



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Πτυχιακή Εργασία

Τίτλος Εργασίας	Πτυχιακής (Ελληνικά) Το πρωτόκολλο Wi-Fi 7 στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Αγγλικά) The Wi-Fi 7 protocol in the IoT
Ονοματεπώνυμο Φοιτητή	Κωστάλας Ανάργυρος
Πατρώνυμο	Πέτρος
Αριθμός Μητρώου	Π/15067
Επιβλέπων	Καθηγητής Χρήστος Δουληγέρης

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν αποκλειστικά τον συγγραφέα και δεν αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πανεπιστημίου Πειραιώς.

Ως συγγραφέας της παρούσας εργασίας δηλώνω πως η παρούσα εργασία δεν αποτελεί προϊόν λογοκλοπής και δεν περιέχει υλικό από μη αναφερόμενες πηγές.

Περίληψη

Αυτή η διατριβή παρέχει μια σε βάθος ανάλυση στο Wi-Fi 7, το IEEE 802.11, τη νέα γενιά ασύρματης δικτύωσης και τον μετασχηματισμό που υπόσχεται να δημιουργήσει. Οι σημαντικές βελτιώσεις στο πρωτόκολλο περιλαμβάνουν αυξημένο εύρος ζώνης καναλιών, αυξημένες χωρικές ροές, διαμόρφωση υψηλότερης τάξης, λειτουργία πολλαπλών συνδέσμων και συνάθροιση μονάδων πολλαπλών πόρων. Αυτά τα χαρακτηριστικά προορίζονταν να ανταποκρίνονται στις αυξανόμενες απαιτήσεις για εξαιρετικά υψηλές ταχύτητες, πολύ χαμηλή καθυστέρηση, αποτελεσματική χρήση του φάσματος και αξιόπιστη συνδεσιμότητα που διαφοροποιεί το Wi-Fi 7 από τις προηγούμενες γενιές.

Η διατριβή διερευνά το Wi-Fi 7 σε πρακτικές εφαρμογές υλοποίησης στο χώρο του επιχειρηματικού δικτύου, των έξυπνων κατοικιών, του IoT, του gaming, του streaming και του βιομηχανικού αυτοματισμού. Αξιοποιώντας προηγμένες λειτουργίες όπως καλύτερο OFDMA(Orthogonal Frequency Division Multiple Access), Target Wake Time και λειτουργία πολλαπλών συνδέσμων, το Wi-Fi 7 επιτρέπει περιπτώσεις χρήσης από επιχειρηματικά συστήματα υψηλής χωρητικότητας έως παιχνίδια χαμηλής καθυστέρησης και ακριβή βιομηχανικό αυτοματισμό.

Ακόμα, παρέχονται πληροφορίες σχετικά με το Wi-Fi 7 και τις προκλήσεις του, τους περιοριστικούς παράγοντες, τις υποδομές, τη συμβατότητα με το παλιό πλαίσιο συσκευών και τις ευπάθειες ασφαλείας. Δίνοντας φως στα ζητήματα που περιπλέκονται κατά την υιοθέτηση νέων προτύπων όσον αφορά τη συμβατότητα προς τα πίσω και την προστασία δεδομένων.

Κοιτάζοντας μπροστά και πέρα από το Wi-Fi 7, η διατριβή εξετάζει το πιθανό μέλλον της ασύρματης δικτύωσης, την ενσωμάτωση δικτύων 5G/6G και την υιοθέτηση της τεχνητής νοημοσύνης/μηχανικής εκμάθησης για βελτιωμένη συνδεσιμότητα και διαχείριση πόρων.

Ως εκ τούτου, εξετάζει το Wi-Fi 7 για προηγμένη παγκόσμια συνδεσιμότητα στην ολιστική του προοπτική, αναφέρει τεχνικά πλεονεκτήματα, εφαρμογές στον πραγματικό κόσμο και μελλοντικές προοπτικές που θα μπορούσαν να καταστήσουν το Wi-Fi 7 έναν από τους ακρογωνιαίους λίθους της ασύρματης δικτύωσης επόμενης γενιάς.

Abstract

This thesis provides an in-depth analysis of Wi-Fi 7, IEEE 802.11, the next generation of wireless networking, and the transformation it promises to bring. Significant improvements to the protocol include increased channel bandwidth, increased spatial streams, higher-order modulation, multi-link operation, and multi-resource unit aggregation. These features were intended to meet the increasing demands for extremely high speeds, very low latency, efficient spectrum utilization, and reliable connectivity that differentiate Wi-Fi 7 from previous generations.

The thesis explores Wi-Fi 7 in practical implementation applications in the areas of enterprise networking, smart homes, IoT, gaming, streaming, and industrial automation. Leveraging advanced features such as better OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), Target Wake Time, and multi-link operation, Wi-Fi 7 enables use cases from high-capacity enterprise systems to low-latency gaming and precise industrial automation.

Furthermore, information is provided on Wi-Fi 7 and its challenges, limiting factors, infrastructure, compatibility with old device frameworks, and security vulnerabilities. Shedding light on the issues that complicate the adoption of new standards in terms of backward compatibility and data protection.

Looking ahead and beyond Wi-Fi 7, the thesis examines the potential future of wireless networking, the integration of 5G/6G networks, and the adoption of artificial intelligence/machine learning for improved connectivity and resource management.

Therefore, it examines Wi-Fi 7 for advanced global connectivity in its holistic perspective, citing technical advantages, real-world applications, and future prospects that could make Wi-Fi 7 one of the cornerstones of next-generation wireless networking.

Πίνακας Περιεχομένων

Copyright ©.....	i
Περίληψη.....	ii
Abstract.....	iii
Πίνακας Περιεχομένων.....	iv
Κατάλογος Εικόνων.....	vi
Κατάλογος Πινάκων.....	vii
Εισαγωγή.....	1
1. Εξέλιξη των Πρωτοκόλλων Wi-Fi.....	3
1.1 Ιστορική αναδρομή και εξέλιξη του Wi-Fi.....	3
1.2 Κύρια χαρακτηριστικά των προηγούμενων προτύπων Wi-Fi.....	9
1.3 Η ανάγκη για την ανάπτυξη του Wi-Fi 7 (802.11be).....	17
2. Τεχνική Ανάλυση του Πρωτοκόλλου Wi-Fi 7 (802.11be).....	19
2.1 Εισαγωγή στο Wi-Fi 7 και οι στόχοι του.....	19
2.2 Ανάλυση τεχνικών χαρακτηριστικών.....	20
2.2.1 Channel Bandwidth.....	20
2.2.2 Spatial Streams.....	23
2.2.3 Modulation.....	26
2.2.4 Multi-Link.....	30
2.2.5 Multi Resource Unit Aggregation.....	36
2.2.6 Target Wake Time.....	41
3. Σύγκριση με Προηγούμενα Πρωτόκολλα.....	45
3.1 Throughput και Data Rates.....	45
3.2 Latency.....	46
3.3 Spectrum Utilization.....	48
3.4 Bandwidth και MIMO (Multiple-Input Multiple-Output).....	50
3.5 Ενεργειακή αποδοτικότητα (Energy Efficiency).....	52
3.6 Κάλυψη και Αξιοπιστία Σήματος.....	55
4. Περιπτώσεις Χρήσης και Εφαρμογές του Wi-Fi 7.....	57

4.1	Δίκτυα επιχειρήσεων.....	57
4.2	Έξυπνα σπίτια και IoT.....	59
4.3	Παιχνίδια και Streaming.....	61
4.4	Βιομηχανικό IoT και Αυτοματισμοί.....	63
5.	Προκλήσεις και Περιορισμοί του Wi-Fi 7.....	66
5.1	Απαιτήσεις σε υποδομές και υλικό.....	66
5.2	Συμβατότητα με παλαιότερες συσκευές.....	68
5.3	Προβλήματα ασφάλειας και προστασίας δεδομένων.....	69
6.	Το Μέλλον της Ασύρματης Δικτύωσης πέρα από το Wi-Fi 7.....	73
6.1	Συνδυασμός με 5G/6G δίκτυα.....	73
6.2	Ενσωμάτωση με AI και Machine Learning.....	75
	Συμπεράσματα.....	78
	Βιβλιογραφία.....	80

Κατάλογος Εικόνων

Νούμερο εικόνας	Τίτλος εικόνας	Σελίδα
Εικόνα 1	Ένα τερματικό ALOHAnet το 1971	5
Εικόνα 2	Εξέλιξη Wi-Fi	9
Εικόνα 3	Κατανομή πόρων OFDM έναντι OFDMA	15
Εικόνα 4	Βασικές βελτιώσεις συγκριτικά με το Wi-Fi 6	19
Εικόνα 5	Επέκταση εύρους ζώνης Wi-Fi 7 καναλιών	21
Εικόνα 6	Εκχώρηση καναλιών (Channel Allocation) 320 MHz σε ζώνη 6 GHz	21
Εικόνα 7	Στατική διάτρηση (Static Puncturing) σε Wi-Fi 7 στο Wi-Fi 7	22
Εικόνα 8	Wider Channels, Higher Order Modulation and More Spatial Streams	23
Εικόνα 9	Wi-Fi Router χωρίς και με Beamforming	24
Εικόνα 10	Τοποθεσία των RU's (Resource Units)	25
Εικόνα 11	Διαφορά διαμόρφωσης από Wi-Fi 6 σε Wi-Fi 7	27
Εικόνα 12	Multi-Link Operation από Wi-Fi 6 σε Wi-Fi 7	31
Εικόνα 13	Πλεονεκτήματα της λειτουργίας Multi-Link	32
Εικόνα 14	Τύποι της λειτουργίας Multi-Link	35
Εικόνα 15	Παράδειγμα MRU στο Wi-Fi 7 συγκριτικά με το Wi-Fi 6	37
Εικόνα 16	Υποστήριξη MRU στο Wi-Fi 7	38
Εικόνα 17	Βελτιώσεις στο PHY Layer του Wi-Fi 7	39
Εικόνα 18	TWT Request Frame Structure	43
Εικόνα 19	TWT Operation: Συντονισμένοι κύκλοι ύπνου και αφύπνισης για συσκευές	43
Εικόνα 20	Building business growth with WiFi 7	57

Κατάλογος Πινάκων

Νούμερο πίνακα	Τίτλος πίνακα	Σελίδα
Πίνακας 1	Wi-Fi πρότυπα και δεδομένα	10
Πίνακας 2	Ρυθμοί διαμόρφωσης(modulation rates) 802.11a και ρυθμοί δεδομένων(data rates) για απόσταση καναλιών(channel spacing) 20 MHz	12
Πίνακας 3	Διαμόρφωση (modulation) 802.11n και ρυθμοί δεδομένων (data rates) για ενιαία ροή (single stream)	13
Πίνακας 4	802.11ac vs 802.11ax	16
Πίνακας 5	Σύγκριση ροής δεδομένων (throughput) μεταξύ προτύπων Wi-Fi	26
Πίνακας 6	Σύγκριση εντολών διαμόρφωσης στα πρότυπα Wi-Fi	29
Πίνακας 7	Συγκριτικός πίνακας Throughput και Data Rate	45
Πίνακας 8	Συγκριτικός πίνακας χρονικής καθυστέρησης (Latency)	47
Πίνακας 9	Συγκριτικός πίνακας χρήσης φάσματος	49
Πίνακας 10	Συγκριτικός πίνακας εύρος ζώνης και MIMO	51
Πίνακας 11	Συγκριτικός πίνακας ενεργειακής απόδοσης	54
Πίνακας 12	Συγκριτικός πίνακας ακτίνα, ισχύς και αξιοπιστία σήματος	56

Εισαγωγή

Το IoT(Internet of Things) είναι μία επαναστατική πραγματικότητα στον 21ο αιώνα. Έφερε τη διασύνδεση στο επόμενο επίπεδο, συνδέοντας συσκευές, συστήματα και χρήστες με έναν άνευ προηγουμένου τρόπο. Από τα έξυπνα σπίτια και τις εφαρμογές βιομηχανικού αυτοματισμού έως τις λύσεις στον τομέα της υγειονομικής περίθαλψης και της περιβαλλοντικής παρακολούθησης, οι εφαρμογές του IoT έχουν διαπεράσει σχεδόν κάθε πτυχή της ανθρώπινης ζωής και, μάλιστα, των βιομηχανιών. Οι περισσότερες από αυτές τις ασύρματες συνδέσεις βασίζονται σε ραδιοσυχνότητες και ένας από τους πιο θεμελιώδεις πυλώνες στις ασύρματες επικοινωνίες θα είναι το Wi-Fi. Η εξέλιξη του προτύπου Wi-Fi είχε ως στόχο να υποστηρίξει τις συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις στο IoT, δίνοντας την ταχύτητα, την αξιοπιστία και την αποτελεσματικότητα που απαιτούνται για τον ταχέως αυξανόμενο αριθμό συνδεδεμένων συσκευών.

Το Wi-Fi, το οποίο αρχικά σχεδιάστηκε ως ένας βολικός τρόπος για να αποκτήσει κανείς ασύρματη πρόσβαση στο διαδίκτυο, βρισκόταν σε συνεχή εξέλιξη για να ανταποκριθεί στη ζήτηση που εμφανιζόταν σε έναν ολοένα και πιο ψηφιακό κόσμο. Από το αρχικό IEEE 802.11b έως το πιο πρόσφατο Wi-Fi 6 (802.11ax), κάθε διαδοχική γενιά του προτύπου Wi-Fi βελτίωσε την απόδοση, την καθυστέρηση και τη φασματική αποδοτικότητα. Τώρα όμως το τοπίο μεταβάλλεται με έναν απολύτως πρωτοφανή ρυθμό, καθοδηγούμενο από τεχνολογίες όπως το edge computing, το AI και τα δίκτυα 5G. Αυτή η πρόοδος πρέπει προφανώς να συνοδεύεται από ένα παρόμοιο άλμα όσον αφορά τις δυνατότητες του Wi-Fi που θα ενσωματώσει και θα υποστηρίξει απρόσκοπτα την επόμενη γενιά συστημάτων IoT.

Το τελευταίο βήμα σε αυτό το ταξίδι εξέλιξης, βασισμένο στο πρότυπο IEEE 802.11be, είναι το Wi-Fi 7, το οποίο αντιμετωπίζει τους περιορισμούς των προκατόχων και τοποθετείται ως ακρογωνιαίος λίθος για τη νέα τεχνολογική εποχή. Από αυτή την άποψη, το Wi-Fi 7 επιτρέπει ακραία υψηλή απόδοση (Extreme High Throughput), λειτουργίες πολλαπλών συνδέσεων και υποστήριξη καναλιών 320 MHz για πρωτοφανή βελτίωση των επιδόσεων, της αποδοτικότητας και της εμπειρίας του χρήστη. Αυτές οι βελτιώσεις δεν είναι απλώς σταδιακές, αλλά αντικατοπτρίζουν μια θεμελιώδης αλλαγή στο σχεδιασμό των πρωτοκόλλων ασύρματης επικοινωνίας για να ανταποκριθούν στην εκθετική αύξηση των συσκευών IoT και στην πολυπλοκότητα των εφαρμογών τους.

Η αναγκαιότητα για το Wi-Fi 7 γίνεται ακόμη πιο κατανοητή αν αναλογιστεί κανείς τις σύγχρονες προκλήσεις που έχουν προκύψει με τα οικοσυστήματα IoT. Η συμφόρηση των ασύρματων δικτύων λόγω του αυξανόμενου αριθμού συσκευών που κατακλύζουν τις τάξεις τους τόσο στις έξυπνες πόλεις όσο και στις βιομηχανικές εγκαταστάσεις έχει ως αποτέλεσμα αυξημένη καθυστέρηση και μειωμένη απόδοση. Εν τω μεταξύ, οι

εφαρμογές που απαιτούν εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση σε συνδυασμό με υψηλή αξιοπιστία, όπως αυτές με τα αυτόνομα οχήματα και την τηλεϊατρική απαιτούν ένα επίπεδο επιδόσεων το οποίο το τρέχον πρότυπο Wi-Fi δεν μπορεί να ικανοποιήσει. Όλες αυτές οι προκλήσεις προσδίδουν στο Wi-Fi 7 μοναδικά προσόντα για την ικανότητά του να τις αντιμετωπίσει, καθώς εξασφαλίζει χαμηλότερη καθυστέρηση, καλύτερη ποιότητα υπηρεσίας και βελτιωμένη χρήση του φάσματος.

Πέραν των τεχνικών πλεονεκτημάτων του, το Wi-Fi 7 έχει μεγάλη σημασία για την καινοτομία που σχετίζεται με το IoT. Με την AR (augmented reality), την VR (virtual reality) και τα εντυπωσιακά μέσα που φτάνουν στο σπίτι μας και την ενσωμάτωση του IoT με τη μηχανική μάθηση και την ανάλυση μεγάλων δεδομένων, αυτό σίγουρα δίνει πρόσθετη έμφαση στην ανάγκη για μια καλή ασύρματη υποδομή. Αυτές οι τεχνολογίες απαιτούν δίκτυα που μπορούν να διαχειριστούν υψηλούς ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων και απρόσκοπτη συνδεσιμότητα, για τα οποία το Wi-Fi 7 είναι σχεδιασμένο.

Η εργασία αυτή εξετάζει τη συμβολή και το ρόλο του Wi-Fi 7 στη διαμόρφωση του μέλλοντος του Διαδικτύου των πραγμάτων. Αρχικά, αναφέρω τη χρονολογική εξέλιξη των προτύπων για το Wi-Fi και τη συμβολή του στην ανάπτυξη του IoT. Στη συνέχεια εξετάζουμε περαιτέρω τις τεχνικές καινοτομίες του Wi-Fi 7 και εξετάζουμε τις συνέπειες για τα οικοσυστήματα του IoT. Τέλος, εξετάζουμε τα μεγάλης κλίμακας κοινωνικοοικονομικά οφέλη από την υιοθέτηση του Wi-Fi 7 ενόψει της νέας τεχνολογικής εποχής. Με τη διερεύνηση αυτή, θέλουμε η παρούσα μελέτη να ρίξει φως στην ανάγκη υιοθέτησης του Wi-Fi 7 για να καταστεί δυνατή η πρόοδος προς ένα καλύτερο μέλλον στον ψηφιακό, πλήρως διασυνδεδεμένο κόσμο.

