνδεόταν με δίκτυα IP, ATM, UMTS και IEEE 1394 μέσω του Convergence Layer, το οποίο ήταν ένα ενδιάμεσο επίπεδο που προσαρμόζε το ασύρματο τμήμα στο δίκτυο (ETSI, 2000a). Επιπλέον, η ασφάλεια ήταν ενσωματωμένη στο πρότυπο. Η προεπιλεγμένη κρυπτογράφηση βασιζόταν σε DES με κλειδί 56 bit, με επιλογές χρήσης triple DES ή καθόλου κρυπτογράφησης, ενώ υποστηριζόταν αμοιβαία αυθεντικοποίηση μεταξύ τερματικού και σημείου πρόσβασης, ώστε και τα δύο να επαληθεύουν το ένα το άλλο (ETSI, 2000a).

Παρά τα τεχνικά του πλεονεκτήματα, το HiperLAN/2 δεν κατάφερε να κυριαρχήσει εμπορικά. Η αυξανόμενη υποστήριξη από κατασκευαστές προς το IEEE 802.11 και η έλλειψη μαζικής παραγωγής εξοπλισμού το περιόρισαν στην αγορά (Doufexi et al., 2002).

9.2.2 Οικογένεια HiperLAN

Η οικογένεια προτύπων BRAN της ETSI περιλάμβανε τέσσερις βασικές τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης: HiperLAN/1, HiperLAN/2, HiperACCESS και HiperLINK, καθεμία από τις οποίες σχεδιάστηκε για διαφορετικό περιβάλλον λειτουργίας και απαιτήσεις μετάδοσης δεδομένων (ETSI, 2000a).

Το HiperLAN/1 παρείχε ασύρματη επικοινωνία τοπικού δικτύου συμβατή με τα ενσύρματα πρότυπα δικτύωσης Ethernet και Token Ring που ήταν διαδεδομένα την εποχή ανάπτυξής του. Λειτουργούσε στη ζώνη των 5 GHz με ρυθμό μετάδοσης 23,5 Mbps (ETSI, 1998).

Το HIPERLAN/2 υποστήριζε ασύρματη σύνδεση με δίκτυα IP, ATM και άλλες τεχνολογίες στη ζώνη των 5 GHz με τυπικούς ρυθμούς από 6 έως 54 Mbps (ETSI, 2000a). Υποστήριζε τόσο κεντρική λειτουργία μέσω σταθερού σημείου πρόσβασης όσο και λειτουργία άμεσης σύνδεσης σε ad hoc, όπου ο κεντρικός ελεγκτής (Central Controller - CC mode) επιλεγόταν δυναμικά (ETSI, 2000a).

Το HIPERACCESS προοριζόταν για σταθερή υπαίθρια ασύρματη πρόσβαση σε κατοικίες και μικρές επιχειρήσεις, επιτυγχάνοντας ταχύτητες έως 25 Mbps. Μπορούσε να αναπτυχθεί τόσο σε αδειοδοτημένο όσο και σε μη αδειοδοτημένο φάσμα, επιτρέποντας στους παρόχους την ταχεία ανάπτυξη ευρυζωνικών δικτύων ευρείας περιοχής (ETSI, 2000a).

Το HIPERLINK σχεδιάστηκε για στατικές ασύρματες συνδέσεις πολύ υψηλής ταχύτητας έως 155 Mbps στη ζώνη των 17 GHz (Smulders, 2002). Χρησιμοποιούνταν για να συνδέει μεταξύ τους δίκτυα HIPERACCESS και σημεία πρόσβασης HiperLAN. Επίσης, υποστήριζε εφαρμογές που απαιτούν ταυτόχρονη μεταφορά βίντεο, ήχου και δεδομένων (ETSI, 2000a).

9.2.3 HiperLAN/1

Η HiperLAN/1, η πρώτη εκδοχή του προτύπου για ασύρματα τοπικά δίκτυα WLAN, βασιζόταν σε αποκεντρωμένο σχήμα πρόσβασης στο μέσο μέσω του πρωτοκόλλου EY-NPMA (Elimination-Yield Non-Preemptive Priority Multiple Access), το οποίο οργάνωνε κάθε κύκλο μετάδοσης σε τέσσερις φάσεις: προτεραιοποίηση (prioritization), αποκλεισμός (elimination), παράκαμψη (yielding) και μετάδοση δεδομένων (transmission) (ETSI, 1998; Dimitriadis & Pavlidou, 2004).

Κατά το prioritization phase, οι σταθμοί ανακοινώνουν την προτεραιότητα του πακέτου τους. Το σύστημα υποστηρίζει 5 επίπεδα (0-4), όπου το 0 αντιστοιχεί σε real-time κυκλοφορία όπως φωνή και βίντεο και το 4 σε γενική κυκλοφορία. Οι σταθμοί χαμηλότερης προτεραιότητας αποσύρονται (Dimitriadis & Pavlidou, 2004).

Κατά το elimination phase, οι σταθμοί που δεν ανιχνεύουν δραστηριότητα στο κανάλι (idle stations) προχωρούν στην εκπομπή, ενώ οι υπόλοιποι αποχωρούν από τον κύκλο, και περιμένουν τον επόμενο. (ETSI, 1998; Dimitriadis & Pavlidou, 2004). Στη yielding phase, οι σταθμοί που έχουν απομείνει επιλέγουν τυχαία αριθμό slots αναμονής. Ο σταθμός με τον μικρότερο αριθμό κερδίζει πρόσβαση στο κανάλι, ενώ οι υπόλοιποι αποσύρονται (Dimitriadis & Pavlidou, 2004). Τέλος, κατά το transmission phase, ο σταθμός που κέρδισε πρόσβαση μεταδίδει τα δεδομένα του, ενώ οι υπόλοιποι αναμένουν τον επόμενο κύκλο για να διεκδικήσουν από την αρχή πρόσβαση στο κανάλι (ETSI, 1998; Dimitriadis & Pavlidou, 2004).

Συνολικά, το σύστημα υποστήριζε 5 επίπεδα προτεραιότητας (0-4, με το 0 ως υψηλότερο), εξασφαλίζοντας QoS χωρίς κεντρικό συντονιστή, με πιθανότητα σύγκρουσης μόλις 3,5% για 256 ταυτόχρονους σταθμούς (Dimitriadis & Pavlidou, 2004). Η λειτουργία του ήταν κατάλληλη για μικρά δίκτυα ad-hoc, όπου η απουσία κεντρικού ελέγχου επέτρεπε την άμεση επικοινωνία μεταξύ των σταθμών χωρίς την ανάγκη για Access Point (ETSI, 2000a). Παρά τα τεχνικά του πλεονεκτήματα, το HiperLAN/1 δεν απέκτησε εμπορική επιτυχία.

9.2.4 HiperLAN/2

Η ανάπτυξη του HiperLAN/2 κρίθηκε αναγκαία καθώς το HiperLAN/1 δεν επαρκούσε για τις αυξανόμενες απαιτήσεις σε ταχύτητα και QoS (ETSI, 2000a). Οριστικοποιήθηκε το 1999 και

δημοσιεύτηκε το 2000-2001 (Khun-Jush et al., 2000). Το MAC επίπεδο βασιζόταν σε TDD και TDMA με κεντρικό χρονοπρογραμματισμό από το Access Point, το οποίο έλεγε όλες τις μεταδόσεις, εξασφαλίζοντας QoS για εφαρμογές real-time όπως φωνή και βίντεο (ETSI, 2000a; Rydnell, 2000).

Στο φυσικό επίπεδο χρησιμοποιούσε OFDM στις ζώνες 5,15-5,35 GHz και 5,470-5,725 GHz (Smulders, 2002), με 7 PHY modes, 6 υποχρεωτικά και 1 προαιρετικό (64QAM). Επίσης, χρησιμοποιούσε διαμορφώσεις (BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM), προσφέροντας ρυθμούς από 6 έως 54 Mbps (ETSI, 2001). Αξίζει να σημειωθεί ότι το HiperLAN/2 και το IEEE 802.11a μοιράζονταν ουσιαστικά το ίδιο PHY, με μοναδική διαφορά τον επιπλέον ρυθμό 27 Mbps του HiperLAN/2 (Smulders, 2002).

Επιπλέον, υποστήριζε Dynamic Frequency Selection (DFS) και Transmit Power Control (TPC) για αποφυγή παρεμβολών (ETSI, 2000a), αλλά και αυτόματη προσαρμογή του PHY mode ανάλογα με τις συνθήκες του καναλιού (Khun-Jush et al., 2000). Η αξιοπιστία της μετάδοσης εξασφαλιζόταν μέσω επιλεκτικής επανάληψης (Selective Repeat ARQ), όπου επαναμεταδίδονταν μόνο τα πακέτα που έφταναν με λάθος (Khun-Jush et al., 2000; Rydnell, 2000). Επιπλέον, η ασφάλεια, όπως στο HiperLAN/1, ήταν ενσωματωμένη με κρυπτογράφηση DES 56-bit και αμοιβαία αυθεντικοποίηση μεταξύ τερματικού και σημείου πρόσβασης (ETSI, 2000a). Τέλος, υποστήριζε handover για μετακίνηση μεταξύ Access Points (ETSI, 2000a).

Σχεδιάστηκε για να υποστηρίξει πολλαπλά πρωτόκολλα δικτύου μέσω του Convergence Layer, συμπεριλαμβανομένων των Ethernet, PPP/IP, ATM, UMTS και IEEE 1394 (Firewire), καθιστώντας το κατάλληλο για εταιρικά περιβάλλοντα με διαφορετικές υποδομές δικτύου (ETSI, 2000a; Khun-Jush et al., 2000).

9.2.5 HIPERACCESS και HIPERLINK

Το HIPERACCESS αναπτύχθηκε για να καλύψει ανάγκες που το HiperLAN/2 δεν μπορούσε να εξυπηρετήσει. Όπως την υπαίθρια σταθερή ασύρματη πρόσβαση σε κατοικίες και μικρές επιχειρήσεις σε ευρεία γεωγραφική κλίμακα (ETSI, 2000a). Σε αντίθεση με το HiperLAN/2, δεν λειτουργούσε στη ζώνη των 5 GHz, επιτρέποντας στους παρόχους την ταχεία ανάπτυξη ευρυζωνικών δικτύων ευρείας περιοχής σε αδειοδοτημένο ή μη αδειοδοτημένο φάσμα (ETSI, 2000a).

Για να υποστηρίξει διαφορετικές δικτυακές υποδομές, το HIPERACCESS διέθετε Convergence Layer, ένα ενδιάμεσο επίπεδο πάνω από το DLC που προσαρμοζε την κυκλοφορία ανώτερων δικτύων στις απαιτήσεις του ασύρματου τμήματος. Υποστήριζε τόσο ATM-based όσο και packet-based traffic μέσω μηχανισμών προσαρμογής, επιτρέποντας τη μεταφορά διαφορετικών τύπων δεδομένων όπως ATM κυκλοφορία και IP/Ethernet πακέτα (ETSI, 2002a; ETSI, 2002b).

Το HIPERLINK, από την άλλη, σχεδιάστηκε για στατικές ασύρματες συνδέσεις πολύ υψηλής ταχύτητας έως 155 Mbps στη ζώνη των 17 GHz, με δυνατότητα υποστήριξης πολυμεσικών εφαρμογών. Κύρια χρήση του ήταν η διασύνδεση δικτύων HIPERACCESS και σημείων πρόσβασης HiperLAN, επιτρέποντας τη δημιουργία ενός πλήρως ασύρματου δικτύου (ETSI, 2000a; Smulders, 2002).

9.2.6 Υποχώρηση των Προτύπων HiperLAN

Παρά τα προηγμένα τεχνικά χαρακτηριστικά τους, τα πρότυπα της οικογένειας ETSI BRAN, δεν επικράτησαν εμπορικά. Η αποτυχία των προτύπων HiperLAN αποδίδεται σε τεχνολογικούς, εμπορικούς και χρονικούς παράγοντες.

Το HiperLAN/2 αναπτύχθηκε για την ευρωπαϊκή αγορά από την ETSI, ενώ το IEEE 802.11 εξασφάλισε παγκόσμια αποδοχή (Doufexi et al., 2002). Κατά την περίοδο κυκλοφορίας του HiperLAN/2, το 802.11b ήταν ήδη ευρέως διαδεδομένο, επικράτησε λόγω χαμηλότερου κόστους και ευρύτερης υποστήριξης από τη βιομηχανία (Doufexi et al., 2002; Stallings, 2013).

Επιπλέον, η πολυπλοκότητα του HiperLAN/2 σε επίπεδο QoS και MAC αύξησε το κόστος υλοποίησης, ενώ η αγορά προτίμησε πιο απλές και προσιτές λύσεις (Khun-Jush et al., 2000). Επίσης, το IEEE 802.16 (WiMAX), έναντι του οποίου το HiperACCESS αποτελούσε το ευρωπαϊκό

αντίστοιχο πρότυπο, υποστηρίχθηκε από ισχυρότερο βιομηχανικό οικοσύστημα και επικράτησε διεθνώς (Eklund et al., 2002).

Αν και τα HIPERACCESS και HIPERLINK αναπτύχθηκαν ως προηγμένα πρότυπα ασύρματων δικτύων, δεν κατάφεραν να περάσουν σε ευρεία εμπορική αξιοποίηση. Η χρήση τους περιορίστηκε κυρίως σε πιλοτικές και ερευνητικές εφαρμογές, καθώς τεχνολογίες όπως το Wi-Fi και το WiMAX επικράτησαν διεθνώς (Stojmenović, 2002; Eklund et al., 2002).

Συνολικά, η οικογένεια προτύπων HiperLAN αποτέλεσε μια ιδιαίτερα προηγμένη ευρωπαϊκή προσπάθεια για την ανάπτυξη ασύρματων δικτύων υψηλών ταχυτήτων, όμως δεν κατάφερε να επικρατήσει εμπορικά, καθώς το Wi-Fi καθιερώθηκε γρήγορα ως το κυρίαρχο παγκόσμιο πρότυπο (Stojmenović, 2002).

9.2.7 Χαρακτηριστικά και Εφαρμογές

Το HiperLAN σχεδιάστηκε κυρίως για εφαρμογές πολυμέσων, παρέχοντας εγγυημένη QoS και real-time επικοινωνία κατάλληλη για εταιρικά περιβάλλοντα, και μπορούσε να αναπτυχθεί τόσο σε εσωτερικούς όσο και σε εξωτερικούς χώρους (ETSI, 2000a; Khun-Jush et al., 2000).

Τυπικές εφαρμογές περιλάμβαναν εταιρικά ασύρματα δίκτυα, οικιακή δικτύωση σε plug-and-play λειτουργία, ασύρματη πρόσβαση στο διαδίκτυο και μετάδοση πολυμεσικού περιεχομένου (ETSI, 2000a; Khun-Jush et al., 2000; Smulders, 2002).

Ο παρακάτω πίνακας συνοψίζει τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά των προτύπων HiperLAN (ETSI, 1998; ETSI, 2000a; ETSI, 2001; ETSI, 2002; Smulders, 2002).

Πίνακας 9.3: Χαρακτηριστικά HiperLAN

Πρότυπο	Έτος Δημοσίευσης	Ενδεικτική Ταχύτητα	Διαμόρφωση	Τοπολογία	Ενδεικτικό Φάσμα	Διασύνδεση με Δίκτυα
HiperLAN/1	1996	~23,5 Mbps	GMSK, FSK	Ad-hoc	5,15-5,35 GHz	Ethernet, Token Ring
HiperLAN/2	2000	6-54 Mbps	OFDM	Infrastructure & Ad-hoc	5,15-5,35 & 5,47-5,725 GHz	IP, ATM, UMTS, IEEE 1394
HIPERACCESS	2002	25 Mbps	-	Point-to-multipoint	Εκτός 5 GHz	Ethernet, IP, ATM
HIPERLINK	Δεν ολοκληρώθηκε εμπορικά	έως 155 Mbps	-	Point-to-point	17 GHz	-

9.2.8 Σύγκριση HiperLAN με IEEE 802.11

Το HiperLAN/2 και το IEEE 802.11a αποτελούσαν τα δύο κύρια ανταγωνιστικά πρότυπα WLAN στη ζώνη των 5 GHz στις αρχές της δεκαετίας του 2000. Και τα δύο βασίζονταν ουσιαστικά στο ίδιο φυσικό επίπεδο (PHY), χρησιμοποιώντας διαμόρφωση OFDM με ρυθμούς μετάδοσης έως 54 Mbps, με μοναδική διαφορά τον επιπλέον ρυθμό 27 Mbps που υποστήριζε το HiperLAN/2 (Doufexi et al., 2002; Smulders, 2002).

Η κύρια τεχνική διαφορά εντοπίζεται στο MAC: το HiperLAN/2 χρησιμοποιούσε κεντρικά χρονοπρογραμματισμένο TDMA/TDD με διάρκεια MAC frame 2 ms, εξασφαλίζοντας εγγυημένη

QoS (ETSI, 2000a; Doufexi et al., 2002), ενώ το IEEE 802.11a βασιζόταν σε κατανεμημένο πρωτόκολλο CSMA/CA (DCF) με QoS βέλτιστης προσπάθειας, που βελτιώθηκε μόνο αργότερα με την προσθήκη EDCA/HCF μέσω του 802.11e (Stallings, 2013).

Επιπλέον, το HiperLAN/2 υποστήριζε Convergence Layer για πολλαπλά πρωτόκολλα, όπως IP, ATM, UMTS και IEEE 1394, ενώ το IEEE 802.11a ήταν προσανατολισμένο κυρίως σε δίκτυα IP (ETSI, 2000a; Doufexi et al., 2002).

Στον τομέα της ασφάλειας, το HiperLAN/2 ενσωμάτωνε κρυπτογράφηση DES/3DES με ανταλλαγή κλειδιών Diffie-Hellman και αμοιβαία αυθεντικοποίηση εξ αρχής (ETSI, 2000a), ενώ το αρχικό 802.11 βασιζόταν στον αδύναμο αλγόριθμο WEP, ο οποίος αποδείχθηκε ευάλωτος σε διάφορες μορφές επίθεσης (Stallings, 2013).

Παρά την τεχνική υπεροχή του HiperLAN/2 σε ορισμένες πτυχές, το IEEE 802.11 επικράτησε εμπορικά. Ενώ το IEEE 802.11 διέθετε ήδη ευρεία εμπορική παρουσία με πολλαπλούς κατασκευαστές και εξελισσόταν ραγδαία μέσω της έκδοσης b, το HiperLAN/2 δεν είχε αποκτήσει αντίστοιχη εμπορική δυναμική την ίδια περίοδο (Doufexi et al., 2002; Stojmenović, 2002).

Η συγκριτική αποτίμηση των δύο προτύπων συνοψίζεται στον Πίνακα 9.4, ο οποίος παραθέτει τα κρισιμότερα τεχνικά χαρακτηριστικά τους με αναφορά στις πρωτογενείς πηγές για κάθε γραμμή, ώστε να καθίστανται άμεσα ορατές τόσο οι σημαντικές ομοιότητες στο φυσικό επίπεδο όσο και οι ουσιαστικές διαφοροποιήσεις στο επίπεδο πρόσβασης μέσου και στην υποστήριξη ποιότητας υπηρεσίας (ETSI, 2000a; Doufexi et al., 2002).

Πίνακας 9.4: Βασικά χαρακτηριστικά HiperLAN/2 και IEEE 802.11a

Χαρακτηριστικό	HiperLAN/2	IEEE 802.11a
Μέγιστη Ταχύτητα	Έως 54 Mbps (+27 Mbps)	Έως 54 Mbps
Ζώνη συχνοτήτων	5 GHz	5 GHz
Διαμόρφωση	OFDM	OFDM
Μηχανισμός QoS	Ενσωματωμένος	Καμία στη DCF, PCF προαιρετική
Μηχανισμός MAC	TDMA/TDD, κεντρικά χρονοπρογραμματισμένος	CSMA/CA κατανεμημένο
Υποστηριζόμενα πρωτόκολλα	Ethernet, ATM, IEEE 1394	Ethernet
Ασφάλεια	DES/3DES, αμοιβαία αυθεντικοποίηση	WEP
Εμπορική παρουσία	Περιορισμένη εμπορική παρουσία	Ευρεία, πολλοί κατασκευαστές
Συνδεσιμότητα	Connection-oriented	Connectionless

9.3 Συμπεράσματα

Συμπερασματικά, τα πρότυπα HomeRF και HiperLAN αποτέλεσαν αξιόλογες τεχνολογικές προσεγγίσεις για την ανάπτυξη ασύρματων τοπικών δικτύων, με στόχο την κάλυψη διαφορετικών αναγκών της αγοράς και των χρηστών. Το HomeRF εστίασε κυρίως στη σύγκλιση φωνής και δεδομένων σε οικιακά περιβάλλοντα, ενώ το HiperLAN σχεδιάστηκε ως ευρωπαϊκή εναλλακτική λύση υψηλών επιδόσεων για ασύρματα τοπικά δίκτυα.

Παρά τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά και τις καινοτόμες ιδέες που εισήγαγαν, δεν κατάφεραν να αποκτήσουν τη μαζική αποδοχή και τη βιομηχανική υποστήριξη που γνώρισαν τα πρότυπα Wi-Fi, με αποτέλεσμα να περιοριστεί σταδιακά η εμπορική τους παρουσία. Ωστόσο, η μελέτη τους παραμένει σημαντική, καθώς αναδεικνύει τις πρώιμες προσπάθειες διαμόρφωσης των ασύρματων τοπικών δικτύων και συμβάλλει στην κατανόηση της εξέλιξης προς τα σύγχρονα WLAN.

Κεφάλαιο 10ο: Άλλα Πρότυπα WMAN

10.1 WiMax

Το WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) αποτελεί την εμπορική ονομασία της οικογένειας προτύπων IEEE 802.16, που αναπτύχθηκε για ευρυζωνική ασύρματη πρόσβαση σε μητροπολιτικές περιοχές WMAN (Andrews et al., 2007; IEEE 802.16-2004). Η τεχνολογία σχεδιάστηκε ως εναλλακτική λύση στις ενσύρματες υποδομές, με στόχο την παροχή ευρυζωνικής πρόσβασης σε περιοχές όπου η εγκατάσταση καλωδιακών δικτύων είναι τεχνικά δύσκολη ή οικονομικά ασύμφορη, καθώς και ως ασύρματο backhaul για σημεία Wi-Fi και επιχειρήσεις (Ghosh et al., 2005; Andrews et al., 2007).

Το πρότυπο WiMAX (IEEE 802.16) εξελίχθηκε σταδιακά από ένα σύστημα σταθερής ασύρματης ευρυζωνικής πρόσβασης (IEEE 802.16-2004), σε μια λύση που υποστηρίζει κινητικότητα και handover για κινητούς χρήστες (IEEE 802.16e-2005), και τελικά σε μια αρχιτεκτονική σχεδιασμένη για τις απαιτήσεις IMT-Advanced με στόχο πολυ-Gbit/s ταχύτητες (IEEE 802.16m-2011) (Andrews et al., 2007).

Παρά τα τεχνικά του πλεονεκτήματα, η εμπορική εξάπλωση του WiMAX περιορίστηκε σημαντικά λόγω της καθολικής υιοθέτησης του LTE/4G και αργότερα του 5G, τα οποία διέθεταν ευρύτερη βιομηχανική υποστήριξη και ισχυρότερο οικοσύστημα κατασκευαστών και παρόχων (Sauter, 2021; Andrews et al., 2007). Ωστόσο, η τεχνολογία εξακολουθεί να αξιοποιείται σε εξειδικευμένα σενάρια fixed wireless access και ασύρματου backhaul, ενώ παραμένει σημαντικό σημείο αναφοράς για την κατανόηση της εξέλιξης των ασύρματων μητροπολιτικών δικτύων και των τεχνολογιών ευρυζωνικής ασύρματης πρόσβασης (Sauter, 2021).

Σε αντίθεση με τα WLAN, το WiMAX λειτουργεί κυρίως σε αδειοδοτημένες ζώνες συχνοτήτων (ενδεικτικά 2.3, 2.5 και 3.5 GHz), υιοθετώντας κυψελοειδή αρχιτεκτονική PMP (Point-to-Multipoint) και έναν χρονοπρογραμματισμένο μηχανισμό πρόσβασης MAC με υποστήριξη ποιότητας υπηρεσίας (QoS) από άκρη σε άκρη (IEEE 802.16e-2005; Sauter, 2021).

Η αρχική έκδοση IEEE 802.16-2004 (Fixed WiMAX) σχεδιάστηκε για σταθερή ασύρματη πρόσβαση τύπου PMP, ενώ η έκδοση IEEE 802.16e-2005 (Mobile WiMAX) εισήγαγε υποστήριξη κινητικότητας, μηχανισμούς handover, λειτουργίες εξοικονόμησης ενέργειας (idle/sleep modes) και ενισχυμένους μηχανισμούς ασφάλειας (PKMv2/EAP με κρυπτογράφηση AES) (IEEE 802.16e-2005; Andrews et al., 2007).

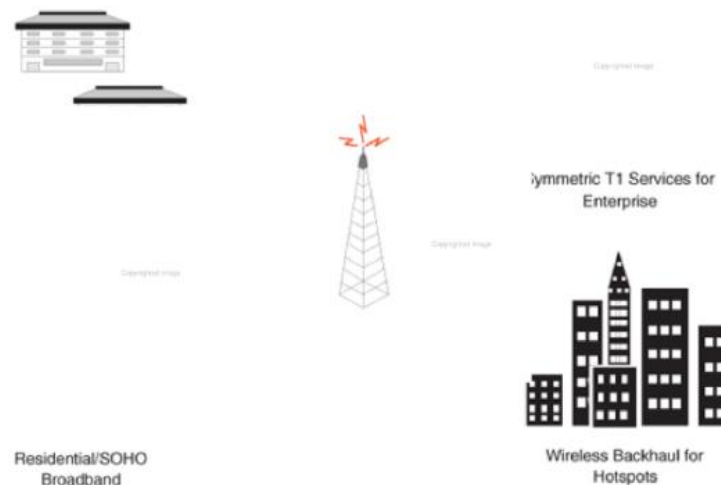
Στη συνέχεια, η εξέλιξη IEEE 802.16m σχεδιάστηκε ώστε να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις IMT-Advanced για υψηλές ταχύτητες και βελτιωμένη φασματική αποδοτικότητα, με μειωμένη καθυστέρηση και προηγμένους μηχανισμούς φυσικού επιπέδου (IEEE 802.16m-2011a). Ιστορικά, το

WiMAX αναπτύχθηκε ως μορφή ασύρματου DSL για αγροτικές και ημιαστικές περιοχές, καθώς και για εφαρμογές backhaul, προσφέροντας εκτεταμένη κάλυψη και πιο ελεγχόμενη πρόσβαση στο μέσο σε σχέση με CSMA/CA-based WLAN συστήματα (Andrews et al., 2007).