1. Εξέλιξη των Πρωτοκόλλων Wi-Fi

1.1 Ιστορική αναδρομή και εξέλιξη του Wi-Fi

Η ασύρματη δικτύωση έχει μια μακρά και ενδιαφέρουσα ιστορία προέλευσης. Πολλές ξεχωριστές ομάδες ανθρώπων εργάζονταν πάνω στο πρόβλημα επί δεκαετίες. Μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 1990 είχαν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι και η ανάγκη για ένα διεθνές πρότυπο ήταν σαφής. Χρειάστηκαν χρόνια εργασίας και δεκάδες προτάσεις για να διαμορφωθεί το αρχικό πρότυπο Wi-Fi το 1997. Χρειάστηκαν ακόμη περισσότερες προσπάθειες τα τελευταία 27 χρόνια για να φτάσουμε στο σημείο που βρισκόμαστε σήμερα. Αυτό που αποκαλούμε «Wi-Fi» είναι στην πραγματικότητα μια σειρά από πρότυπα ασύρματης δικτύωσης, τα οποία ψηφίστηκαν από ένα παγκόσμιο σώμα μηχανικών, το IEEE(Institute of Electrical and Electronics Engineers). Υπάρχει μια περίπλοκη ιστορία που οδηγεί σε αυτό το αρχικό πρότυπο του 1997 και η αλήθεια είναι δύσκολο να αποκρυπτογραφηθεί, παρόλο αυτά υπάρχουν κάποιοι βασικοί άνθρωποι και οργανισμοί που βρίσκονται πίσω από την τεχνολογία.

Τα πρώτα δίκτυα επικοινωνίας ήταν τόσο ασύρματα όσο και προβιομηχανικά: τα σήματα καπνού, τα σήματα φωτός και φλόγας, οι καθρέφτες, οι σηματοδότες και οι σημαίες είναι όλα παραδείγματα τεχνολογιών που χρησιμοποιήθηκαν για την ασύρματη μεταφορά πληροφοριών, ξεκινώντας πολύ πριν ο τηλεγράφος και το τηλέφωνο φέρουν τα καλώδια στην επικοινωνία σε μεγάλες αποστάσεις.

Το ραδιόφωνο έγινε η πρώτη ασύρματη τεχνολογία της βιομηχανικής εποχής. Ο Χάινριχ Ρούντολφ Χερτζ πραγματοποίησε τις πρώτες κατάλληλα τεκμηριωμένες μεταδόσεις ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων τη δεκαετία του 1880. Αργότερα, βέβαια, το Hertz έγινε το ίδιο το όνομα της μονάδας μέτρησης των συχνοτήτων. Ο Σέρβος-Αμερικανός Νίκολα Τέσλα και ο Βεγγαλός Τζαγκαντίν Τσάντρα Μπόζε ήταν δύο από τους πολλούς επιστήμονες που συνέχισαν το έργο που είχε κάνει ο Χερτζ με τα ραδιοκύματα. Τη δεκαετία του 1890, ο Bose έκανε διάσημη επίδειξη των μικροκυμάτων χρησιμοποιώντας τα για να αναφλέξει πυρίτιδα και να χτυπήσει μια καμπάνα από απόσταση, μπροστά σε κοινό στο δημαρχείο της Καλκούτα. Στο δοκίμιό του με τίτλο «Αόρατο φως», ο Bose έγραψε: Το αόρατο φως μπορεί εύκολα να περάσει μέσα από τοίχους από τούβλα, κτίρια κ.λπ. Ως εκ τούτου, τα μηνύματα μπορούν να μεταδίδονται μέσω αυτού χωρίς τη μεσολάβηση καλωδίων.

Προς το γύρισμα του αιώνα, ο Guglielmo Marconi παρουσίασε την πρώτη εμπορικά χρησιμοποιήσιμη συσκευή για ασύρματη τηλεγραφία μεγάλων αποστάσεων, βασιζόμενος, μεταξύ άλλων, στο έργο των Hertz, Tesla και Bose. Ο Nikola Tesla ήταν επίσης πίσω από την πρώτη γνωστή μέθοδο αλλαγής συχνοτήτων για την αποφυγή παρεμβολών. Το 1903 κατοχύρωσε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας ένα σύστημα όπου ο πομπός και ο δέκτης εναλλάσσονται συγχρονισμένα μεταξύ δύο καναλιών. Όπως κάθε πρωτοποριακή τεχνολογία επικοινωνίας, έτσι και αυτή βρήκε σύντομα στρατιωτική

χρήση. Από το 1915, ο γερμανικός στρατός άρχισε να χρησιμοποιεί ραδιόφωνα με μεταβαλλόμενες συχνότητες για να εμποδίσει τους Βρετανούς να κρυφακούσουν.

Αυτή που θα ερχόταν για να προωθήσει περαιτέρω αυτή την τεχνολογία ήταν η σταρ του Χόλιγουντ Hedy Lamarr. Ήταν έξυπνη, εφευρετική και είχε ένα σαφώς ευρύ φάσμα ενδιαφερόντων. Η Lamarr ήταν εξοικειωμένη τόσο με τη ραδιοφωνική τεχνολογία όσο και με τη βιομηχανία όπλων. Ήξερε ότι οι τορπίλες ήταν αποτελεσματικά όπλα, αλλά εξαιρετικά ευάλωτα στον εντοπισμό και το σαμποτάζ των ραδιοσημάτων που χρησιμοποιούνταν για τον έλεγχό τους. Είχε την ιδέα της χρήσης πολλαπλών, μεταβαλλόμενων συχνοτήτων για να καταστήσει δυσκολότερη τη δολιοφθορά των σημάτων, και το ονόμασε αλληπάλληλες συχνότητες(frequency hopping). Πρόκειται για ένα πρώιμο παράδειγμα αυτού που σήμερα είναι γνωστό ως τεχνολογία διασποράς φάσματος(spread spectrum technology). Από τα μουσικά έργα, ο συνθέτης Antheil είχε μεγάλη εμπειρία με τον συγχρονισμό των πιανίσκων ή πιάνων. Οι δύο τους εμπνεύστηκαν από αυτό για να αναπτύξουν ένα μυστικό σύστημα επικοινωνίας για τον τηλεχειρισμό τορπιλών, το οποίο βασιζόταν σε έναν μηχανισμό άλματος συχνότητας που άλλαζε μεταξύ 88 διαφορετικών συχνοτήτων. Το 1942, έλαβαν δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για το σύστημα αυτό. Ωστόσο, το αμερικανικό πολεμικό ναυτικό δεν αποδείχθηκε ενθουσιασμένο με την προτεινόμενη συσκευή για τη χρήση του συστήματος αυτού και έτσι δεν το υιοθέτησε εκείνη την εποχή. Μόνο πολύ αργότερα, μετά τη λήξη της αρχικής πατέντας, κάποιος έθεσε τελικά την εφεύρεσή τους σε χρήση για στρατιωτικούς σκοπούς. Το 1997, το Ίδρυμα Electronic Frontier Foundation (EFF) απένειμε στους Lamarr και Antheil (μετά θάνατον) το βραβείο πρωτοπόρου για την «πρωτοποριακή ανάπτυξη από τους εφευρέτες μιας τεχνολογίας που έχει γίνει βασικό συστατικό των ασύρματων συστημάτων δεδομένων».

Το 1968, ερευνητές του Πανεπιστημίου της Χαβάης άρχισαν να διερευνούν αν τα ραδιοκύματα θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την επικοινωνία μεταξύ υπολογιστών. Επικεφαλής του έργου ήταν ο καθηγητής Norman Abramson, ο Δρ Franklin Kuo, και μια ομάδα καθηγητών και φοιτητών. Θα γινόταν γνωστό ως ALOHAnet. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, η ενσύρματη δικτύωση υπολογιστών βρισκόταν σε αρχικά στάδια ακόμα αλλά εξελισσόταν ραγδαία. Η μεταγωγή πακέτων(packet switching) επινοήθηκε από τον Paul Baran το 1964 και επιδείχθηκε για πρώτη φορά από τον Donald Davies τον Αύγουστο του 1968. Τον Οκτώβριο του 1969, δημιουργήθηκε η πρώτη σύνδεση ARPANET μεταξύ του UCLA και του Stanford. Τον Ιούνιο του 1971, το ALOHAnet ήταν το πρώτο ασύρματο δίκτυο δεδομένων μεταγωγής πακέτων στον κόσμο.

Κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης του ALOHAnet, ο Abramson και η ομάδα του έπρεπε να λύσουν πολλά θεμελιώδη ζητήματα με την ασύρματη δικτύωση, συμπεριλαμβανομένων των συγκρούσεων και των αποτυχημένων μεταδόσεων. Αποφάσισαν ότι ένα πρωτόκολλο τυχαίας πρόσβασης θα ήταν ο καλύτερος τρόπος για να το επιτύχουν αυτό. Το πρωτόκολλο ALOHA επέτρεπε στα τερματικά να στέλνουν δεδομένα όποτε τα είχαν, και να ακούνε τις μεταδόσεις τους για να βεβαιώνονται ότι έχουν ληφθεί και επιβεβαιωθεί. Εάν μια μετάδοση αποτύγχανε, τα τερματικά θα έστελναν ξανά μετά από μια τυχαία καθυστέρηση. Αυτό ήταν απλό και αποτελεσματικό,

αλλά είχε προβλήματα κλιμάκωσης σε περισσότερους χρήστες. Το πρωτόκολλο ALOHA βελτιώθηκε και επεκτάθηκε και αποτέλεσε την έμπνευση για το CSMA/CA.



Εικόνα 1. Ένα τερματικό ALOHAnet το 1971

Πηγή: <https://evanmccann.net/blog/wifi-101/origins-and-history>

Το ALOHAnet ήταν ένα πρωτοποριακό τεχνολογικό θαύμα, αλλά ήταν πειραματικό και ακατάλληλο για εμπορική χρήση. Το πιο κρίσιμο είναι ότι το μη αδειοδοτημένο φάσμα για επικοινωνίες υπολογιστών δεν ήταν ακόμη διαθέσιμο στο κοινό. Δεδομένου ότι το Πανεπιστήμιο της Χαβάης δεν είχε τρόπο να πουλήσει την τεχνολογία, η τεχνολογία τέθηκε σε δημόσιο κτήμα. Το ALOHAnet τέθηκε εκτός λειτουργίας το 1976, αλλά ενέπνευσε άλλους να συνεχίσουν αυτό που ξεκίνησε. Πιο συγκεκριμένα, ο Robert «Bob» Metcalfe το μελέτησε για τη διδακτορική του διατριβή.

Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1970, αναπτύχθηκαν πολλές τεχνολογίες ενσύρματων τοπικών δικτύων. Ορισμένες ήταν ιδιόκτητες και ορισμένες ήταν ανοικτά πρότυπα. Οι περισσότερες από αυτές τις πρώιμες εργασίες έγιναν πρότυπα ANSI (American National Standards Institute) ή IEEE και αποτέλεσαν τη βάση για την επικοινωνία των υπολογιστών και το Διαδίκτυο. Η προσέγγιση με βάση τα πρότυπα δεν ήταν πεπρωμένο, και όλοι μας επωφελούμαστε από τους πρωτοπόρους που πίεσαν για πρότυπα αντί για ιδιόκτητες λύσεις. Όλο αυτό το πρωτοποριακό έργο για τα ενσύρματα πρότυπα βοήθησε να τεθούν τα θεμέλια για την ασύρματη τεχνολογία.

Αξίζει να σημειωθούν, έστω και πολύ σύντομα και περιγραφικά, οι παρακάτω ημερομηνίες και τα γεγονότα σχετικά με την εξέλιξη της ενσύρματης δικτύωσης καθώς αυτά αποτέλεσαν την βάση για την ασύρματη.

1973: Bob Metcalf και David Boggs δημιουργήσαν τη βάση για το Ethernet, ενώ εργάζονταν στο θρυλικό ερευνητικό κέντρο της Xerox στο Palo Alto της Καλιφόρνια. Εμπνεύστηκαν από την προσέγγιση του ARPAnet και του ALOHAnet που βασιζόταν σε πακέτα και βελτίωσαν αυτό το σχέδιο. Στις 11 Νοεμβρίου 1973, το πρώτο σύστημα Ethernet ήταν λειτουργικό.

1974: Το Cambridge Ring αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο του Κέιμπριτζ, αποτελώντας τη βάση αυτού που έγινε Token Ring. Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1970, ο Werner Bux, ο Hans Müller και άλλοι υπάλληλοι της IBM εργάστηκαν πάνω στο σχεδιασμό αυτού που έγινε το ιδιόκτητο Token Ring της IBM .

1974: Ο Vint Cerf και ο Bob Kahn δημοσιεύουν το «A Protocol for Packet Network Intercommunication», το οποίο περιγράφει το TCP και θέτει τις βάσεις για το TCP/IP.

1975: Η Xerox καταθέτει αίτηση για δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για το Ethernet.

1978: Jonathan B. Postel γράφει την πρώτη προδιαγραφή του IPv4.

1979: Η Xerox επιλέγει να καταστήσει το Ethernet ανοικτό πρότυπο για να βοηθήσει στην κατασκευή και να τονώσει τις πωλήσεις των προϊόντων της. Η DEC και η Intel συμμετέχουν στην προσπάθεια.

1980: Συγκροτείται η επιτροπή IEEE 802.3 για να γίνει το Ethernet ένα ανοικτό πρότυπο, με επικεφαλής τις Xerox, DEC, Intel και άλλους μεγάλους κατασκευαστές.

1980: Ο μηχανικός Michael Marcus κάνει μια πρόταση στην αμερικανική FCC για το άνοιγμα των ζωνών ISM για μη αδειοδοτημένη χρήση διαμόρφωσης και πολλαπλής πρόσβασης με διασπορά φάσματος, πηγαίνοντας ενάντια στη συμβατική σοφία της εποχής. Οι ζώνες ISM(industrial, scientific, και medical) θεωρείται ότι δεν έχουν καμία πρακτική εφαρμογή στις επικοινωνίες.

1983: Επικυρώνεται το πρώτο πρότυπο IEEE 802.3 Ethernet, 10BASE5. Το Wi-Fi χρησιμοποιεί πολλαπλά μέρη της οικογένειας πρωτοκόλλων IEEE 802 και έχει σχεδιαστεί για να συνεργάζεται απρόσκοπτα με το Ethernet, το ενσύρματο αδελφάκι του.

1985: Η IBM εισήγαγε την ιδιόκτητη έκδοση του Token Ring, προσφέροντας 4 Mbps. Λόγω της ενσωμάτωσης με τους υπολογιστές της IBM, το Token Ring ήταν δημοφιλές για ένα διάστημα στη δεκαετία του 1980, μέχρι που το Ethernet εξελίχθηκε στο πανταχού παρόν πρότυπο που είναι σήμερα.

1985: Η Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών των ΗΠΑ άνοιξε τις ραδιοζώνες ISM (Industrial, Science, and Medicine) του ασύρματου φάσματος για χρήση στις επικοινωνίες χωρίς κρατική άδεια. Οι συχνότητες που απελευθερώθηκαν περιλαμβάνουν: MHz, 2,4 GHz και 5,8 GHz. Άλλες χώρες και περιοχές ακολούθησαν τελικά το παράδειγμα της FCC. Με αυτό το φάσμα διαθέσιμο για χρήση από οποιονδήποτε, θα μπορούσε να ξεκινήσει η πραγματική ανάπτυξη των πρώτων εμπορικών τεχνολογιών ασύρματων δικτύων.

Μέχρι το 1985, όλα τα κομμάτια ήταν έτοιμα για την ανάπτυξη ενός καθολικού προτύπου ασύρματης δικτύωσης. Αυτές ήταν οι μέρες της Άγριας Δύσης της ασύρματης δικτύωσης. Δεκάδες εταιρείες ανταγωνίζονταν για να είναι οι πρώτες που θα παρήγαγαν ένα επιτυχημένο προϊόν. Πολλές εταιρείες ήρθαν και έφυγαν, γι' αυτό θα επικεντρωθώ μόνο στις μεγαλύτερες και σημαντικότερες.

NCR και WaveLAN

Στη δεκαετία του 1980, η NCR Corporation ήταν μια μεγάλη διεθνής εταιρεία που πωλούσε υπολογιστές, ATM και ταμειακές μηχανές. Ήθελαν να αναπτύξουν έναν τρόπο για να λειτουργούν οι ταμειακές τους μηχανές ασύρματα. Αυτό θα τους έδινε ένα ανταγωνιστικό πλεονέκτημα και θα επέτρεπε στα καταστήματα λιανικής να αποφύγουν το κόστος και την υλικοτεχνική υποδομή της καλωδίωσης σε κάθε ταμειακή μηχανή. Ταυτόχρονα, οι ταμειακές μηχανές έμοιαζαν όλο και περισσότερο με υπολογιστές, οπότε η NCR προσπάθησε να αναπτύξει ένα διεθνές ασύρματο πρότυπο που θα μπορούσε να χρησιμοποιήσει οποιοσδήποτε υπολογιστής. Δύο από τους βασικούς μηχανικούς που ανέλαβαν αυτό το έργο ήταν οι Cees Links και Vic Hayes. Κατά τη διάρκεια του 1986 και του 1987, ο Vic και οι άλλοι μηχανικοί της NCR ανέπτυξαν ένα προϊόν που έγινε γνωστό ως WaveLAN.

Η NCR παρουσίασε το WaveLAN στον κόσμο το 1990.(2) Ενώ το WaveLAN προοριζόταν για χρήση σε ταμειακές μηχανές, τοποθετήθηκε επίσης ως μια ασύρματη εναλλακτική λύση στο Ethernet και το Token Ring για υπολογιστές. Στη δεκαετία του 1990, τα ασύρματα προϊόντα ήταν ακριβά και δύσκολα στη χρήση. Τα πρώτα προγράμματα οδήγησης ήταν προβληματικά και η τεκμηρίωση ήταν δύσκολο να βρεθεί. Οι προσαρμογείς δικτύου WaveLAN κόστιζαν εκατοντάδες δολάρια και τα σημεία πρόσβασης μπορεί να κόστιζαν χιλιάδες δολάρια. Το υψηλό κόστος και η περιορισμένη χρηστικότητα διατήρησαν το WaveLAN ως ένα εξειδικευμένο προϊόν, το οποίο συναντούσαν κυρίως οι μεγάλες επιχειρήσεις που είχαν την οικονομική δυνατότητα να το αγοράσουν.

Το WaveLAN λειτουργούσε στα 900MHz ή στα 2,4 GHz και προσέφερε ταχύτητες 1 έως 2 Mbps. Ανταγωνιζόταν το ARLAN της Aironet και άλλα που προσέφεραν παρόμοιες ταχύτητες, εύρος συχνοτήτων και υλικό. Αρκετές εταιρείες διέθεταν επίσης στην αγορά ασύρματες γέφυρες και δρομολογητές που βασίζονταν στην τεχνολογία WaveLAN. Τα προϊόντα ασύρματης δικτύωσης έγιναν ένα χάος από ανταγωνιστικές εταιρείες και διαφορετικές υλοποιήσεις. Η ανάγκη για ένα διεθνές πρότυπο ήταν σαφής.