Παρά τα τεχνικά του πλεονεκτήματα, η εμπορική εξάπλωση του WiMAX περιορίστηκε σημαντικά λόγω της καθολικής υιοθέτησης του LTE/4G και της ευρείας υποστήριξής του από τη βιομηχανία τηλεπικοινωνιών. Ωστόσο, το WiMAX εξακολουθεί να αποτελεί σημαντικό σημείο αναφοράς για αρχιτεκτονικές WMAN με αυστηρή υποστήριξη QoS και αξιοποιείται σε εφαρμογές fixed wireless access και εξειδικευμένα σενάρια ασύρματου backhaul, όπως η διασύνδεση απομακρυσμένων σταθμών βάσης και αγροτικών περιοχών με το κεντρικό δίκτυο (Sauter, 2021).

10.2 Αρχιτεκτονική

Το WiMAX βασίζεται σε αρχιτεκτονική τύπου PMP, στην οποία ένας σταθμός βάσης (Base Station - BS) εξυπηρετεί πολλούς σταθμούς συνδρομητών (Subscriber Stations - SS), επιτρέποντας την κάλυψη εκτεταμένων περιοχών με περιορισμένη υποδομή (Andrews et al., 2007; IEEE 802.16-2004). Για καλύτερη κατανόηση της αρχιτεκτονικής PMP, η Εικόνα 10.1 που ακολουθεί απεικονίζει τη σύνδεση μεταξύ του σταθμού βάσης (BS) και των σταθμών συνδρομητών (SS), καλύπτοντας ενδεικτικά σενάρια όπως οικιακοί χρήστες, επιχειρήσεις και σημεία Wi-Fi backhaul (Andrews et al., 2007).



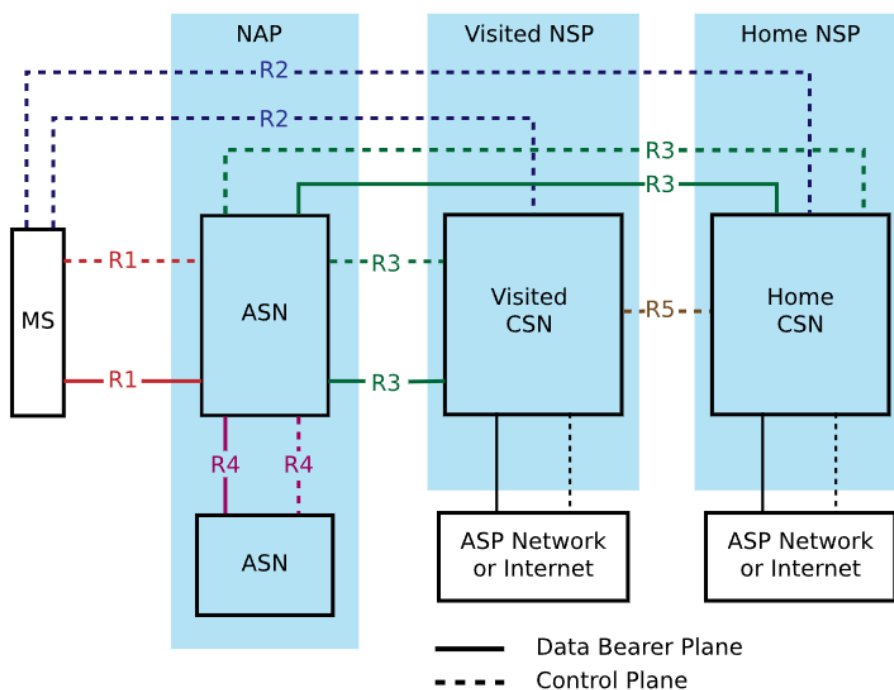
Εικόνα 10.1: Αρχιτεκτονική Point-to-Multipoint (PMP) του WiMAX. Πηγή: Andrews et al. (2007)

Η δικτυακή αρχιτεκτονική του WiMAX περιλαμβάνει τρία επίπεδα. Το Access Service Network (ASN) διαχειρίζεται την ασύρματη πρόσβαση, καλύπτοντας λειτουργίες κινητικότητας (handoff), διαχείρισης συνδέσεων (sessions), εφαρμογής QoS και αυθεντικοποίησης χρηστών (Andrews et al., 2007).

Το Connectivity Service Network (CSN) παρέχει τη σύνδεση με εξωτερικά δίκτυα, τη δρομολόγηση IP, την ασφάλεια και την υποστήριξη υπηρεσιών όπως VoIP και IPTV (Internet Protocol Television), (τηλεόραση μέσω διαδικτύου), καθώς και διασύνδεση με το διαδίκτυο και ιδιωτικά εταιρικά δίκτυα (Andrews et al., 2007). Το User Equipment (UE) αντιστοιχεί σε συσκευές χρηστών (π.χ. laptop, tablet, smartphone), που εφαρμόζουν τους μηχανισμούς PHY/MAC επικοινωνώντας ασύρματα με τον BS (Andrews et al., 2007; Ghosh et al., 2005).

Στο WiMAX υπάρχουν τρεις ρόλοι παρόχων, οι Network Access Provider (NAP), Network Service Provider (NSP) και Application Service Provider (ASP). Ο NAP (Network Access Provider) κατέχει και διαχειρίζεται τη φυσική υποδομή του δικτύου, όπως κεραίες και σταθμούς βάσης. Ο NSP (Network Service Provider) είναι υπεύθυνος για τη σύνδεση των χρηστών με το διαδίκτυο μέσω αυτής της υποδομής. Ο ASP (Application Service Provider) προσφέρει υπηρεσίες στους συνδρομητές, όπως IPTV και εταιρικά VPN (Virtual Private Network) (Andrews et al., 2007).

Η Εικόνα 10.2 απεικονίζει την αρχιτεκτονική αναφοράς του WiMAX, όπου διακρίνονται οι τρεις βασικοί ρόλοι παρόχων: ο NAP που κατέχει τη φυσική υποδομή μέσω των ASN, ο NSP που παρέχει συνδεσιμότητα μέσω των CSN (Home και Visited), και ο ASP που προσφέρει υπηρεσίες μέσω εξωτερικών δικτύων. Οι διακεκομμένες γραμμές αναπαριστούν το επίπεδο ελέγχου και οι συνεχείς το επίπεδο δεδομένων.

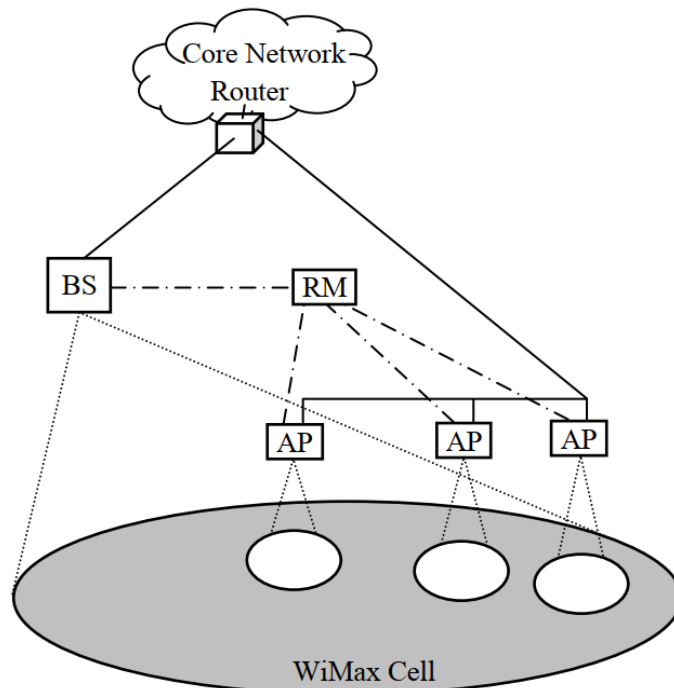


Εικόνα 10.2: Αρχιτεκτονική Αναφοράς WiMAX (NAP, NSP, ASP). Πηγή: Wikimedia Commons “WiMAXArchitecture”

Η διάκριση αυτή επιτρέπει μεγαλύτερο ανταγωνισμό και ευελιξία στην αγορά, καθώς διαφορετικές εταιρείες μπορούν να αναλαμβάνουν διαφορετικούς ρόλους στην παροχή υπηρεσιών WiMAX (Andrews et al., 2007). Για παράδειγμα, μια εταιρεία τηλεπικοινωνιών μπορεί να λειτουργεί ως NAP (κατέχοντας τις κεραίες), ενώ μια άλλη ως NSP (παρέχοντας πρόσβαση στο διαδίκτυο) και μια τρίτη ως ASP (προσφέροντας υπηρεσίες IPTV ή VPN).

Μια σημαντική πτυχή της αρχιτεκτονικής WiMAX αφορά τη συνεργασία με δίκτυα WLAN για υπηρεσίες φωνής. Το WiMAX λειτουργεί ως εφεδρικό δίκτυο για τις φωνητικές κλήσεις που δεν μπορούν να εξυπηρετηθούν από τις Wi-Fi κυψέλες (cells) λόγω traffic overflow. Οι κλήσεις αυτές ανακατευθύνονται στο WiMAX μέσω ειδικού αλγορίθμου (rearrangement control algorithm), με στόχο την καλύτερη αξιοποίηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης (Tsankov et al., 2008).

Η Εικόνα 10.3 απεικονίζει την αρχιτεκτονική ολοκλήρωσης WiMAX και WLAN. Ο Resource Manager (RM) συντονίζει τους πόρους μεταξύ του σταθμού βάσης WiMAX (BS) και των σημείων πρόσβασης Wi-Fi (AP), ανακατευθύνοντας την κίνηση από το WLAN στο WiMAX όταν απαιτείται, ενώ ο Core Network Router διασφαλίζει τη σύνδεση με το διαδίκτυο.



Εικόνα 10.3: Αρχιτεκτονική ολοκλήρωσης WLAN/WMAN. Πηγή: Tsankov et al, (2008)

Επιπλέον, η αρχιτεκτονική υποστηρίζει διασύνδεση με εξωτερικά δίκτυα όπως PSTN, 3GPP και 3GPP2, καθώς και υποστήριξη mobile IP για διατήρηση της συνδεσιμότητας κατά τη μετακίνηση (roaming) του χρήστη μεταξύ διαφορετικών δικτύων, σταθμών βάσης ή παρόχων (Andrews et al., 2007).

10.3 Επίπεδα PHY και MAC

Το πρότυπο WiMAX βασίζεται στο φυσικό επίπεδο (PHY) και στο επίπεδο πρόσβασης μέσου (MAC), τα οποία συνεργάζονται για την παροχή υψηλής ταχύτητας και αξιόπιστης ασύρματης επικοινωνίας (Andrews et al., 2007; IEEE 802.16-2004).

Στο φυσικό επίπεδο (PHY), το IEEE 802.16 αξιοποιεί τεχνικές OFDM/OFDMA, προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση (Adaptive Modulation and Coding - AMC), καθώς και τεχνολογίες πολλαπλών κεραίων MIMO και beamforming, με τυπικά εύρη καναλιού 3.5, 5, 7 και 10 MHz (έως 20 MHz ανάλογα με το προφίλ λειτουργίας) (IEEE 802.16-2004; Andrews et al., 2007).

Πιο συγκεκριμένα, το φυσικό επίπεδο υλοποιείται μέσω διαφορετικών τεχνικών διαμόρφωσης και πολυπλεξίας, ανάλογα με το αν πρόκειται για σταθερή (fixed) ή κινητή (mobile) σύνδεση. Η Fixed WiMAX (IEEE 802.16-2004) χρησιμοποιεί OFDM με 256 υποφορείς, ενώ η Mobile WiMAX (IEEE 802.16e-2005) χρησιμοποιεί OFDMA με έως 2048 υποφορείς (Ghosh et al., 2005; Andrews et al., 2007; IEEE 802.16-2004; IEEE 802.16e-2005). Οι τεχνικές αυτές μειώνουν την παρεμβολή,

επιτρέποντας δυναμική κατανομή φάσματος σε πολλαπλούς χρήστες και μείωση multipath σε πολυσύχναστα περιβάλλοντα (Ghosh et al., 2005; Andrews et al., 2007).

Επιπλέον, η τεχνολογία AMC (Adaptive Modulation and Coding) προσαρμόζει αυτόματα την ταχύτητα μετάδοσης ανάλογα με την ποιότητα της σύνδεσης (Andrews et al., 2007). Τα θεωρητικά μέγιστα φτάνουν τα 70 Mbps για σταθερές και 30 Mbps για κινητά δίκτυα, αν και στην πράξη οι ταχύτητες αυτές επηρεάζονται από παράγοντες όπως η απόσταση, οι παρεμβολές και ο αριθμός των χρηστών (Andrews et al., 2007; Ghosh et al., 2005).

Το PHY υποστηρίζει τεχνολογίες πολλαπλών κεραιών MIMO, που επιτρέπουν την ταυτόχρονη μετάδοση περισσότερων δεδομένων, αυξάνοντας την ταχύτητα και τη χωρητικότητα του δικτύου. Παράλληλα, το beamforming κατευθύνει το σήμα προς τον χρήστη και μακριά από πηγές παρεμβολών, βελτιώνοντας την εμβέλεια κάλυψης, τη χωρητικότητα και την αξιοπιστία του δικτύου (Andrews et al., 2007).

Το επίπεδο MAC είναι connection-oriented και βασίζεται σε service flows και κατηγορίες ποιότητας υπηρεσίας (QoS), όπως UGS (Unsolicited Grant Service) για εφαρμογές πραγματικού χρόνου με σταθερό ρυθμό μετάδοσης, rtPS (Real-Time Polling Service) για υπηρεσίες όπως video streaming, nrtPS (Non-Real-Time Polling Service) για εφαρμογές που απαιτούν εγγυημένο throughput χωρίς αυστηρές απαιτήσεις καθυστέρησης. Επιπλέον, τη BE (Best Effort) για κίνηση χωρίς εγγυήσεις QoS, όπως web browsing και email, και ErtPS (Extended Real-Time Polling Service) για εφαρμογές VoIP με silence suppression που απαιτούν εγγυημένη ταχύτητα και καθυστέρηση, η οποία προστέθηκε αποκλειστικά στο IEEE 802.16e-2005. Οι κατηγορίες αυτές προγραμματίζονται κεντρικά από τον σταθμό βάσης ώστε να ικανοποιούνται απαιτήσεις ταχύτητας, καθυστέρησης και jitter (IEEE 802.16e-2005; Sauter, 2021; Andrews et al., 2007).

Αποτελείται από τρία υποεπίπεδα. Το Convergence Sublayer (CS) λειτουργεί ως ενδιάμεσο επίπεδο μεταξύ των εφαρμογών του χρήστη και του δικτύου WiMAX, μετατρέποντας τα εισερχόμενα δεδομένα, όπως IP πακέτα, στη μορφή που απαιτείται για τη μετάδοση (Andrews et al., 2007). Το Common Part Sublayer (CPS) είναι υπεύθυνο για τη διαχείριση των συνδέσεων, τον έλεγχο πρόσβασης στο δίκτυο και τον καθορισμό της σειράς και του χρόνου μετάδοσης δεδομένων από κάθε χρήστη (Andrews et al., 2007; Ghosh et al., 2005). Τέλος, το Privacy Sublayer παρέχει κρυπτογράφηση AES, αυθεντικοποίηση χρηστών και διαχείριση κλειδιών (Andrews et al., 2007; IEEE 802.16e-2005).

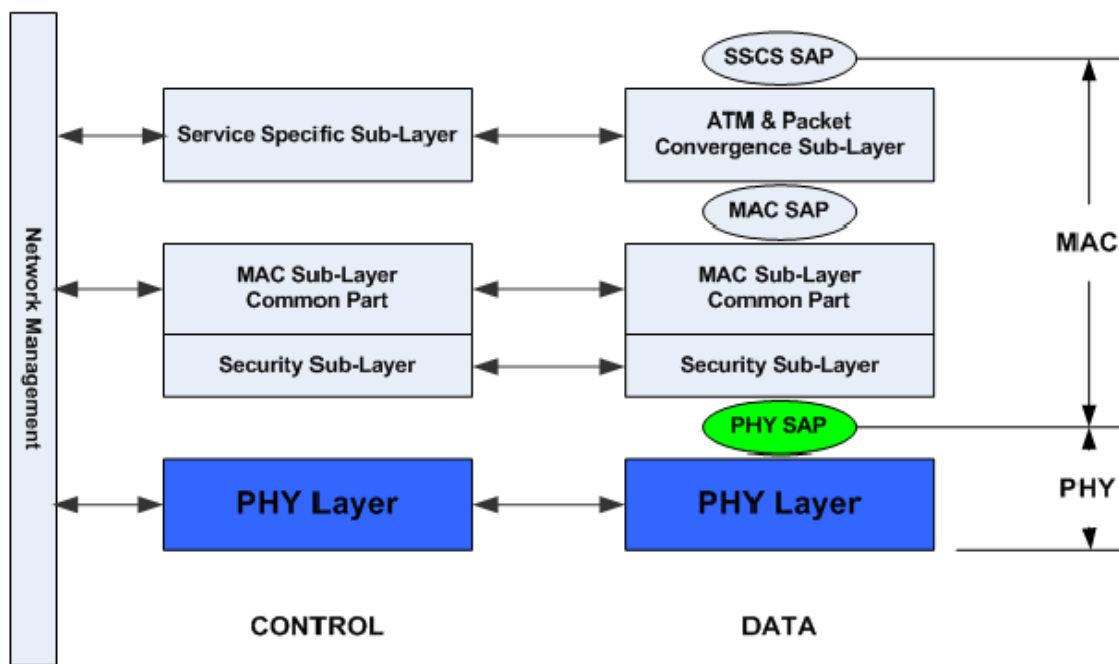
Επιπλέον, το MAC επίπεδο υποστηρίζει μηχανισμούς αυτόματης διόρθωσης σφαλμάτων, όπως το ARQ (Automatic Repeat reQuest) και το HARQ (Hybrid ARQ). Το ARQ ζητά επανάληψη της μετάδοσης όταν ένα πακέτο φτάσει λανθασμένο, ενώ το HARQ συνδυάζει το λανθασμένο με το νέο πακέτο για καλύτερη διόρθωση, εξασφαλίζοντας αξιόπιστη μετάδοση ακόμα και σε δυσμενείς συνθήκες (Andrews et al., 2007; Ghosh et al., 2005).

Τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά και οι διαφορές μεταξύ του PHY και του MAC στο WiMAX συνοψίζονται στον Πίνακα 10.1 (Andrews et al., 2007; Ghosh et al., 2005; IEEE 802.16-2004; IEEE 802.16e-2005).

Πίνακας 10.1: Σύγκριση Χαρακτηριστικών PHY και MAC του WiMAX

Χαρακτηριστικό	PHY Layer (802.16d/e)	MAC Layer
Τεχνολογία μετάδοσης	OFDM (Fixed), OFDMA (Mobile)	Service Flow Management
Αρχιτεκτονική	Point-to-Multipoint (PMP)	Connection-oriented, QoS-enabled
Μέγιστη Ταχύτητα	Έως 70 Mbps (Fixed), Έως 30 Mbps (Mobile)	Εγγυημένο bandwidth για real-time εφαρμογές
Προσαρμοστικότητα	AMC, MIMO, Beamforming	ARQ/HARQ, Class-based QoS
Ασφάλεια	AES, Privacy Sublayer	Πιστοποίηση, Διαχείριση Κλειδιών
Υποστήριξη Κινητικότητας	Μόνο σε 802.16e	Handover μεταξύ BS

Η αρχιτεκτονική των επιπέδων MAC και PHY του WiMAX παρουσιάζεται στην Εικόνα 10.4. Η δομή οργανώνεται σε δύο κατακόρυφες στήλες ελέγχου (Control) και δεδομένων (Data), με τη Διαχείριση Δικτύου (Network Management) να εκτείνεται οριζόντια σε όλα τα επίπεδα. Η επικοινωνία μεταξύ των επιπέδων πραγματοποιείται μέσω σημείων πρόσβασης υπηρεσιών (Service Access Points - SAP): του SSCS SAP στην είσοδο του MAC, του MAC SAP μεταξύ CS και CPS, και του PHY SAP που συνδέει το MAC με το PHY (Odhiambo & Rayolla, 2012).



Εικόνα 10.4: Αρχιτεκτονική MAC και PHY του WiMAX (IEEE 802.16). Πηγή: Odhiambo & Rayolla (2012).

10.4 Κατηγορίες και Εφαρμογές

Η πρώτη κατηγορία, η Fixed WiMAX προσφέρει σταθερή και αξιόπιστη σύνδεση με χαμηλό κόστος ανάπτυξης, καθιστώντας την κατάλληλη για επιχειρήσεις, οικιακούς χρήστες και αγροτικές περιοχές (Andrews et al., 2007; Ghosh et al., 2005).

Η δεύτερη κατηγορία, η Mobile WiMAX σχεδιάστηκε για κινητούς χρήστες, όπως επιβάτες σε οχήματα ή δημόσια μέσα μεταφοράς, και κινητές μονάδες υγείας, υποστηρίζοντας εφαρμογές όπως τηλεϊατρική και γεωργία ακριβείας, ενώ η απόδοσή της εξαρτάται από την πυκνότητα του δικτύου και την ταχύτητα μετακίνησης (Andrews et al., 2007; IEEE 802.16e-2005).

Το WiMAX έχει αξιοποιηθεί κυρίως σε γεωγραφικά απομακρυσμένες ή δυσπρόσιτες περιοχές, όπως νησιά, ορεινές περιοχές και αγροτικές εκτάσεις, όπου οι ενσύρματες υποδομές είναι οικονομικά δύσκολες. Το χαμηλό κόστος ανάπτυξης και η δυνατότητα κάλυψης μεγάλων περιοχών το καθιστούν ιδανική λύση για κοινότητες χωρίς πρόσβαση σε σταθερά δίκτυα (Ghosh et al., 2005; Andrews et al., 2007).

Το IEEE 802.16e υποστηρίζει ταυτόχρονα σταθερούς και κινητούς χρήστες μέσω ενιαίας αρχιτεκτονικής, δίνοντας ευελιξία στους παρόχους για εξυπηρέτηση χρηστών διαφορετικού προφίλ κινητικότητας (Andrews et al., 2007; IEEE 802.16e-2005). Ωστόσο, η εδραίωση του LTE περιόρισε σημαντικά την υιοθέτησή του, κυρίως λόγω της ευρύτερης βιομηχανικής υποστήριξης (Sauter, 2021).

Σε παγκόσμιο επίπεδο, αξιοποιήθηκε κυρίως από αναπτυσσόμενες χώρες για ταχεία ανάπτυξη τηλεπικοινωνιακών υποδομών, βελτιώνοντας την πρόσβαση σε πληροφορία και εκπαίδευση (Ghosh et al., 2005). Επιπλέον, σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης, η γρήγορη ανάπτυξη WiMAX δικτύου μπορεί να αποκαταστήσει επικοινωνία εκεί όπου άλλες τεχνολογίες αποτυγχάνουν (Andrews et al., 2007).

10.5 Πλεονεκτήματα και Περιορισμοί

Η τεχνολογία WiMAX αποτέλεσε μια από τις πρώτες ολοκληρωμένες λύσεις για την παροχή ευρυζωνικής ασύρματης πρόσβασης σε περιοχές όπου οι παραδοσιακές ενσύρματες υποδομές ήταν ανεπαρκείς ή οικονομικά ασύμφορες. Ο σχεδιασμός της βασίστηκε σε προηγμένες τεχνολογίες στο

φυσικό και στο επίπεδο πρόσβασης μέσου, γεγονός που προσέδωσε στο WiMAX σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι παλαιότερων ασύρματων προτύπων (Andrews et al., 2007; Ghosh et al., 2005).

Βασικά πλεονεκτήματα του WiMAX αποτελούν η μεγάλη εμβέλεια κάλυψης, που επιτρέπει την εξυπηρέτηση ευρύτερων γεωγραφικών περιοχών με λιγότερους σταθμούς βάσης και η αξιόπιστη μετάδοση ακόμα και σε περιβάλλοντα με παρεμβολές χάρη στο OFDM/OFDMA. (Andrews et al., 2007; Ghosh et al., 2005). Ένα άλλο θετικό χαρακτηριστικό του WiMAX είναι η ενσωματωμένη υποστήριξη για QoS, η οποία επιτρέπει τη διαχείριση της κυκλοφορίας για εφαρμογές πραγματικού χρόνου, όπως η φωνή και το βίντεο. Ειδικά σε περιπτώσεις όπου απαιτείται σταθερή απόδοση, όπως στις επιχειρήσεις ή στα δημόσια δίκτυα (Andrews et al., 2007; Ghosh et al., 2005).

Ωστόσο, το WiMAX δεν κατόρθωσε να εδραιωθεί παγκοσμίως ως πρότυπο ευρείας χρήσης. Ένα από τα βασικά μειονεκτήματά του είναι η περιορισμένη υποστήριξη από τους κατασκευαστές τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού, κάτι που οδήγησε σε μικρότερη διαθεσιμότητα συσκευών και μεγαλύτερο κόστος εγκατάστασης. Επιπλέον, η τεχνολογία καθυστέρησε να υιοθετηθεί σε σχέση με ανταγωνιστικές λύσεις, όπως το LTE, με αποτέλεσμα να χάσει σημαντικό έδαφος στις πρώτες φάσεις της εμπορικής διάδοσης (Andrews et al., 2007; Ghosh et al., 2005).

10.6 Σύγκριση WiMAX με LTE και 5G

Η σύγκριση του WiMAX με LTE και 5G αναδεικνύει την εξέλιξη των ασύρματων ευρυζωνικών επικοινωνιών. Αν και το WiMAX αποτέλεσε πρωτοποριακή λύση κατά τη δεκαετία του 2000, η επικράτηση του LTE και αργότερα του 5G οδήγησε σε σταδιακή υποχώρησή του (Andrews et al., 2007; Sauter, 2021).