Η NCR ήθελε να αναθέσει στον Vic Hayes να κάνει τις τεχνικές προτάσεις στο IEEE εκ μέρους της εταιρείας. Ο Vic διαφώνησε και αγωνίστηκε να παραμείνει ανεξάρτητος και να μην κάνει καμία από τις προτάσεις για λογαριασμό της NCR. Η εταιρεία συμφώνησε, και αυτό στην πραγματικότητα λειτούργησε προς όφελός της. Δεδομένου ότι ο Vic δεν προωθούσε την ιδιόκτητη λύση της NCR, κέρδισε την εμπιστοσύνη των άλλων. Ο Vic κατέληξε να γίνει ο πρώτος πρόεδρος της ομάδας εργασίας IEEE 802.11, δίνοντάς του το παρατσούκλι «Πατέρας του Wi-Fi».

IEEE και η ομάδα εργασίας 802.11

Το 1988, ο Vic Hayes προσέγγισε το IEEE για να συνεισφέρει στο 802.4L, μια υπάρχουσα επιτροπή που δημιουργούσε ένα ασύρματο πρότυπο βασισμένο στο Token

Ring. Όπως αποδείχθηκε, η εν λόγω επιτροπή είχε καταστεί ανενεργή και ο πρόεδρος είχε παραιτηθεί. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα ο Vic να γίνει πρόεδρος της 802.4L και να δημιουργηθεί μια νέα ομάδα εργασίας, η 802.11. Οι τεχνολογίες Ethernet και WaveLAN αποτέλεσαν μέρος της τεχνικής βάσης της επιτροπής 802.11, η οποία ξεκίνησε επίσημα το 1990. Το WaveLAN και οι γνώσεις της ομάδας του Vic Hayes στην NCR βοήθησαν στη διαμόρφωση της βάσης, αλλά αμέτρητοι άλλοι συνέβαλαν επίσης. Πολλές άλλες εταιρείες υπέβαλαν προτάσεις για διάφορες πτυχές του προτύπου, και η ομάδα συμβιβάστηκε και ψήφισε τις καλύτερες ιδέες στην πορεία. Τα περισσότερα από τα έγγραφά τους είναι ακόμη δημόσια διαθέσιμα. Η ομάδα 802.11 συνέχισε να εργάζεται καθ' όλη τη δεκαετία του 1990 για την ανάπτυξη του προτύπου, η οποία ήταν μια μακρά και περίπλοκη διαδικασία. Χρειάστηκαν 7 χρόνια και η συμβολή αμέτρητων μηχανικών για να διαμορφωθεί το πρώτο πρότυπο Wi-Fi, γνωστό ως 802.11-1997.

Το πρώτο πρότυπο Wi-Fi ήταν κατά κάποιον τρόπο ένας ακατάλληλος συμβιβασμός. Επέτρεπε μεταδόσεις μέσω υπέρυθρων ή ραδιοκυμάτων 2,4 GHz. Επίσης, επέτρεπε δύο διαφορετικές μεθόδους επιλογής συχνότητας, γεγονός που εμποδίζει την εγγυημένη συμβατότητα. Τελικά, στο πρότυπο προστέθηκαν τόσο το Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS) όσο και το Direct-Sequence Spread Spectrum (DSSS). Η ομάδα επέτρεψε αυτές τις επιλογές ως έναν τρόπο να ικανοποιήσει τις οντότητες που συμμετείχαν στη δημιουργία, αλλά αυτό έκανε το πρότυπο αδύναμο.

Το 802.11-1997 δεν απέκτησε ποτέ μεγάλη απήχηση. Παρόλα αυτά, η ομάδα άρχισε να εργάζεται πάνω στην επόμενη σειρά προτύπων, τα 802.11a και 802.11b, τα οποία αναπτύχθηκαν παράλληλα. Η κύρια διαφορά μεταξύ τους ήταν οι συχνότητες και τα σχήματα διαμόρφωσης που χρησιμοποιούσαν.

- Το 802.11a λειτουργεί στα 5 GHz, χρησιμοποιώντας OFDM(Orthogonal frequency-division multiplexing) για ρυθμούς δεδομένων έως 54 Mbps.
- Το 802.11b λειτουργεί στα 2,4 GHz, χρησιμοποιώντας DSSS για ρυθμούς δεδομένων έως 11 Mbps.

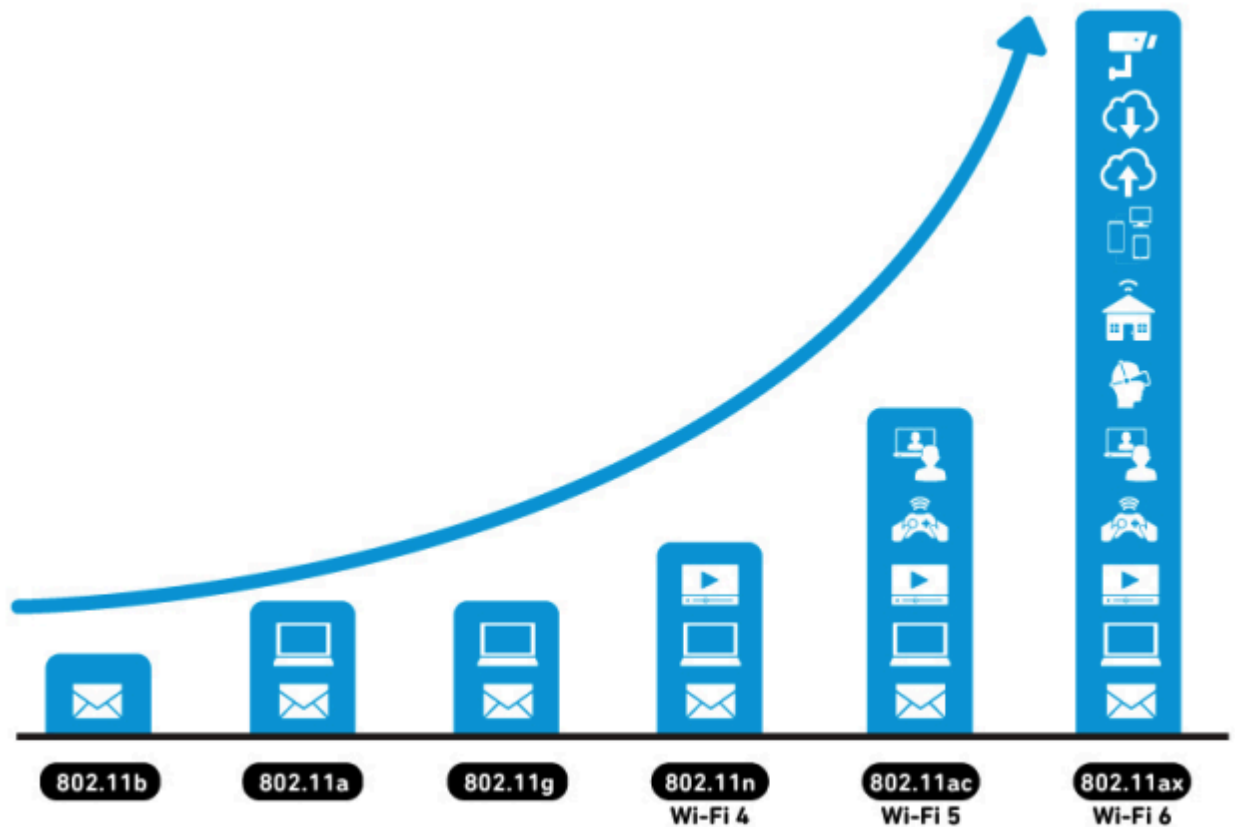
Το 802.11b κυκλοφόρησε πρώτο στην αγορά. Παρά τις χαμηλότερες ταχύτητες, ο κόσμος προτίμησε τη διαθεσιμότητα, το χαμηλότερο κόστος και τη μεγαλύτερη εμβέλεια του εξοπλισμού των 2,4 GHz. Η επιτυχία του 802.11b οδήγησε στην ανάπτυξη του 802.11g και κατέστησε τα 2,4 GHz την οριστική διεθνή περιοχή ασύρματου φάσματος για τα επόμενα χρόνια.

Στα τέλη της δεκαετίας του 1990, η επιτυχία του Wi-Fi δεν ήταν εγγυημένη. Οι πρώτες συσκευές Wi-Fi ήταν ακριβές, αργές και συχνά ασύμβατες με άλλες συσκευές. Σύμφωνα με τον Vic Hayes, προσέγγισε πολλούς κατασκευαστές υπολογιστών για να τους πείσει να προσθέσουν Wi-Fi στους υπολογιστές τους, αλλά οι περισσότεροι από αυτούς είπαν όχι. Ο Steve Jobs και η Apple ήθελαν να προσθέσουν Wi-Fi σε έναν επερχόμενο φορητό υπολογιστή, αλλά ήθελαν να κοστίζει 100 δολάρια και όχι 500 δολάρια. Υποστήριξαν ότι το χαμηλότερο κόστος θα το έκανε πιο εμπορεύσιμο στους καταναλωτές.

Η Apple τελικά πήρε την κάρτα Wi-Fi των 100 δολαρίων που ήθελε. Το iBook και το AirPort κυκλοφόρησαν στις 21 Ιουλίου 1999, λίγους μήνες πριν οριστικοποιηθεί το πρότυπο 802.11a και 802.11b. Ήταν ο πρώτος mainstream υπολογιστής που σχεδιάστηκε και πωλήθηκε με ενσωματωμένη ασύρματη δικτύωση.

1.2 Κύρια χαρακτηριστικά των προηγούμενων προτύπων Wi-Fi

Από την πρώτη κυκλοφορία και εφαρμογή των προτύπων Wi-Fi (802.11), ο κόσμος της τεχνολογίας γνώρισε μια ριζική μεταμόρφωση, δημιουργώντας νέες αγορές και οδηγώντας την ανάπτυξη καινοτόμων τεχνολογιών. Αυτή η συνεχής εξέλιξη αποτελεί έναν από τους βασικούς λόγους που καθιστούν την τεχνολογική πρόοδο ζωτικής σημασίας, κάτι που θα αναλυθεί διεξοδικά στη συνέχεια. Κάθε νέο πρότυπο Wi-Fi βασίζεται σταθερά στο προηγούμενο, προσφέροντας βελτιώσεις στην ταχύτητα και την αξιοπιστία της σύνδεσης. Στις επόμενες ενότητες, θα παρουσιαστούν αρκετά τεχνικά στοιχεία για τα πρότυπα Wi-Fi, χωρίς να δοθεί λεπτομερής εξήγηση σε κάθε χαρακτηριστικό. Ο στόχος είναι, μια ολοκληρωμένη τεχνική ανάλυση για το πρότυπο Wi-Fi 7, το οποίο αποτελεί και το κύριο θέμα αυτής της εργασίας.



Εικόνα 2. Εξέλιξη Wi-Fi

Πηγή: "The Wi-Fi Evolution" By: Jaidev Sharma
Director, Applications Engineering, white paper

Πρότυπα Wi-Fi

Από την πρώτη διάθεση του Wi-Fi στους καταναλωτές το 1997, τα πρότυπά του έχουν εξελιχθεί σταθερά, οδηγώντας σε μεγαλύτερες ταχύτητες και βελτιωμένη αποδοτικότητα

δικτύου και φάσματος. Κάθε νέα προσθήκη στο αρχικό πρότυπο 802.11 συνοδεύεται από σχετικές τροποποιήσεις, οι οποίες φέρουν ξεχωριστές ονομασίες, όπως 802.11b, 802.11g κ.λπ. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται τα διάφορα πρότυπα Wi-Fi μαζί με τους μέγιστους θεωρητικούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων που μπορούν να επιτύχουν. Ωστόσο, οι πραγματικοί ρυθμοί μετάδοσης είναι συνήθως χαμηλότεροι από τους θεωρητικούς, λόγω παραγόντων όπως η υποβάθμιση του σήματος με την απόσταση, η διαμόρφωση σήματος, η κωδικοποίηση διόρθωσης λαθών, το εύρος ζώνης, ο αριθμός πολλαπλών καναλιών (MIMO), το διάστημα προστασίας (guard interval) και οι τυπικοί ρυθμοί σφαλμάτων.

Η οικογένεια προτύπων 802.11 βασίζεται σε μια σειρά τεχνικών διαμόρφωσης για ημι-αμφίδρομη μετάδοση δεδομένων μέσω ασύρματης σύνδεσης, διατηρώντας κοινό το βασικό πρωτόκολλο επικοινωνίας. Στις ενότητες που ακολουθούν, θα γίνει συνοπτική παρουσίαση των κύριων χαρακτηριστικών κάθε προτύπου Wi-Fi, παρέχοντας μια συνολική εικόνα της εξέλιξής τους.

Πίνακας 1. Wi-Fi πρότυπα και δεδομένα

IEEE 802.11 Protocol	Release Date	Frequency Band(s)	Bandwidth	Max Throughput
802.11-1997	1997	2.4	22	2 Mbps
11b	1999	2.4	22	11 Mbps
11a	1999	5	20	54 Mbps
11g	2003	2.4	20	54 Mbps
11n (Wi-Fi 4)	2009	2.4/5	20/40	600 Mbps
11ac (Wi-Fi 5)	2013	2.4/5	20/40/80/160	6.8 Gbps
11ax (Wi-Fi 6)	2019	2.5/5	20/40/80/160	10 Gbps

Πρότυπο 802.11-1997

Το πρότυπο 802.11-1997 ήταν το πρώτο ασύρματο πρότυπο της οικογένειας, το οποίο κυκλοφόρησε το 1997, αλλά είναι πλέον παρωχημένο. Το πρότυπο αυτό ορίζει το πρωτόκολλο και τη συμβατή διασύνδεση εξοπλισμού επικοινωνίας δεδομένων μέσω του αέρα σε ένα τοπικό δίκτυο (LAN) με χρήση πρωτοκόλλου πολλαπλής πρόσβασης με αίσθηση φορέα και αποφυγή συγκρούσεων (CSMA/CA). Το πρωτόκολλο αυτό υποστήριζε τρεις τεχνολογίες φυσικού επιπέδου, συμπεριλαμβανομένων των υπερύθρων που λειτουργούσαν με ταχύτητα 1 Mbps, ενός φάσματος διασποράς με άλμα συχνότητας (FHSS) που υποστήριζε ταχύτητα 1 Mbps και προαιρετικά ταχύτητα δεδομένων 2 Mbps ή ενός φάσματος διασποράς άμεσης ακολουθίας (DSSS) που υποστήριζε ταχύτητες δεδομένων 1 και 2 Mbps. Το πρωτόκολλο αυτό δεν έγινε ευρέως αποδεκτό λόγω προβλημάτων διαλειτουργικότητας, κόστους και έλλειψης επαρκούς ρυθμού μετάδοσης.

Πρότυπο 802.11b

Τα προϊόντα 802.11b εμφανίστηκαν στην αγορά στα μέσα του 1999. Έχει μέγιστο θεωρητικό ρυθμό δεδομένων 11 Mbps και χρησιμοποιεί την ίδια μέθοδο πρόσβασης στο μέσο CSMA/CA που ορίζεται στο αρχικό πρότυπο. Η δραματική αύξηση της απόδοσης του 802.11b σε συνδυασμό με τη σημαντική μείωση της τιμής οδήγησε στην ευρεία αποδοχή του 802.11b ως ασύρματης τεχνολογίας. Το 802.11b χρησιμοποιεί τη μη αδειοδοτημένη ζώνη συχνοτήτων ISM από 2400-2500 MHz. Το 802.11b αποτελεί άμεση επέκταση του DSSS και χρησιμοποιεί ως τεχνική διαμόρφωσης τη συμπληρωματική κωδικοποίηση (CCK - complementary code keying). Το 802.11b χρησιμοποιείται σε διαμόρφωση point-to-multipoint όπου ένα σημείο πρόσβασης επικοινωνεί με κινητούς πελάτες εντός της εμβέλειας του σημείου πρόσβασης. Η εμβέλεια αυτή εξαρτάται από το περιβάλλον ραδιοσυχνοτήτων, την ισχύ εξόδου και την ευαισθησία του δέκτη. Το 802.11b έχει εύρος ζώνης καναλιού 22 MHz, μπορεί να λειτουργήσει στα 11 Mbps αλλά να μειωθεί στα 5,5, στη συνέχεια στα 2 και στη συνέχεια στο 1 Mbps (προσαρμοστική επιλογή ρυθμού), προκειμένου να μειωθεί ο ρυθμός των επαναπροωθήσεων που προκύπτουν από σφάλματα[1]. Έτσι, εντός του σπιτιού ασύρματες συσκευές όπως φούρνοι μικροκυμάτων, συσκευές Bluetooth και ασύρματα τηλέφωνα μπορούν να προκαλέσουν παρεμβολές στο Wi-Fi.

Πρότυπο 802.11a

Το 802.11a χρησιμοποιεί το ίδιο βασικό πρωτόκολλο με το αρχικό πρότυπο. Λειτουργεί στα 5 GHz και χρησιμοποιεί ορθογωνική πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (OFDM) 52 υποφορέων με μέγιστο θεωρητικό ρυθμό δεδομένων 54 Mbps. Αυτό επιτυγχάνει πρακτικό ρυθμό μετάδοσης στα μέσα των 20 Mbps. Άλλοι ρυθμοί δεδομένων που υποστηρίζει περιλαμβάνουν 6, 9, 12, 18, 24, 36 και 48 Mbps. Το 802.11a δεν είναι διαλειτουργικό με το 802.11b, καθώς λειτουργούν σε διαφορετικές μη αδειοδοτημένες ζώνες συχνοτήτων ISM. Η ζώνη των 5 GHz δίνει στο 802.11a σημαντικό πλεονέκτημα, δεδομένου ότι τα 2,4 GHz γίνονται γεμάτα, αλλά λόγω της υψηλής συχνότητας του φορέα, η αποτελεσματική συνολική εμβέλεια είναι μικρότερη από το 802.11b/g. Τα προϊόντα 802.11a δεν έγιναν αρχικά ευρέως αποδεκτά λόγω του κόστους, της χαμηλής εμβέλειας και της ασυμβατότητας με το 802.11b. Από τις 52 OFDM υποφέρουσες, 48 είναι για δεδομένα και 4 είναι πιλοτικές υποφέρουσες με διαχωρισμό φέροντος 312,5 kHz. Κάθε ένας από αυτούς τους υποφορείς μπορεί να είναι BPSK, QPSK, 16 QAM ή 64 QAM. Το εύρος ζώνης του καναλιού είναι 20 MHz με κατειλημμένο εύρος ζώνης 16,6 MHz. Η διάρκεια συμβόλου είναι 4 μsec, η οποία περιλαμβάνει ένα διάστημα προστασίας 0,8 μsec. Τα πλεονεκτήματα του OFDM περιλαμβάνουν μειωμένα φαινόμενα πολλαπλών διαδρομών κατά τη λήψη και αυξημένη φασματική απόδοση. Ο πίνακας 2 παραθέτει τις διάφορες διαμορφώσεις που υποστηρίζονται από το 11a και τον αντίστοιχο θεωρητικό ρυθμό δεδομένων τους.

Πίνακας 2. Ρυθμοί διαμόρφωσης(modulation rates) 802.11a και ρυθμοί δεδομένων(data rates) για απόσταση καναλιών(channel spacing) 20 MHz

Modulation Type (802.11a)	Coding Rate	Data Rate (Mbps)
BPSK	1/2	6
BPSK	3/4	9
QPSK	1/2	12
QPSK	3/4	18
16 QAM	1/2	24
16 QAM	3/4	36
64 QAM	2/3	48
64 QAM	3/4	54

Πρότυπο 802.11g

Το πρότυπο 802.11g έγινε διαθέσιμο το καλοκαίρι του 2003. Χρησιμοποιεί την ίδια τεχνολογία OFDM που εισήχθη με το 802.11a. Όπως και το 802.11a, υποστηρίζει μέγιστο θεωρητικό ρυθμό 54 Mbps. Αλλά όπως και το 802.11b, λειτουργεί στην πολυσύχναστη περιοχή 2,4 GHz και ως εκ τούτου είναι ευαίσθητο σε θέματα παρεμβολών. Το 802.11g είναι συμβατό προς τα πίσω με το 802.11b (δηλαδή οι συσκευές 802.11b μπορούν να συνδεθούν σε ένα σημείο πρόσβασης 802.11g). Το 802.11g ήταν σε θέση να χειριστεί σημεία πρόσβασης διπλής ζώνης ή διπλής λειτουργίας με χρήση 802.11a και 802.11b/g.

Πρότυπο 802.11n

Με το 802.11n, το Wi-Fi έγινε ακόμη πιο γρήγορο και αξιόπιστο. Αυτό επιτυγχάνεται με την προσθήκη MIMO και καναλιών 40 MHz στο φυσικό επίπεδο (PHY) και τη συγκέντρωση πλαισίων στο επίπεδο MAC. Η MIMO είναι μια μέθοδος πολλαπλασιασμού της χωρητικότητας μιας ραδιοζεύξης με τη χρήση πολλαπλών κεραιών εκπομπής και λήψης για την εκμετάλλευση της διάδοσης πολλαπλών διαδρομών. Αυτές οι κεραιές πρέπει να διαχωρίζονται χωρικά, έτσι ώστε το σήμα από κάθε κεραία εκπομπής σε κάθε κεραία λήψης να έχει διαφορετική χωρική υπογραφή, έτσι ώστε στο δέκτη να μπορεί να διαχωρίσει αυτές τις ροές σε παράλληλα ανεξάρτητα κανάλια. Τα κανάλια που λειτουργούν με πλάτος 40 MHz, διπλασιάζουν το πλάτος του καναλιού και παρέχουν διπλάσιο ρυθμό δεδομένων PHY σε σχέση με ένα ενιαίο κανάλι 20 MHz. Το προσχέδιο 802.11n επιτρέπει έως και 4 χωρικές ροές με μέγιστη θεωρητική απόδοση 600 Mbps. Τα κανάλια των 20 MHz έχουν 56 υποφορείς OFDM, 52 είναι δεδομένα και 4 είναι πιλοτικοί τόνοι με διαχωρισμό φορέων 312,5 kHz. Καθένας από αυτούς τους υποφορείς μπορεί να

είναι BPSK, QPSK, 16 QAM ή 64 QAM. Η συνολική διάρκεια συμβόλου είναι 3,6 ή 4μSec, η οποία περιλαμβάνει ένα διάστημα προστασίας 0,4 ή 0,8μSec αντίστοιχα. Ο πίνακας 3 παραθέτει διάφορα σχήματα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης για μια απλή ροή (για πολλαπλές ροές, ο ρυθμός δεδομένων είναι πολλαπλάσιος του αριθμού των ροών). Το 802.11n υποστηρίζει τη συνάθροιση πλαισίων, όπου πολλαπλές μονάδες δεδομένων υπηρεσίας MAC (MSDUs) ή μονάδες δεδομένων πρωτοκόλλου MAC (MPDUs) συσκευάζονται μαζί για να μειώσουν τα γενικά έξοδα και να τα υπολογίσουν κατά μέσο όρο σε πολλαπλά πλαίσια, αυξάνοντας έτσι το ρυθμό δεδομένων σε επίπεδο χρήστη. Επίσης, το 802.11n είναι συμβατό προς τα πίσω με τα 802.11g, 11b και 11a.

Πίνακας 3. Διαμόρφωση (modulation) 802.11n και ρυθμοί δεδομένων (data rates) για ενιαία ροή (single stream).

MCS Index	Spatial Streams	Modulation Type	Coding Rate	Data Rate (Mbps)	
				20 MHz Channel	
				800nSGI	400nSGI
0	1	BPSK	1/2	6.5	7.2
1	1	QPSK	1/2	13	14.4
2	1	QPSK	3/4	19.5	21.7
3	1	16 QAM	1/2	26	28.9
4	1	16 QAM	3/4	39	43.3
5	1	64 QAM	2/3	52	57.8
6	1	64 QAM	3/4	58.5	65
7	1	64 QAM	5/6	65	72.2

MCS Index	Spatial Streams	Modulation Type	Coding Rate	Data Rate (Mbps)	
				40 MHz Channel	
				800nSGI	400nSGI
0	1	BPSK	1/2	13.5	15
1	1	QPSK	1/2	27	30
2	1	QPSK	3/4	40.5	45
3	1	16 QAM	1/2	54	60
4	1	16 QAM	3/4	81	90
5	1	64 QAM	2/3	108	120
6	1	64 QAM	3/4	121.5	135
7	1	64 QAM	5/6	135	150

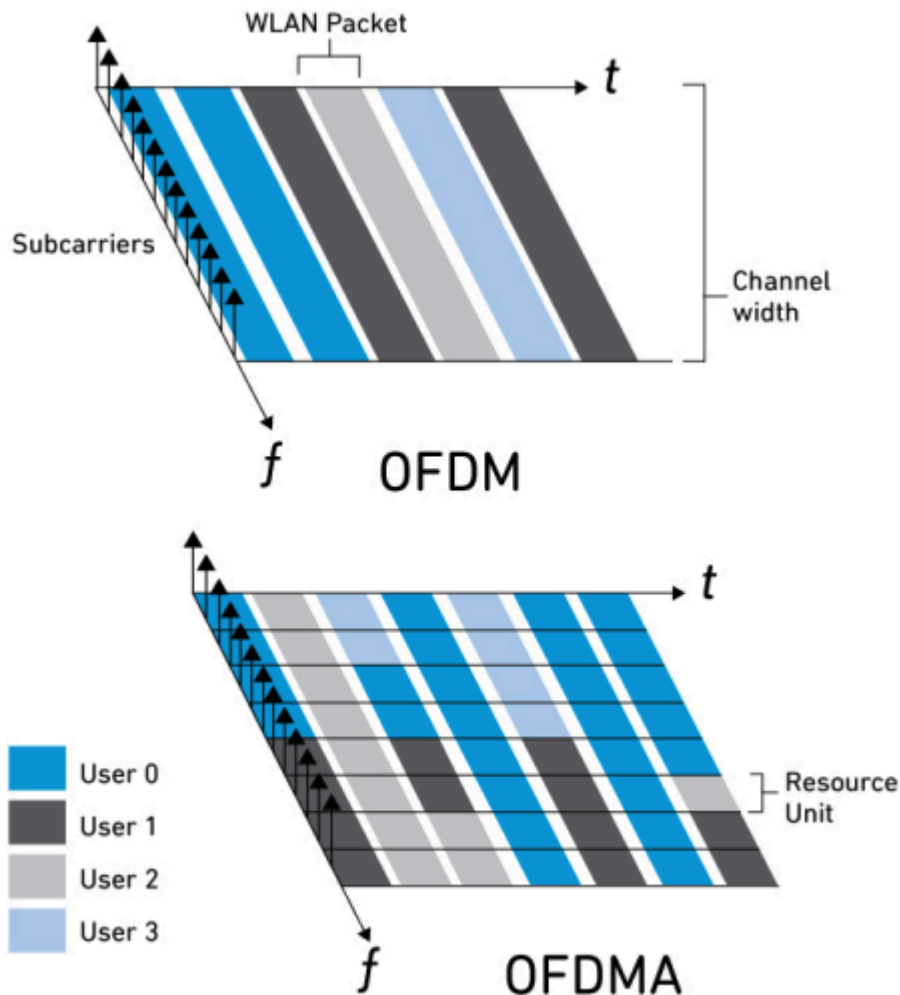
Το πρότυπο 802.11ac

Το 802.11ac ανανέωσε το Wi-Fi παρέχοντας ταχύτητες gigabit ανά δευτερόλεπτο και αυτό επιτυγχάνεται με την επέκταση των εννοιών του 802.11n που περιλαμβάνουν μεγαλύτερο εύρος ζώνης (έως 160 MHz), περισσότερες χωρικές

ροές MIMO (έως 8), MIMO πολλαπλών χρηστών κάτω ζεύξης (έως τέσσερις πελάτες) και διαμόρφωση υψηλής πυκνότητας (έως 256 QAM). Το 802.11ac υποστηρίζει 256 QAM με ρυθμό κωδικοποίησης 3/4, 5/6 (MCS8/9), γεγονός που απαιτεί 6 dB αυστηρότερες απαιτήσεις EVM επιπέδου συστήματος (-34 dB). Το 802.11ac λειτουργεί αποκλειστικά στη ζώνη των 5 GHz, οπότε τα σημεία πρόσβασης διπλής ζώνης και οι πελάτες θα συνεχίσουν να χρησιμοποιούν το 802.11n στα 2,4 GHz. Το πρώτο κύμα του 802.11ac που κυκλοφόρησε το 2013, υποστήριζε μόνο κανάλια 80 MHz και έως και 3 χωρικές ροές που παρείχαν έως και 1300 Mbps στο φυσικό επίπεδο. Τα προϊόντα του δεύτερου κύματος ή τα προϊόντα 802.11ac wave 2 κυκλοφόρησαν το 2015, υποστηρίζουν περισσότερο channel bonding, περισσότερες χωρικές ροές και MU-MIMO. Το MU-MIMO αποτελεί σημαντική εξέλιξη του 802.11ac. Ενώ το MIMO κατευθύνει πολλαπλές ροές σε έναν χρήστη, το MU-MIMO μπορεί να κατευθύνει χωρικές ροές σε πολλούς πελάτες ταυτόχρονα, βελτιώνοντας έτσι την αποδοτικότητα του δικτύου. Επίσης, το 802.11ac χρησιμοποιεί μια τεχνολογία που ονομάζεται διαμόρφωση δέσμης. Με τη διαμόρφωση δέσμης, η κεραία ουσιαστικά μεταδίδει τα ραδιοσήματα έτσι ώστε να κατευθύνονται σε μια συγκεκριμένη συσκευή. Οι δρομολογητές 802.11ac είναι συμβατοί προς τα πίσω με τα 802.11b, 11g, 11a και 11n, πράγμα που σημαίνει ότι όλοι οι παλαιότεροι πελάτες λειτουργούν άψογα με τους δρομολογητές 802.11ac.

Πρότυπο Wi-Fi 6 ή 802.11ax

Το 802.11ax είναι η έκτη γενιά του Wi-Fi, βασισμένο στα πλεονεκτήματα του 802.11ac, το οποίο παρέχει μεγαλύτερη ασύρματη χωρητικότητα και αξιοπιστία. Το 802.11ax επιτυγχάνει αυτά τα οφέλη με τη χρήση πυκνότερης διαμόρφωσης (1024 QAM), (OFDMA), μειωμένης απόστασης υποφερόντων (78,125 kHz) και με τη χρήση προγραμματισμένης κατανομής πόρων. Σε αντίθεση με το 802.11ac, το 802.11ax είναι τεχνολογία διπλής ζώνης 2,4 και 5 GHz. Το 802.11ax σχεδιάστηκε για μέγιστη συμβατότητα, συνυπάρχοντας αποτελεσματικά με τους πελάτες 802.11a/g/n/ac. Το 802.11ax χρησιμοποιεί OFDMA, το οποίο επιτρέπει μονάδες πόρων (RUs) που κατανέμουν το εύρος ζώνης ανάλογα με τις ανάγκες των πελατών και παρέχουν σε πολλά άτομα την ίδια εμπειρία χρήσης με ταχύτερες ταχύτητες. Με το 802.11ac, το κανάλι WiFi αναλύθηκε σε μια συλλογή μικρότερων υποκαναλιών OFDM. Σε κάθε δεδομένο σημείο των φορέων σε κάθε μονάδα δεδομένων πρωτοκόλλου PLCP (PPDU). Ωστόσο, με το OFDMA (802.11ax), οι μεμονωμένες ομάδες υποφορέων κατανέμονται μεμονωμένα στους πελάτες ως μονάδες πόρων ανά PPDU (Εικόνα 3).



Εικόνα 3. Κατανομή πόρων OFDM έναντι OFDMA

Πηγή: "The Wi-Fi Evolution" By: Jaidev Sharma
Director, Applications Engineering, white paper

Παλαιότερα πρότυπα 802.11 Μέθοδος CSMA/CA κατά την οποία οι ασύρματοι πελάτες ανιχνεύουν πρώτα το κανάλι και προσπαθούν να αποφύγουν συγκρούσεις μεταδίδοντας μόνο όταν ανιχνεύουν ότι το κανάλι είναι αδρανές. Αν και αυτή η σαφής εκτίμηση και η αποφυγή συγκρούσεων εξυπηρετεί καλά, η αποτελεσματικότητά της μειώνεται όταν ο αριθμός των πελατών αυξάνεται πολύ μεγάλο. Το πρωτόκολλο 802.11ax επιλύει αυτό το πρόβλημα μέσω OFDMA και κατανομής πόρων βάσει χρονοδιαγράμματος. Τα σημεία πρόσβασης 802.11ax υπαγορεύουν τότε θα λειτουργεί η συσκευή, χειριζόμενα έτσι τους πελάτες πιο αποτελεσματικά. Ο προγραμματισμός πόρων μειώνει επίσης σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας κατά τη διάρκεια του χρόνου αναστολής λειτουργίας, γεγονός που βελτιώνει τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας των πελατών. Στον πίνακα 4, παρατίθενται οι διαφορές μεταξύ των πρωτοκόλλων 802.11ac και 802.11ax. Τα

υψηλής ενεργειακής απόδοσης FEMs του χαρτοφυλακίου μειώνουν τα θερμικά ζητήματα που σχετίζονται με την υποστήριξη MIMO στον εξοπλισμό Wi-Fi, επιτρέποντας στους κατασκευαστές να μειώσουν το μέγεθος και το κόστος των προϊόντων.

Πίνακας 4. 802.11ac vs 802.11ax.

	802.11ac (Wi-Fi 5)	802.11ax (Wi-Fi 6)
Bands	5 GHz	2.4, 5 GHz
Channel Bandwidth	20, 40, 80, 160 MHz	20, 40, 80, 160 MHz
FFT Sizes	64, 128, 256, 512	256, 512, 1024, 2048
Subcarrier Spacing	312.5 kHz	78.125 kHz
Symbol Duration	3.2μs + 0.8/0.4μs	12.8μs + 0.8/1.6/3.2μs
Highest Modulation	256 QAM	1024 QAM
Max Data Rate	6933 Mbps (160 MHz, 8 SS)	9607.8 Mbps (160 MHz, 8 SS)

1.3 Η ανάγκη για την ανάπτυξη του Wi-Fi 7 (802.11be)

Οι εξελίξεις του Wi-Fi ήταν αρκετά κρίσιμες για την ικανοποίηση των συνεχώς αυξανόμενων απαιτήσεων για ταχύτερες, πιο ισχυρές και αποδοτικές ασύρματες επικοινωνίες. Το πολυαναμενόμενο Wi-Fi, αποτελεί ένα κβαντικό άλμα προς την εξάλειψη των προβλημάτων που δημιουργούνταν στα προηγούμενα πρωτόκολλα, ιδίως λόγω της υψηλής πυκνότητας συσκευών και των εφαρμογών έντασης εύρους ζώνης (bandwidth-intensive).

Γιατί η εξέλιξη του Wi-Fi έχει σημασία

Το Wi-Fi έχει εξελιχθεί από άνεση σε βασική ανάγκη και συνδέει δισεκατομμύρια συσκευές παγκοσμίως. Οι προηγούμενες γενιές διέθεταν το Wi-Fi 4 ή 802.11n-μαζί με την εισαγωγή του βασικού MIMO που βελτίωσε σημαντικά τις ταχύτητές του. Το Wi-Fi 5-ή 802.11ac- από την άλλη πλευρά, εισήγαγε τη διαμόρφωση δέσμης (beamforming), στοχεύοντας στη μετάδοση δεδομένων σε συγκεκριμένες κατευθύνσεις. Το Wi-Fi 6 βελτίωσε την υποστήριξη πολλαπλών συσκευών και την αποδοτικότητα με χαρακτηριστικά όπως το OFDMA. Κάθε γενιά αντιμετώπισε συγκεκριμένες προκλήσεις της εποχής της, οι οποίες επέτρεψαν στα δίκτυα να υποστηρίξουν νέες εφαρμογές όπως το IoT, το AR/VR και τα έξυπνα σπίτια.

Ωστόσο, ακόμη και αυτές οι εξελίξεις εξακολουθούσαν να διατηρούν τα σημεία συμφόρησης σε περιβάλλοντα υψηλής πυκνότητας, τη διαχείριση παρεμβολών και την αποτελεσματική διαχείριση μαζικών ροών δεδομένων. Το Wi-Fi 7 αντιμετωπίζει αυτές τις δυσχέρειες, καθιστώντας έτσι την τεχνολογία ζωτικής σημασίας για τα σύγχρονα και μελλοντικά ασύρματα οικοσυστήματα.

Βασικά προβλήματα που λύνει το Wi-Fi 7

Περιορισμοί εύρους ζώνης (bandwidth): Το Wi-Fi 7 επεκτείνει το πλάτος του καναλιού στα 320 MHz από 160 MHz του Wi-Fi 6, επιτρέποντας τη μετάδοση περισσότερων πληροφοριών ανά πάσα στιγμή. Αυτό θα παρέχει μεγάλη υποστήριξη για εφαρμογές με μεγάλο εύρος ζώνης, όπως η αναμετάδοση (streaming) 4K/8K, η εικονική πραγματικότητα και τα παιχνίδια υψηλής ταχύτητας.