Το LTE (Long Term Evolution), που βασίζεται στην τεχνολογία 3GPP. Υιοθετήθηκε ευρύτερα γιατί ήταν συμβατό με τις υπάρχουσες υποδομές GSM και UMTS, όπου οι πάροχοι μπορούσαν να αναβαθμίσουν τα δίκτυά τους χωρίς να τα χτίσουν από την αρχή (Sauter, 2021). Αντίθετα, το WiMAX, αν και βασιζόταν σε τεχνολογία IP και προσέφερε υψηλές ταχύτητες, δεν διέθετε αντίστοιχη υποστήριξη από τους παγκόσμιους τηλεπικοινωνιακούς οργανισμούς (Sauter, 2021).

Το 5G εισήγαγε ταχύτητες άνω του 1 Gbps, latency κάτω των 10 ms και δυνατότητα μαζικής σύνδεσης IoT συσκευών, όπου το WiMAX δεν μπορούσε να προσφέρει (Sauter, 2021; Rangan et al., 2014).

Το LTE και το 5G απέκτησαν ευρεία υποστήριξη από τη βιομηχανία τηλεπικοινωνιών, με αποτέλεσμα μαζική παραγωγή συσκευών και μείωση κόστους. Το WiMAX δεν κατάφερε να επιτύχει το ίδιο, γεγονός που περιόρισε την εμπορική του εξάπλωση (Sauter, 2021; Andrews et al., 2007).

Παρακάτω παρουσιάζεται συγκριτικός πίνακας των βασικών χαρακτηριστικών των τριών τεχνολογιών (Andrews et al., 2007; Sauter, 2021; Rangan et al., 2014).

Πίνακας 10.2: Συγκριτικά Τεχνικά Χαρακτηριστικά WiMAX, LTE και 5G

Χαρακτηριστικό	WiMAX (802.16e)	LTE (4G)	5G (NR)
Μέγιστη ταχύτητα Downlink	75 Mbps (Fixed), 30 Mbps (Mobile)	~100 Mbps έως 1 Gbps	1-20 Gbps
Τεχνολογία PHY	OFDMA	SC-FDMA & OFDMA	OFDMA + mmWave
Φάσμα λειτουργίας	2.3-3.5 GHz	700 MHz-2.6 GHz	600 MHz έως 100

			GHz
Υποστήριξη κινητικότητας	Έως 120 km/h	Έως 350 km/h	>500 km/h
Καθυστέρηση (latency)	~50 ms	~30 ms	<10 ms
Διεθνής υποστήριξη	Περιορισμένη	Παγκόσμια	Παγκόσμια

Η τεχνολογική ανωτερότητα του LTE και η ραγδαία ανάπτυξη του 5G εξηγούν σε μεγάλο βαθμό την εγκατάλειψη του WiMAX. Ωστόσο, η τεχνολογία WiMAX εξακολουθεί να παρέχει αξιόπιστες λύσεις σε συγκεκριμένες γεωγραφικές και οικονομικές συνθήκες, ειδικά σε αναπτυσσόμενες χώρες ή σε περιοχές χωρίς υποδομές (Ghosh et al., 2005; Sauter, 2021).

10.7 Συμπεράσματα

Συμπερασματικά, το WiMAX αποτέλεσε μια αξιόλογη τεχνολογική πρόταση για ευρυζωνική ασύρματη πρόσβαση, ωστόσο η περιορισμένη υποστήριξη από την αγορά και τη βιομηχανία οδήγησαν στη σταδιακή υποχώρησή του έναντι του LTE. Το LTE, ως πιο ώριμη και ευρέως υιοθετημένη τεχνολογία, καθιέρωσε τη βάση για τα σύγχρονα κινητά δίκτυα, ενώ το 5G επεκτείνει περαιτέρω τις δυνατότητες αυτές μέσω υψηλότερων ταχυτήτων, χαμηλότερης καθυστέρησης και υποστήριξης μαζικής συνδεσιμότητας.

Παρά το γεγονός ότι το WiMAX δεν καθιερώθηκε ως κυρίαρχη τεχνολογία, συνέβαλε ουσιαστικά στην εξέλιξη των ευρυζωνικών ασύρματων συστημάτων και ανέδειξε βασικές απαιτήσεις που αργότερα υιοθετήθηκαν και βελτιώθηκαν από το LTE. Για τον λόγο αυτό, η μελέτη του WiMAX παραμένει ιδιαίτερα χρήσιμη, καθώς προσφέρει το απαραίτητο ιστορικό και τεχνολογικό υπόβαθρο για την κατανόηση της μετάβασης προς το LTE.

Κεφάλαιο 11ο: Άλλα Πρότυπα WWAN

11.1 Εξέλιξη Κινητών Δικτύων: 3G, 4G και 5G

Τα ασύρματα δίκτυα ευρείας περιοχής (WWAN - Wireless Wide Area Networks) αποτελούν σημαντικό μέρος των σύγχρονων τηλεπικοινωνιών, επιτρέποντας τη συνδεσιμότητα σε μεγάλες γεωγραφικές εκτάσεις χωρίς τη χρήση φυσικών καλωδίων. Η εξέλιξη των τεχνολογιών κινητής τηλεφωνίας από το 3G στο 4G και πλέον στο 5G έχει αλλάξει τον τρόπο με τον οποίο οι χρήστες και οι συσκευές ανταλλάσσουν δεδομένα.

Το 3G εισήγαγε τη δυνατότητα μετάδοσης δεδομένων σε σχετικά υψηλές ταχύτητες, το 4G βελτίωσε σημαντικά την απόδοση και έφερε την εποχή του mobile internet και υπηρεσιών βίντεο και ήχου, ενώ το 5G προσφέρει πολύ υψηλές ταχύτητες, χαμηλή καθυστέρηση και σύνδεση μεγάλου αριθμού συσκευών στο πλαίσιο του IoT (Rangan et al., 2014; Sauter, 2021; Rancy, 2016).

Συνολικά, η μετάβαση από το 3G στο 5G δείχνει τη συνεχή εξέλιξη των ασύρματων δικτύων, με στόχο ταχύτερη, πιο αξιόπιστη και αποδοτικότερη επικοινωνία. Κάθε νέα γενιά βασίζεται στις δυνατότητες της προηγούμενης και τις εξελίσσει περαιτέρω (Sauter, 2021).

11.2 Τεχνολογία και Υπηρεσίες 3G (UMTS)

Το UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) αποτελεί το βασικό πρότυπο κινητών δικτύων τρίτης γενιάς (3G), το οποίο αναπτύχθηκε ως εξέλιξη των δικτύων GSM με στόχο την παροχή υψηλότερων ταχυτήτων μετάδοσης δεδομένων και την υποστήριξη ευρυζωνικών υπηρεσιών κινητής επικοινωνίας. Στο πλαίσιο της αποδοτικής διαχείρισης των δεδομένων, το UMTS χρησιμοποιεί τη μεταγωγή πακέτων (packet-switched), μια τεχνική κατά την οποία τα δεδομένα διασπώνται σε μικρά πακέτα και μεταδίδονται μέσω του δικτύου ανεξάρτητα, χωρίς την ανάγκη αποκλειστικής και μόνιμης σύνδεσης όπως στη μεταγωγή κυκλώματος (circuit-switched) (Sauter, 2021). Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει καλύτερη αξιοποίηση των πόρων του δικτύου και αποτελεσματικότερη υποστήριξη υπηρεσιών διαδικτύου και πολυμέσων.

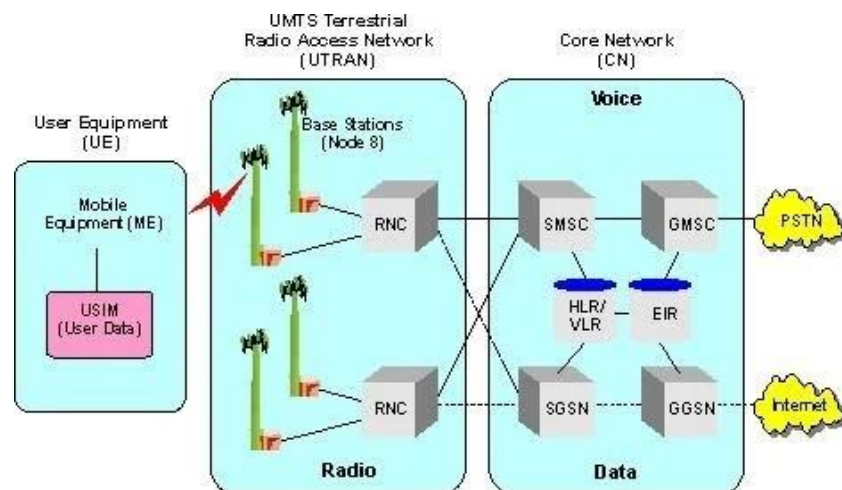
Ο Πίνακας 11.1 παρουσιάζει τη σύγκριση μεταξύ των δικτύων GSM και UMTS, δείχνοντας τη μετάβαση από βασικές υπηρεσίες φωνής και SMS σε ευρυζωνικές υπηρεσίες κινητής επικοινωνίας (Sauter, 2021).

Πίνακας 11.1: Σύγκριση δικτύων GSM και UMTS

Χαρακτηριστικό	GSM (2G)	UMTS (3G)
Τύπος δικτύου	Δεύτερης γενιάς (2G)	Τρίτης γενιάς (3G)
Τεχνολογία πρόσβασης	TDMA / FDMA	WCDMA
Υπηρεσίες	Φωνή και SMS	Φωνή, internet και πολυμέσα
Ταχύτητα δεδομένων	Πολύ χαμηλή	Υψηλότερη
Αρχιτεκτονική	Circuit-switched	Circuit-switched and Packet-switched

Βασισμένο στην τεχνολογία WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access), το UMTS υποστήριζε ταυτόχρονα φωνή, mobile internet, video calling και αποστολή πολυμέσων (MMS) (Sauter, 2021; Goldsmith, 2005). Η τεχνολογία WCDMA βασίζεται στη μέθοδο CDMA, όπου πολλοί χρήστες χρησιμοποιούν ταυτόχρονα το ίδιο φάσμα συχνοτήτων μέσω διαφορετικών κωδικών διάδοσης (spreading codes), βελτιώνοντας τη χωρητικότητα και την αποδοτικότητα του δικτύου (Goldsmith, 2005). Παράλληλα, το σύστημα μπορούσε να υποστηρίξει διαφορετικούς τύπους κυκλοφορίας μέσω δυναμικής κατανομής πόρων και μετάδοσης δεδομένων, βελτιώνοντας το QoS και την εμπειρία των χρηστών (Sauter, 2021).

Η Εικόνα 11.1 παρουσιάζει την αρχιτεκτονική του δικτύου UMTS/HSPA και τη δομή του 3G συστήματος. Φαίνεται η ροή των δεδομένων από τον χρήστη προς το δίκτυο και τα βασικά του στοιχεία, όπως οι σταθμοί βάσης και οι ελεγκτές ραδιοδικτύου.



Εικόνα 11.1: Αρχιτεκτονική δικτύου UMTS/WCDMA και HSPA, Πηγή: Mahmud (2019)

Η σημαντικότερη αναβάθμιση του UMTS έγινε με την ενσωμάτωση του HSPA (High Speed Packet Access), το οποίο περιλάμβανε το HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) για ταχύτερη λήψη δεδομένων και το HSUPA (High Speed Uplink Packet Access) για ταχύτερη αποστολή δεδομένων. Με την ενσωμάτωση του HSPA, ο ρυθμός μετάδοσης στο downlink έφτασε τα 14.4 Mbps και στο uplink τα 5.76 Mbps, ενισχύοντας σημαντικά την εμπειρία χρήσης σε εφαρμογές όπως video streaming, cloud υπηρεσίες και απομακρυσμένη εργασία (Sauter, 2021).

Επιπλέον, το HSPA ενίσχυσε την αξιοπιστία και την αποδοτικότητα της μετάδοσης μέσω τεχνικών όπως το Adaptive Modulation and Coding (AMC) και το Hybrid Automatic Repeat Request (HARQ), οι οποίες προσαρμόζουν δυναμικά τη μετάδοση δεδομένων ανάλογα με τις συνθήκες του δικτύου (Sauter, 2021). Οι μηχανισμοί αυτοί βελτίωσαν τη μετάδοση δεδομένων σε περιβάλλοντα με υψηλό θόρυβο ή μεταβαλλόμενες συνθήκες δικτύου, προσφέροντας πιο σταθερή εμπειρία στους τελικούς χρήστες. Παράλληλα, η αναβάθμιση των σταθμών βάσης του UMTS ήταν δυνατή μέσω λογισμικού, γεγονός που μείωσε το κόστος ανάπτυξης και διευκόλυνε την ευρεία εμπορική υιοθέτηση των υπηρεσιών HSPA από τους παρόχους (Sauter, 2021).

Το HSPA αποτέλεσε ουσιαστικά το μεταβατικό στάδιο μεταξύ των δικτύων τρίτης και τέταρτης γενιάς, καθιερώνοντας την ευρυζωνική κινητή πρόσβαση σε μεγάλη κλίμακα και βελτιώνοντας σημαντικά την εμπειρία των χρηστών σε υπηρεσίες δεδομένων (Goldsmith, 2005; Sauter, 2021). Μέχρι την έλευση του LTE, το HSPA είχε καταστεί το κυρίαρχο πρότυπο ευρυζωνικής κινητής πρόσβασης σε παγκόσμια κλίμακα. Το εύρος εφαρμογών που υποστήριζε, σε συνδυασμό με τις υψηλές επιδόσεις και την ευελιξία αναβάθμισης, το καθιστούν ένα από τα σημαντικότερα τεχνολογικά επιτεύγματα της εποχής του (Goldsmith, 2005; Sauter, 2021).

Στο πλαίσιο αυτής της εξέλιξης, η μετάβαση από το 3G στο 4G πραγματοποιήθηκε με στόχο τη σημαντική βελτίωση των ταχυτήτων σύνδεσης και της συνολικής απόδοσης των κινητών δικτύων. Το 4G προσφέρει πολύ υψηλότερες ταχύτητες και μικρότερη καθυστέρηση σε σχέση με το 3G, επιτρέποντας πιο ομαλή χρήση εφαρμογών όπως το streaming, οι βιντεοκλήσεις και τα online παιχνίδια (Goldsmith, 2005; Sauter, 2021). Έτσι, αντικατέστησε σταδιακά το 3G και οδήγησε σε μια πιο γρήγορη και σταθερή εμπειρία mobile internet.

11.3 Τεχνολογία και Υπηρεσίες 4G (LTE)

Το 4G LTE (Long Term Evolution) αποτελεί την τέταρτη γενιά κινητών δικτύων και σχεδιάστηκε με στόχο την αύξηση ταχύτητας, τη μείωση καθυστέρησης και τη καλύτερη ποιότητας σύνδεσης. Σε σχέση με το 3G, προσφέρει σημαντικά πιο γρήγορο mobile internet και πιο σταθερή σύνδεση. Επίσης, υποστηρίζει υπηρεσίες όπως γρήγορη περιήγηση στο διαδίκτυο, video streaming, εφαρμογές κοινωνικής δικτύωσης, online gaming και φωνητικές κλήσεις μέσω διαδικτύου (VoIP - Voice over IP) (Sauter, 2021). Έτσι, βελτίωσε σημαντικά την εμπειρία χρήσης των κινητών συσκευών.

Σε τεχνικό επίπεδο, το 4G βασίζεται κυρίως σε μεταγωγή πακέτων (packet-switched) και σε IP αρχιτεκτονική, γεγονός που το κάνει πιο αποδοτικό στη μεταφορά δεδομένων (Sauter, 2021; 3GPP TS 36.300). Επιπλέον, χαρακτηρίζεται από πολύ χαμηλότερη καθυστέρηση (latency) και μεγαλύτερη αξιοπιστία σε σχέση με τα προηγούμενα δίκτυα (Dahlman et al., 2011).

Σε επίπεδο πρόσβασης, το LTE χρησιμοποιεί OFDMA στο downlink και SC-FDMA (Single Carrier FDMA) στο uplink, υποστηρίζει εύρος καναλιού 1.4-20 MHz σε FDD και TDD. Παράλληλα, αξιοποιεί τεχνικές όπως το MIMO και beamforming για τη βελτίωση της ταχύτητας και της αξιοπιστίας της σύνδεσης (Dahlman et al., 2011; 3GPP TS 36.300; Singh et al., 2021).

Η αρχιτεκτονική του LTE βασίζεται στο Evolved Packet Core (EPC), το οποίο διαχειρίζεται τη σύνδεση των χρηστών, τη δρομολόγηση των δεδομένων και την ποιότητα υπηρεσίας. Το EPC περιλαμβάνει βασικές λειτουργίες όπως η MME (Mobility Management Entity) δηλαδή τον έλεγχο της σύνδεσης των χρηστών και την υποστήριξη κατά τη μετακίνηση μέσα στο δίκτυο, η S-GW (Serving Gateway) και η P-GW (Packet Data Network Gateway) για τη δρομολόγηση και προώθηση δεδομένων στον τελικό προορισμό, καθώς και η PCRF (Policy and Charging Rules Function) για τον έλεγχο της χρέωσης και κανόνων χρήσης του δικτύου (3GPP TS 23.401; Sauter, 2021).

Σε αυτό το πλαίσιο, η φωνητική επικοινωνία υποστηρίζεται μέσω VoLTE (Voice over LTE), δηλαδή η φωνή και τα δεδομένα μεταφέρονται μέσω του ίδιου δικτύου δεδομένων. Έτσι, η επικοινωνία γίνεται πιο αποδοτική και πλήρως βασισμένη στην τεχνολογία IP. Η υπηρεσία αυτή βασίζεται στη χρήση EPS bearers, τα οποία εξασφαλίζουν τη σωστή μεταφορά δεδομένων, καθώς και σε κλάσεις QCI (QoS Class Identifiers), οι οποίες ορίζουν την προτεραιότητα και τις απαιτήσεις καθυστέρησης κάθε υπηρεσίας (3GPP TS 23.401; Sauter, 2021).

Οι μηχανισμοί του LTE, όπως ο χρονοπρογραμματισμός κάθε 1 ms (TTI), η ανατροφοδότηση ποιότητας καναλιού (CQI/PMI/RI), το HARQ και η προσαρμογή της μετάδοσης (link adaptation), βοηθούν ώστε το δίκτυο να χρησιμοποιεί αποδοτικά το διαθέσιμο φάσμα και να λειτουργεί σωστά ακόμη και σε συνθήκες παρεμβολών. Συγκεκριμένα, το CQI δείχνει την ποιότητα της σύνδεσης, το PMI υποδεικνύει τον βέλτιστο τρόπο μετάδοσης, ενώ το RI δείχνει πόσες παράλληλες μεταδόσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για πιο γρήγορο internet (3GPP TS 23.401; Sauter, 2021). Έπειτα, το

HARQ ξαναστέλνει αυτόματα τα δεδομένα όταν δεν ληφθούν σωστά, και το link adaptation αλλάζει τον τρόπο αποστολής των δεδομένων ανάλογα με την ποιότητα της σύνδεσης, με στόχο τη καλύτερη απόδοση και σταθερότητα.

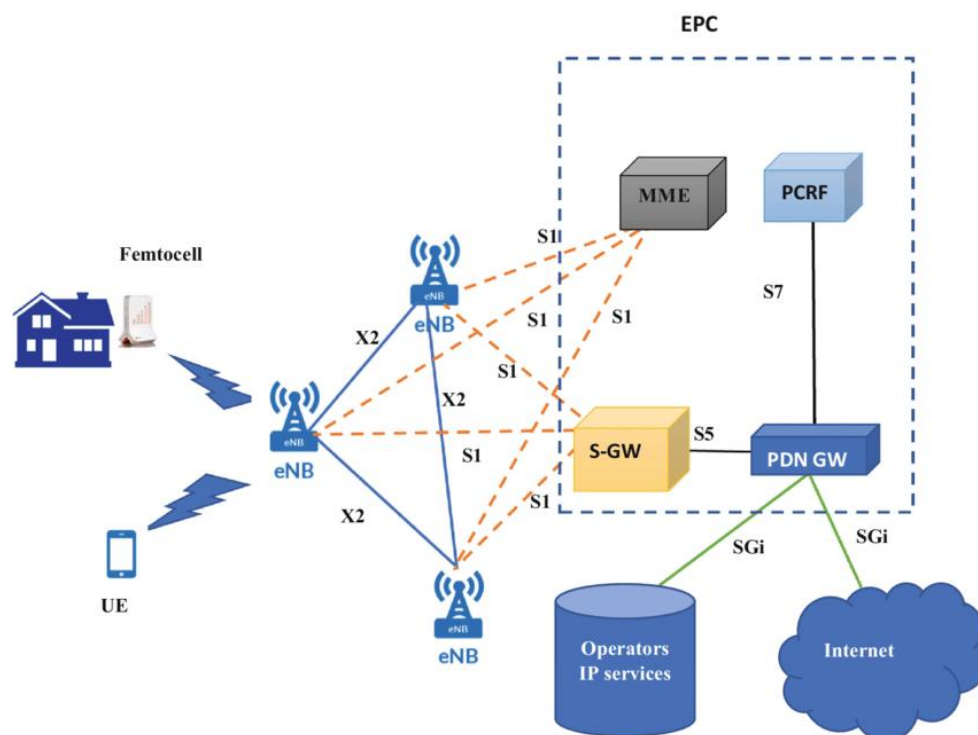
Η τυπική καθυστέρηση στο user plane, δηλαδή στο μέρος του δικτύου που μεταφέρει το internet και τα δεδομένα του χρήστη, είναι σημαντικά χαμηλότερη σε σχέση με το 3G, γεγονός που καθιστά το LTE κατάλληλο για mobile broadband, video streaming και υπηρεσίες πραγματικού χρόνου (Dahlman et al., 2011; 3GPP TS 36.300).

11.3.1 Μετάβαση σε All-IP Δίκτυο

Η εισαγωγή του LTE αποτέλεσε σημείο καμπής για τις κινητές επικοινωνίες, καθώς καθιέρωσε για πρώτη φορά την αποκλειστική χρήση του πρωτοκόλλου IP σε επίπεδο δικτύου. Η φιλοσοφία του All-IP οδήγησε στην πλήρη ενοποίηση φωνής, δεδομένων και πολυμέσων, καταργώντας τις παλαιότερες υποδομές κυκλωματικής μεταγωγής (Sauter, 2021; Singh et al., 2021). Ως αποτέλεσμα, αξιοποιήθηκε καλύτερα το διαθέσιμο φάσμα και μειώθηκε η πολυπλοκότητα του δικτύου.

Η επίπεδη αρχιτεκτονική του LTE επιτρέπει στους σταθμούς βάσης (eNodeB) να συνδέονται απευθείας στον EPC μέσω της διεπαφής S1, χωρίς ενδιάμεσους ελεγκτές όπως ο κεντρικός ελεγκτής RNC (Radio Network Controller) του UMTS. Επιπλέον, οι eNodeB διασυνδέονται μεταξύ τους μέσω της διεπαφής X2, υποστηρίζοντας αποτελεσματική διαχείριση κινητικότητας και συντονισμό παρεμβολών μεταξύ κελιών (Dahlman et al., 2011). Αυτή η απλοποίηση μειώνει τη σηματοδότηση και τις καθυστερήσεις, ενώ ενισχύει τη χωρητικότητα και την αποδοτικότητα του δικτύου (Sauter, 2021).

Η Εικόνα 11.2 παρουσιάζει την αρχιτεκτονική του δικτύου LTE και τη δομή του EPC. Απεικονίζεται το πλήρως IP-based μοντέλο επικοινωνίας, στο οποίο οι σταθμοί βάσης συνδέονται άμεσα με τον πυρήνα του δικτύου. Επιπλέον, παρουσιάζονται οι βασικές λειτουργίες του EPC που υποστηρίζουν τη διαχείριση κινητικότητας και τη δρομολόγηση δεδομένων.



Εικόνα 11.2: Αρχιτεκτονική LTE και EPC - All-IP δίκτυο. Πηγή: Ibrahim et al. (2019)

Η υποστήριξη του All-IP μοντέλου ενίσχυσε σημαντικά την αποδοτικότητα διαχείρισης των δικτύων από τους παρόχους. Η ενσωμάτωση τεχνολογιών NFV (Network Function Virtualization) και SDN (Software Defined Networking) στο LTE επιτρέπει τον εκσυγχρονισμό του δικτύου μέσω της χρήσης λογισμικού αντί αποκλειστικά φυσικού εξοπλισμού. Συγκεκριμένα, το NFV μετατρέπει λειτουργίες, όπως τα routers και firewalls, σε λογισμικές εφαρμογές που μπορούν να εκτελούνται σε servers, μειώνοντας έτσι την ανάγκη για εξειδικευμένο hardware (Sauter, 2021; Dahlman et al., 2011). Αντίστοιχα, το SDN εισάγει έναν κεντρικό μηχανισμό ελέγχου του δικτύου, ο οποίος ρυθμίζει την κίνηση δεδομένων στο δίκτυο και διαχειρίζεται καλύτερα τους πόρους του. Ο συνδυασμός των δύο τεχνολογιών καθιστά το δίκτυο πιο ευέλικτο, πιο εύκολα διαχειρίσιμο και μειώνει σημαντικά το λειτουργικό κόστος.

Με το VoLTE, στο πλαίσιο του All-IP δικτύου, οι φωνητικές κλήσεις πραγματοποιούνται μέσω του ίδιου δικτύου δεδομένων με το internet, χωρίς χρήση 3G ή GSM, προσφέροντας καλύτερη ποιότητα ήχου και ταχύτερη έναρξη κλήσης (Sauter, 2021; 3GPP TS 23.401).

Η μετάβαση στο All-IP μοντέλο σημαίνει ότι όλες οι υπηρεσίες (φωνή, δεδομένα και πολυμέσα) μεταφέρονται πλέον ως IP πακέτα μέσω του ίδιου δικτύου, χωρίς διαχωρισμό σε circuit ή packet switching (Sauter, 2021). Αυτό οδηγεί σε απλούστερη αρχιτεκτονική, μειωμένο κόστος λειτουργίας και καλύτερη αξιοποίηση των πόρων του δικτύου, ενώ ταυτόχρονα διευκολύνει την ανάπτυξη νέων υπηρεσιών και τη μετάβαση σε μελλοντικές τεχνολογίες όπως το 5G (Sauter, 2021).