Συμφόρηση και καθυστέρηση: Το MLO (Multi-Link Operation) επιτρέπει σε μια συσκευή να χρησιμοποιεί ταυτόχρονα πολλαπλές ζώνες συχνοτήτων όπως τα 2,4 GHz, 5 GHz και 6 GHz. Αυτό θα μειώσει τη συμφόρηση, επειδή η μετάδοση θα βελτιστοποιείται δυναμικά στα λιγότερο πολυσύχναστα κανάλια, ενισχύοντας περαιτέρω την αξιοπιστία και μειώνοντας παράλληλα την καθυστέρηση, η οποία θα είναι ζωτικής σημασίας για εφαρμογές πραγματικού χρόνου που περιλαμβάνουν τηλεδιασκέψεις και διαδικτυακά παιχνίδια.

Πυκνότητα δεδομένων: Το Wi-Fi 7 υποστηρίζει 4K-QAM (Quadrature Amplitude Modulation), επιτρέποντας τη μεταφορά έως και 20% περισσότερων δεδομένων στο ίδιο φάσμα με το Wi-Fi 6. Αντιμετωπίζει τη ραγδαία αύξηση της πυκνότητας των συσκευών στο σπίτι και στα γραφεία.

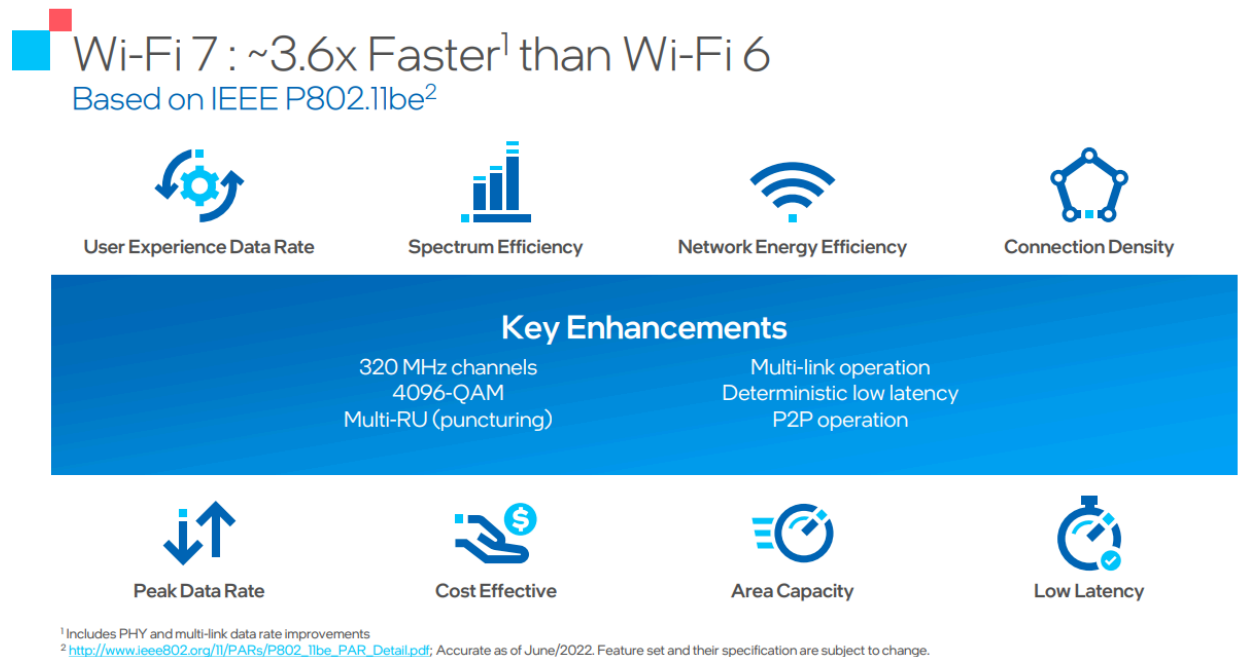
Προετοιμασία για το μέλλον: Καθώς οι πάροχοι υπηρεσιών διαδικτύου προσφέρουν πακέτα πολλαπλών gigabit, το Wi-Fi 7 παρέχει ασύρματα δίκτυα που συμβαδίζουν με τα ενσύρματα αδέρφια τους, χάρη σε ταχύτητες που φτάνουν τα 46 Gbps, αποτρέποντας έτσι τα ασύρματα σημεία συμφόρησης σε περιβάλλοντα υψηλών επιδόσεων.

Το Wi-Fi 7 αντιπροσωπεύει ένα σημαντικό βήμα για να διασφαλιστεί ότι οι ασύρματες τεχνολογίες ανταποκρίνονται στις αυξανόμενες απαιτήσεις του ψηφιακού μας κόσμου, δημιουργώντας ευκαιρίες για πιο συναρπαστική, αποτελεσματική και ισχυρή συνδεσιμότητα.

2. Τεχνική Ανάλυση του Πρωτοκόλλου Wi-Fi 7

2.1 Εισαγωγή στο Wi-Fi 7 και οι στόχοι του

Το Wi-Fi 7, αναπτύχθηκε για να χειριστεί ορισμένους από τους βασικούς περιορισμούς του Wi-Fi 6 και να καλύψει τις ταχέως μεταβαλλόμενες απαιτήσεις των σύγχρονων δικτύων. Καθώς αναπτύσσονται εφαρμογές όπως η αναμετάδοση 8K (streaming), το cloud gaming, τα οικοσυστήματα AR/VR και IoT, το Wi-Fi 7 εστιάζει σε αυτές τις βασικές ανάγκες:



Εικόνα 4. Βασικές βελτιώσεις συγκριτικά με το Wi-Fi 6

Πηγή: Επίσημο site της Intel

(<https://www.intel.com/content/www/us/en/products/docs/wireless/wi-fi-technology-guide.html>)

1. Μεγαλύτερο εύρος ζώνης και μεγαλύτερες ταχύτητες

Το Wi-Fi 6 μόλις και μετά βίας είχε αρκετό εύρος ζώνης καναλιού 160 MHz και 1024-QAM για τέτοιες εφαρμογές έντασης δεδομένων. Το Wi-Fi 7 διπλασιάζει το μέγεθος του καναλιού στα 320 MHz, εισάγοντας το 4096-QAM για να επιτρέψει ταχύτητες πολλών gigabit που θα χρειαστούν για απρόσκοπτη ροή ultra-HD και μεταφορά δεδομένων υψηλής ταχύτητας.

2. Χαμηλότερη καθυστέρηση για εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο

Εφαρμογές όπως το AR/VR, το cloud gaming και τα αυτόνομα συστήματα απαιτούν εξαιρετικά χαμηλό λανθάνοντα χρόνο, κάτι που επιβεβαιώνεται από τις αναδυόμενες τεχνολογίες. Το Wi-Fi 7 το λύνει αυτό με λειτουργία πολλαπλών συνδέσμων,

επιτρέποντας στις συσκευές να χρησιμοποιούν πολλές ζώνες συχνοτήτων ταυτόχρονα και αποφεύγοντας τη συμφόρηση και τις καθυστερήσεις.

3. Καλύτερη απόδοση σε πολυσύχναστα δίκτυα

Το Wi-Fi 6 ήταν πιο αποτελεσματικό με το OFDMA και το MU-MIMO, αλλά τα πυκνά περιβάλλοντα εξακολουθούσαν να παρουσιάζουν παρεμβολές και επιβραδύνσεις. Το Wi-Fi 7 κάνει το ίδιο, αλλά ενισχύει τέτοιες λειτουργίες με τη συγκέντρωση πολλαπλών RU (Resource Units) και το καλύτερο MU-MIMO (Multi-User, Multiple Input, Multiple Output.) για να εξασφαλίσει ομαλότερη απόδοση για πολλές συσκευές στην ίδια περιοχή.

4. Απρόσκοπτη χρήση πολλαπλών ζωνών

Με την αυξανόμενη χρήση του φάσματος των 6 GHz, το Wi-Fi 7 εισάγει καλύτερη λειτουργία πολλαπλών ζωνών: συνδυάζοντας συχνότητες 2,4 GHz, 5 GHz και 6 GHz για υψηλότερες συνολικές ταχύτητες και πιο αξιόπιστες συνδέσεις.

5. Συνδεσιμότητα Future-Ready

Το Wi-Fi 7 έχει σχεδιαστεί για να υποστηρίζει μελλοντικές τεχνολογίες που κυμαίνονται από προηγμένο IoT έως καθηλωτικά μέσα, παρέχοντας την απαιτούμενη ευελιξία, επεκτασιμότητα και αποτελεσματικότητα για μελλοντικά δίκτυα.

Το Wi-Fi 7 αντιμετωπίζει αυτές τις προκλήσεις που το Wi-Fi 6 δεν μπορούσε να λύσει. Ικανοποιώντας αυτές τις ανάγκες, το Wi-Fi 7 ενισχύει τις εφαρμογές επόμενης γενιάς και παρέχει ισχυρή, αδιάλειπτη ασύρματη συνδεσιμότητα.

2.2 Ανάλυση τεχνικών χαρακτηριστικών

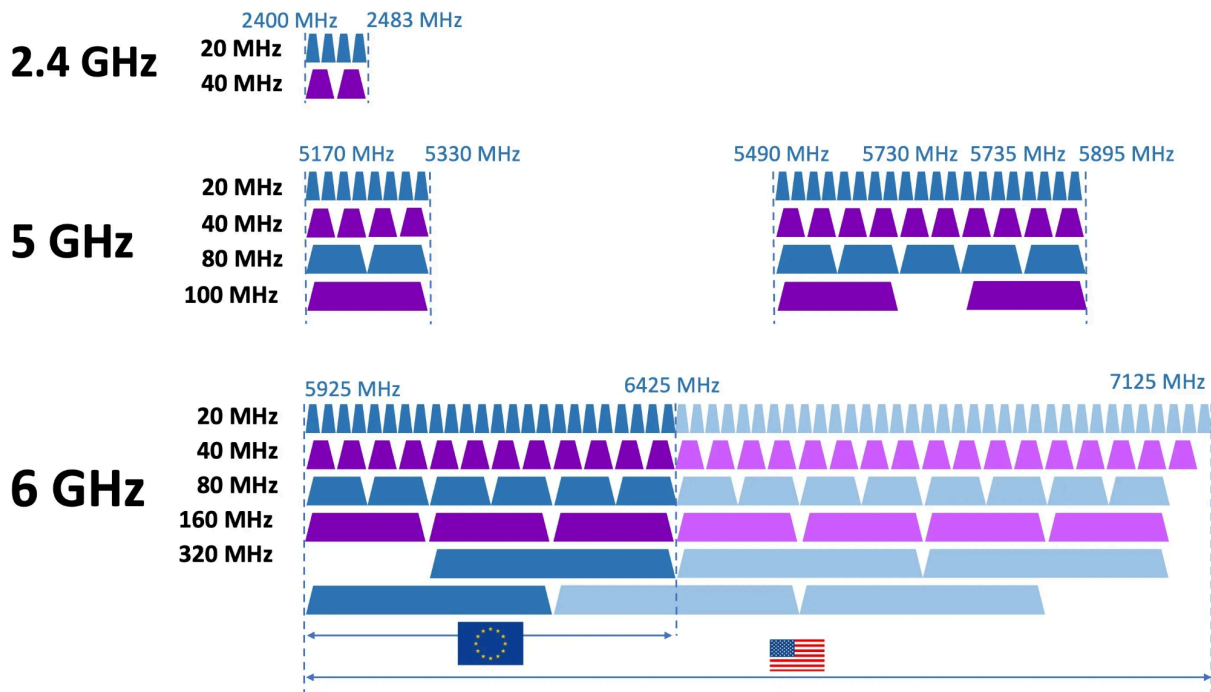
2.2.1 Channel Bandwidth (εύρος ζώνης καναλιού)

Το Wi-Fi 7 εισάγει τεράστια εξέλιξη στο εύρος ζώνης καναλιών. Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά του είναι η υποστήριξη καναλιών πλάτους έως 320 MHz, ενώ το Wi-Fi 6 είχε εύρος ζώνης καναλιών 160 MHz. Μπορεί να διπλασιαστεί με αυτήν την επέκταση, αυξάνοντας τη ροή δεδομένων και προσφέροντας ακόμα καλύτερη απόδοση για διάφορες περιπτώσεις χρήσης.

Επέκταση εύρους ζώνης καναλιού

Η αύξηση στα κανάλια των 320 MHz είναι ιδιαίτερα σημαντική στη ζώνη συχνοτήτων των 6 GHz, η οποία είναι ένα ευρύτερο φάσμα με λιγότερες παρεμβολές από τις ζώνες 2,4 GHz και 5 GHz. Αυτό το ευρύτερο κανάλι επιτρέπει υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων, μειωμένη

καθυστέρηση και βελτιωμένη συνολική απόδοση δικτύου. Εάν είναι διαθέσιμο φάσμα 1200 MHz στη ζώνη των 6 GHz, μπορούν να διαμορφωθούν έως και τρία κανάλια των 320 MHz. Τα 500 MHz του φάσματος υποστηρίζουν ένα μόνο κανάλι 320 MHz.



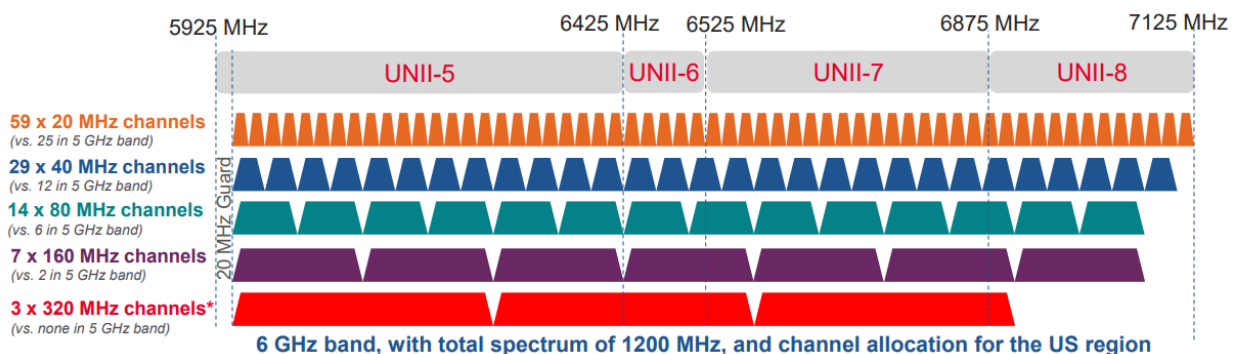
Εικόνα 5. Επέκταση εύρους ζώνης Wi-Fi 7 καναλιών

Αυτό η εικόνα απεικονίζει την εξέλιξη από κανάλια 20 MHz στα πρώιμα πρότυπα Wi-Fi στα 320 MHz κανάλια που εισήχθησαν στο Wi-Fi 7, υπογραμμίζοντας την αυξημένη ικανότητα μετάδοσης δεδομένων και δείχνει πώς πολλαπλά μικρότερα κανάλια συνδυάζονται για να σχηματίσουν ένα ευρύτερο κανάλι 320 MHz για βελτιωμένη απόδοση δεδομένων.

Πηγή: EDN Exploring the superior capabilities of Wi-Fi 7 over Wi-Fi 6
(<https://www.edn.com/exploring-the-superior-capabilities-of-wi-fi-7-over-wi-fi-6/>)

Τεχνικές Επιπτώσεις

Η χρήση καναλιών 320 MHz στο Wi-Fi 7 επιτρέπει μέγιστες ταχύτητες δεδομένων άνω των 40 Gbps, που είναι τέσσερις φορές υψηλότεροι από τη μέγιστη απόδοση του Wi-Fi 6E. Αυτή η σημαντική αύξηση επιτρέπει εφαρμογές υψηλής έντασης δεδομένων, όπως αναμετάδοση βίντεο 8K, εικονική πραγματικότητα και μεταφορά μεγάλων αρχείων με πολύ πιο ομαλή εμπειρία χρήστη.



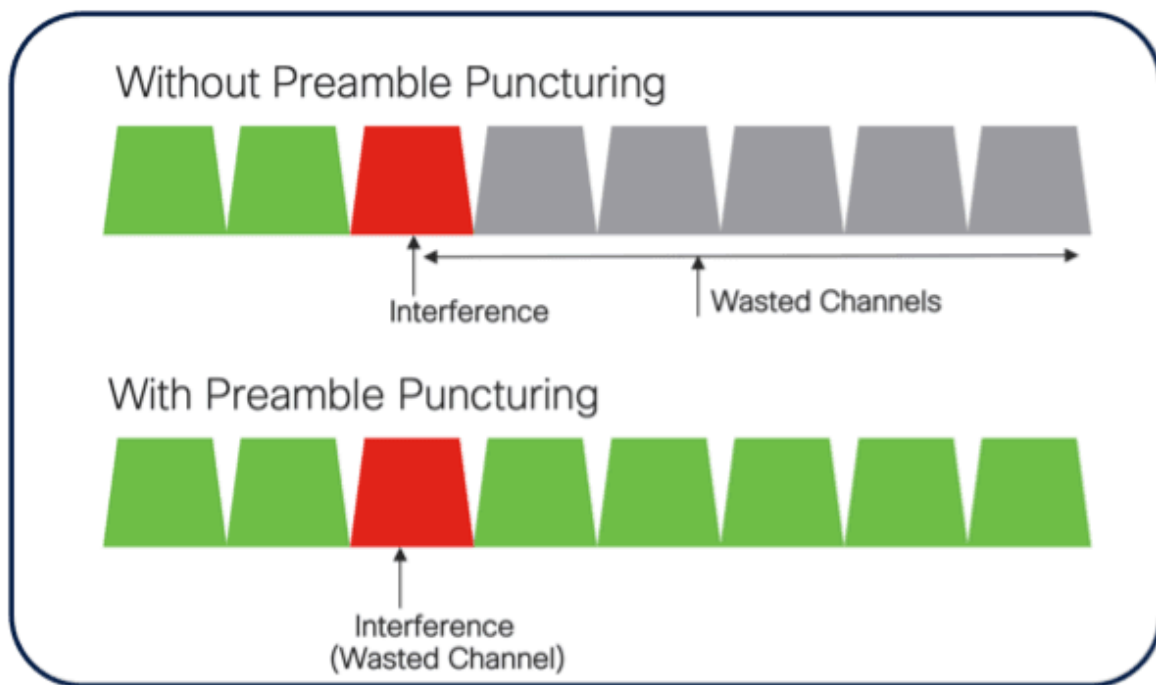
Εικόνα 6. Εκχώρηση καναλιών (Channel Allocation) 320 MHz σε ζώνη 6 GHz

Αυτό η εικόνα απεικονίζει μια οπτική αναπαράσταση που δείχνει πώς συνδέονται δύο γειτονικά κανάλια 160 MHz για να σχηματίσουν ένα ενιαίο κανάλι 320 MHz εντός του φάσματος των 6 GHz.

Πηγή: WiFi 7 Explained | Mercku Blogs (<https://www.mercku.com/2022/06/07/wifi-7-explained-mercku-blogs/>)

Κατανομή καναλιών και χρήση φάσματος (Channel Allocation and Spectrum Utilization)

Το Wi-Fi 7 μπορεί να συνδυάσει δύο γειτονικά κανάλια 160 MHz σε ένα κανάλι 320 MHz στη ζώνη των 6 GHz. Αυτή η σύνδεση καναλιού αυξάνει την ικανότητα μεταφοράς δεδομένων, αλλά εισάγει ζητήματα που σχετίζονται με τη διαθεσιμότητα του φάσματος και τους ρυθμιστικούς περιορισμούς σε διάφορα μέρη του κόσμου. Δεύτερον, το Wi-Fi 7 παρέχει στατική διάτρηση (Static Preamble Puncturing), με την οποία μπορούν να αποκλειστούν υποκανάλια των 20 MHz σε ένα ευρύτερο κανάλι, προκειμένου να μειωθούν οι παρεμβολές και επομένως να αξιοποιηθεί καλύτερα το φάσμα.



Εικόνα 7. Στατική διάτρηση (Static Puncturing) σε Wi-Fi 7 στο Wi-Fi 7

Απεικόνιση της χρήσης καναλιού χωρίς διάτρηση και με διάτρηση, ένα αναμενόμενο χαρακτηριστικό του νέου προτύπου Wi-Fi 7

Πηγή: Onward and upward with Wi-Fi 7 (<https://outshift.cisco.com/blog/onward-and-upward-with-wi-fi-7>)

Προκλήσεις και προβληματισμοί

Η χρήση καναλιών 320 MHz απαιτεί νέο σύγχρονο υλικό (advanced hardware) που υποστηρίζει μεγαλύτερα εύρη ζώνης. Επίσης, αυτό το υλικό είναι συμβατό με συσκευές που λειτουργούν σε στενότερα κανάλια. Εκτός αυτού, ο σχεδιασμός δικτύου πρέπει να δώσει μεγάλη προσοχή στις παρεμβολές και στα ρυθμιστικά όρια, καθώς οι πυκνοκατοικημένες πόλεις αντιμετωπίζουν πραγματικά προβλήματα λόγω της σπάνιας διαθεσιμότητας του φάσματος.

2.2.2 Spatial Streams (Χωρικές ροές)

Οι χωρικές ροές είναι βαθιά ριζωμένες στον πυρήνα του Wi-Fi και έτσι τελικά επηρεάζουν τη ροή δεδομένων και την αποτελεσματικότητά του. Οι χωρικές ροές επιτρέπουν την ταυτόχρονη μετάδοση πολλαπλών ροών δεδομένων, χρησιμοποιώντας ξεχωριστές κεραίες και αξιοποιώντας τη χωρική πολυπλεξία(multiplexing). Το Wi-Fi 7, αυξάνει τον αριθμό των χωρικών ροών που υποστηρίζονται από 8 στο Wi-Fi 6 στο μέγιστο 16. Αυτό είναι σημαντικό για τους υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων και την αποτελεσματικότητα δικτύου που υπόσχεται το Wi-Fi 7.

Spatial Multiplexing και MIMO σε Wi-Fi 7

Η χωρική πολυπλεξία είναι αυτό που πραγματικά επιτρέπει αυτές τις χωρικές ροές. Χρησιμοποιεί πολλαπλές κεραίες τόσο στον πομπό όσο και στον δέκτη για τη δημιουργία ανεξάρτητων καναλιών δεδομένων. Αυτό είναι στενά συνδεδεμένο με την τεχνολογία Multi-Input Multi-Output (MIMO).

- **Πλήθος χωρικών ροών Wi-Fi 7:** Ενώ τα προηγούμενα πρότυπα όπως το Wi-Fi 6 και το 6E υποστήριζαν έως και 8 χωρικές ροές, το Wi-Fi 7 διπλασιάζει αυτό για να υποστηρίξει 16 χωρικές ροές. Αυτό επιτρέπει στο Wi-Fi 7 να υποστηρίζει ακόμη υψηλότερους ρυθμούς συγκεντρωτικών δεδομένων και περισσότερους ταυτόχρονους χρήστες. Για παράδειγμα, στο καλύτερο δυνατό περιβάλλον, κάθε χωρική ροή θα μπορούσε να εκπέμπει έως και 4,8 Gbps, αφήνοντας τη θεωρητική μέγιστη απόδοση να υπερβαίνει τα 46 Gbps.
- **Ενισχυμένο MU-MIMO:** Το Wi-Fi 7 βελτιώνει περαιτέρω το MU-MIMO, επιτρέποντας σε πολλές συσκευές να λαμβάνουν ή να εκπέμπουν ταυτόχρονα σε ανεξάρτητες χωρικές ροές. Αυτό μειώνει σημαντικά τη διαμάχη και ενισχύει την αποτελεσματικότητα σε πολύ πυκνά περιβάλλοντα, όπως στάδια ή κτίρια γραφείων.



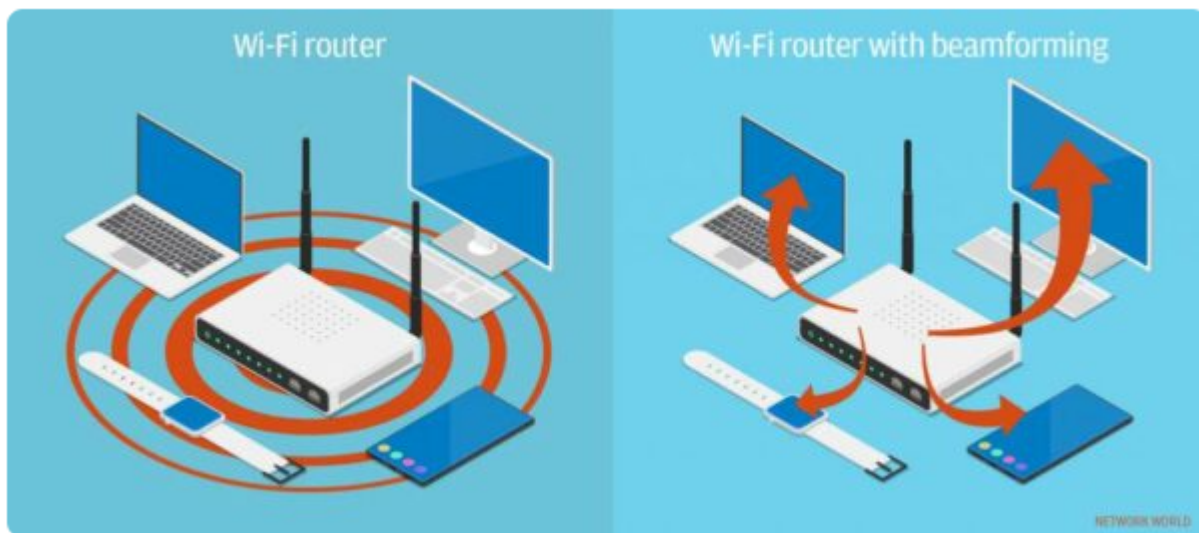
Εικόνα 8. Wider Channels, Higher Order Modulation and More Spatial Streams

Πηγή: Wi-Fi 7 (<https://www.mpirical.com/blog/wi-fi-7>)

Beamforming(Διαμόρφωση Δέσμης) και ο ρόλος της στα χωρικά ρεύματα

Αυτό σημαίνει ότι, με την τεχνολογία beamforming, υπάρχει ενισχυμένη χρήση χωρικών ρευμάτων. Αντί να μεταδίδεται ομοιόμορφα το ασύρματο σήμα, η διαμόρφωση δέσμης το εστιάζει στη συσκευή εξυπηρέτησης για να αυξήσει την ποιότητα του σήματος και να χρησιμοποιήσει αποτελεσματικά τις χωρικές ροές.

- Το Wi-Fi 7 παρέχει περαιτέρω βελτιωμένους αλγόριθμους διαμόρφωσης δέσμης, επιτρέποντας έτσι την ακριβέστερη διεύθυνση των 16 χωρικών ροών.
- Αυτή η δυνατότητα σημαίνει καλύτερη κάλυψη, μείωση παρεμβολών και απόδοση για συσκευές στα άκρα του δικτύου.



Εικόνα 9. Wi-Fi Router χωρίς και με Beamforming

Πηγή: What Is Beamforming? How Does Beamforming Work?

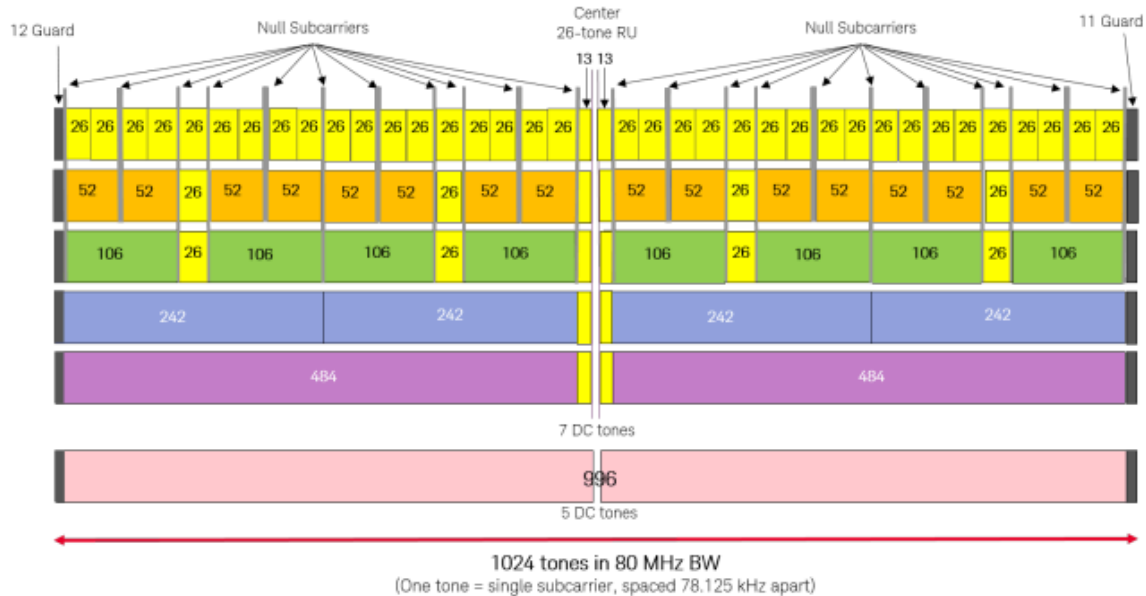
(<https://blog.flashrouters.com/2024/09/20/wifi-beamforming-flashrouters-faq/>)

Τεχνική εφαρμογή στο Wi-Fi 7

Η δυνατότητα χρήσης 16 χωρικών ροών βασίζεται σε προηγμένα σχέδια κεραιών και εξελιγμένες τεχνικές επεξεργασίας σήματος. Οι βασικές πτυχές περιλαμβάνουν:

1. **Διαμόρφωση κεραίας:** Αυτό περιλαμβάνει την ύπαρξη μεγάλου αριθμού κεραιών (για παράδειγμα, 16 για την πλήρη χωρική δυνατότητα ροής σε σημεία πρόσβασης Wi-Fi 7). Ο σχεδιασμός τέτοιων κεραιών θα πρέπει να ελαχιστοποιεί τις παρεμβολές μεγιστοποιώντας παράλληλα τον χωρικό διαχωρισμό.
2. **Σύνδεση καναλιών και χωρικές ροές:** Η σύνδεση καναλιών έως 320 MHz μέσω Wi-Fi 7 προσφέρει την επιπλέον χωρητικότητα που απαιτείται για την αποτελεσματική χρήση 16 χωρικών ροών. Τα ευρύτερα κανάλια έχουν μεγαλύτερη ικανότητα μεταφοράς δεδομένων και οι επιπλέον χωρικές ροές διασφαλίζουν ότι αυτή η χωρητικότητα χρησιμοποιείται πλήρως.
3. **Ενσωμάτωση OFDMA:** Η ορθογώνια διαίρεση συχνότητας πολλαπλής πρόσβασης (OFDMA - Orthogonal Frequency Division Multiple Access) λειτουργεί μαζί με χωρικά ρεύματα. Κάθε χωρική ροή μπορεί να χρησιμοποιήσει ανεξάρτητα τα υποκανάλια μέσα σε μια ζώνη 20 MHz, ενισχύοντας περαιτέρω τη φασματική απόδοση. Η πολλαπλή πρόσβαση με ορθογώνια διαίρεση συχνότητας (OFDMA) βελτιώνει την απόδοση επιτρέποντας ταυτόχρονες μεταδόσεις μεταξύ πολλών πελατών. Με το Wi-Fi 6, ένα κανάλι χωρίζεται σε RU's (Resource Units) ως ομαδοποιήσεις συχνοτήτων. Σε κάθε συσκευή εκχωρείται μία RU. Το Wi-Fi 7 επιτρέπει την κατανομή των πολλαπλών RU's σε κάθε συσκευή, παρέχοντας καλύτερη απόδοση χρησιμοποιώντας ένα φάσμα που μπορεί διαφορετικά να σπαταληθεί. Η πολυπλοκότητα της χρήσης πολλαπλών RU's με

μία συσκευή αυξάνει τη σημασία της δοκιμής κάθε συσκευής υπό συνθήκες εξομοίωσης της χρήσης του πραγματικού κόσμου για την επαλήθευση παραμέτρων όπως το σφάλμα αξιοσιμοποίητου τόνου, βέλτιστα επίπεδα ισχύος μετάδοσης και σφάλματα χρονισμού.



Εικόνα 10. Τοποθεσία των RU's (Resource Units)

Πηγή: Everything You Need to Know About Wi-Fi

7(<https://www.keysight.com/us/en/assets/7124-1010/white-papers/Everything-You-Need-to-Know-About-Wi-Fi-7.pdf>)

Πρακτικές Εφαρμογές 16 Χωρικών Ρευμάτων

Η αυξημένη χωρική ικανότητα ροής είναι πολύ ευνοϊκή στο Wi-Fi 7 και θα ωφελήσει σε μεγάλο βαθμό τις εφαρμογές που απαιτούν πολύ υψηλές αποδόσεις και χαμηλές καθυστερήσεις, όπως:

- **Ροή βίντεο 8K:** Η μετάδοση δεδομένων σε πολλαπλές ροές εξασφαλίζει ομαλή αναπαραγωγή χωρίς αποθήκευση στην προσωρινή μνήμη.
- **Εφαρμογές AR/VR:** Οι βελτιωμένες χωρικές ροές στο Wi-Fi 7 χρησιμοποιούν το απαιτούμενο εύρος ζώνης και την επικοινωνία χαμηλής καθυστέρησης για καθηλωτικές εφαρμογές.
- **Αναπτύξεις επιχειρήσεων και IoT:** Βοηθά πολύ όταν υπάρχουν περισσότερες συσκευές στο δίκτυο, όπως σε μεγάλες επιχειρήσεις ή οικοσυστήματα IoT, να χειρίζονται πιο ταυτόχρονες συνδέσεις αποτελεσματικά.

Προκλήσεις και προβληματισμοί

Ενώ η αύξηση των χωρικών ροών προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα, η εφαρμογή της

δημιουργεί επίσης προκλήσεις:

- **Κόστος υλικού:** Για την υποστήριξη 16 χωρικών ροών, θα απαιτηθούν περισσότερες κεραίες και εξελιγμένο υλικό, γεγονός που θα μπορούσε να αυξήσει το κόστος της συσκευής.
- **Συμβατότητα συσκευής:** Δεν θα μπορούν όλες οι συσκευές-πελάτες να χρησιμοποιούν και τις 16 χωρικές ροές, ειδικά οι μικρότερες συσκευές που περιορίζονται από μικρές διαμορφώσεις κεραίας.
- **Περιβαλλοντικοί Παράγοντες:** Η απόδοση του πραγματικού κόσμου μπορεί να επηρεαστεί από φυσικά εμπόδια, παρεμβολές και την πολυπλοκότητα των αλγορίθμων διαμόρφωσης δέσμης.

Πίνακας 5. Σύγκριση ροής δεδομένων (throughput) μεταξύ προτύπων Wi-Fi.

Standard	Max Spatial Streams	Max Channel Bandwidth	Theoretical Throughput
Wi-Fi 5	4	80 MHz	~3.5 Gbps
Wi-Fi 6	8	160MHz	~9.6 Gbps
Wi-Fi 7	16	320MHz	~46 Gbps

Συνοπτικά, η υποστήριξη του Wi-Fi 7 για 16 χωρικές ροές είναι το επαναστατικό μέλλον της ασύρματης δικτύωσης, προσφέροντας ασύγκριτους ρυθμούς δεδομένων, αποτελεσματικότητα και επεκτασιμότητα. Διπλασιάζοντας τη χωρητικότητα της χωρικής ροής, το Wi-Fi 7 ανταποκρίνεται στις αυξανόμενες απαιτήσεις της επικοινωνίας υψηλής ταχύτητας και χαμηλής καθυστέρησης και θέτει το θεμέλιο για μελλοντικές καινοτομίες στην ασύρματη τεχνολογία.

2.2.3 Modulation (Διαμόρφωση)

Το Wi-Fi 7, επιβάλλει ορισμένες σοβαρές αλλαγές στις τεχνικές διαμόρφωσης για να ανταποκριθεί στην υπόσχεση για υψηλότερες αποδόσεις, καλύτερη φασματική απόδοση και χαμηλότερο λανθάνοντα χρόνο. Μεταξύ τέτοιων βελτιώσεων ακρογωνιαίος λίθος τους είναι η εισαγωγή του 4096-QAM, το οποίο είναι ένα άλμα από το 1024-QAM που χρησιμοποιείται στο Wi-Fi 6. Αυτό θα ήταν κρίσιμο για την υπέρβαση των ορίων στην αποδοτικότητα και την επίδοση της ασύρματης επικοινωνίας.

Το QAM είναι μια τεχνική διαμόρφωσης όπου ένα σήμα φορέα τροποποιείται για να μεταφέρει πληροφορίες. Συνοπτικά, συνδυάζει δύο βασικές τεχνικές:

- **Διαμόρφωση πλάτους:** Αυτό αλλάζει το πλάτος του φέροντος σήματος.