11.3.2 OFDMA και MIMO στο LTE

Η τεχνολογία LTE εισήγαγε την OFDMA για το downlink, για υψηλή απόδοση μετάδοσης δεδομένων. Η OFDMA, χωρίζει το διαθέσιμο φάσμα σε πολλά μικρά κομμάτια για να εξυπηρετεί πολλούς χρήστες μαζί, τα οποία κατανέμονται δυναμικά σε διαφορετικούς χρήστες με βάση τη ζήτηση και τις συνθήκες καναλιού (Sauter, 2021).

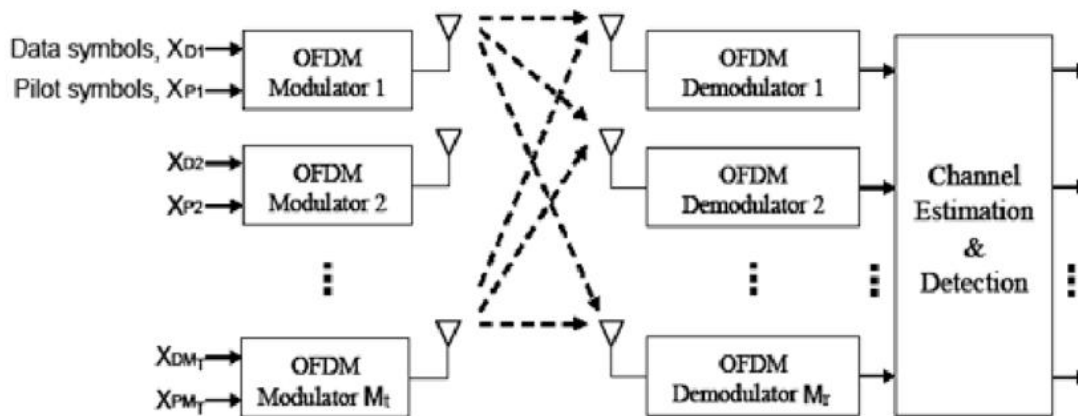
Για το uplink, το LTE χρησιμοποιεί τη SC-FDMA, η οποία μειώνει τις μεγάλες αυξομειώσεις στην ισχύ του σήματος, δηλαδή τον λόγο κορυφής προς μέση ισχύ (PAPR), βελτιώνοντας την κατανάλωση ενέργειας των φορητών συσκευών (Sauter, 2021). Η SC-FDMA εφαρμόζει διακριτό μετασχηματισμό (DFT - Discrete Fourier Transform) στα δεδομένα πριν αυτά σταλούν, με αποτέλεσμα την μείωση PAPR που κάνει πιο σταθερό το σήμα μετάδοσης (Sauter, 2021).

Παράλληλα, το LTE αξιοποιεί το MIMO, το οποίο βασίζεται στη χρήση πολλαπλών κεραιών στον πομπό και στον δέκτη. Μέσω τεχνικών όπως ο χωρικός πολυπλεξισμός (spatial multiplexing), επιτυγχάνεται η ταυτόχρονη μετάδοση πολλών ανεξάρτητων ροών δεδομένων, αυξάνοντας την απόδοση χωρίς την ανάγκη για επιπλέον φάσμα (Dahlman et al., 2011). Αυτό είναι κρίσιμο για τις φορητές συσκευές, καθώς μειώνει την ενεργειακή κατανάλωση και εξασφαλίζει μεγαλύτερη αυτονομία.

Ο συνδυασμός OFDMA και MIMO επιτρέπει στο LTE να ανταποκρίνεται σε απαιτήσεις ταχύτητας άνω των 100 Mbps και καθυστερήσεων κάτω των 10 ms (Singh et al., 2021; Dahlman et al., 2011). Οι τεχνολογίες αυτές καθιστούν το δίκτυο ικανό να υποστηρίξει εφαρμογές όπως ροή βίντεο υψηλής ευκρίνειας (HD - High Definition), online gaming και τηλεφωνία μέσω διαδικτύου.

Η προσέγγιση αυτή έχει υιοθετηθεί και στο LTE-Advanced, το οποίο αποτελεί εξέλιξη του LTE. Προσφέρει υψηλότερες ταχύτητες, μεγαλύτερη χωρητικότητα και καλύτερη απόδοση του δικτύου, επιτρέποντας την υποστήριξη πιο απαιτητικών εφαρμογών (Sauter, 2021; Dahlman et al., 2011).

Η εικόνα δείχνει την αρχιτεκτονική MIMO-OFDMA στο LTE. Η OFDMA μοιράζει τη συχνότητα σε μικρά κομμάτια (subcarriers) και το MIMO χρησιμοποιεί πολλαπλές κεραίες. Ο συνδυασμός τους αυξάνει τη χωρητικότητα και κάνει τη σύνδεση πιο αξιόπιστη.



Εικόνα 11.3: Αρχιτεκτονική MIMO-OFDMA στο LTE. Πηγή: Shoba & Jayanthi (2012).

11.3.3 Υπηρεσία VoLTE

Η τεχνολογία Voice over LTE (VoLTE) αποτελεί μία από τις σημαντικότερες εξελίξεις στην αρχιτεκτονική των δικτύων 4G, καθώς ενσωματώνει πλήρως τις φωνητικές υπηρεσίες στο Internet Protocol. Το VoLTE επιτρέπει τη μετάδοση φωνής αποκλειστικά μέσω πακέτων IP εντός του δικτύου LTE, διασφαλίζοντας υψηλότερη ποιότητα ήχου, μικρότερες καθυστερήσεις και καλύτερη αξιοποίηση των πόρων του δικτύου (Sauter, 2021).

Η λειτουργία του VoLTE βασίζεται στο πρωτόκολλο IMS (IP Multimedia Subsystem), το οποίο επιτρέπει την παροχή υπηρεσιών πολυμέσων σε IP περιβάλλον (Sauter, 2021). Το IMS υποστηρίζει λειτουργίες όπως έλεγχο κλήσεων, αυθεντικοποίηση, διαχείριση συνεδρίας και παρουσία χρηστών, απαραίτητες για υπηρεσίες φωνής και βίντεο σε πραγματικό χρόνο. Με αυτόν τον τρόπο, οι φωνητικές κλήσεις αντιμετωπίζονται ως μία ακόμη IP υπηρεσία, ενταγμένη στο συνολικό δίκτυο δεδομένων (Sauter, 2021).

Το VoLTE προσφέρει υψηλή ποιότητα φωνής μέσω της τεχνολογίας AMR-WB (Adaptive Multi-Rate Wideband), η οποία επεκτείνει το φάσμα ήχου και βελτιώνει την ποιότητα της φωνής. Παράλληλα, μειώνει σημαντικά τις καθυστερήσεις (latency) σε σχέση με τα προηγούμενα δίκτυα. Ενδεικτικά, η καθυστέρηση κλήσης στο VoLTE είναι περίπου 300-400 ms, έναντι 600-700 ms σε 3G, προσφέροντας βελτιωμένη εμπειρία επικοινωνίας για τον τελικό χρήστη (Sauter, 2021; 3GPP TS 23.401).

Μία σημαντική πτυχή του VoLTE είναι η δυνατότητα ταυτόχρονης χρήσης φωνής και δεδομένων, η οποία επιτρέπει στον χρήστη να πραγματοποιεί φωνητικές κλήσεις και ταυτόχρονα να χρησιμοποιεί

εφαρμογές που απαιτούν σύνδεση στο διαδίκτυο χωρίς καμία διακοπή ή καθυστέρηση. Η ενοποίηση αυτή αυξάνει την αποδοτικότητα του φάσματος και μειώνει τις ανάγκες του παρόχου για ξεχωριστή διαχείριση πόρων για φωνή και δεδομένα (Sauter, 2021).

Η υλοποίηση του VoLTE αποτελεί επίσης βασικό βήμα για τη μετάβαση στις αρχιτεκτονικές του 5G, όπου όλες οι υπηρεσίες λειτουργούν αποκλειστικά σε IP επίπεδο. Επιπλέον, επιτρέπει την υποστήριξη υπηρεσιών όπως video calling, HD voice και Rich Communication Services (RCS), καθιστώντας το θεμελιώδη τεχνολογική βάση για τις σύγχρονες επικοινωνίες. Στον Πίνακα 11.2 παρουσιάζονται οι διαφορές του VoLTE σε σχέση με τις προηγούμενες τεχνολογίες φωνής (Sauter, 2021; 3GPP TS 23.401).

Πίνακας 11.2: Σύγκριση τεχνολογιών φωνής (VoLTE, 3G, 2G).

Χαρακτηριστικό	VoLTE (4G)	3G (UMTS)	2G (GSM)
Τύπος μεταγωγής (για φωνή)	Packet-switched (IP-based / All-IP)	Circuit-switched	Circuit-switched
Υποδομή	IMS (IP Multimedia Subsystem)	MSC/HLR, SGSN	MSC/HLR
Ποιότητα φωνής	Υψηλή (AMR-WB, HD Voice)	Μέτρια	Χαμηλή
Καθυστέρηση (latency)	~300 ms	~600 ms	>800 ms
Χρήση ταυτόχρονης μεταφοράς data	Ναι (φωνή και δεδομένα ταυτόχρονα)	Όχι (εκτός αν υποστηρίζεται με CSFB)	Όχι
Απόδοση φάσματος	Υψηλή (μεταφορά μέσω IP πακέτων και QoS)	Μέτρια	Χαμηλή
Ενσωμάτωση με υπηρεσίες πολυμέσων	Πλήρης (π.χ. video, RCS)	Περιορισμένη	Πολύ περιορισμένη
Συμβατότητα με μελλοντικά δίκτυα	φωνή στο 5G (VoNR / 5G NR voice)	Όχι	Όχι

11.3.4 Καθυστερήσεις, Ταχύτητα και Ποιότητα Υπηρεσίας (QoS) στο LTE

Η τεχνολογία LTE μείωσε σημαντικά την καθυστέρηση στη μετάδοση δεδομένων και βελτίωσε την εμπειρία των χρηστών. Ο συνολικός χρόνος καθυστέρησης κυμαίνεται περίπου στα 10 ms για τη μεταφορά χρήστη (user plane) και γύρω στα 100 ms για τη σηματοδότηση (control plane), επιδόσεις που καθιστούν το LTE ιδιαίτερα κατάλληλο για εφαρμογές που απαιτούν άμεση απόκριση, όπως φωνητικές κλήσεις μέσω διαδικτύου, τηλεδιασκέψεις και online gaming (Sauter, 2021).

Όσον αφορά τις ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, το LTE επιτρέπει θεωρητικά ρυθμούς που φτάνουν τα 300 Mbps κατά τη λήψη και τα 75 Mbps κατά την αποστολή, υπό ιδανικές συνθήκες χρήσης φάσματος 20 MHz και με αξιοποίηση τεχνολογιών πολλαπλών κεραιών (Sauter, 2021; Dahlman, et al., 2011). Αν και οι πραγματικές επιδόσεις εξαρτώνται από τις συνθήκες του δικτύου και την

πυκνότητα των χρηστών, το LTE προσφέρει σημαντικά υψηλότερη απόδοση σε σχέση με τα δίκτυα 3G (Sauter, 2021).

Η διαχείριση της ποιότητας υπηρεσίας στο LTE επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης EPS bearers με δείκτες QoS (QCI) (Sauter, 2021). Κάθε bearer ορίζει απαιτήσεις όπως προτεραιότητα, αποδεκτή καθυστέρηση και ρυθμό μετάδοσης, επιτρέποντας την εξυπηρέτηση διαφορετικών τύπων εφαρμογών ανάλογα με τις ανάγκες τους (Sauter, 2021).

Για την υλοποίηση αυτών των μηχανισμών, το LTE χρησιμοποιεί τον Packet Scheduler και το Admission Control, οι οποίοι κατανέμουν αποδοτικά τους διαθέσιμους πόρους του δικτύου, λαμβάνοντας υπόψη τις συνθήκες του καναλιού, τη συμφόρηση και την προτεραιότητα κάθε ροής. Με αυτόν τον τρόπο διασφαλίζεται η ομαλή παροχή υπηρεσιών, ακόμη και σε περιόδους υψηλής ζήτησης (Sauter, 2021).

Συνολικά, το LTE προσφέρει υψηλές ταχύτητες, χαμηλή καθυστέρηση και καλό έλεγχο ποιότητας, καθιστώντας το ένα ολοκληρωμένο δίκτυο που υποστηρίζει πολλές εφαρμογές και χρήστες. Η πρακτική εφαρμογή των μηχανισμών ποιότητας υπηρεσίας αποτυπώνεται μέσω των κλάσεων QCI (QoS Class Identifier), οι οποίες καθορίζουν όρια καθυστέρησης, απώλειας πακέτων και προτεραιότητας για διαφορετικούς τύπους υπηρεσιών. Ενδεικτικά παραδείγματα κλάσεων QCI και των αντίστοιχων απαιτήσεών τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 11.3 (Sauter, 2021; 3GPP TS 23.401).

Πίνακας 11.3: Παραδείγματα QoS Κλάσεων στο LTE

QCI	Τύπος υπηρεσίας	Καθυστέρηση (ms)	Απώλεια πακέτων (%)	Προτεραιότητα
1	Φωνή (VoIP)	≤ 100	≤ 1	Υψηλή
2	Video streaming (live)	≤ 150	≤ 1	Υψηλή
3	Video streaming (buffered)	≤ 300	≤ 10	Μέση
4	Online gaming	≤ 50	≤ 1	Πολύ Υψηλή
5	Web browsing	≤ 300	≤ 10	Χαμηλή
6-9	Best effort (email, FTP, etc.)	> 300	> 10	Πολύ Χαμηλή

11.4 Τεχνολογία και Υπηρεσίες 5G

Η πέμπτη γενιά κινητών δικτύων 5G αποτελεί την πιο σύγχρονη εξέλιξη στις ασύρματες επικοινωνίες, προσφέροντας σημαντικά βελτιωμένες επιδόσεις σε σχέση με τις προηγούμενες γενιές. Στόχος του είναι η παροχή πολύ υψηλών ταχυτήτων μετάδοσης δεδομένων, εξαιρετικά χαμηλής καθυστέρησης και η υποστήριξη μεγάλου αριθμού ταυτόχρονα συνδεδεμένων συσκευών. Σε αντίθεση με τα δίκτυα 4G, το 5G σχεδιάστηκε ώστε να εξυπηρετεί όχι μόνο την κινητή πρόσβαση, αλλά και προηγμένες εφαρμογές όπως το IoT, οι έξυπνες πόλεις, τα αυτόνομα οχήματα και η επαυξημένη και εικονική πραγματικότητα (ITU-R M.2083-0, 2015). Η τεχνολογία αυτή βασίζεται σε νέα δίκτυα και ασύρματη σύνδεση, που προσφέρουν μεγαλύτερη ταχύτητα, αξιοπιστία και καλύτερη διαχείριση, κάνοντας το 5G τη βάση για τις μελλοντικές ψηφιακές εφαρμογές (Sauter, 2021).

Το 5G New Radio (NR) αποτελεί το ασύρματο κομμάτι του δικτύου πέμπτης γενιάς και είναι υπεύθυνο για τη ραδιοεπικοινωνία μεταξύ των χρηστών και του δικτύου (Sauter, 2021). Υποστηρίζει υψηλές ταχύτητες μετάδοσης, χαμηλή καθυστέρηση και μεγάλη χωρητικότητα, επιτρέποντας την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλών συσκευών.

Το 5G NR έχει σχεδιαστεί ώστε να υποστηρίζει διαφορετικές κατηγορίες υπηρεσιών. Τρεις βασικές κατηγορίες υπηρεσιών: την eMBB (enhanced Mobile Broadband), URLLC (Ultra-Reliable Low-Latency Communications), και τη mMTC (massive Machine-Type Communications) (Sauter, 2021; 3GPP TS 38.300). Για την επίτευξη αυτών των στόχων, αξιοποιεί τεχνολογίες όπως το 5G New Radio (NR), το massive MIMO, το beamforming και το network slicing (Sauter, 2021).

Η κατηγορία eMBB επικεντρώνεται στην παροχή πολύ υψηλών ταχυτήτων δεδομένων για εφαρμογές όπως streaming βίντεο υψηλής ανάλυσης (4K/8K), εικονική πραγματικότητα (VR) και επαυξημένη πραγματικότητα (AR). Η URLLC χρησιμοποιείται σε εφαρμογές κρίσιμης σημασίας που απαιτούν άμεση απόκριση και αξιόπιστη σύνδεση, όπως η τηλεϊατρική και τα αυτόνομα οχήματα. Τέλος, η mMTC επικεντρώνεται στη σύνδεση μεγάλου αριθμού συσκευών IoT, όπως αισθητήρες, έξυπνοι μετρητές και εφαρμογές έξυπνων πόλεων (ITU-R M.2083-0, 2015; 3GPP TS 38.300).

Στο φυσικό επίπεδο, το 5G αξιοποιεί τεχνολογίες όπως το massive MIMO, το οποίο χρησιμοποιεί μεγάλο αριθμό κεραιών για την αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου, και το beamforming, που κατευθύνει το σήμα προς τον χρήστη βελτιώνοντας την κάλυψη και την αποδοτικότητα. Επιπλέον, υποστηρίζει το network slicing, το οποίο επιτρέπει τη δημιουργία εικονικών τμημάτων δικτύου προσαρμοσμένων στις απαιτήσεις διαφορετικών υπηρεσιών (3GPP TS 38.300; Dahlman et al., 2011).

Σε επίπεδο συστήματος, ο πυρήνας του 5G (5G Core - 5GC) διαθέτει μια ευέλικτη, service-based αρχιτεκτονική, στην οποία οι λειτουργίες δικτύου επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω διεπαφών τύπου REST (Representational State Transfer). Η service-based αρχιτεκτονική του 5G Core επιτρέπει την αποδοτικότερη διαχείριση των πόρων, τον διαχωρισμό των λειτουργιών ελέγχου και δεδομένων, καθώς και την εύκολη προσαρμογή του δικτύου στις ανάγκες των χρηστών (3GPP TS 23.501).

Συνολικά, το 5G στοχεύει σε ταχύτητες της τάξης των Gbps και σε πολύ χαμηλές καθυστερήσεις, υποστηρίζοντας εφαρμογές όπως ο βιομηχανικός αυτοματισμός και οι επικοινωνίες οχημάτων (Vehicle-to-Everything - V2X) (Sauter, 2021). Επιπλέον, σε συνδυασμό με τεχνολογίες όπως το edge computing, επιτυγχάνει ακόμη μεγαλύτερη μείωση της καθυστέρησης από άκρο σε άκρο (end-to-end latency) (ETSI GS MEC 003, 2025).

11.4.1 Αρχιτεκτονική 5G: Standalone και Non-standalone

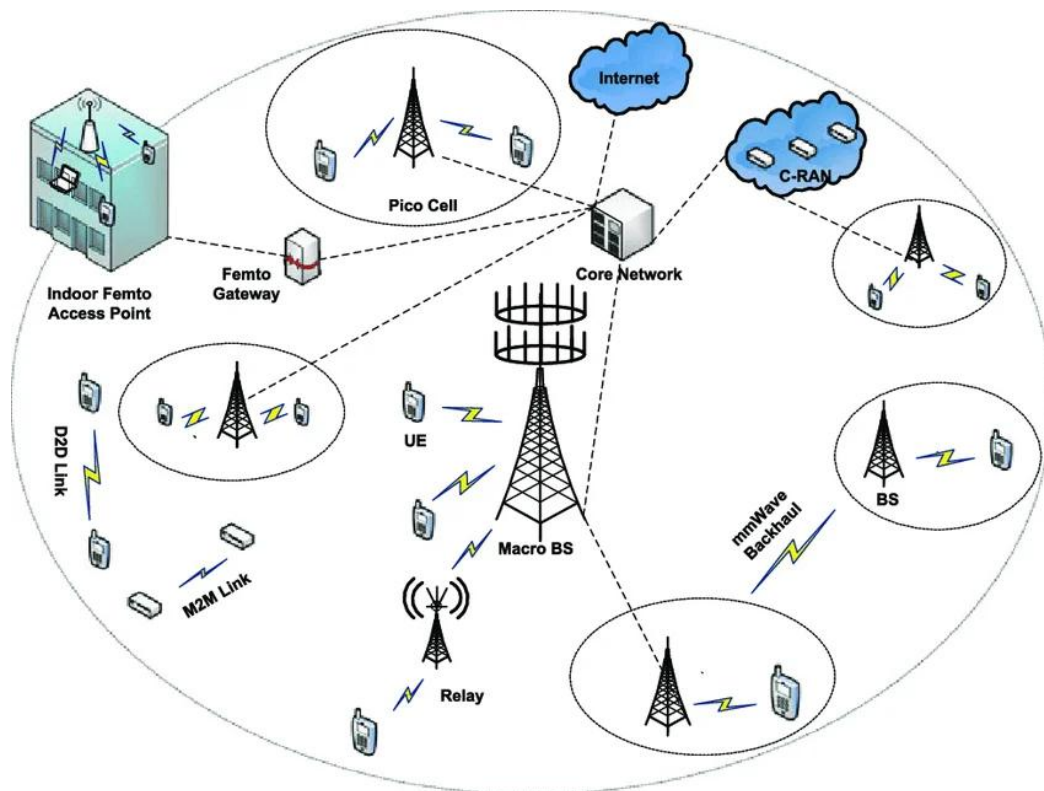
Το δίκτυο 5G υποστηρίζει δύο βασικές αρχιτεκτονικές υλοποίησης: τη Non-Standalone (NSA) και τη Standalone (SA). Η NSA βασίζεται στη συνύπαρξη του 5G New Radio (NR) με το EPC του 4G/LTE, ώστε να αναπτυχθεί πιο γρήγορα το 5G χρησιμοποιώντας το υπάρχον δίκτυο 4G, χωρίς να χρειάζεται πλήρης αντικατάσταση της υπάρχουσας υποδομής (Sauter, 2021).

Αντίθετα, η Standalone αρχιτεκτονική αποτελεί πλήρως αυτόνομη υλοποίηση του 5G, καθώς χρησιμοποιεί τόσο το 5G NR όσο και τον νέο πυρήνα δικτύου 5G Core. Με αυτόν τον τρόπο υποστηρίζει λειτουργίες όπως το network slicing, τη χαμηλή καθυστέρηση και την υψηλή αξιοπιστία, αξιοποιώντας πλήρως τις δυνατότητες του 5G (Sauter, 2021). Η SA προσφέρει επίσης καλύτερη προσαρμογή σε απαιτητικές εφαρμογές, όπως το βιομηχανικό IoT, τα αυτόνομα οχήματα και οι κρίσιμες υπηρεσίες επικοινωνίας (Sauter, 2021; 3GPP TS 23.501).

Η NSA αρχιτεκτονική προσφέρει πλεονεκτήματα κυρίως ως προς την ταχεία υιοθέτηση και το χαμηλότερο κόστος, ωστόσο περιορίζεται από την εξάρτηση από τον πυρήνα LTE (EPC), γεγονός που επηρεάζει δυνατότητες όπως το network slicing και την πλήρη υποστήριξη υπηρεσιών URLLC (Sauter, 2021; 3GPP TS 23.501).

Αντίθετα, η SA παρέχει πλήρη ανεξαρτησία και μεγαλύτερη ευελιξία, αξιοποιώντας cloud-based αρχιτεκτονική και τον 5GC, αλλά απαιτεί σημαντικότερες επενδύσεις και εκτεταμένη αναβάθμιση υποδομών. Επιπλέον, η Standalone αρχιτεκτονική προσφέρει πλήρη έλεγχο και ενοποίηση των υπηρεσιών, μέσω του 5GC, ο οποίος βασίζεται σε cloud-native και service-based αρχιτεκτονική. Η SA υποδομή υποστηρίζει προηγμένες λειτουργίες authentication, ασφάλειας και κατανομής πόρων, οι οποίες δεν είναι εφικτές στο περιβάλλον NSA (3GPP TS 23.501). Παρότι η μετάβαση στη SA απαιτεί υψηλότερο κόστος και εκτεταμένες υποδομικές αλλαγές, θεωρείται απαραίτητη για την πλήρη αξιοποίηση των δυνατοτήτων που προσφέρει το 5G (Sauter, 2021).

Η Εικόνα 11.4 παρουσιάζει τις αρχιτεκτονικές NSA και SA του 5G. Η σύγκριση αναδεικνύει ότι η NSA βασίζεται στο EPC του LTE, ενώ η SA λειτουργεί ανεξάρτητα μέσω του 5GC.



Εικόνα 11.4: Αρχιτεκτονικές 5G Non-Standalone και Standalone. Πηγή: Shi et al. (2016)

11.4.2 Αρχιτεκτονική 5G-AN και 5G Core

Το 5G Access Network (5G-AN) αποτελεί το τμήμα του δικτύου 5G που ευθύνεται για την ασύρματη σύνδεση μεταξύ των τελικών συσκευών (User Equipment) και του πυρήνα του δικτύου (5G Core). Αποτελείται από τους σταθμούς βάσης 5G (gNB) και τους αναβαθμισμένους σταθμούς βάσης 4G (ng-eNB) που συνδέονται με το 5G Core (Sauter, 2021).

Το 5G-AN εκτελεί τρεις θεμελιώδεις λειτουργίες:

- Διαχείριση ραδιοσυνδέσεων (Radio Resource Management): Το 5G-AN διαχειρίζεται την ασύρματη επικοινωνία μεταξύ του User Equipment και του σταθμού βάσης. Περιλαμβάνει τον έλεγχο της εγκατάστασης, διατήρησης και τερματισμού της ραδιοσύνδεσης, τη διαχείριση της ισχύος μετάδοσης, καθώς και την επιλογή των κατάλληλων ρυθμών μετάδοσης και κωδικοποίησης ανάλογα με τις συνθήκες του καναλιού (3GPP TS 38.300; Sauter, 2021).

- Διαχείριση κινητικότητας (Handover between Cells): Όταν ένας χρήστης μετακινείται εντός της γεωγραφικής κάλυψης του δικτύου, η σύνδεσή του πρέπει να μεταφερθεί από μία περιοχή κάλυψης σε άλλη χωρίς διακοπή της υπηρεσίας. Το 5G-AN εκτελεί τη διαδικασία του handover, η οποία περιλαμβάνει την ανίχνευση της υποβάθμισης του σήματος του τρέχοντος κυττάρου, την επιλογή του καταλληλότερου γειτονικού κυττάρου και την ομαλή μετάβαση της σύνδεσης, διατηρώντας τη συνεχή παροχή υπηρεσίας (3GPP TS 38.300; Sauter, 2021).
- Δυναμική κατανομή ραδιοπόρων (Dynamic Resource Allocation): Το 5G-AN κατανέμει τις συχνότητες και τα χρονικά slots στους συνδεδεμένους χρήστες με βάση τις ανάγκες τους και τις συνθήκες του καναλιού. Ο scheduler του σταθμού βάσης διαρκώς αξιολογεί την ποιότητα του καναλιού κάθε χρήστη (μέσω αναφορών CQI) και αναθέτει πόρους προτεραιότητας σε χρήστες με απαιτητικές εφαρμογές (π.χ. video streaming, real-time gaming) ενώ ταυτόχρονα εξασφαλίζει δίκαιη κατανομή μεταξύ όλων των χρηστών (3GPP TS 38.300; Sauter, 2021).

Το 5G Core είναι ο πυρήνας του δικτύου και διαχειρίζεται την αυθεντικοποίηση των χρηστών, τη δρομολόγηση δεδομένων, την ποιότητα υπηρεσίας (QoS), το network slicing και την κινητικότητα (Sauter, 2021). Σε αντίθεση με το 4G που χρησιμοποιούσε point-to-point διεπαφές, το 5G Core χρησιμοποιεί Service-Based Architecture (SBA), όπου κάθε λειτουργία δικτύου επικοινωνεί μέσω APIs (3GPP TS 23.501, 2024).

Στο 5G Core υπάρχουν 9 βασικές Network Functions (NFs), οι οποίες αποτελούν τις θεμελιώδεις λειτουργίες του πυρήνα του δικτύου (Sauter, 2021). Κάθε Network Function έχει συγκεκριμένη αρμοδιότητα και επικοινωνεί με τις υπόλοιπες μέσω APIs. Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει συνοπτικά τις 9 βασικές Network Functions του 5G Core και τις κύριες ευθύνες κάθε λειτουργίας (3GPP TS 23.501, 2024; Sauter, 2021).

Πίνακας 11.4: Βασικές Network Functions του 5G Core και οι κύριες λειτουργίες τους

Network Functions	Λειτουργία
AMF (Access and Mobility Management Function)	Διαχείριση σύνδεσης και κινητικότητας
SMF (Session Management Function)	Διαχείριση PDU sessions
UPF (User Plane Function)	Μεταφορά δεδομένων (user plane traffic)
AUSF (Authentication Server Function)	Αυθεντικοποίηση χρηστών (5G-AKA / EAP-AKA')
UDM (Unified Data Management)	Διαχείριση ταυτότητας και δεδομένων συνδρομητών
PCF (Policy Control Function)	Πολιτικές QoS και πρόσβασης
NSSF (Network Slice Selection Function)	Επιλογή network slice για κάθε UE
NEF (Network Exposure Function)	Αποκαλύπτει ικανότητες δικτύου σε τρίτες εφαρμογές
NRF (Network Repository Function)	Αποθήκη και ανακάλυψη όλων των NFs

Υπάρχει διαχωρισμός μεταξύ Control Plane και User Plane στο 5G Core (3GPP TS 23.501, 2024). Το Control Plane περιλαμβάνει 8 από τις 9 λειτουργίες (AMF, SMF, AUSF, UDM, PCF, NSSF, NEF,

NRF) και είναι υπεύθυνο για την αυθεντικοποίηση των χρηστών, τη διαχείριση της κινητικότητας όταν ο χρήστης μετακινείται, τον ορισμό των πολιτικών ποιότητας υπηρεσίας (QoS), την επιλογή του κατάλληλου network slice, τη διαχείριση των sessions και την αποθήκευση όλων των λειτουργιών δικτύου. Με απλά λόγια, το Control Plane αποφασίζει αν επιτρέπεται η σύνδεση, με ποιο τρόπο θα γίνει και με ποιους όρους (3GPP TS 23.501, 2024).

Το User Plane περιλαμβάνει μόνο μία λειτουργία, την UPF (User Plane Function), και είναι υπεύθυνο για τη μεταφορά των πραγματικών δεδομένων των χρηστών (Sauter, 2021). Μεταφέρει βίντεο, ιστοσελίδες, αρχεία, φωνή και όλα τα δεδομένα που στέλνει και λαμβάνει ο χρήστης από το κινητό στο Internet και αντίστροφα.

Ο διαχωρισμός μεταξύ Control Plane και User Plane είναι σημαντικός γιατί επιτρέπει την τοποθέτηση της UPF στο edge του δικτύου (3GPP TS 23.501, 2024). Όταν η UPF τοποθετείται πιο κοντά στον χρήστη, η καθυστέρηση μειώνεται σημαντικά. Αυτό είναι απαραίτητο για εφαρμογές που απαιτούν πολύ χαμηλή καθυστέρηση, όπως βιομηχανία 4.0, αυτόνομα οχήματα, τηλεχειριζόμενα ρομπότ και παιχνίδια πραγματικού χρόνου (Sauter, 2021). Το Control Plane μπορεί να παραμείνει κεντρικό, ενώ το User Plane μπορεί να καταναμηθεί σε πολλά σημεία κοντά στους χρήστες (3GPP TS 23.501, 2024).

11.4.3 Ζώνες Συχνοτήτων: mmWave και Sub-6GHz

Η τεχνολογία 5G αξιοποιεί ένα ευρύ φάσμα ραδιοσυχνοτήτων που εκτείνεται από τις χαμηλότερες ζώνες sub-6GHz έως τις υψηλές ζώνες millimeter wave (mmWave) (ITU-R M.2083-0, 2015; Sauter, 2021). Οι συχνότητες sub-6GHz, όπως οι 700 MHz, 2.6 GHz και 3.5 GHz, προσφέρουν επαρκή εμβέλεια και δυνατότητα διείσδυσης σε κτίρια, καθιστώντας τις κατάλληλες για βασική κάλυψη (Sauter, 2021; Rancy, 2016). Αντιθέτως, οι ζώνες mmWave, άνω των 24 GHz, χαρακτηρίζονται από εξαιρετικά υψηλές ταχύτητες, αλλά περιορισμένη εμβέλεια και αδυναμία διείσδυσης σε εμπόδια, απαιτώντας πιο πυκνή υποδομή (Rancy, 2016).

Οι sub-6GHz ζώνες χρησιμοποιούνται κυρίως για την κάλυψη αγροτικών και ημιαστικών περιοχών, διασφαλίζοντας την παροχή συνδεσιμότητας με QoS. Η χαμηλότερη εξασθένιση του σήματος σε αυτές τις ζώνες επιτρέπει την υποστήριξη εφαρμογών όπως φωνητικές υπηρεσίες, mobile broadband και βασικές IoT εφαρμογές. Ειδικά σε πρώιμα στάδια ανάπτυξης του 5G, οι πάροχοι βασίστηκαν κυρίως στις sub-6GHz ζώνες λόγω της ευκολότερης ενσωμάτωσής τους στις υπάρχουσες υποδομές (Sauter, 2021).

Αντιθέτως, οι ζώνες mmWave είναι κατάλληλες για περιβάλλοντα υψηλής πυκνότητας, όπως αστικά κέντρα και εσωτερικοί χώροι με υψηλές απαιτήσεις σε εύρος ζώνης. Προσφέρουν εξαιρετικούς ρυθμούς μετάδοσης που υπερβαίνουν τα 10 Gbps, καθιστώντας τις ιδανικές για εφαρμογές όπως AR, VR και cloud gaming (Sauter, 2021; Rancy, 2016). Ωστόσο, απαιτούν πολλαπλούς σταθμούς βάσης μικρής εμβέλειας και τεχνικές όπως beamforming για να ενισχύσουν το σήμα (Sauter, 2021; Rangan et al., 2014).

Η τεχνολογία Dynamic Spectrum Sharing (DSS) έχει επιτρέψει τη σταδιακή υιοθέτηση του 5G χωρίς να χρειαστεί νέο φάσμα, επιτρέποντας την ταυτόχρονη λειτουργία LTE και 5G στο ίδιο φάσμα (3GPP TS 38.300; Sauter, 2021). Αυτή η πρακτική υλοποιείται κυρίως στις sub-6GHz ζώνες, διευκολύνοντας την ευρεία διάθεση υπηρεσιών 5G χωρίς σημαντικό κόστος αναβάθμισης για τους παρόχους.

Ο συνδυασμός sub-6GHz και mmWave στο 5G βελτιώνει την απόδοση, την ποιότητα και την ενέργεια. Το mmWave με massive MIMO και μικροκυψέλες εξυπηρετεί πολλές συσκευές σε μικρό χώρο. Το sub-6GHz κρατάει το δίκτυο σταθερό και αξιόπιστο (Rancy, 2016; Sauter, 2021). Οι βασικές διαφορές μεταξύ των ζωνών sub-6GHz και mmWave συνοψίζονται στον Πίνακα 11.5. Το sub-6GHz λειτουργεί σε συχνότητες κάτω από 6 GHz και προσφέρει υψηλή εμβέλεια και καλή

διείσδυση σε κτίρια, καθιστώντας το ιδανικό για ευρεία κάλυψη σε αγροτικές και αστικές περιοχές (Sauter, 2021; Rancy, 2016). Αντιθέτως, το mmWave λειτουργεί σε συχνότητες άνω των 24 GHz και προσφέρει πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, αλλά με χαμηλή εμβέλεια και περιορισμένη διείσδυση, απαιτώντας τεχνικές όπως beamforming και small cells για βελτιστοποίηση της απόδοσης (Rancy, 2016; Rangan et al., 2014; Sauter, 2021; 3GPP TS 38.300)

Πίνακας 11.5: Σύγκριση χαρακτηριστικών sub-6GHz και mmWave στο 5G

Χαρακτηριστικό	sub-6GHz	mmWave
Εύρος Συχνοτήτων	< 6 GHz	> 24 GHz
Εμβέλεια Σήματος	Υψηλή	Χαμηλή
Ικανότητα Διείσδυσης	Καλή	Περιορισμένη
Ενδεικτική Ταχύτητα	Μεσαία (100-700 Mbps)	Πολύ Υψηλή (1-10 Gbps)
Κάλυψη	Ευρεία κάλυψη	Τοπική (hotspots)
Εφαρμογές	Βασικές επικοινωνίες, IoT	AR/VR, gaming, video streaming
Τεχνικές Υποστήριξης	DSS, Massive MIMO	Beamforming, Small Cells, Massive MIMO

11.4.4 Edge Computing στο 5G

Το 5G υποστηρίζει την Edge δικτύωση, η οποία μεταφέρει την επεξεργασία και αποθήκευση δεδομένων από το κεντρικό cloud κοντά στους χρήστες (Shi et al., 2016; Sauter, 2021). Αυτό μειώνει την καθυστέρηση και βοηθά εφαρμογές πραγματικού χρόνου, όπως αυτόνομα οχήματα και βιομηχανία. Η λειτουργία των Edge κόμβων, σε επίπεδο σταθμών βάσης ή τοπικών data centers, επιτρέπει την αποκεντρωμένη διαχείριση των δεδομένων, βελτιώνοντας την απόδοση του συνολικού συστήματος (Sauter, 2021).

Η Multi-access Edge Computing (MEC) υποστηρίζει την υλοποίηση της Edge δικτύωσης στο 5G. Μέσω της MEC, οι τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι μπορούν να προσφέρουν υπηρεσίες υπολογιστικού νέφους (cloud computing) απευθείας από την άκρη του δικτύου, επιτρέποντας τοπική επεξεργασία, χαμηλή καθυστέρηση και βελτιστοποιημένη χρήση των πόρων (3GPP TS 23.501, 2024). Η MEC ενσωματώνεται στο 5G χωρίς να χρειάζεται να αλλάξει ο πυρήνας του δικτύου, γι' αυτό διαδίδεται γρήγορα (3GPP TS 23.501, 2024). Η MEC συνδέει το cloud με τους τοπικούς κόμβους, φτιάχνοντας ένα υβριδικό σύστημα επεξεργασίας (Sauter, 2021).

Μία από τις σημαντικότερες επιπτώσεις της Edge δικτύωσης είναι στην τεχνητή νοημοσύνη και μηχανική μάθηση, όπου τα δεδομένα επεξεργάζονται τοπικά και χρησιμοποιούνται για real-time αποφάσεις (Shi et al., 2016; Attar et al., 2022). Στα βιομηχανικά, αστικά και υγειονομικά συστήματα, αυτό φτιάχνει έξυπνα περιβάλλοντα με υψηλή αυτονομία (Shi et al., 2016). Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα Edge-enabled video analytics σε δίκτυα ασφαλείας ή η ανάλυση αισθητήρων σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις (Attar et al., 2022; Saad et al., 2020).

Η Edge τεχνολογία βελτιώνει την ενεργειακή απόδοση και ασφάλεια. Η τοπική επεξεργασία δεδομένων μειώνει την ανάγκη για συνεχή επικοινωνία με τον πυρήνα του δικτύου, εξοικονομώντας ενέργεια και μειώνοντας τη συμφόρηση. Ταυτόχρονα, τα δεδομένα μένουν τοπικά, αυξάνοντας την

ασφάλεια και την προστασία της ιδιωτικότητας, τα χαρακτηριστικά αυτά είναι ιδιαίτερα κρίσιμα σε τομείς όπως η τηλεϊατρική και η διαχείριση κρίσιμων υποδομών (Sauter, 2021).

Ωστόσο, η εφαρμογή της Edge αρχιτεκτονικής απαιτεί σημαντική αναδιοργάνωση των τηλεπικοινωνιακών δικτύων. Η ανάπτυξη νέων κόμβων, η ενσωμάτωση MEC πλατφορμών και η διασφάλιση διαλειτουργικότητας με το υπάρχον οικοσύστημα αποτελούν τεχνολογικές και στρατηγικές προκλήσεις. Οι πάροχοι πρέπει να επενδύσουν σε νέα μοντέλα υπηρεσιών και να αναπτύξουν σενάρια που αξιοποιούν τη χαμηλή καθυστέρηση και τοπική επεξεργασία (3GPP TS 23.501, 2024).

Η Edge δικτύωση στο 5G είναι καταλύτης για την επόμενη γενιά υπηρεσιών, παρέχοντας υποδομές για εφαρμογές στο IoT, έξυπνες πόλεις και ιατρική ακριβείας. Η δυνατότητα διαχείρισης τεράστιου όγκου δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και σε τοπικό επίπεδο αποτελεί βασικό πλεονέκτημα για την εξέλιξη των έξυπνων συστημάτων, με την Edge αρχιτεκτονική να είναι βασικό μέρος του 5G (Sauter, 2021).

11.4.5 Network Slicing και οι Εφαρμογές του

Το Network Slicing στο 5G χωρίζει το δίκτυο σε πολλά ανεξάρτητα τεμάχια (slices). Κάθε slice είναι εικονικό δίκτυο με δικούς του πόρους, για συγκεκριμένες απαιτήσεις απόδοσης, καθυστέρησης και αξιοπιστίας. Αυτό υποστηρίζει διαφορετικές υπηρεσίες σε ένα δίκτυο (Sauter, 2021; 3GPP TS 23.501, 2024).

Η τεχνική υλοποίηση του Network Slicing αξιοποιεί τεχνολογίες όπως η Εικονικοποίηση Δικτυακών Λειτουργιών (NFV) και η Δικτύωση Οριζόμενη από Λογισμικό (SDN). Χρησιμοποιεί NFV και SDN (Sauter, 2021). Είναι απαραίτητο για εφαρμογές που απαιτούν εγγυημένη απόδοση (Basilier et al., 2021).

Μέσω αυτών των τεχνολογιών, κάθε slice μπορεί να ρυθμιστεί ανεξάρτητα, με ειδικές ρυθμίσεις για πόρους και ποιότητα QoS. Η δυνατότητα αυτή καθιστά το δίκτυο πιο προσαρμοστικό, ικανό να ανταποκριθεί σε διαφορετικές εφαρμογές, από κρίσιμες υποδομές μέχρι ψυχαγωγικές υπηρεσίες (Sauter, 2021; 3GPP TS 23.501, 2024).

Η υιοθέτηση του Network Slicing είναι καθοριστική για περιβάλλοντα που απαιτούν αυστηρό έλεγχο ποιότητας, όπως το IoT, όπου εκατομμύρια αισθητήρες απαιτούν αποδοτική, χαμηλής ενέργειας συνδεσιμότητα. Επιπλέον, στον τομέα των έξυπνων πόλεων, τα slices μπορούν να εξυπηρετούν παράλληλα, για παράδειγμα, δίκτυα φωτισμού, παρακολούθησης κυκλοφορίας και διαχείρισης απορριμμάτων, με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Η δυνατότητα εξειδίκευσης διευκολύνει επίσης τις βιομηχανικές εφαρμογές, όπου η αξιοπιστία και η καθυστέρηση είναι κρίσιμες (Sauter, 2021; 3GPP TS 23.501, 2024).

Το πλαίσιο αυτό επεκτείνεται και στον τομέα της Υγείας, όπου το Network Slicing επιτρέπει την ασφαλή και αξιόπιστη διασύνδεση ιατρικών συσκευών και την υποστήριξη απομακρυσμένων χειρουργικών επεμβάσεων. Ειδικά slices μπορούν να δεσμεύονται για real-time υπηρεσίες υγείας, παρέχοντας χαμηλή καθυστέρηση και υψηλή διαθεσιμότητα (3GPP TS 23.501, 2024). Αντίστοιχα, στα αυτόνομα οχήματα, το δίκτυο μπορεί να προσφέρει ξεχωριστά slices για κρίσιμες λειτουργίες πλοήγησης και μη κρίσιμες εφαρμογές ενημέρωσης ή ψυχαγωγίας (Basilier et al., 2021).

Η εφαρμογή του Network Slicing σε επιχειρηματικά και δημόσια περιβάλλοντα επιτρέπει εξατομικευμένες υπηρεσίες. Οι πάροχοι μπορούν να προσφέρουν slices με διαφορετικές τιμές και συμφωνημένη απόδοση (SLAs - Service Level Agreement), επιτρέποντας νέα επιχειρηματικά μοντέλα και στοχευμένη εμπορική εκμετάλλευση (Basilier et al., 2021). Με ένα δίκτυο 5G και πολλά slices, μπορούμε να τρέχουμε εφαρμογές με διαφορετικές απαιτήσεις ταυτόχρονα. γεγονός που καθιστά τα δίκτυα ευκολότερα στη διαχείριση και προγραμματιζόμενα μέσω λογισμικού (Sauter, 2021)

11.4.6 Δίκτυο 5G και Internet of Things

Το Internet of Things (IoT) είναι ένας βασικός λόγος για την ανάπτυξη του 5G. Συνδέει εκατομμυρία συσκευές, από αισθητήρες θερμοκρασίας μέχρι wearable τεχνολογίες και βιομηχανικούς

αυτοματισμούς. Το 5G προσφέρει τις απαιτούμενες τεχνικές προδιαγραφές για αυτό τον λόγο. Το δίκτυο παρέχει δυνατότητες για μαζική συνδεσιμότητα, με χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση, υψηλή αξιοπιστία και διατήρηση χαμηλών επιπέδων καθυστέρησης (Sauter, 2021).

Μέσω της τεχνολογίας NB-IoT (Narrowband IoT) και άλλων προτύπων όπως LTE-M, το 5G μπορεί να υποστηρίξει συσκευές που απαιτούν μικρή χωρητικότητα μετάδοσης αλλά μεγάλη διάρκεια ζωής μπαταρίας. Αυτό είναι κρίσιμο για εφαρμογές σε τομείς όπως η αγροτική παραγωγή, η παρακολούθηση περιβαλλοντικών συνθηκών και η απομακρυσμένη επιτήρηση. Επιπλέον, η δυνατότητα ευέλικτης κατανομής πόρων μέσω Network Slicing ενισχύει την αξιοπιστία και την ασφάλεια της επικοινωνίας μεταξύ συσκευών (Andrews et al., 2014; Sauter, 2021; 3GPP TS 23.501, 2024).

Ο ρόλος του 5G στο IoT δεν περιορίζεται μόνο στην τεχνολογία. Επιτρέπει την ανάπτυξη καινοτόμων επιχειρηματικών μοντέλων βασισμένων σε δεδομένα, όπως το predictive maintenance σε βιομηχανικά περιβάλλοντα ή το usage-based insurance στις μεταφορές. Η συνεχής, αξιόπιστη σύνδεση δημιουργεί τις προϋποθέσεις για πλήρως αυτοματοποιημένες διαδικασίες και λήψη αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο (Attar et al., 2022; Saad et al., 2020).

Η υλοποίηση αυτών των σεναρίων απαιτεί όμως υψηλά επίπεδα κυβερνοασφάλειας, κάτι που το 5G αντιμετωπίζει μέσω εξελιγμένων μηχανισμών ταυτοποίησης, κρυπτογράφησης και διαχείρισης ταυτότητας των συνδεδεμένων συσκευών (Sauter, 2021; 3GPP TS 23.501, 2024). Η Ευρωπαϊκή Ένωση αναγνωρίζει ότι η ευρεία υιοθέτηση του 5G, ιδιαίτερα σε κρίσιμες υποδομές και IoT εφαρμογές, απαιτεί ισχυρά μέτρα μετριασμού κινδύνων, ώστε να διασφαλίζεται ένα υψηλό επίπεδο ασφάλειας και ανθεκτικότητας των δικτύων (European Commission, 2020).

11.4.7 Έξυπνες Πόλεις

Οι έξυπνες πόλεις (smart cities) βασίζονται στο 5G ως βασική υποδομή επικοινωνίας που επιτρέπει τη διαχείριση πόρων, μετακινήσεων, ενέργειας και ασφάλειας σε πραγματικό χρόνο. Η υψηλή πυκνότητα συνδέσεων, το network slicing και το edge computing επιτρέπουν την εγκατάσταση χιλιάδων αισθητήρων και μονάδων παρακολούθησης, που αλληλεπιδρούν σε πραγματικό χρόνο (Sauter, 2021).

Μέσα από τα slices του 5G, οι δήμοι μπορούν να εκχωρούν συγκεκριμένο εύρος ζώνης για διαφορετικές χρήσεις: κυκλοφοριακή ρύθμιση, διαχείριση απορριμμάτων, έλεγχο της ποιότητας αέρα ή υποδομές φωτισμού (Basilier et al., 2021). Το κάθε slice λειτουργεί ανεξάρτητα, προσαρμοσμένο στις ανάγκες του συγκεκριμένου υποσυστήματος, διασφαλίζοντας έτσι αξιοπιστία και χαμηλή καθυστέρηση (Basilier et al., 2021; 3GPP TS 23.501, 2024).

Η δυνατότητα edge computing εντός του αστικού δικτύου επιτρέπει επεξεργασία των δεδομένων τοπικά, χωρίς καθυστέρηση από κεντρικούς διακομιστές (Sauter, 2021). Αυτό υποστηρίζει εφαρμογές όπως έξυπνες διαβάσεις πεζών, άμεση ενημέρωση οδηγών για κίνηση ή ατυχήματα και δυναμική διαχείριση παροχής ενέργειας. Όλα αυτά ενισχύουν τη βιωσιμότητα, τη λειτουργικότητα και την ασφάλεια του αστικού περιβάλλοντος (Attar et al., 2022; Saad et al., 2020).

Η ενσωμάτωση του πολίτη στις έξυπνες υπηρεσίες μέσω εφαρμογών για κινητά, οι αυτόματες ειδοποιήσεις (push notifications) και προσωποποιημένα δεδομένα, επιτυγχάνεται μέσω των δυνατοτήτων εξατομίκευσης του 5G (Basilier et al., 2021). Οι έξυπνες πόλεις, επομένως, δεν είναι μόνο υποδομές αλλά και κοινωνικά διασυνδεδεμένα οικοσυστήματα.

11.4.8 Βιομηχανία 4.0

Η Βιομηχανία 4.0 αποτελεί το νέο μοντέλο βιομηχανικής παραγωγής, στο οποίο τα εργοστάσια μετατρέπονται σε «έξυπνα» συστήματα υψηλού επιπέδου αυτοματοποίησης. Σε αυτό το πλαίσιο, φυσικά και ψηφιακά συστήματα συνδυάζονται και συνεργάζονται μέσω τεχνολογιών όπως αισθητήρες, ρομποτική και δίκτυα επικοινωνίας, επιτρέποντας τη συνεχή ανταλλαγή δεδομένων και τη λήψη αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο (Sauter, 2021; Basilier et al., 2021).

Το 5G είναι βασικό για τη Βιομηχανία 4.0 γιατί επιτρέπει πολύ γρήγορη, σταθερή και ταυτόχρονη επικοινωνία πολλών συσκευών. Αυτά τα χαρακτηριστικά είναι κρίσιμα για την ομαλή λειτουργία

διαδικασιών όπως ο έλεγχος ρομποτικών βραχιόνων και η ανταλλαγή δεδομένων από αισθητήρες που παρακολουθούν την παραγωγή σε πραγματικό χρόνο (Sauter, 2021).

Μέσω της χρήσης MIMO και mmWave τεχνολογιών, οι εγκαταστάσεις παραγωγής μπορούν να εξυπηρετήσουν ταυτόχρονα μεγάλο αριθμό συσκευών και μηχανημάτων χωρίς υπερφόρτωση στο δίκτυο (Talwar et al., 2014). Η αυξημένη πυκνότητα συνδέσεων που υποστηρίζεται από το 5G εξασφαλίζει συνεχή διασύνδεση μεταξύ μηχανημάτων (machine-to-machine, M2M) αλλά και ανάμεσα στους εργαζόμενους και τα συστήματα παρακολούθησης, διευκολύνοντας τον συγχρονισμό όλων των παραγωγικών βημάτων (Sauter, 2021). Οι έξυπνοι αισθητήρες στο εργοστάσιο εντοπίζουν αμέσως προβλήματα και βοηθούν την παραγωγή να προσαρμόζεται αυτόματα (Attar et al., 2022; Saad et al., 2020).

Το Network Slicing προσφέρει τη δυνατότητα διαμόρφωσης ιδιωτικών λογικών υποδικτύων με διαφορετική ποιότητα, ταχύτητα και ασφάλεια για κάθε χρήση (Basilier et al., 2021). Αυτό είναι σημαντικό γιατί οι βασικές λειτουργίες (όπως ρομπότ και αυτοματισμοί) προστατεύονται και δεν επηρεάζονται από λιγότερο σημαντικά δεδομένα. Έτσι, οι σημαντικές διαδικασίες συνεχίζουν να λειτουργούν κανονικά, ακόμα και όταν υπάρχει πολλή κίνηση στο δίκτυο (Basilier et al., 2021; 3GPP TS 23.501, 2024).