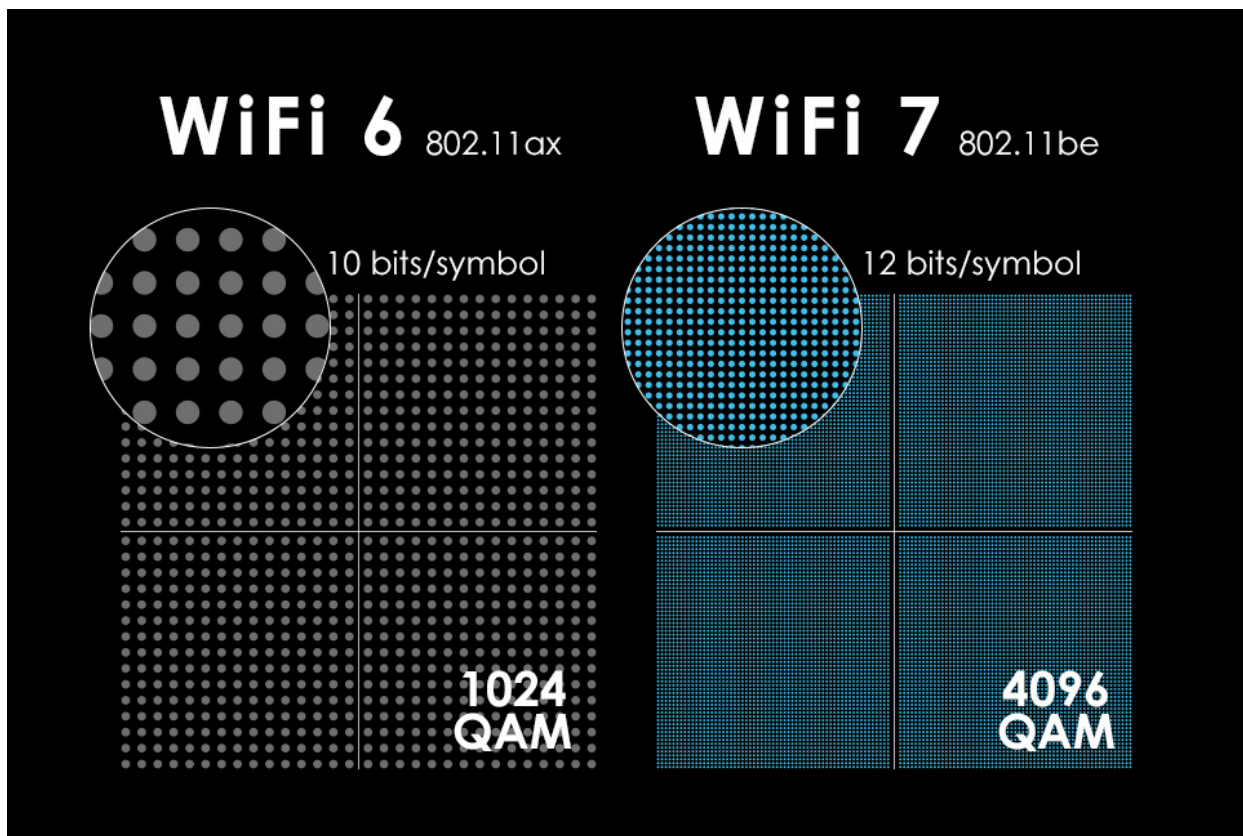
- **Διαμόρφωση φάσης:** Αυτό αλλάζει τη φάση του σήματος φορέα.

Στην πράξη, αυτές οι δύο μέθοδοι κωδικοποιούν πληροφορίες στο φέρον σήμα. Κάθε μοναδικός συνδυασμός πλάτους και φάσης ορίζει ένα μοναδικό σύμβολο. Ο αριθμός των μοναδικών συμβόλων υπαγορεύει τη σειρά διαμόρφωσης, όπως 16-QAM, 256-QAM κ.λπ.

Μετανάστευση από 1024-QAM σε 4096-QAM

Το Wi-Fi 7 αυξάνει τη σειρά διαμόρφωσης σε 4096-QAM. Συγκριτικά με τα προηγούμενα πρότυπα έχουμε:

- 256-QAM - Wi-Fi 5: 8 bit ανά σύμβολο
- 1024-QAM - Wi-Fi 6: 10 bit ανά σύμβολο
- 4096-QAM - Wi-Fi 7: 12 bit ανά σύμβολο



Εικόνα 11. Διαφορά διαμόρφωσης από Wi-Fi 6 σε Wi-Fi 7

Πηγή: Introducing Wi-Fi 7: The Next Wi-Fi Revolution? (<https://www.msi.com/blog/what-is-wifi-7>)

Έτσι, τέτοιες αυξήσεις σε bit ανά σύμβολο συνοδεύονται από αυξημένους ρυθμούς δεδομένων με την ίδια φασματική απόδοση.

Οφέλη του 4096-QAM

1. **Υψηλότερα ποσοστά δεδομένων:** Το 4096-QAM επιτρέπει στο Wi-Fi 7 να μεταφέρει περισσότερα δεδομένα στο ίδιο χρονικό πλαίσιο. Πράγματι, μπορεί να υπερηφανεύεται για μια θεωρητική αύξηση του ρυθμού δεδομένων περίπου 20%, σε σύγκριση με το

- 1024-QAM στις βέλτιστες συνθήκες, λόγω των 12 bit ανά σύμβολο.
2. **Βελτιωμένη φασματική απόδοση:** Με την κωδικοποίηση περισσότερων bits σε κάθε σύμβολο, το Wi-Fi 7 μεγιστοποιεί τη χρήση του διαθέσιμου εύρους ζώνης, εξασφαλίζοντας καλύτερη απόδοση σε πυκνά περιβάλλοντα.
 3. **Μείωση καθυστέρησης:** Οι υψηλότερες εντολές διαμόρφωσης μειώνουν τον αριθμό των μεταδόσεων που απαιτούνται για ένα δεδομένο ωφέλιμο φορτίο δεδομένων, μειώνοντας έτσι την καθυστέρηση.

Προκλήσεις με Διαμόρφωση Ανώτερης Τάξης

Ενώ το 4096-QAM προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα, πρέπει να ξεπεραστούν ορισμένες προκλήσεις για να επιτευχθεί αξιόπιστη λειτουργία:

1. **Αναλογία σήματος προς θόρυβο(SNR - Signal to Noise Ratio):** Η διαμόρφωση υψηλότερης τάξης απαιτεί ένα σημαντικά υψηλότερο SNR για να διακρίνει κανείς στενά συσκευασμένα σύμβολα. Για το 4096-QAM, το SNR εκτιμάται ότι είναι στην περιοχή των 38-41 dB, που συγκρίνεται με περίπου 35 dB για το 1024-QAM.
2. **Περιβαλλοντικοί παράγοντες:** Η επίτευξη του απαιτούμενου SNR εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις ιδανικές συνθήκες. Οι παρεμβολές, η εξασθένηση και τα φαινόμενα πολλαπλών διαδρομών μπορούν να υποβαθμίσουν την απόδοση, περιορίζοντας την πρακτική χρήση του 4096-QAM σε ορισμένα περιβάλλοντα.
3. **Απόδοση ισχύος:** Η ακρίβεια που απαιτείται για τη δημιουργία και την αποκωδικοποίηση σημάτων 4096-QAM απαιτεί περισσότερη ενέργεια, η οποία θα μπορούσε να επηρεάσει τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας για φορητές συσκευές.
4. **Απαιτήσεις υλικού:** Οι δρομολογητές και οι συσκευές που υποστηρίζουν Wi-Fi 7 πρέπει να διαθέτουν προηγμένες αλυσίδες ραδιοσυχνοτήτων, κεραίες και δυνατότητες επεξεργασίας ψηφιακού σήματος για να χειρίζονται την αυξημένη πολυπλοκότητα του 4096-QAM.

Πρακτικές περιπτώσεις χρήσης του 4096-QAM

Η υιοθέτηση του 4096-QAM από το Wi-Fi 7 είναι ιδιαίτερα επωφελής σε σενάρια με υψηλό SNR και ελάχιστες παρεμβολές, όπως:

- **Εφαρμογές μικρού εύρους και υψηλού εύρους ζώνης:** Για περιβάλλοντα όπως σπίτια ή γραφεία με δρομολογητές υψηλής ποιότητας, το 4096-QAM παρέχει την καλύτερη απόδοση για εφαρμογές όπως η ροή βίντεο 8K και η μεταφορά αρχείων.
- **Πυκνά Αστικά Δίκτυα:** Τα δίκτυα σε βαριές περιοχές μπορούν να χρησιμοποιήσουν το 4096-QAM για καλύτερη φασματική απόδοση, εξυπηρετώντας πολλούς χρήστες χωρίς υποβάθμιση της απόδοσης.
- **IoT και Enterprise:** Οι εφαρμογές επικοινωνίας εξαιρετικά υψηλής ταχύτητας και χαμηλής καθυστέρησης, όπως το βιομηχανικό IoT ή το VDI, κάνουν χρήση των αυξημένων ρυθμών δεδομένων και της χαμηλότερης καθυστέρησης.

Συμπληρωματικά χαρακτηριστικά που βελτιώνουν τη διαμόρφωση στο Wi-Fi 7

Οι βελτιώσεις διαμόρφωσης του Wi-Fi 7 υποστηρίζονται και από άλλες τεχνολογικές εξελίξεις που αναφέραμε:

1. **Ευρύτερο εύρος ζώνης καναλιού έως 320 MHz:** Το αυξημένο εύρος ζώνης επιτρέπει στο 4096-QAM να μεταφέρει περισσότερα δεδομένα, ενισχύοντας τα πλεονεκτήματά του.
2. **Βελτιωμένη διαμόρφωση δέσμης:** Μέσω της διαμόρφωσης δέσμης, το εστιασμένο

ασύρματο σήμα παρέχει καλά αποτελέσματα προς συγκεκριμένες συσκευές, διατηρώντας το SNR σε τόσο υψηλό επίπεδο που απαιτείται για το 4096-QAM σε συνθήκες πολλών χρηστών.

3. **Βελτιωμένη διόρθωση σφαλμάτων:** Οι βελτιωμένοι μηχανισμοί FEC στο Wi-Fi 7 του επιτρέπουν να μετριάσει τον θόρυβο και τις παρεμβολές και να παρέχει σταθερή απόδοση ακόμη και για υψηλότερες παραγγελίες διαμόρφωσης.

Μαθηματική Προσέγγιση στο 4096-QAM

Η σχέση μεταξύ διαμόρφωσης, ρυθμού δεδομένων και SNR μπορεί να εκφραστεί μαθηματικά χρησιμοποιώντας το θεώρημα Shannon-Hartley:

$$C = B \cdot \log_2(1 + \text{SNR})$$

Οπου:

- C: Μέγιστη χωρητικότητα καναλιού (bits ανά δευτερόλεπτο).
- B: Εύρος ζώνης (Hz).
- SNR: Λόγος σήματος προς θόρυβο (γραμμική κλίμακα).

Για το 4096-QAM, ο αριθμός των bit ανά σύμβολο αυξάνεται σε 12. Με κανάλι 320 MHz και επαρκή SNR, η θεωρητική απόδοση είναι:

$$C = 320 \text{ MHz} \cdot 12 \text{ bits/symbol} \cdot \text{symbols/sec}$$

Αυτό έχει ως αποτέλεσμα σημαντικά υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων σε σύγκριση με προγράμματα χαμηλότερης QAM.

Πίνακας 6. Σύγκριση εντολών διαμόρφωσης στα πρότυπα Wi-Fi

Wi-Fi Standard	Modulation Scheme	Bits per Symbol	Required SNR (dB)
Wi-Fi 4 (802.11n)	64-QAM	6	~25
Wi-Fi 5 (802.11ac)	256-QAM	8	~30
Wi-Fi 6 (802.11ax)	1024-QAM	10	~35
Wi-Fi 7 (802.11be)	4096-QAM	12	~38-41

Συνοπτικά, η υιοθέτηση του 4096-QAM από το Wi-Fi 7 είναι ένα κρίσιμο βήμα προς την επίτευξη εξαιρετικά υψηλής απόδοσης με χαμηλό λανθάνοντα χρόνο για σύγχρονες και μελλοντικές ασύρματες εφαρμογές. Αν και τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας είναι τεράστια, η εφαρμογή της αντιμετωπίζει προκλήσεις σχετικά με το SNR, τις παρεμβολές και την ακρίβεια υλικού. Εκτός αυτού, το Wi-Fi 7 εισάγει νέες εγγραφές στην τεχνολογία ασύρματης επικοινωνίας χρησιμοποιώντας το 4096-QAM σε συνδυασμό με ευρύτερα κανάλια και βελτιωμένη διόρθωση σφαλμάτων.

2.2.4 Multi-Link Operation (MLO) - Λειτουργία πολλαπλών συνδέσεων

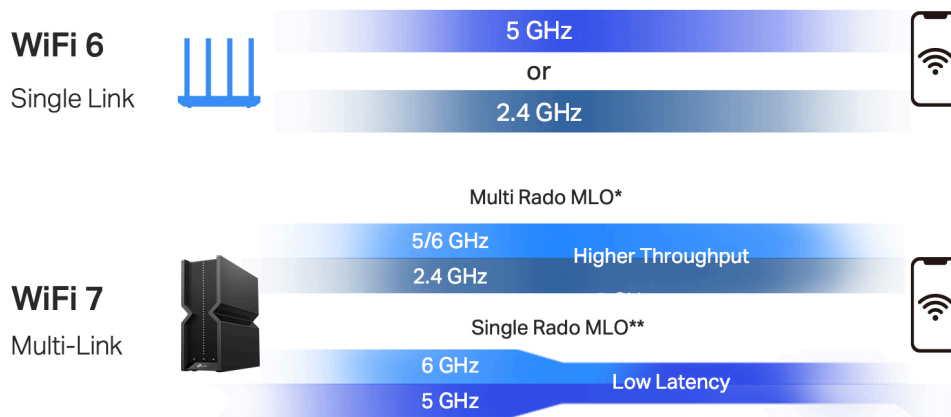
Ένα από τα πιο εντυπωσιακά χαρακτηριστικά του Wi-Fi 7 είναι το Multi-Link Operation (MLO). Το MLO μπορεί να βελτιώσει ριζικά την απόδοση, την αξιοπιστία και την αποδοτικότητα των ασύρματων δικτύων χρησιμοποιώντας πολλαπλές ζώνες συχνοτήτων (όπως 2,4 GHz, 5 GHz και 6 GHz) για ανερχόμενη και κατερχόμενη σύνδεση ταυτόχρονα. Αυτό επιτρέπει πολύ υψηλότερη απόδοση, χαμηλότερη καθυστέρηση και αυξημένη ανθεκτικότητα έναντι παρεμβολών, ειδικά σε δύσκολα και πυκνά ασύρματα περιβάλλοντα.

Το MLO παρέχει σε κάθε συσκευή τη δυνατότητα σύνδεσης και λειτουργίας σε πολλές ζώνες συχνοτήτων ταυτόχρονα, γεγονός που μπορεί να κάνει αποτελεσματική χρήση πολλαπλών καναλιών και να ξεπεράσει ορισμένους από τους περιορισμούς της λειτουργίας μιας ζώνης.

Τα ακόλουθα περιγράφουν πώς λειτουργεί το MLO και τα πλεονεκτήματά του:

1. **Ταυτόχρονη χρήση πολλαπλών ζωνών:** Οι συσκευές Wi-Fi 7 μπορούν να λειτουργούν σε τρεις διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων: 2,4 GHz, 5 GHz και 6 GHz, όλες ταυτόχρονα. Αυτό επιτρέπει στη συσκευή να επιλέγει δυναμικά το καλύτερο κανάλι σε πολλές ζώνες για πιο αξιόπιστη σύνδεση.
2. **Εξισορρόπηση φορτίου:** Χρησιμοποιώντας πολλαπλούς συνδέσμους, το Wi-Fi 7 μπορεί να κατανέμει την κυκλοφορία σε διαθέσιμες ζώνες, κάτι που βοηθά στην εξισορρόπηση του φορτίου και αποφεύγει τη συμφόρηση σε οποιαδήποτε ζώνη. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε πυκνά περιβάλλοντα όπου η κυκλοφορία υπερφορτώνει μία συχνότητα.
3. **Καλύτερη διαχείριση παρεμβολών:** Οι παρεμβολές που οφείλονται σε άλλα ασύρματα δίκτυα ή συσκευές μπορούν να μειωθούν λειτουργώντας σε διαφορετικές μπάντες. Το MLO επιτρέπει την απρόσκοπτη εναλλαγή μεταξύ των ζωνών για την αποφυγή παρεμβολών, εξασφαλίζοντας έτσι καλύτερη απόδοση σε θορυβώδη περιβάλλοντα.
4. **Ταυτόχρονη Uplink και Downlink:** Το Wi-Fi 7 επιτρέπει σε ροές δεδομένων ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης να εμφανίζονται σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων, αυξάνοντας γενικά την απόδοση. Αυτό βοηθά στη μείωση των σημείων συμφόρησης εντός του δικτύου και ως εκ τούτου βελτιώνει την εμπειρία του χρήστη.
5. **Υψηλότερη απόδοση και χαμηλότερη καθυστέρηση:** Το Wi-Fi 7 επιτυγχάνει υψηλότερες αποδόσεις σε σύγκριση με τα παραδοσιακά συστήματα μονής σύνδεσης συγκεντρώνοντας πολλαπλούς συνδέσμους (κανάλια). Ταυτόχρονα, μειώνει τον λανθάνοντα χρόνο, καθώς οι συσκευές μπορούν να στέλνουν και να λαμβάνουν δεδομένα σε πολλαπλές διαδρομές ταυτόχρονα.