Το edge computing σημαίνει ότι τα δεδομένα επεξεργάζονται τοπικά, κοντά στην πηγή τους, χωρίς να στέλνονται σε μακρινούς υπολογιστές, ώστε οι αποφάσεις να παίρνονται πιο γρήγορα (Sauter, 2021). Αυτό μειώνει σημαντικά την καθυστέρηση, ενισχύοντας την ταχύτητα με την οποία ένα σύστημα αντιδρά σε αλλαγές ή προβλήματα. Σε συνδυασμό με τις προηγμένες δυνατότητες του 5G, η Βιομηχανία 4.0 καθίσταται ικανή να υλοποιήσει πλήρως εύελικτες και έξυπνες γραμμές παραγωγής με υψηλά επίπεδα αυτονομίας και προσαρμοστικότητας (Talwar et al., 2014).

11.4.9 Υγεία

Η αξιοποίηση της τεχνολογίας 5G στον χώρο της υγείας επιταχύνει τη μετάβαση προς ένα πιο ψηφιακό, διασυνδεδεμένο και αποδοτικό σύστημα περίθαλψης (Basilier et al., 2021). Η εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση του 5G καθιστά εφικτή την απομακρυσμένη ρομποτική χειρουργική, όπου η ακρίβεια στην κίνηση και η αμεσότητα της απόκρισης είναι ζωτικής σημασίας. Μέσω αυτής της τεχνολογίας, χειρουργικές επεμβάσεις μπορούν να εκτελούνται με υψηλή ασφάλεια, ακόμα και όταν ο χειρουργός βρίσκεται σε διαφορετική γεωγραφική τοποθεσία από τον ασθενή (Sauter, 2021).

Η συνεχής παρακολούθηση ασθενών με έξυπνες συσκευές και αισθητήρες είναι ένα ακόμη σημαντικό πλεονέκτημα. Οι μετρήσεις όπως οι καρδιακοί παλμοί, η πίεση και τα επίπεδα σακχάρου μπορούν να συλλέγονται και να αποστέλλονται σε πραγματικό χρόνο προς τους ιατρούς, διευκολύνοντας την πρόληψη κρίσεων και την εξατομικευμένη αντιμετώπιση των περιστατικών. Οι υποδομές edge computing εξασφαλίζουν τη γρήγορη επεξεργασία των δεδομένων σε τοπικό επίπεδο, μειώνοντας δραστηρικά τον χρόνο απόκρισης (Rappaport et al., 2015; Attar et al., 2022).

Παράλληλα, η τηλεϊατρική ενισχύεται σημαντικά μέσα από την ευρυζωνική πρόσβαση και τη σταθερότητα των 5G δικτύων. Οι ασθενείς μπορούν να επικοινωνούν με γιατρούς εξ αποστάσεως, να υποβάλλονται σε διαγνώσεις και να παρακολουθούν θεραπευτικές αγωγές, χωρίς την ανάγκη φυσικής παρουσίας (Sauter, 2021). Η δυνατότητα αυτή είναι ιδιαίτερα κρίσιμη για απομακρυσμένες και δυσπρόσιτες περιοχές, δίνοντας σε όλους την ίδια δυνατότητα να χρησιμοποιούν υπηρεσίες υγείας και ενισχύοντας την υγειονομική κάλυψη του πληθυσμού (Sauter, 2021).

Το 5G συμβάλλει επίσης στην εσωτερική οργάνωση νοσηλευτικών μονάδων μέσω της τεχνολογίας network slicing (Basilier et al., 2021). Οι εφαρμογές κρίσιμης σημασίας, όπως τα συστήματα ΜΕΘ ή οι απινιδωτές, λειτουργούν σε απομονωμένα και προστατευμένα slices του δικτύου, με εγγυημένη απόδοση, διαθεσιμότητα και ασφάλεια. Έτσι, οι βασικές υπηρεσίες λειτουργούν κανονικά, ακόμα και όταν το δίκτυο είναι πολύ φορτωμένο.

11.4.10 Αυτόνομα Οχήματα

Το 5G είναι πολύ σημαντικό για τα αυτόνομα οχήματα, γιατί επιτρέπει γρήγορη και αξιόπιστη ανταλλαγή δεδομένων για να κινούνται με ασφάλεια και αποτελεσματικότητα. Ένα αυτόνομο όχημα βασίζεται στη συνεχή ροή πληροφοριών από αισθητήρες, κάμερες, ραντάρ και συστήματα πλοήγησης, τα οποία πρέπει να συγχρονίζονται και να ανταλλάσσουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο. Το 5G εξασφαλίζει ότι αυτή η ανταλλαγή γίνεται χωρίς καθυστερήσεις, διευκολύνοντας την άμεση λήψη αποφάσεων κατά την οδήγηση (Sauter, 2021).

Η τεχνολογία V2X, με τη βοήθεια του 5G, επιτρέπει στα οχήματα να επικοινωνούν με άλλα οχήματα, με τις υποδομές του δρόμου, με πεζούς και με το διαδίκτυο (Garcia et al., 2021). Αυτή η διασύνδεση βοηθά στην καλύτερη κατανόηση της κυκλοφορίας, ώστε να αποφεύγονται ατυχήματα και να ρυθμίζεται πιο αποτελεσματικά η κίνηση στους δρόμους (Garcia et al., 2021). Το δίκτυο 5G υποστηρίζει αυτή τη δυναμική αλληλεπίδραση με εξαιρετικά υψηλό ρυθμό μετάδοσης και εξαιρετική σταθερότητα (Sauter, 2021).

Η ενσωμάτωση edge computing στο πλαίσιο της αυτόνομης οδήγησης ενισχύει περαιτέρω την απόδοση, επιτρέποντας στα δεδομένα να επεξεργάζονται τοπικά, κοντά στο όχημα. Αυτό μειώνει την ανάγκη για επικοινωνία με απομακρυσμένα κέντρα δεδομένων και βελτιώνει την ταχύτητα απόκρισης του συστήματος, κάτι το οποίο είναι κρίσιμο για την ασφάλεια (Sauter, 2021). Η δυνατότητα γρήγορης ανάλυσης δεδομένων οδηγεί σε αποφάσεις που βασίζονται σε πραγματικές συνθήκες του δρόμου και σε αντιδράσεις ακριβείας από το όχημα.

Η αξιοπιστία του 5G είναι πολύ σημαντική για να χρησιμοποιηθούν ευρέως τα αυτόνομα οχήματα. Η ποιότητα υπηρεσίας (QoS) μέσω του network slicing επιτρέπει τη δημιουργία ειδικών καναλιών επικοινωνίας για σημαντικές λειτουργίες ασφαλείας. Με αυτόν τον τρόπο, τα δεδομένα του οχήματος ξεχωρίζουν από την υπόλοιπη κίνηση του δικτύου, κάτι που κάνει τα οχήματα πιο ασφαλή και πιο σταθερά στη λειτουργία τους.

11.5 Σύγκριση 3G, 4G και 5G

Η εξέλιξη των κινητών δικτύων από την τρίτη (3G), στην τέταρτη (4G) και στην πέμπτη γενιά (5G) αντικατοπτρίζει τη συνεχή βελτίωση στις δυνατότητες ασύρματης επικοινωνίας και στη μετάβαση προς πιο προηγμένα ψηφιακά οικοσυστήματα (Sauter, 2021).

Το 3G αποτέλεσε την πρώτη ευρεία προσπάθεια παροχής κινητού internet, υποστηρίζοντας βασικές υπηρεσίες όπως η περιήγηση στο διαδίκτυο και η ανταλλαγή μηνυμάτων, με σχετικά περιορισμένες ταχύτητες.

Το 4G βελτίωσε σημαντικά την εμπειρία χρήσης, προσφέροντας υψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, σταθερότερη σύνδεση και δυνατότητα υποστήριξης εφαρμογών όπως video streaming, κοινωνικά δίκτυα και υπηρεσίες υψηλής ανάλυσης σε πραγματικό χρόνο.

Το 5G εισάγει μια νέα εποχή δικτύων, όπου η έμφαση δεν δίνεται μόνο στην ταχύτητα, αλλά και στην εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση, στην υψηλή αξιοπιστία και στη μαζική συνδεσιμότητα συσκευών (Sauter, 2021; ITU-R M.2083-0, 2015). Τα χαρακτηριστικά αυτά επιτρέπουν την ανάπτυξη προηγμένων εφαρμογών όπως η Βιομηχανία 4.0, τα αυτόνομα οχήματα, η τηλεϊατρική και οι έξυπνες πόλεις, δημιουργώντας ένα πλήρως διασυνδεδεμένο ψηφιακό περιβάλλον.

Οι βασικές διαφορές μεταξύ των τριών γενεών συνοψίζονται στον Πίνακα 11.6 (Sauter, 2021; Goldsmith, 2005; Dahlman et al., 2011; 3GPP TS 38.300; ITU-R M.2083-0, 2015).

Πίνακας 11.6: Σύγκριση τεχνολογιών 3G, 4G και 5G

Χαρακτηριστικό	3G (UMTS/HSPA)	4G (LTE/LTE-A)	5G (NR)
----------------	----------------	----------------	---------

Εποχή ανάπτυξης	2000-2010	2009–2019	2019+
Τεχνολογία πρόσβασης	WCDMA	OFDMA / SC-FDMA	OFDMA/massive MIMO
Ενδεικτική Μέγιστη ταχύτητα	~384 kbps (UMTS) / ~14.4 Mbps (HSPA)	~150 Mbps (LTE) / ~1 Gbps (LTE-A)	>10 Gbps
Ενδεικτική Καθυστέρηση	~150-200 ms	~10–30 ms	<1 ms
Αρχιτεκτονική πυρήνα	Circuit+Packet	All-IP (EPC)	Service-Based (5GC)
Φωνή	Circuit-switched	VoLTE (IP)	VoNR (IP)
Φάσμα	850 MHz - 2.1 GHz	700 MHz – 2.6 GHz	sub-6GHz & mmWave (>24 GHz)
IoT υποστήριξη	Περιορισμένη	Μέτρια (NB-IoT, LTE-M)	Πλήρης (mMTC)
Network Slicing	Όχι	Όχι	Ναι
Edge Computing	Όχι	Περιορισμένο	Πλήρες (MEC)
Βασικές εφαρμογές	Φωνή, mobile internet	HD video, VoIP, mobile broadband	IoT, αυτόνομα οχήματα, Βιομηχανία 4.0

Συνολικά, η μετάβαση από το 3G στο 5G δεν αποτελεί απλή εξέλιξη ταχύτητας, αλλά θεμελιώδη αλλαγή στον τρόπο με τον οποίο τα δίκτυα υποστηρίζουν την κοινωνία και την οικονομία.

11.6 Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκε η εξέλιξη των δικτύων WWAN από το 3G στο 5G. Το 3G (UMTS/HSPA) εισήγαγε την ευρυζωνική κινητή πρόσβαση μέσω WCDMA, το 4G (LTE) καθιέρωσε το μοντέλο All-IP με σημαντική βελτίωση ταχυτήτων και καθυστέρησης μέσω OFDMA και MIMO, ενώ το 5G αποτελεί θεμελιώδη μετασχηματισμό μέσω τεχνολογιών όπως massive MIMO, network slicing και edge computing.

Κάθε γενιά δεν αντικατέστησε απλώς την προηγούμενη σε ταχύτητα, αλλά επέκτεινε τις δυνατότητες του δικτύου σε νέους τομείς. Το 5G ειδικότερα, με τις τρεις κατηγορίες υπηρεσιών (eMBB, URLLC, mMTC) και τη service-based αρχιτεκτονική του 5G Core, ανοίγει τον δρόμο σε εφαρμογές κρίσιμης σημασίας όπως η τηλεχειρουργική, τα αυτόνομα οχήματα, η Βιομηχανία 4.0 και οι έξυπνες πόλεις.

Ωστόσο, η πλήρης αξιοποίηση του 5G εξαρτάται από τη μετάβαση στην αρχιτεκτονική Standalone, τη διαχείριση φάσματος σε ζώνες sub-6 GHz και mmWave, καθώς και από την αντιμετώπιση ζητημάτων ασφάλειας και κλιμάκωσης. Οι τεχνολογίες του 5G αποτελούν τη βάση πάνω στην οποία θα χτιστεί η επόμενη γενιά κινητών επικοινωνιών (6G), η οποία αναμένεται να επεκτείνει περαιτέρω τα όρια της συνδεσιμότητας, της νοημοσύνης και της αλληλεπίδρασης μεταξύ ανθρώπου και δικτύου.

Συνολικά, η μετάβαση από το 3G στο 5G καταδεικνύει ότι η εξέλιξη των κινητών δικτύων δεν αφορά μόνο την αύξηση των επιδόσεων, αλλά και τη μετάβαση προς πιο ευέλικτες, αποδοτικές και έξυπνες υποδομές επικοινωνίας.

Κεφάλαιο 12ο: Εφαρμογές και Μελλοντικές Προοπτικές

12.1 Τάσεις Ενοποίησης Τεχνολογιών

Η εξέλιξη των ασύρματων επικοινωνιών χαρακτηρίζεται από μια διαρκή τάση ενοποίησης και σύγκλισης τεχνολογιών, με στόχο τη δημιουργία ευέλικτων, αποδοτικών και πλήρως διασυνδεδεμένων δικτύων. Από τις πρώτες ασύρματες τεχνολογίες, όπως το IEEE 802.11 (Wi-Fi) και το Bluetooth, έως τα σύγχρονα δίκτυα πέμπτης γενιάς (5G), η ενσωμάτωση διαφορετικών τεχνολογιών σε ένα ενιαίο οικοσύστημα έχει αποτελέσει βασικό παράγοντα τεχνολογικής εξέλιξης. Οι σύγχρονες υποδομές δεν λειτουργούν πλέον ως ανεξάρτητα συστήματα, αλλά ως τμήματα ενός ενοποιημένου περιβάλλοντος που υποστηρίζει διαλειτουργικότητα και αποτελεσματικότερη διαχείριση των διαθέσιμων πόρων (Saad et al., 2020).

Η σύγκλιση μεταξύ δικτύων σταθερής και κινητής πρόσβασης συμβάλλει στη βελτίωση της εμπειρίας του τελικού χρήστη και στην αποτελεσματικότερη αξιοποίηση των υποδομών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η αρχιτεκτονική Fixed-Mobile Convergence (FMC), η οποία στοχεύει στη διασφάλιση απρόσκοπτης μετάβασης των χρηστών μεταξύ ετερογενών δικτύων, όπως Wi-Fi και κυψελοειδή δίκτυα, με ελάχιστη ή μηδενική διακοπή της υπηρεσίας (Talwar et al., 2014).

Η τάση της ενοποίησης επεκτείνεται και στο επίπεδο των εφαρμογών. Η σύγκλιση μεταξύ επικοινωνίας, υπολογισμού και ανάλυσης δεδομένων αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό των σύγχρονων και μελλοντικών δικτύων. Σε αυτό το πλαίσιο, τεχνολογίες όπως το edge computing, το cloud computing, η εικονικοποίηση και η τεχνητή νοημοσύνη συνεισφέρουν στη δημιουργία πιο προσαρμοστικών και αποδοτικών δικτύων (Ahmad et al., 2022; Saad et al., 2020).

Η ενοποίηση τεχνολογιών αποτελεί σημαντικό παράγοντα για παρόχους τηλεπικοινωνιών, βιομηχανίες και κατασκευαστές συσκευών, καθώς συμβάλλει στη βελτίωση της λειτουργικότητας, στην αποδοτικότερη αξιοποίηση των πόρων, στην ενίσχυση της ασφάλειας και στη μεγαλύτερη ανθεκτικότητα των δικτύων απέναντι σε βλάβες ή διακοπές λειτουργίας. Η τάση αυτή αναμένεται να ενισχυθεί περαιτέρω κατά τη μετάβαση προς τα δίκτυα 6G, όπου η σύγκλιση δικτύωσης, υπολογιστικής ισχύος και τεχνητής νοημοσύνης θα αποτελέσει βασικό χαρακτηριστικό της αρχιτεκτονικής τους (Alsabah et al., 2021).

12.2 Ο Ρόλος του 6G στο Μέλλον

Το 6G αποτελεί την επόμενη μεγάλη εξέλιξη στην ιστορία των ασύρματων επικοινωνιών. Η νέα αυτή τεχνολογία δεν αποτελεί απλώς μια βελτίωση του 5G, αλλά ένα νέο πρότυπο επικοινωνίας που αναμένεται να επηρεάσει σημαντικά την οικονομία, τη βιομηχανία και την καθημερινή ζωή.

Σε αντίθεση με τα προηγούμενα πρότυπα που επικεντρώνονταν κυρίως στην αύξηση της ταχύτητας και της φασματικής αποδοτικότητας, το 6G σχεδιάζεται ως ένα ολοκληρωμένο οικοσύστημα στο

οποίο η δικτύωση, η υπολογιστική ισχύς και η ανάλυση δεδομένων θα λειτουργούν ως ένα ενιαίο σύστημα. Η προσέγγιση αυτή αναμένεται να υποστηρίξει εφαρμογές όπως το tactile internet, τα γνωστικά δίκτυα (cognitive networks) και προηγμένες μορφές ψηφιακής αλληλεπίδρασης.

Βασικές τεχνολογίες του 6G περιλαμβάνουν τις επικοινωνίες Terahertz, τα Intelligent Reflecting Surfaces (IRS), τα Optical Wireless Communications και τα κατακεντρωμένα cell-free δίκτυα. Οι τεχνολογίες αυτές αναμένεται να προσφέρουν εξαιρετικά υψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων και εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση, ενώ η ενσωμάτωση τεχνητής νοημοσύνης και edge computing θα επιτρέψει την ανάπτυξη ευφών και αυτοπροσαρμοζόμενων δικτύων (Alsabab et al., 2021).

Παράλληλα, η ενσωμάτωση δυνατοτήτων sensing και smart surfaces θα επιτρέψει στα δίκτυα να αλληλεπιδρούν πιο αποτελεσματικά με το περιβάλλον τους. Ως αποτέλεσμα, εφαρμογές όπως η ολογραφική τηλεπαρουσία (holographic teleportation), η τηλεχειρουργική, τα πλήρως αυτόνομα οχήματα και οι έξυπνες πόλεις αναμένεται να αποκτήσουν ευρεία πρακτική εφαρμογή, μετασχηματίζοντας τομείς όπως η υγεία, η εκπαίδευση, οι μεταφορές και η γεωργία (Saad et al., 2020; Alsabab et al., 2021).

Ωστόσο, η ανάπτυξη του 6G συνοδεύεται από σημαντικές προκλήσεις, όπως η αξιόπιστη μετάδοση σε πολύ υψηλές συχνότητες, η αυξημένη κατανάλωση ενέργειας, οι νέες απαιτήσεις ασφάλειας και η ανάγκη δημιουργίας διεθνών προτύπων και κανονισμών (Alsabab et al., 2021).

Συνολικά, το 6G αναμένεται να αποτελέσει βασικό πυλώνα της επόμενης ψηφιακής εποχής, προσφέροντας νέες δυνατότητες επικοινωνίας και διασύνδεσης. Η επιτυχής υλοποίησή του θα εξαρτηθεί από την πρόοδο της έρευνας, τις επενδύσεις σε νέες τεχνολογίες και τη διεθνή συνεργασία για την ανάπτυξη κοινών προτύπων και πλαισίων λειτουργίας.

Συμπερασματικά, το 6G δεν αποτελεί απλώς μια τεχνολογική βελτίωση, αλλά ένα αναπόσπαστο μέρος της ψηφιακής μετάβασης της κοινωνίας. Με τις κατάλληλες επενδύσεις σε έρευνα και ανάπτυξη, καθώς και με διεθνή συνεργασία, το 6G θα είναι δυνατό να υλοποιηθεί και να φέρει επαναστατικές αλλαγές στη ζωή των ανθρώπων σε ολόκληρο τον κόσμο (Ahmad et al., 2022; Alsabab et al., 2021).

12.3 Η Σημασία της Ασφάλειας και της Ιδιωτικότητας

Η ασφάλεια και η προστασία της ιδιωτικότητας αποτελούν θεμελιώδεις προϋποθέσεις για τη λειτουργία των σύγχρονων και μελλοντικών δικτύων επικοινωνιών. Η συνεχής αύξηση του αριθμού των συνδεδεμένων συσκευών, σε συνδυασμό με την πολυπλοκότητα των δικτυακών υποδομών, δημιουργεί νέες προκλήσεις και αυξάνει την έκθεση των συστημάτων σε κυβερνοαπειλές. Στα δίκτυα 5G, τεχνολογίες όπως το network slicing, το edge computing και η υποστήριξη κρίσιμων υπηρεσιών εισάγουν πρόσθετες απαιτήσεις ασφάλειας και προστασίας δεδομένων (Sauter, 2021).

Η ανάγκη για αξιόπιστη προστασία είναι ιδιαίτερα σημαντική σε εφαρμογές όπως τα αυτόνομα οχήματα, η τηλεϊατρική και οι έξυπνες πόλεις, όπου η διαθεσιμότητα και η ακεραιότητα των δεδομένων είναι ζωτικής σημασίας. Για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων χρησιμοποιούνται τεχνολογίες όπως η κρυπτογράφηση από άκρο σε άκρο, οι μηχανισμοί αυθεντικοποίησης χρηστών και συσκευών, καθώς και προηγμένες μέθοδοι προστασίας της ταυτότητας και της επικοινωνίας (Ahmad et al., 2022; Sicari et al., 2020).

Παράλληλα, η συμμόρφωση με κανονιστικά πλαίσια, όπως ο GDPR στην Ευρωπαϊκή Ένωση, απαιτεί την εφαρμογή πολιτικών που διασφαλίζουν τη διαφάνεια στη διαχείριση των προσωπικών δεδομένων και την προστασία των δικαιωμάτων των χρηστών. Για να παραμένουν αξιόπιστα τα δίκτυα, είναι σημαντικό να προστατεύονται τόσο οι υποδομές όσο και η αλυσίδα εφοδιασμού, αφού τυχόν κενά ασφάλειας στους προμηθευτές μπορεί να προκαλέσουν ευρύτερα προβλήματα (ENISA, 2023;). Παράλληλα, η ιδιωτικότητα πρέπει να εξετάζεται συνολικά, καθώς ακόμη και έμμεσα δεδομένα επικοινωνίας μπορούν να αποκαλύψουν κρίσιμες πληροφορίες για τον χρήστη.

Η ασφάλεια στα σύγχρονα δίκτυα δεν περιορίζεται μόνο στην αποτροπή μη εξουσιοδοτημένης πρόσβασης, αλλά επεκτείνεται και στη διατήρηση της εμπιστοσύνης μεταξύ χρηστών, συσκευών και παρόχων υπηρεσιών. Σε περιβάλλοντα όπου μεταδίδονται ευαίσθητα ή κρίσιμα δεδομένα, ακόμη και

μικρές παραβιάσεις μπορούν να έχουν σημαντικές λειτουργικές και κοινωνικές συνέπειες. Για τον λόγο αυτό, η ασφάλεια και η ιδιωτικότητα πρέπει να αντιμετωπίζονται ως ενιαίες και διαρκείς απαιτήσεις καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του δικτύου.

Επιπλέον, η συνεχής εξέλιξη των κυβερνοαπειλών, όπως οι επιθέσεις άρνησης υπηρεσίας (DoS), η πλαστογράφηση ταυτότητας (spoofing) και οι παρεμβολές σημάτων (jamming), καθιστά αναγκαία την υιοθέτηση προληπτικών στρατηγικών προστασίας. Για τον λόγο αυτό, η προσέγγιση «security by design», δηλαδή η ενσωμάτωση μηχανισμών ασφάλειας από το στάδιο του σχεδιασμού των συστημάτων, θεωρείται βασική προϋπόθεση για την ανάπτυξη ασφαλών και αξιόπιστων δικτύων επόμενης γενιάς (ENISA, 2023).

12.4 Μελλοντικές Προκλήσεις: Φάσμα και Κλιμάκωση

Η διαχείριση του φάσματος και η κλιμάκωση των δικτύων αποτελούν δύο από τις σημαντικότερες προκλήσεις για τις σύγχρονες και μελλοντικές ασύρματες επικοινωνίες. Η συνεχής αύξηση της ζήτησης για ασύρματες υπηρεσίες, σε συνδυασμό με την εξάπλωση των εφαρμογών του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT), δημιουργεί αυξημένες απαιτήσεις σε διαθέσιμο φάσμα και δικτυακούς πόρους (Saad et al., 2020).

Η διαθεσιμότητα του ραδιοφάσματος, ιδιαίτερα στις ζώνες κάτω των 6 GHz και στις mmWave συχνότητες, είναι περιορισμένη και απαιτεί αποτελεσματική διαχείριση. Η συνύπαρξη διαφορετικών τεχνολογιών και υπηρεσιών καθιστά αναγκαία την υιοθέτηση ευέλικτων μεθόδων κατανομής πόρων, όπως η κοινή χρήση φάσματος (spectrum sharing), με στόχο τη βέλτιστη αξιοποίηση των διαθέσιμων συχνοτήτων (Rappaport et al., 2015).

Παράλληλα, η κλιμάκωση των δικτύων αποτελεί κρίσιμο ζήτημα, καθώς τα δίκτυα νέας γενιάς καλούνται να εξυπηρετήσουν δισεκατομμύρια συνδεδεμένες συσκευές, εφαρμογές υψηλής αξιοπιστίας και χρήστες με συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις σε ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Η διαχείριση μεγάλου αριθμού ταυτόχρονων συνδέσεων, η υποστήριξη υψηλής κινητικότητας και η διατήρηση χαμηλής καθυστέρησης αποτελούν βασικές προκλήσεις για τον σχεδιασμό των μελλοντικών δικτύων (Sauter, 2021).

Για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων, απαιτείται η υιοθέτηση προηγμένων αρχιτεκτονικών, όπως τα cloud-native δίκτυα και η εικονικοποίηση δικτυακών λειτουργιών (Network Function Virtualization - NFV). Επιπλέον, η αξιοποίηση τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης μπορεί να συμβάλει στη δυναμική διαχείριση πόρων και στη βελτιστοποίηση της απόδοσης των δικτύων σε πραγματικό χρόνο (Saad et al., 2020).

Τέλος, ιδιαίτερη σημασία έχει η διασφάλιση ισότιμης πρόσβασης στις υπηρεσίες επικοινωνίας, ανεξάρτητα από τη γεωγραφική θέση των χρηστών. Η παροχή αξιόπιστης συνδεσιμότητας σε αγροτικές και απομακρυσμένες περιοχές αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη μείωση του ψηφιακού χάσματος και την επίτευξη μιας πιο ισόρροπης ψηφιακής ανάπτυξης.

12.5 Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία εξέτασε την εξέλιξη των ασύρματων επικοινωνιών, από τα πρώτα πρότυπα κινητών δικτύων έως τις μελλοντικές τεχνολογίες της έκτης γενιάς (6G). Μέσα από την ανάλυση των διαφόρων γενεών κινητών δικτύων, καταδείχθηκε ότι κάθε γενιά αντιμετώπισε συγκεκριμένες ανάγκες της εποχής της και έθεσε τα θεμέλια για την επόμενη εξελικτική βαθμίδα.

Από την πρώτη γενιά (1G), που εισήγαγε την αναλογική φωνητική επικοινωνία, μέχρι την πέμπτη γενιά (5G), που υποστηρίζει υψηλές ταχύτητες, χαμηλή καθυστέρηση και μαζική σύνδεση συσκευών IoT, η εξέλιξη υπήρξε ραγδαία (Saad et al., 2020). Κάθε μετάβαση συνοδεύτηκε από νέες τεχνολογίες, νέα πρότυπα και νέες προκλήσεις, αλλά και από σημαντικές ευκαιρίες για την κοινωνία και την οικονομία.

Η εργασία ανέδειξε τον κρίσιμο ρόλο βασικών τεχνολογιών, όπως το OFDM, το MIMO, το network slicing και το edge computing, οι οποίες αποτέλεσαν τους πυλώνες των σύγχρονων δικτύων.

Παράλληλα, εξετάστηκαν ζητήματα ασφάλειας και ιδιωτικότητας, τα οποία καθίστανται ολοένα και πιο σύνθετα καθώς τα δίκτυα γίνονται πιο πολύπλοκα και διασυνδεδεμένα.

Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στις προοπτικές του 6G, το οποίο αναμένεται να ενσωματώσει προηγμένες τεχνολογίες, όπως οι επικοινωνίες Terahertz, η τεχνητή νοημοσύνη και τα έξυπνα προγραμματιζόμενα περιβάλλοντα επικοινωνίας. Οι τεχνολογίες αυτές εκτιμάται ότι θα υποστηρίξουν νέες εφαρμογές στους τομείς της υγείας, των μεταφορών, της βιομηχανίας και των έξυπνων πόλεων, συμβάλλοντας στον περαιτέρω ψηφιακό μετασχηματισμό της κοινωνίας (Saad et al., 2020).

Παράλληλα, η μετάβαση στο 6G δεν αφορά μόνο την αύξηση της χωρητικότητας και τη μείωση της καθυστέρησης, αλλά και τον επανασχεδιασμό της δικτυακής αρχιτεκτονικής με βάση την νοημοσύνη δικτύου, την αυτοματοποίηση και τη βιωσιμότητα. Η ενσωμάτωση τεχνητής νοημοσύνης, η βελτιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης και η υποστήριξη ετερογενών εφαρμογών αναμένεται να αποτελέσουν καθοριστικούς παράγοντες για την πρακτική υλοποίηση των μελλοντικών συστημάτων επικοινωνίας.

Παρά τις σημαντικές δυνατότητες που προσφέρει το 6G, εξακολουθούν να υπάρχουν τεχνικές, οικονομικές και κανονιστικές προκλήσεις, όπως η αποδοτική αξιοποίηση του φάσματος, η ενεργειακή κατανάλωση, η κυβερνοασφάλεια και η εξασφάλιση ισότιμης πρόσβασης στις νέες τεχνολογίες (Rappaport et al., 2015; Ahmad et al., 2022; ENISA, 2023). Επιπλέον, η διαχείριση του φάσματος, η κλιμάκωση των δικτύων και η διασφάλιση ίσης πρόσβασης σε αγροτικές και απομακρυσμένες περιοχές αποτελούν ζητήματα που απαιτούν τόσο τεχνική όσο και πολιτική αντιμετώπιση.

Συνολικά, η εξέλιξη των ασύρματων επικοινωνιών αποτελεί μια συνεχή διαδικασία καινοτομίας, όπου κάθε νέα γενιά δικτύων βασίζεται στα επιτεύγματα της προηγούμενης. Η επιτυχής ανάπτυξη των μελλοντικών δικτύων θα εξαρτηθεί από τη συνεργασία της επιστημονικής κοινότητας, της βιομηχανίας και των ρυθμιστικών φορέων, με στόχο τη δημιουργία ασφαλών, αποδοτικών και προσβάσιμων συστημάτων επικοινωνίας για όλους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] 3rd Generation Partnership Project. (2017). *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation (TS 36.211)*. <https://www.3gpp.org/specifications>
- [2] 3rd Generation Partnership Project. (2021). *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description (TS 36.300)*. <https://www.3gpp.org/specifications>
- [3] 3rd Generation Partnership Project. (2022). *Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Physical layer on the radio path (TS 45.001)*. <https://www.3gpp.org/specifications>
- [4] 3rd Generation Partnership Project. (2022b). *General Packet Radio Service (GPRS) enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) access (TS 23.401)*. <https://www.3gpp.org/specifications>
- [5] 3rd Generation Partnership Project. (2023a). *Policy and charging control architecture (TS 23.203)*. <https://www.3gpp.org/specifications>
- [6] 3rd Generation Partnership Project. (2023b). *NR; NR and NG-RAN overall description (TS 38.300)*. <https://www.3gpp.org/specifications>
- [7] 3rd Generation Partnership Project. (2024a). *System architecture for the 5G System (5GS) (TS 23.501)*. <https://www.3gpp.org/specifications>
- [8] 3rd Generation Partnership Project. (2024b). *NR; NR and NG-RAN overall description; Stage 2 (TS 38.300)*. <https://www.3gpp.org/specifications>
- [9] 3rd Generation Partnership Project. (2025). *NR; User Equipment (UE) radio access capabilities (TS 38.306)*. <https://www.3gpp.org/specifications>
- [10] Abramson, N. (1970). THE ALOHA SYSTEM: Another alternative for computer communications. Proceedings of the 1970 Fall Joint Computer Conference, AFIPS '70, 281–285. <https://doi.org/10.1145/1478462.1478502>
- [11] Ahmad, I., Kumar, T., Liyanage, M., Okwuibe, J., Ylianttila, M., & Gurtov, A. (2017). *5G security: Analysis of threats and solutions*. In 2017 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN). IEEE <https://ieeexplore.ieee.org/document/8088621>
- [12] Ahmad, I., Namal, S., Ylianttila, M., & Gurtov, A. (2022). Narrowband Internet of Things: A comprehensive study. *Computer Networks*.
- [13] Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., & Ayyash, M. (2015). Internet of Things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(4), 2347–2376. <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2444095>
- [14] Alkholidi, A. G., & Altowij, K. S. (2014). *Free Space Optical Communications — Theory and Practices*. In M. Khatib (Ed.), *Contemporary Issues in Wireless Communications*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/58884>
- [15] Alsabah, M., Naser, M. A., Mahmmod, B. M., Abdulhussain, S. H., Eissa, M. R., Al-Baidhani, A., Alsaffar, N. K., & Sadiq, A. T. (2021). 6G wireless communications networks: A comprehensive survey. *IEEE Access*, 9, 148191–148243. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3124812>
- [16] Andrews, L. C., & Phillips, R. L. (2005). *Laser beam propagation through random media* (2nd ed.). <https://doi.org/10.1117/3.626196>
- [17] Andrews, J. G., Ghosh, A., & Muhamed, R. (2007). *Fundamentals of WiMAX: Understanding broadband wireless networking*. Prentice Hall.
- [18] Andrews, J. G., Buzzi, S., Choi, W., Hanly, S. V., Lozano, A., Soong, A. C. K., & Zhang, J. C. (2014). What will 5G be? *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 32(6), 1065–1082. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2014.2328098>
- [19] ANT Wireless. (2020). ANT message protocol and usage (Rev. 5.1). Garmin Ltd. <https://www.thisisant.com/developer/resources/downloads>

- [20] Antonioli, D., Tippenhauer, N. O., & Rasmussen, K. (2020). BIAS: Bluetooth impersonation attacks. *Proceedings of the 2020 IEEE Symposium on Security and Privacy*, 549–562. <https://doi.org/10.1109/SP40000.2020.00093>
- [21] Attar, H., Issa, H., Ababneh, J. M., Abbasi, M., Solyman, A. A. A., Khosravi, M., & Agieb, R. S. (2022). *5G system overview for ongoing smart applications: Structure, requirements, and specifications. Computational Intelligence and Neuroscience, 2022*, Article 2476841. <https://doi.org/10.1155/2022/2476841>
- [22] Baños-Gonzalez, V., Afaqui, M. S., Lopez-Aguilera, E., & Garcia-Villegas, E. (2016). IEEE 802.11ah: A technology to face the IoT challenge. *Sensors*, 16(11), 1960. <https://doi.org/10.3390/s16111960>
- [23] Baran, P. (1964). On distributed communications: I. Introduction to distributed communications networks (RM-3420-PR). RAND Corporation. https://www.rand.org/pubs/research_memoranda/RM3420.html
- [24] Barua, A., Viana, A. C., & Mukherjee, A. (2022). Security and privacy in Bluetooth Low Energy: A survey. *ACM Computing Surveys*, 55(2), 1–44. <https://doi.org/10.1145/3517313>
- [25] Basilier, H., Lemark, J., Centonza, A., & Åsberg, T. (2021). *Applied network slicing scenarios in 5G*. *Ericsson Technology Review*, 2021(2), 2–11. <https://doi.org/10.23919/etr.2021.9904667>
- [26] Bianchi, G. (2000). Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 18(3), 535–547. <https://doi.org/10.1109/49.840210>
- [27] Bikrat, F., El Hammoumi, A., Rachdi, F., & Mellouli, M. (2019). Intelligent wireless system for PV supervision based on the Raspberry Pi. In *Proceedings of the 2019 International Conference on Systems of Collaboration Big Data, Internet of Things & Security (SysCoBIoTS)*, 1–6.
- [28] Bluetooth SIG. (2015). *Human Interface Device (HID) Profile Specification (v1.1.1)*. <https://www.bluetooth.com/specifications/specs/human-interface-device-hid-profile-1-1/>
- [29] Bluetooth Special Interest Group. (2020). Bluetooth Core Specification v5.2. Bluetooth Special Interest Group. <https://www.bluetooth.com/specifications/specs/core-specification-5-2/>
- [30] Bluetooth Special Interest Group. (2021). Bluetooth Core Specification v5.3. Bluetooth Special Interest Group. <https://www.bluetooth.com/specifications/specs/core-specification-5-3/>
- [31] Bluetooth Special Interest Group. (2023). *Bluetooth Core Specification – Logical Link Control and Adaptation Protocol (L2CAP)*. <https://www.bluetooth.com/wp-content/uploads/Files/Specification/HTML/Core-60/out/en/host/logical-link-control-and-adaptation-protocol-specification.html>
- [32] Bluetooth Special Interest Group. (2024). Bluetooth Core Specification overview. Bluetooth Special Interest Group. <https://www.bluetooth.com/>
- [33] Bluetooth Special Interest Group. (n.d.). *Bluetooth technology overview*. <https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/tech-overview/>
- [34] Briggs, A., & Burke, P. (2010). *A social history of the media: From Gutenberg to the Internet* (3rd ed.). Polity Press.
- [35] Buczkowski, M. (2023). *Wi-Fi 6: High-Efficiency WLAN with IEEE 802.11ax*. Grandmetric. <https://www.grandmetric.com/wi-fi-802-11ax/>
- [36] Carney, W., & Solomon, J. (2002). *Performance of 802.11g and 802.11a in mixed networks*. In *Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 1151–1156.
- [37] Castells, M. (1996). *The rise of the network society*. Blackwell.
- [38] Ceruzzi, P. E. (2003). *A history of modern computing* (2nd ed.). MIT Press.
- [39] Cisco Systems. (2020). *Wi-Fi frequency bands: 2.4 GHz vs 5 GHz*. Cisco Systems.
- [40] <https://www.cisco.com/>
- [41] Chen, M., Miao, Y., Hao, Y., & Hwang, K. (2017). *Narrow band Internet of Things. IEEE Access*, 5, 20557–20577. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2751586>

- [42] Chen, S., Xu, H., Liu, D., Hu, B., & Wang, H. (2014). A vision of IoT: Applications, challenges, and opportunities with China perspective. *IEEE Internet of Things Journal*, 1(4), 349–359. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2014.2337336>
- [43] Cisco Meraki. (2019). 802.11ax (Wi-Fi 6) design guide. Cisco Systems. <https://documentation.meraki.com/>
- [44] Connectivity Standards Alliance. (2023). *Zigbee specification overview*. Connectivity Standards Alliance. <https://csa-iot.org/all-solutions/zigbee/>
- [45] Cooley, D. (2004). HomeRF interoperability perspectives. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control*, 1, 52–57.
- [46] Couch, L. W. (2012). *Digital and analog communication systems* (8th ed.). Pearson.
- [47] Dahlman, E., Parkvall, S., & Sköld, J. (2011). *4G: LTE/LTE-Advanced for mobile broadband*. Academic Press. <https://shop.elsevier.com/books/4g-lte-lte-advanced-for-mobile-broadband/dahlman/978-0-12-385489-6>
- [48] Dahlman, E., Parkvall, S., & Sköld, J. (2018). *5G NR: The next generation wireless access technology*. Academic Press. <https://shop.elsevier.com/books/5g-nr-the-next-generation-wireless-access-technology/dahlman/978-0-12-814323-0>
- [49] Davies, D. W. (1966). *Proposal for a digital communication network*. National Physics Laboratory.
- [50] Deng, C., Fang, X., Han, X., Wang, X., Yan, L., He, R., Long, Y., & Guo, Y. (2020). *IEEE 802.11be Wi-Fi 7: New challenges and opportunities*. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 22(4), 2136–2166. <https://doi.org/10.1109/COMST.2020.3012715>
- [51] Dimitriadis, G., & Pavlidou, F. N. (2004). *Comparative performance evaluation of EDCF and EY-NPMA protocols*. *IEEE Communications Letters*, 8(1), 42–44.
- [52] Dini, G., Portolés-Comeras, M., Nin-Guerrero, J., & Manges-Bafalluy, J. (2011). *Experimental characterization of VoIP traffic over IEEE 802.11 wireless LANs*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/14514>
- [53] Doufexi, A., Armour, S. M. D., Butler, M. R. G., Nix, A. R., Bull, D. R., McGeehan, J. P., & Karlsson, P. (2002). *A comparison of the HIPERLAN/2 and IEEE 802.11a wireless LAN standards*. *IEEE Communications Magazine*, 40(5), 172–180. <https://doi.org/10.1109/35.1000232>
- [54] Douglas, S. J. (2004). *Listening in: Radio and the American imagination*. University of Minnesota Press.
- [55] Edney, J., & Arbaugh, W. A. (2003). *Real 802.11 security: Wi-Fi Protected Access and 802.11i*. Addison-Wesley.
- [56] Eklund, C., Marks, R. B., Stanwood, K. L., & Wang, S. (2002). *IEEE Standard 802.16: A technical overview of the WirelessMAN air interface for broadband wireless access*. *IEEE Communications Magazine*, 40(6), 98–107. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2002.1007415>
- [57] ENISA. (2023). 5G security: Threat landscape and best practices. European Union Agency for Cybersecurity. <https://www.enisa.europa.eu/publications/enisa-threat-landscape-for-5g-networks>
- [58] EnOcean Alliance. (2021). EnOcean technology overview. <https://www.enocean-alliance.org/technology/>
- [59] Ergen, M. (2002). *IEEE 802.11 tutorial*. University of California, Berkeley. https://www.researchgate.net/publication/2533138_IEEE_80211_Tutorial
- [60] European Telecommunications Standards Institute. (1998). *Broadband Radio Access Networks (BRAN); High Performance Radio Local Area Network (HIPERLAN) Type 1; Functional specification (ETSI EN 300 652)*. ETSI. https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/300600_300699/300652/01.30.01_60/en_300652v013001p.pdf
- [61] European Telecommunications Standards Institute. (2000a). *Broadband Radio Access Networks (BRAN); HIPERLAN Type 2; System overview (ETSI TR 101 683)*. ETSI. https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/101600_101699/101683/01.01.01_60/tr_101683v010101p.pdf

- [62] European Telecommunications Standards Institute. (2000b). *Broadband Radio Access Networks (BRAN); HIPERLAN Type 2; Physical (PHY) layer (ETSI TS 101 475)*. ETSI. https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/101400_101499/101475/01.01.01_60/ts_101475v010101p.pdf
- [63] European Telecommunications Standards Institute. (2002a). *Broadband Radio Access Networks (BRAN); HIPERACCESS; DLC sublayer specification, Part 1: Basic transport functions (ETSI TS 102 000)*. ETSI. https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/102000_102099/102000/01.01.01_60/ts_102000v010101p.pdf
- [64] European Telecommunications Standards Institute. (2002b). *Broadband Radio Access Networks (BRAN); HIPERACCESS; PHY protocol specification (ETSI TS 102 003)*. ETSI. https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/102000_102099/102003/01.01.01_60/tr_102003v010101p.pdf
- [65] European Telecommunications Standards Institute. (2017). *Terrestrial Trunked Radio (TETRA); Voice plus Data (V+D); Part 2: Air Interface (AI) (ETSI EN 300 392-2)*. ETSI. https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/300300_300399/30039202/01.04.01_60/en_30039202v010401p.pdf
- [66] European Telecommunications Standards Institute. (2018). *Digital Enhanced Cordless Telecommunications (DECT); Common Interface (CI); Part 3: Medium Access Control (MAC) layer (ETSI EN 300 175-3)*. ETSI. https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/300100_300199/30017503/02.07.01_60/en_30017503v020701p.pdf
- [67] European Telecommunications Standards Institute. (2020). *Fixed radio systems; Characteristics and requirements for point-to-point equipment and antennas; Part 4: System-dependent requirements for the E-band (ETSI EN 302 217-4)*. ETSI. https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302200_302299/30221704/02.02.00_20/en_30221704v020200a.pdf
- [68] European Telecommunications Standards Institute. (2024). *ETSI EN 301 545-2 V1.4.1 (Digital Video Broadcasting (DVB); Second Generation DVB Interactive Satellite System (DVB-RCS2); Part 2: Lower Layers for Satellite standard)*. ETSI. https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/301500_301599/30154502/01.04.01_60/en_30154502v010401p.pdf
- [69] European Telecommunications Standards Institute. (2025). *Multi-access Edge Computing (MEC); Framework and reference architecture (ETSI GS MEC 003 V4.1.1)*. ETSI. https://www.etsi.org/deliver/etsi_gs/MEC/001_099/003/04.01.01_60/gs_MEC003v040101p.pdf
- [70] European Commission. (2020). Shaping Europe's digital future: 5G for Europe action plan. European Commission. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/5g-europe>
- [71] Faragher, R. (2014). An analysis of the accuracy of Bluetooth low energy for indoor positioning applications. Proceedings of the 27th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. 201–210. <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=12345>
- [72] Farahani, S. (2008). ZigBee wireless networks and transceivers. Newnes.
- [73] Farkas, J., Lo Bello, L., & Gunther, C. (2020). Time-sensitive networking standards. IEEE Communications Standards Magazine, 2(2), 20–21. <https://doi.org/10.1109/MCOMSTD.001.1800013>
- [74] Faruque, S. (2019). *Radio Frequency Multiple Access Techniques Made Easy*. In SpringerBriefs in Electrical and Computer Engineering. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-91651-4>
- [75] Flichy, P. (1995). Dynamics of modern communication: The shaping and impact of new communication technologies. Sage.
- [76] Frankel, S., Eydt, B., Owens, L., & Scarfone, K. (2007). Establishing wireless robust security networks: A guide to IEEE 802.11i (NIST Special Publication 800-97). National Institute of Standards and Technology. <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-97>

- [77] Fred derf. (2010). IrDA protocol stack basic [Diagram]. Wikimedia Commons. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Irda_protocol_stack_basic.png
- [78] Galati-Giordano, L., Geraci, G., Carrascosa, M., & Bellalta, B. (2024). *What will Wi-Fi 8 be? A primer on IEEE 802.11bn ultra high reliability*. IEEE Communications Magazine, 62(8), 126–132. <https://doi.org/10.1109/MCOM.001.2300728>
- [79] Gallegos Ramonet, A., & Noguchi, T. (2020). *Performance evaluation of IEEE 802.15.4 in industrial environments*. IEEE Access, 8, 157832–157847.
- [80] Galli, S. (2001). *HomeRF and Bluetooth: Assessment of the point-to-point link performance*. Telcordia Technologies.
- [81] García, L., Parra, L., Jimenez, J. M., Lloret, J., & Lorenz, P. (2020). *IoT-based smart irrigation systems: An overview on the recent trends on sensors and IoT systems for irrigation in precision agriculture*. Sensors, 20(4), 1042. <https://doi.org/10.3390/s20041042>
- [82] Garcia, M. L., Ribeiro, A., & Ordonez, L. G. (2021). *5G NR: Architecture, technology, implementation, and operation of 3GPP new radio standards*. Academic Press.
- [83] Gast, M. S. (2005). *802.11 wireless networks: The definitive guide (2nd ed.)*. O'Reilly Media.
- [84] Gast, M. S. (2013). *802.11ac: A Survival Guide*. O'Reilly Media
- [85] Geier, J. T. (2001). *Wireless LANs: Implementing interoperable networks*. (2nd ed.). Sams Publishing.
- [86] Georgiadis Christos K. (2006). *Adaptation and personalization of user interface and content*. In *Mobile Business: Technological, Methodological and Social Perspectives* (Chapter 18). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/9781591408666.ch018>
- [87] Gfeller, F. R., & Bapst, U. (1979). Wireless in-house data communication via diffuse infrared radiation. Proceedings of the IEEE, 67(11), 1474–1486. <https://doi.org/10.1109/PROC.1979.11508>
- [88] Ghassemlooy, Z., Popoola, W. O., & Rajbhandari, S. (2013). *Optical wireless communications: System and channel modelling with MATLAB*. CRC Press.
- [89] Ghosh, A., Wolter, D. R., Andrews, J. G., & Chen, R. (2005). Broadband wireless access with WiMax/802.16: Current performance benchmarks and future potential. IEEE Communications Magazine, 43(2), 129–136. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2005.1391513>
- [90] Gleason, G. (1999). Signal Corps: The history of U.S. Army communications. US Army Center of Military History.
- [91] Goldsmith, A. (2005). *Wireless communications*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511841224>
- [92] Golriz, A. (2009). OFDM system design and implementation [Master's thesis]. University of Applied Sciences, Cologne.
- [93] Gomez, C., Oller, J., & Paradells, J. (2012). Overview and evaluation of Bluetooth low energy: An emerging low-power wireless technology. Sensors, 12(9), 11734–11753. <https://doi.org/10.3390/s120911734>
- [94] Granjal, J., Monteiro, E., & Sá Silva, J. (2015). Security for the Internet of Things: A survey of existing protocols and open research issues. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 17(3), 1294–1312. <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2388550>
- [95] GSMA. (2020). *The 5G guide: A reference for operators*. GSMA. https://www.gsma.com/wp-content/uploads/2020/04/The-5G-Guide_GSMA_2020_04.pdf
- [96] Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). *Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions*. Future Generation Computer Systems, 29(7), 1645–1660. <https://doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010>
- [97] Haartsen, J. C. (2000). The Bluetooth radio system. IEEE Personal Communications, 7(1), 28–36. <https://doi.org/10.1109/98.824570>
- [98] Haartsen, J. C. (1998). Bluetooth – The universal radio interface for ad hoc, wireless connectivity. Ericsson Review, 3, 110–117.
- [99] Haque, K. F., Abdelgawad, A., & Yelamarthi, K. (2022a). Comprehensive performance analysis of Zigbee communication: An experimental approach with XBee S2C module. Sensors, 22(9), 3245. <https://doi.org/10.3390/s22093245>

- [100] Haque, M. E., Asikuzzaman, M., Khan, I. U., Ra, I.-H., Hossain, M. S., & Shah, S. B. H. (2022b). Comparative study of IoT-based topology maintenance protocol in a wireless sensor network for structural health monitoring. *Remote Sensing*, 12(15), 2358. <https://doi.org/10.3390/rs12152358>
- [101] Hauben, M., & Hauben, R. (1997). *Netizens: On the history and impact of Usenet and the Internet*. IEEE Computer Society Press.
<https://archive.org/details/netizensonhistor0000haubHaykin>, S. (2009). *Communication systems* (5th ed.). Wiley. <https://www.wiley.com/en-us/Communication+Systems%2C+5th+Edition-p-9780471697909>
- [102] Hertz, H. (1894). *Electric waves: Being researches on the propagation of electric action with finite velocity through space* (D. E. Jones, Trans.). Macmillan.
- [103] Hodge, V. J., & Whitaker, R. M. (2005). Scatternet formation: Approaches and performance. *International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing*, 1(1/2), 92–101.
- [104] Hong, S. (2001). *Wireless: From Marconi's black-box to the audion*. MIT Press. <https://doi.org/10.7551/mitpress/7255.001.0001>
- [105] Hui, J., & Thubert, P. (2011). Compression format for IPv6 datagrams over IEEE 802.15.4-based networks (RFC 6282). Internet Engineering Task Force. <https://doi.org/10.17487/RFC6282>
- [106] Huurdeman, A. A. (2003). *The worldwide history of telecommunications*. Wiley-IEEE Press.
- [107] Ibrahim, L. F., Salman, H. A., Taha, Z. K., & Akkari, N. (2019). A survey on LTE/LTE-A network architecture and functionality. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite (Comnetsat)*, 1–6.
- [108] Iqbal, M., Abdullah, A. Y. M., & Shabnam, F. (2020). An application based comparative study of LPWAN technologies for IoT environment. In *Proceedings of the 2020 IEEE Region 10 Symposium (TENSYP)* (pp. 682–685). IEEE. <https://doi.org/10.1109/TENSYP50017.2020.9230597>
- [109] International Electrotechnical Commission. (2014a). *Safety of laser products – Part 1: Equipment classification and requirements (IEC 60825-1:2014)*. IEC. <https://webstore.iec.ch/en/publication/3587>
- [110] International Electrotechnical Commission. (2014b). *Medical electrical equipment – Part 1-2: General requirements for basic safety and essential performance – Collateral standard: Electromagnetic disturbances – Requirements and tests (IEC 60601-1-2:2014)*. IEC. <https://webstore.iec.ch/en/publication/2590>
- [111] International Electrotechnical Commission. (2016). *Industrial networks – Wireless communication network and communication profiles – WirelessHART (IEC 62591:2016)*. <https://standards.iec.ch/view/pub/24433>
- [112] Institute of Electrical and Electronics Engineers. (1999a). *IEEE standard for wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications* (IEEE Std 802.11-1999). IEEE. https://standards.ieee.org/standard/802_11-1999.html
- [113] Institute of Electrical and Electronics Engineers. (1999a). *IEEE standard for wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: High-speed physical layer in the 5 GHz band* (IEEE Std 802.11a-1999). IEEE. https://standards.ieee.org/standard/802_11a-1999.html
- [114] Institute of Electrical and Electronics Engineers. (1999b). *IEEE standard for wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: Higher-speed physical layer extension in the 2.4 GHz band* (IEEE Std 802.11b-1999). IEEE. https://standards.ieee.org/standard/802_11b-1999.html IEEE Standards Association. (2001). *IEEE Std 802.1X-2001: Port-based network access control*. IEEE. https://standards.ieee.org/standard/802_1X-2001.html
- [115] IEEE Standards Association. (2001). *IEEE Std 802.1X-2001: Port-based network access control*. IEEE. https://standards.ieee.org/standard/802_1X-2001.html
- [116] Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2003). *IEEE standard for information technology—Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer*

- (PHY) specifications—Amendment 4: Further higher data rate extension in the 2.4 GHz band (IEEE Std 802.11g-2003). IEEE. https://standards.ieee.org/standard/802_11g-2003.html
- [117] Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2004a). *IEEE standard for information technology—Medium access control (MAC) security enhancements* (IEEE Std 802.11i-2004). IEEE. https://standards.ieee.org/standard/802_11i-2004.html
- [118] Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2004b). *IEEE standard for local and metropolitan area networks—Part 16: Air interface for fixed broadband wireless access systems* (IEEE Std 802.16-2004). IEEE. https://standards.ieee.org/standard/802_16-2004.html
- [119] Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2005a). *IEEE standard for information technology—Medium access control (MAC) quality of service enhancements* (IEEE Std 802.11e-2005). IEEE. https://standards.ieee.org/standard/802_11e-2005.html
- [120] Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2005b). *IEEE standard for local and metropolitan area networks—Part 16: Air interface for fixed and mobile broadband wireless access systems—Amendment 2* (IEEE Std 802.16e-2005). IEEE. https://standards.ieee.org/standard/802_16e-2005.html
- [121] IEEE Standards Association. (2005c). *IEEE Std 802.11e-2005: Medium access control (MAC) quality of service (QoS) enhancements*. https://standards.ieee.org/standard/802_11e-2005.html
- [122] Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2006). *IEEE standard for information technology—Part 15.4: Low-rate wireless personal area networks (LR-WPANs)* (IEEE Std 802.15.4-2006). IEEE. https://standards.ieee.org/standard/802_15_4-2006.html
- [123] Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2007). *IEEE standard for information technology—Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications* (IEEE Std 802.11-2007). IEEE. https://standards.ieee.org/standard/802_11-2007.html
- [124] Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2009). *IEEE Standard for Information Technology—Telecommunications and Information Exchange Between Systems—Local and Metropolitan Area Networks—Specific Requirements—Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 5: Enhancements for Higher Throughput* (IEEE Std 802.11n-2009). IEEE. <https://ieeexplore.ieee.org/document/1561948>
- [125] Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2009). *IEEE Standard for Long Wavelength Wireless Network Protocol* (IEEE Std 1902.1-2009). IEEE. <http://ieeexplore.ieee.org/document/4810102>
- [126] Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2011a). *IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems—Amendment 3: Advanced Air Interface* (IEEE Std 802.16m-2011). IEEE. <https://standards.ieee.org/ieee/802.16m/4098/>
- [127] Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2011b). *IEEE Std 802.15.4a-2011: Wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for low-rate wireless personal area networks (LR-WPANs)*. IEEE.
- [128] Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2012). *IEEE Standard for Information Technology—Telecommunications and information exchange between systems—Local and metropolitan area networks—Specific requirements—Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications—Amendment 3: Enhancements for very high throughput in the 60 GHz band* (IEEE Std 802.11ad-2012). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2012.6392842>
- [129] Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2013). *IEEE Standard for Information technology—Telecommunications and information exchange between systems—Local and metropolitan area networks—Specific requirements—Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications—Amendment 4: Enhancements for Very High Throughput for 5 GHz band*. IEEE Std 802.11ac-2013. <https://standards.ieee.org/ieee/802.11ac/4473/>

- [130] Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2016). *IEEE Standard for Information Technology—Telecommunications and information exchange between systems—Local and metropolitan area networks—Specific requirements—Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications—Amendment 3: Sub 1 GHz License Exempt Operation (IEEE Std 802.11ah-2016)*. IEEE.
<https://standards.ieee.org/ieee/802.11/5536/>
- [131] Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2017). *IEEE Standard for Air Interface for Broadband Wireless Access Systems (IEEE Std 802.16-2017)*. IEEE.
<http://standards.ieee.org/ieee/802.16/6996/>
- [132] Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2018). *IEEE Standard for Ethernet (IEEE Std 802.3-2018)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2018.8457469>
- [133] Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2020). *IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks (IEEE Std 802.15.4-2020)*. IEEE.
<https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2020.9144691>
- [134] Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2020a). *IEEE Standard for Information Technology—Telecommunications and information exchange between systems—Local and metropolitan area networks—Specific requirements—Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications (IEEE Std 802.11-2020)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2021.9363693>
- [135] Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2020b). *IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Port-Based Network Access Control (IEEE Std 802.1X-2020)*. IEEE. <https://standards.ieee.org/ieee/802.1X/7345/>
- [136] Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2020c). *IEEE Std 802.15.4z: Enhanced impulse radio ultra-wideband (UWB) PHY amendments*. IEEE
- [137] Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2021). *IEEE Standard for Information Technology—Telecommunications and information exchange between systems—Local and metropolitan area networks—Specific requirements—Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications—Amendment 1: Enhancements for High-Efficiency WLAN (IEEE Std 802.11ax-2021)*. IEEE.
<https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2021.9442429>
- [138] Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2022). *IEEE Standard for Ethernet (IEEE Std 802.3-2022)*. Institute of Electrical and Electronics Engineers.
https://standards.ieee.org/standard/802_3-2022.html
- [139] Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2024). *IEEE Standard for Information Technology—Telecommunications and information exchange between systems—Local and metropolitan area networks—Specific requirements—Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications—Amendment: Enhancements for Extremely High Throughput (EHT) (IEEE Std 802.11be-2024)*. IEEE.
<https://ieeexplore.ieee.org/document/10979691>
- [140] IEEE Standards Association. (2024). *IEEE 802.11-2024: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*. IEEE.
https://standards.ieee.org/standard/802_11-2024.html
- [141] Imperva Inc. (2024). *OSI model*. Imperva Learning Center.
<https://www.imperva.com/learn/application-security/osi-model>
- [142] Infrared Data Association. (1994). *Serial infrared physical layer specification (IrPHY), Version 1.0*. <https://www.irda.org/>
- [143] Infrared Data Association. (1996). *IrDA standards overview*. <https://www.irda.org/>
- [144] Infrared Data Association. (2000). *IrDA Data Specifications overview (IrPHY, IrLAP, IrLMP)*. <https://www.irda.org/>
- [145] IPCisco. (n.d.). *What is a MAC address?* <https://ipcisco.com/lesson/what-is-a-mac-address/>
- [146] ISO. (1984). *Information processing systems – Open Systems Interconnection – Basic Reference Model (ISO 7498)*. International Organization for Standardization.

- [147] International Telecommunication Union Radiocommunication Sector. (2005). *Specific attenuation model for rain for use in prediction methods (Recommendation ITU-R P.838-3)*. ITU.
- [148] International Telecommunication Union Radiocommunication Sector. (2015). *IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond (Recommendation ITU-R M.2083-0)*. ITU.
- [149] ITU. (2020). IMT-2020 (5G) standards. International Telecommunication Union. <https://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rsg5/rwp5d/imt-2020/Pages/default.aspx>
- [150] Jagannath, J., & Jagannath, A. (2022). Machine learning for wireless communications in the Internet of Things: A comprehensive survey. *Ad Hoc Networks*, 93, 101913. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2022.101913>
- [151] Kaplan, E. D., & Hegarty, C. J. (2006). *Understanding GPS: Principles and applications* (2nd ed.). Artech House.
- [152] Khalighi, M. A., & Uysal, M. (2014). Survey on free space optical communication: A communication theory perspective. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 16(4), 2231–2258. <https://doi.org/10.1109/COMST.2014.2329501>
- [153] Khorov, E., Kiryanov, A., Lyakhov, A., & Bianchi, G. (2018). A tutorial on IEEE 802.11ax high efficiency WLANs. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(1), 197–216. <https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2871099>
- [154] Khun-Jush, J., Schramm, P., Wachsmann, U., & Wenger, F. (2000). Structure and performance of the HIPERLAN/2 physical layer. In *Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)*, 5, 2667–2671.
- [155] Koulouras, G., Katsoulis, S., & Zantalis, F. (2025). *Evolution of Bluetooth Technology: BLE in the IoT Ecosystem*. *Sensors*, 25(4), 996 <https://doi.org/10.3390/s25040996>
- [156] Kurose, J. F., & Ross, K. W. (2021). *Computer networking: A top-down approach* (8th ed.). Pearson.
- [157] Lansford, J. (1999). HomeRF: Wireless networking for the connected home. In *Proceedings of the IEEE International Workshop on Mobile Multimedia Communications (MoMuC)*, 151–154.
- [158] Lansford, J. (2000). HomeRF and the Shared Wireless Access Protocol (SWAP). In *Proceedings of the IEEE Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 2, 1192–1197.
- [159] Liao, R., Bellalta, B., Oliver, M., & Niu, Z. (2014). MU-MIMO MAC protocols for wireless local area networks: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18(1), 162–183. <https://doi.org/10.1109/COMST.2014.2377373>
- [160] Liao, R., Bellalta, B., Oliver, M., & Niu, Z. (2016). MU-MIMO MAC protocols for wireless local area networks: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18(1), 162–183. <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2497888>
- [161] Lin, X., & Lee, N. (Eds.). (2021). *5G and beyond: Fundamentals and standards*. Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-58197-8>
- [162] Lopez-Raventos, A., Bellalta, B., & Wilhelmi, F. (2023). IEEE 802.11be multi-link operation: When the whole is greater than the sum of its parts. *IEEE Network*, 37(3), 62–69.
- [163] LoRa Alliance. (2020). LoRaWAN specification v1.0.4. LoRa Alliance. https://loralliance.org/resource_hub/lorawan-specification-v1-0-4/
- [164] Mahmud, M. D. H. (2019). *Cellular mobile technologies (1G to 5G) and massive MIMO*. *International Journal of Science and Research*, 8(7), 929–937. <https://www.ijsr.net/archive/v8i7/ART20199494.pdf>
- [165] Majumdar, A. K., & Ricklin, J. C. (2008). *Free-space laser communications: Principles and advances*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-28677-8>
- [166] Marzetta, T. L., Larsson, E. G., Yang, H., & Ngo, H. Q. (2016). *Fundamentals of massive MIMO*. Cambridge University Press.
- [167] Maxwell, J. C. (1865). A dynamical theory of the electromagnetic field. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 155, 459–512. <https://doi.org/10.1098/rstl.1865.0008>

- [168] Metcalfe, R. M., & Boggs, D. R. (1976). Ethernet: Distributed packet switching for local computer networks. *Communications of the ACM*, 19(7), 395–404.
<https://doi.org/10.1145/360248.360253>
- [169] Mišić, J., & Mišić, V. B. (2004). *Performance modeling and analysis of Bluetooth networks: Polling, scheduling, and traffic control*. CRC Press.
- [170] Molisch, A. F. (2011). *Wireless communications* (2nd ed.). Wiley.
- [171] Montori, F., Bedogni, L., Di Felice, M., & Bononi, L. (2018). Machine-to-machine wireless communication technologies for the Internet of Things: Taxonomy, comparison and open issues. *Pervasive and Mobile Computing*, 50, 56–81.
<https://doi.org/10.1016/j.pmcj.2018.08.002>
- [172] Mouly, M., & Pautet, M.-B. (1992). *The GSM system for mobile communications*. Telecom Publishing.
- [173] Muller, N. J. (2000). *Bluetooth demystified*. McGraw-Hill.
- [174] Murad, S. S., Badeel, R., Abdal, B. B., Rahman, T., & Al-Quraishi, T. (2024). [Diagram] *Introduction to Wi-Fi 7: A review of history, applications, challenges, economical impact and research development*. *Mesopotamian Journal of Computer Science*.
<https://doi.org/10.58496/MJCSC/2024/009>
- [175] Negus, K. J., Stephens, A. P., & Lansford, J. (1998). HomeRF: Wireless networking for the connected home. *IEEE Personal Communications*, 7(1), 20–27.
<https://doi.org/10.1109/98.824568>
- [176] Negus, K. J., Stephens, A. P., & Lansford, J. (2000). HomeRF and SWAP: Wireless networking for the connected home. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 4(4), 28–37. <https://doi.org/10.1145/380516.380528>
- [177] NFC Forum. (2020). NFC standards overview. <https://nfc-forum.org/learn/nfc-standard>
- [178] NIST. (2021). *Guide to Bluetooth security* (NIST SP 800-121 Rev. 2). National Institute of Standards and Technology. <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-121r2>
- [179] OASIS. (2019). MQTT Version 5.0. OASIS Standard. <https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v5.0/mqtt-v5.0.html>
- [180] Odhiambo, M. O., & Rayolla, P. (2012). WiMAX technology: Performance analysis and QoS. In *Proceedings of the Southern Africa Telecommunication Networks and Applications Conference (SATNAC)*, 1–6.
- [181] Oscium. *Why Channels 1, 6 and 11*. <https://www.oscium.com/training/why-channels-1-6-11/>
- [182] Padgette, J., Bahr, J., Batra, M., Holtmann, M., Smithbey, R., Chen, L., & Scarfone, K. (2017). *Guide to Bluetooth security* (NIST Special Publication 800-121 Rev. 2). National Institute of Standards and Technology. <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-121r2>
- [183] Padgette, J., Scarfone, K., & Chen, L. (2022). *Guide to Bluetooth security* (NIST Special Publication 800-121 Rev. 2). National Institute of Standards and Technology. <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-121r2>
- [184] Pahlavan, K., & Krishnamurthy, P. (2002). *Principles of wireless networks: A unified approach*. Prentice Hall.
- [185] Pakhomova, V. M., & Nazarova, D. I. (2020). *Organizing wireless network at marshall yards using the bee method*. *Science and Transport Progress*, 2(86), 60–73.
<https://doi.org/10.15802/stp2020/204005>
- [186] Perahia, E., & Stacey, R. (2013). *Next generation wireless LANs: 802.11n and 802.11ac* (2nd ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139061407>
- [187] Pérez-Hernández, A., Barreras-Martín, M. N., Becerra, J. A., Madero-Ayora, M. J., & Aguilera, P. (2024). *De-Randomization of MAC Addresses Using Fingerprints and RSSI With ML for Wi-Fi Analytics*. *IEEE Access*, 12, 150857–150868
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3410549>
- [188] Persson, K., Manivannan, D., & Singhal, M. (2004). *Bluetooth scatternet formation: Criteria, models and classification*. In *Proceedings of the 1st IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC 2004)* (pp. 59–64). IEEE.
<https://doi.org/10.1109/CCNC.2004.1286833>

- [189] Proakis, J. G., & Salehi, M. (2008). *Digital communications* (5th ed.). McGraw-Hill.
- [190] Rancy, F. (2022). *IMT for 2020 and beyond*. In *5G Outlook: Innovations and Applications* (pp. 69–83). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003336860-6>
- [191] Rangan, S., Rappaport, T. S., & Erkip, E. (2014). Millimeter-wave cellular wireless networks: Potentials and challenges. *Proceedings of the IEEE*, 102(3), 366–385. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2014.2299397>
- [192] Rappaport, T. S., Heath, R. W., Jr., Daniels, R. C., & Murdock, J. N. (2015). *Millimeter wave wireless communications*. Pearson Education.
- [193] Rappaport, T. S. (2022). *Wireless communications: Principles and practice*. Pearson.
- [194] Rappaport, T. S., Sun, S., Mayzus, R., Zhao, H., Azar, Y., Wang, K., Wong, G. N., Schulz, J. K., Samimi, M., & Gutierrez, F. (2015). Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work! *IEEE Access*, 1, 335–349. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2013.2260813>
- [195] Redl, S. M., Weber, M. K., & Oliphant, M. W. (1995). *An introduction to GSM*. Artech House.
- [196] Riordan, M., & Hoddeson, L. (1997). *Crystal fire: The birth of the information age*. W. W. Norton & Company.
- [197] Rohde & Schwarz. (2024). *IEEE 802.11be (Wi-Fi 7) technology introduction*. Rohde & Schwarz. <https://www.rohde-schwarz.com/>
- [198] Rydell, M. (2000). HiperLAN/2 overview. *Ericsson Review*, 77(1), 26–33.
- [199] Saad, W., Bennis, M., & Chen, M. (2020). *A vision of 6G wireless systems: Applications, trends, technologies, and open research problems*. *IEEE Network*, 34(3), 134–142. <https://doi.org/10.1109/MNET.001.1900287>
- [200] Sauter, M. (2021). *From GSM to LTE-Advanced Pro and 5G: An introduction to mobile networks and mobile broadband* (4th ed.). Wiley.
- [201] Shi, W., Cao, J., Zhang, Q., Li, Y., & Xu, L. (2016). Edge computing: Vision and challenges. *IEEE Internet of Things Journal*.
- [202] Shoba, B., & Jayanthi, K. (2012). Performance improvement of MIMO-OFDM systems through channel estimation. *International Journal of Wireless & Mobile Networks*, 4(5), 49–59. <https://doi.org/10.5121/ijwmn.2012.4504>
- [203] Sicari, S., Rizzardi, A., & Coen-Porisini, A. (2020). *5G in the Internet of Things era: An overview on security and privacy challenges*. *Computer Networks*, 179, 107345. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107345>
- [204] Singh, P., Tripathi, V., Gangodkar, D., & Bordoloi, D. (2021). *A study of future analysis of 4G and 5G communication networks*. *Webology*, 18(3), 1542–1552. <https://doi.org/10.29121/WEB/V18I3/137>
- [205] Sklar, B. (2001). *Digital communications: Fundamentals and applications* (2nd ed.). Prentice Hall.
- [206] Smulders, P. F. M. (2002). *Exploiting the 60 GHz band for local wireless multimedia access: Prospects and future directions*. *IEEE Communications Magazine*, 40(1), 140–147. <https://doi.org/10.1109/35.978061>
- [207] Soltani, M. D., Purwita, A. A., Tavakkolnia, I., Haas, H., & Safari, M. (2019). *Impact of device orientation on error performance of LiFi systems*. *IEEE Access*, 7, 41690–41701. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2907463>
- [208] Soltanieh, N., Norouzi, Y., Yang, Y., & Karmakar, N. C. (2020). *A review of radio frequency fingerprinting techniques*. *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*, 4(3), 222–233. <https://doi.org/10.1109/JRFID.2020.2968369>
- [209] Stallings, W. (2013). *Wireless communications and networks* (2nd ed.). Pearson.
- [210] Stallings, W. (2017). *Data and computer communications* (10th ed.). Pearson.
- [211] Stallings, W. (2020). *Network security essentials: Applications and standards* (7th ed.). Pearson.
- [212] Standage, T. (1998). *The Victorian internet: The remarkable story of the telegraph and the nineteenth century's online pioneers*. Walker & Company.
- [213] Stojmenović, I. (Ed.). (2002). *Handbook of wireless networks and mobile computing*. Wiley.

- [214] Talwar, S., Choudhury, D., Dimou, K., Aryafar, E., Bangerter, B., & Stewart, K. (2014). *Enabling technologies and architectures for 5G wireless*. In *2014 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS2014)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/MWSYM.2014.6848639>
- [215] Tanenbaum, A. S., Feamster, N., & Wetherall, D. J. (2021). *Computer networks* (6th ed.). Pearson. <https://www.pearson.com/en-us/subject-catalog/p/computer-networks/P200000003188/9780137523214>
- [216] The Things Network. (2020). *LoRaWAN*. <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/>
- [217] Thread Group. (2021). *Thread 1.2 specification*. <https://www.threadgroup.org/technology>
- [218] Thread Group. (2022). *Thread 1.3.0 specification*. <https://www.threadgroup.org/technology>
- [219] Tinnirello, I., & Choi, S. (2005). *Temporal fairness provisioning in multi-rate contention-based 802.11e WLANs*. In *Proceedings of the 6th IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM 2005)*, 220–230. <https://doi.org/10.1109/WOWMOM.2005.101>
- [220] Torrieri, D. (2022). *Principles of spread-spectrum communication systems* (5th ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-75343-6>
- [221] Tsankov, B., Kassev, K., & Pachamanov, R. (2008). *WLAN/WMAN integration architecture and traffic control for voice transmission*. In *Proceedings of the Sixth International Conference on Information Research and Applications (i.Tech 2008)*, Varna, Bulgaria.
- [222] Tsantilas, S., Spandonidis, C., Giannopoulos, F., Galiatsatos, N., Karageorgiou, D., & Giordamli, C. (2020). *A Comparative Study of Wireless Communication Protocols in a Computer Vision System for improving the Autonomy of the Visually Impaired*. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 13(1), 72–76. <https://doi.org/10.25103/jestr.131.10>
- [223] Tse, D., & Viswanath, P. (2005). *Fundamentals of wireless communication*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511807213>
- [224] Ugwewe, O. C. (2004). *Radio frequency and wireless communications*. In H. Bidgoli (Ed.), *The Internet Encyclopedia*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/047148296X.tie151>
- [225] van Nee, R., & Prasad, R. (2000). *OFDM for wireless multimedia communications*. Artech House.
- [226] Vanhoef, M., & Piessens, F. (2017). *Key reinstallation attacks: Forcing nonce reuse in WPA2*. In *Proceedings of the 2017 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security (CCS '17)*, 1313–1328. <https://doi.org/10.1145/3133956.3134027>
- [227] Vanhoef, M., & Ronen, E. (2020). *Dragonblood: Analyzing the dragonfly handshake of WPA3 and EAP-pwd*. In *Proceedings of the 2020 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP)* (pp. 517–533). IEEE. <https://doi.org/10.1109/SP40000.2020.00031>
- [228] Wang, S., Wan, J., Zhang, D., Li, D., & Zhang, C. (2016). *Towards smart factory for Industry 4.0: A self-organized multi-agent system with big data-based feedback and coordination*. *Computer Networks*, 101, 158–168. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2015.12.017>
- [229] Weyulu, E., Hanada, M., Kanemitsu, H., Park, E.-C., & Kim, M. W. (2018). *Cross-layer design for exposed node reduction in ad hoc WLANs*. *IEICE Transactions on Communications*, 101(7), 1575–1588. <https://doi.org/10.1587/transcom.2017CQP0015>
- [230] aaWi-Fi Alliance. (2018a). *Wi-Fi CERTIFIED WPA3™ security considerations*. <https://www.wi-fi.org/discover-wi-fi/security>
- [231] Wi-Fi Alliance. (2018b). *Wi-Fi Enhanced Open (OWE)*. <https://www.wi-fi.org/discover-wi-fi/wi-fi-enhanced-open>
- [232] Wi-Fi Alliance. (2018c). *Wi-Fi generation numbering*. <https://www.wi-fi.org/discover-wi-fi/wi-fi-generations>
- [233] Wi-Fi Alliance. (2023). *Wi-Fi 7 technology overview*. <https://www.wi-fi.org/discover-wi-fi/wi-fi-7>

- [234] Wi-Fi Alliance. (2025). *Wi-Fi Direct*. <https://www.wi-fi.org/discover-wi-fi/wi-fi-direct>
- [235] Wikimedia Commons. Am fm. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Amfm3-en-de.gif>
- [236] Wikimedia Commons, “Bluetooth network topology” [Diagram]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bluetooth_network_topology.png
- [237] Wikimedia Commons. “IrDA protocol stack basic” [Diagram]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Irda_protocol_stack_basic.png
- [238] Wikimedia Commons contributors. *WiMAX architecture (NAP, NSP, ASP)*. [Diagram]. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:WiMAXArchitecture.svg>
- [239] Wikimedia Commons "Generic wireless network architecture according to 802.11" [Diagram]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:802.11_Network_Architecture.svg
- [240] Williams, S. (2000). *IrDA: Past, present and future*. IEEE Personal Communications, 7(1), 11–19. <https://doi.org/10.1109/98.824566>
- [241] Yaw, N., & Keeratiwintakorn, P. (2011). *Efficiency improvement of AODV for vehicular networks with channel availability estimation*. In *Proceedings of the 8th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2011)*, pp. 284–287. <https://doi.org/10.1109/ECTICON.2011.5947828>
- [242] Z-Wave Alliance. (2020). *Z-Wave technology overview*. <https://z-wavealliance.org/about-z-wave-technology/>
- [243] Zeadally, S., Siddiqui, F., Baig, Z., & Ibrahim, A. (2019). *Smart healthcare: Challenges and potential solutions using Internet of Things (IoT) and big data analytics*. PSU Research Review, 4(2), 149–168. <https://doi.org/10.1108/PRR-08-2019-0027>
- [244] Zhang, J., Ding, M., López-Pérez, D., Marshall, A., & Hanzo, L. (2019). Design of an efficient OFDMA-based multi-user key generation protocol. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 68(9), 8842–8852. <https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2929362>
- [245] Zimmermann, H. (1980). OSI reference model – The ISO model of architecture for open systems interconnection. IEEE Transactions on Communications, 28(4), 425–432. <https://doi.org/10.1109/TCOM.1980.1094702>