Multi-Link Operation



Εικόνα 12. Multi-Link Operation από Wi-Fi 6 σε Wi-Fi 7

Πηγή: What Is Wi-Fi 7? All You Need to Know?(<https://www.starhub.com/personal/how-to/wifi-7-explained.html>)

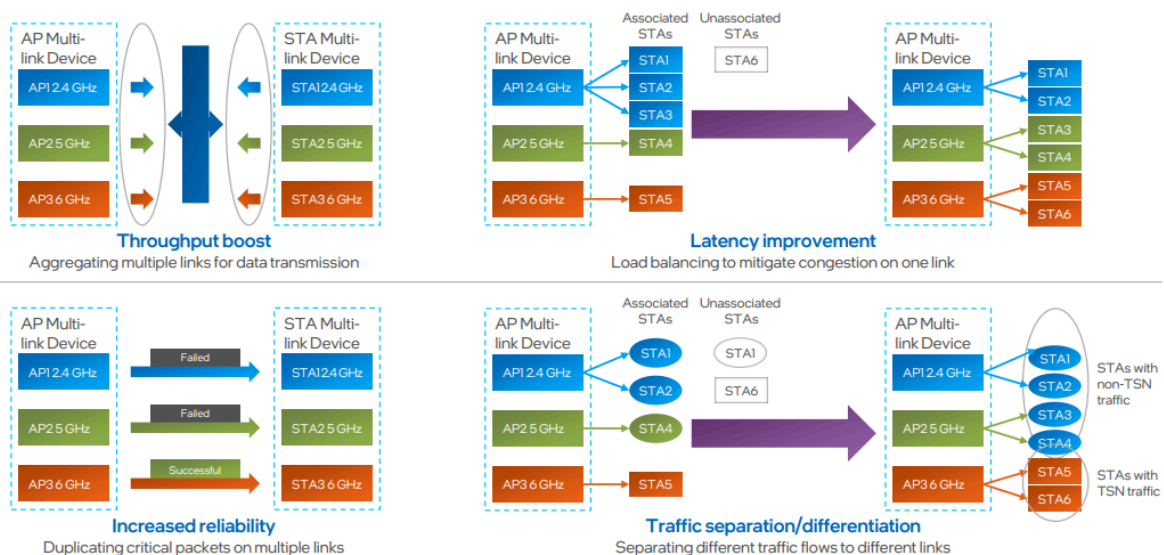
Βασικά χαρακτηριστικά της λειτουργίας Multi-Link

1. **Σύνδεση καναλιού σε διάφορες ζώνες:** Η δυνατότητα σύνδεσης καναλιού σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων, συνδυάζοντας το εύρος ζώνης τους για ταχύτερη μετάδοση δεδομένων, είναι ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά του MLO. Το Wi-Fi 7 μπορεί να συγκεντρώσει τα κανάλια στις ζώνες των 2,4 GHz, 5 GHz και 6 GHz σε ένα μόνο εικονικό κανάλι. Για παράδειγμα, μια συσκευή μπορεί να χρησιμοποιήσει μαζί το κανάλι των 160 MHz στη ζώνη των 5 GHz και το κανάλι των 160 MHz στη ζώνη των 6 GHz, συνδυάζοντας το εύρος ζώνης 320 MHz, γεγονός που βελτιώνει σημαντικά την απόδοση.
2. **Βελτιωμένη συγκέντρωση συνδέσμων (Link Aggregation):** Το MLO είναι ικανό να συγκεντρώνει πολλαπλές ροές δεδομένων σε διαφορετικές ζώνες σε μια συγκεντρωτική σύνδεση. Υψηλότεροι ρυθμοί δεδομένων είναι επιτεύξιμοι και είναι δυνατή η πιο αποτελεσματική χρήση των πόρων, ειδικά υπό έντονες συνθήκες κυκλοφορίας.
3. **Συντονισμός σημείων πρόσβασης (Access Point Coordination):** Ο προηγμένος προγραμματισμός και ο συντονισμός AP είναι νέες δυνατότητες που εισάγονται για τον καλύτερο χειρισμό του MLO στο Wi-Fi 7. Το AP επιτρέπει την καλύτερη απόδοση με ελάχιστους κινδύνους συμφόρησης ή παρεμβολής σε οποιαδήποτε ζώνη, ελέγχοντας την κατανομή της κίνησης δεδομένων στις ζώνες συχνοτήτων.
4. **Εξοπλισμός χρήστη (User Equipment) και επικοινωνία AP:** Πρώτα απ' όλα, η χρήση του MLO απαιτεί τόσο εξοπλισμό χρήστη όσο και σημείο πρόσβασης που υποστηρίζει MLO. Κατά τη σύνδεση σε ένα AP, μια συσκευή διαχειρίζεται δυναμικά τις συνδέσεις πολλαπλών συνδέσμων ενός AP. Ένα AP μπορεί να αλλάξει τις ζώνες που χρησιμοποιούνται λόγω των μεταβαλλόμενων συνθηκών δικτύου.

Πλεονεκτήματα της λειτουργίας Multi-Link

1. **Υψηλότερη απόδοση:** Το άμεσο πλεονέκτημα του MLO είναι η αύξηση της απόδοσης που μπορούν να προσφέρουν πολλές μπάντες ταυτόχρονα. Αυτό επιτρέπει στο Wi-Fi 7 να επιτυγχάνει εφαρμογές πολύ υψηλότερου ρυθμού δεδομένων, για παράδειγμα, ροή υψηλής ευκρίνειας, εικονική πραγματικότητα και μεγάλες μεταφορές αρχείων.
2. **Βελτιωμένη αξιοπιστία:** Το MLO μπορεί να επιτρέψει σε μια συσκευή να παραμένει αποτελεσματικά συνδεδεμένη, ακόμη και όταν μια μπάντα αντιμετωπίζει παρεμβολές ή συμφόρηση. Η εναλλακτική δυνατότητα σε διαφορετική μπάντα εγγυάται πιο αξιόπιστη συνδεσιμότητα, κάτι τόσο σημαντικό σε περιβάλλοντα υψηλής πυκνότητας όπως στάδια, αεροδρόμια ή γραφεία.
3. **Μειωμένη συμφόρηση:** Σε ένα περιβάλλον όπου υπάρχουν πολλές συσκευές που ανταγωνίζονται για το εύρος ζώνης, το MLO συμβάλλει στη μείωση της συμφόρησης κατανέμοντας την κυκλοφορία σε πολλές ζώνες. Οι συσκευές που είναι συνδεδεμένες στο ίδιο AP μπορούν να μοιράζονται πόρους πιο αποτελεσματικά και να ελαχιστοποιούν τον κίνδυνο υποβάθμισης της απόδοσης λόγω υπερφόρτωσης σε ένα μόνο κανάλι.
4. **Βελτιωμένη καθυστέρηση και ανταπόκριση:** Επειδή το MLO λειτουργεί σε πολλές ζώνες συχνοτήτων ταυτόχρονα, μειώνει την ανάγκη για οποιαδήποτε συσκευή να περιμένει για ένα διαθέσιμο κανάλι. Αυτό μπορεί να συμβάλει στη μείωση του λανθάνοντος χρόνου και, ως εκ τούτου, το Wi-Fi 7 θα μπορούσε να είναι κατάλληλο για εφαρμογές περιορισμένου χρόνου, όπως διαδικτυακά παιχνίδια, βιντεοκλήσεις και ροή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο.
5. **Βελτιστοποιημένη διάρκεια ζωής μπαταρίας πελάτη:** Επίσης, το MLO θα κάνει τις μπαταρίες πιο αποτελεσματικές στις συσκευές διευκολύνοντας τη μεταφορά δεδομένων πιο αποτελεσματικά. Για παράδειγμα, κατά τη λειτουργία χαμηλής κατανάλωσης, η συσκευή μπορεί να χρησιμοποιήσει ζώνες χαμηλής συχνότητας-2,4 GHz-για λιγότερο κρίσιμα δεδομένα, ενώ οι ζώνες υψηλής συχνότητας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εργασίες υψηλής έντασης, μειώνοντας κατά συνέπεια την κατανάλωση ενέργειας.

Benefits of Multi-link Operation



Εικόνα 13. Πλεονεκτήματα της λειτουργίας Multi-Link

Πηγή: Wi-Fi Unleashed: Wi-Fi 7, 6 GHz, and Beyond

(<https://www.intel.com/content/www/us/en/products/docs/wireless/wi-fi-technology-guide.html>)

Τύποι MLO

Multi-Link Single Radio (MLSR)

Το MLSR περιλαμβάνει ένα ραδιο-τσιπ (single radio interface) σε μια συσκευή που επικοινωνεί σε πολλαπλές ζώνες συχνοτήτων, αλλά μπορεί να εκπέμπει (TX) ή να λαμβάνει (RX) μόνο σε μία σύνδεση κάθε φορά. Αυτό σημαίνει ότι το ραδιο-τσιπ μπορεί να εναλλάσσεται μεταξύ ζωνών (όπως 2,4 GHz, 5 GHz ή 6 GHz), αλλά δεν εκπέμπει και λαμβάνει ταυτόχρονα σε πολλαπλές συνδέσεις.

- Περιπτώσεις χρήσης: Το MLSR χρησιμοποιείται συνήθως σε συσκευές χαμηλής κατανάλωσης όπου η προτεραιότητα είναι η εξοικονόμηση ενέργειας, ενώ παράλληλα επωφελείται από τη συνδεσιμότητα πολλαπλών ζωνών. Για παράδειγμα, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε συσκευές IoT ή κινητά τηλέφωνα που μπορούν να υποστηρίξουν λειτουργία πολλαπλών ζωνών, αλλά δεν απαιτούν ταυτόχρονη επικοινωνία πολλαπλών ζωνών.
- Λειτουργικότητα:
 - Η συσκευή χρησιμοποιεί υλικό ενός ραδιο-τσιπ(single-radio hardware).
 - Εναλλάσσεται μεταξύ ζωνών συχνοτήτων (π.χ. 2,4 GHz, 5 GHz, 6 GHz) με βάση τις συνθήκες δικτύου.
 - Μόνο ένας σύνδεσμος είναι ενεργός κάθε φορά για TX/RX.

Enhanced Multi-Link Single Radio (EMLSR)

Το EMLSR βασίζεται στο MLSR και επιτρέπει στο μονό ραδιο-τσιπ να ακούει δύο συνδέσμους ταυτόχρονα. Ωστόσο, το ραδιο-τσιπ εξακολουθεί να μην μπορεί να εκπέμπει και να λαμβάνει ταυτόχρονα σε διαφορετικούς συνδέσμους. Αυτό δίνει στη συσκευή μια μικρή βελτίωση της απόδοσης λαμβάνοντας δεδομένα από δύο ζώνες συχνοτήτων ταυτόχρονα, ενώ εξακολουθεί να εκπέμπει μόνο σε μία σύνδεση.

- Περιπτώσεις χρήσης: Το EMLSR μπορεί να είναι επωφελές σε εφαρμογές όπου η συσκευή λαμβάνει μεγάλο όγκο δεδομένων (όπως ροή ή λήψη) αλλά χρειάζεται μόνο να μεταδίδει κατά διαστήματα. Για παράδειγμα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε smartphone ή tablet που εκτελούν εργασίες στο παρασκήνιο, ενώ παράλληλα κάνουν λήψη μεγάλων αρχείων.
- Λειτουργικότητα:
 - Χρησιμοποιείται μονό ράδιο, αλλά με βελτιωμένη δυνατότητα λήψης δεδομένων από δύο συνδέσμους ταυτόχρονα.
 - Χωρίς ταυτόχρονο TX/RX — το ράδιο εκπέμπει μόνο σε μία σύνδεση κάθε φορά.
 - Βελτιωμένη απόδοση στη λήψη δεδομένων σε πολλές ζώνες.

Nonsimultaneous Transmit and Receive Multi-Link Multi-Radio (NSTR MLMR)

Το NSTR MLMR επιτρέπει στη συσκευή να χρησιμοποιεί δύο ή περισσότερα ραδιο-τσιπ ταυτόχρονα για μετάδοση (TX) και λήψη (RX) μέσω πολλαπλών ζεύξεων. Ωστόσο, η μετάδοση και η λήψη δεν γίνονται ταυτόχρονα σε όλες τις συνδέσεις, πράγμα που σημαίνει ότι η συσκευή μπορεί είτε να εκπέμπει σε μία σύνδεση ενώ λαμβάνει σε άλλη είτε αντίστροφα.

- Περιπτώσεις χρήσης: Το NSTR MLMR μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε σενάρια όπου η συσκευή απαιτεί υψηλότερη απόδοση ή κάλυψη με χρήση πολλαπλών ραδιο-τσιπ (π.χ. δρομολογητές διπλής ζώνης, φορητοί υπολογιστές υψηλής απόδοσης κ.λπ.), αλλά μπορεί να ανεχθεί κάποια καθυστέρηση στη μετάδοση και τη λήψη. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμο όταν οι συσκευές είναι συνδεδεμένες σε πολλαπλά AP και πρέπει να διατηρούν ισχυρή επικοινωνία σε όλους τους συνδέσμους.
- Λειτουργικότητα:
 - Πολλαπλά ραδιο-τσιπ χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων.

- Η ταυτόχρονη TX/TX ή RX/RX είναι δυνατή σε διαφορετικούς συνδέσμους.
- Δεν υπάρχει δυνατότητα full-duplex για ταυτόχρονο TX και RX σε πολλαπλούς συνδέσμους.

Simultaneous Transmit and Receive Multi-Link Multi-Radio (STR MLMR)

Το STR MLMR παρέχει μια πιο προηγμένη υλοποίηση όπου δύο ή περισσότερα ραδιο-τσιπ χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση και λήψη δεδομένων ταυτόχρονα σε πολλαπλές συνδέσεις. Αυτό επιτρέπει την αληθινή αμφίδρομη επικοινωνία, επιτρέποντας στη συσκευή να μεταδίδει και να λαμβάνει δεδομένα ταυτόχρονα, σε πολλαπλές ζώνες συχνοτήτων (π.χ. 2,4 GHz, 5 GHz και 6 GHz).

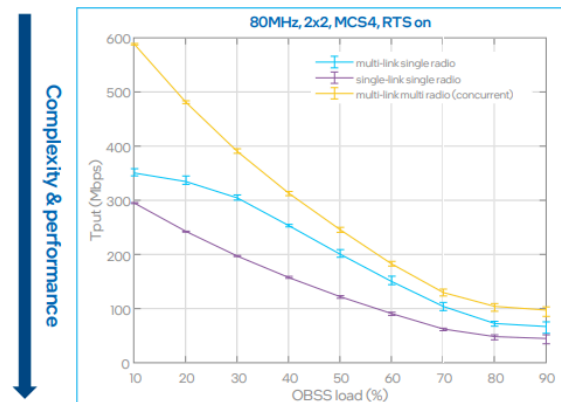
- Περιπτώσεις χρήσης: Το STR MLMR είναι ιδανικό για συσκευές υψηλής απόδοσης που χρειάζονται επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο και εφαρμογές υψηλού εύρους ζώνης. Για παράδειγμα, αυτό θα μπορούσε να είναι χρήσιμο σε εταιρικά περιβάλλοντα, συστήματα οικιακής ψυχαγωγίας ή σενάρια μεταφοράς δεδομένων υψηλής ταχύτητας, όπου απαιτούνται τόσο υψηλή απόδοση όσο και χαμηλή καθυστέρηση.
- Λειτουργικότητα:
 - Χρησιμοποιούνται πολλαπλά ραδιο-τσιπ, καθένα από τα οποία επικοινωνεί σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων.
 - Πραγματικό ταυτόχρονο TX/RX σε πολλαπλούς συνδέσμους, το οποίο είναι ιδανικό για μετάδοση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο.
 - Η λειτουργία full-duplex επιτρέπει την αποτελεσματική χρήση του φάσματος και τη μειωμένη καθυστέρηση.

Enhanced Multi-Link Multi-Radio (EMLMR)

Το EMLMR επεκτείνει το STR MLMR παρέχοντας δυναμική αναδιαμόρφωση της ικανότητας χωρικής πολυπλεξίας σε κάθε σύνδεσμο. Με άλλα λόγια, μπορεί να προσαρμόσει τον τρόπο μετάδοσης των δεδομένων μέσω πολλαπλών συνδέσεων και πολλαπλών ραδιο-τσιπ, βελτιστοποιώντας δυναμικά τη χρήση χωρικών ροών, γεγονός που ενισχύει τη συνολική απόδοση και ευελιξία του συστήματος MLO.

- Περιπτώσεις χρήσης: Το EMLMR είναι ιδανικό για δίκτυα και συσκευές πολύ υψηλής απόδοσης που υποστηρίζουν προηγμένη χωρική πολυπλεξία (π.χ. δρομολογητές υψηλής τεχνολογίας για επιχειρήσεις, προηγμένα συστήματα AR/VR ή κέντρα δεδομένων). Αυτή η δυναμική προσαρμογή επιτρέπει τη βέλτιστη κλίμακα απόδοσης με βάση τις συνθήκες δικτύου και τις απαιτήσεις της συσκευής.
- Λειτουργικότητα:
 - Πολλαπλά ραδιο-τσιπ χρησιμοποιούνται για ταυτόχρονο TX/RX.
 - Η δυναμική αναδιαμόρφωση των χωρικών ροών επιτρέπει την καλύτερη προσαρμογή στις μεταβαλλόμενες συνθήκες δικτύου.
 - Βελτιστοποιεί την απόδοση της σύνδεσης προσαρμόζοντας τον τρόπο ροής δεδομένων σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων, αυξάνοντας πιθανώς τη συνολική απόδοση και μειώνοντας τις παρεμβολές.

MLO Type	Number of Radios	Characteristics
Multi-link single radio (MLSR)	1	TX/RX over one link at a time.
Enhanced multi-link single radio (EMLSR)	1	MLSR with additional capability to listen to two links simultaneously.
Nonsimultaneous transmit and receive multi-link multi-radio (NSTR MLMR)	≥ 2	Simultaneous TX/TX, RX/RX over multiple links.
Simultaneous transmit and receive multi-link multi-radio (STR MLMR)	≥ 2	Simultaneous TX/TX, RX/RX, and TX/RX over multiple links.
Enhanced multi-link multi-radio (EMLMR)	≥ 2	MLMR with additional capability to dynamically reconfigure spatial multiplexing capability on each link.



Εικόνα 14. Τύποι της λειτουργίας Multi-Link

Πηγή: Wi-Fi Unleashed: Wi-Fi 7, 6 GHz, and Beyond

(<https://www.intel.com/content/www/us/en/products/docs/wireless/wi-fi-technology-guide.html>)

Προκλήσεις και προβληματισμοί για τη λειτουργία πολλαπλών συνδέσεων

- Πολυπλοκότητα στο σχεδιασμό της συσκευής:** Το MLO απαιτεί μια πιο προηγμένη ικανότητα υλικού και λογισμικού τόσο στο AP όσο και στις συσκευές πελάτη. Σημαίνει ότι οι συσκευές πρέπει να μπορούν να μιλούν σε πολλές ζώνες συχνοτήτων ταυτόχρονα, απαιτώντας έτσι δυνατότητες πολλαπλής κεραίας και πολλαπλής επεξεργασίας.
- Διαχείριση παρεμβολών:** Ενώ το MLO βοηθά με τον μετριασμό των παρεμβολών χρησιμοποιώντας διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων, εξακολουθεί να υπάρχει μια πιθανή συμφόρηση όταν λειτουργεί σε εξαιρετικά αδόμητα και ακατάστατα περιβάλλοντα. Ενδέχεται να υπάρχουν παρεμβολές από το ίδιο κανάλι, εφόσον οι συσκευές μοιράζονται την ίδια ζώνη. Ως εκ τούτου, το MLO πρέπει να διαχειριστεί με σύνεση τη χρήση του διαθέσιμου φάσματος.
- Συμβατότητα προς τα πίσω:** Τα δίκτυα Wi-Fi 7 μπορούν να συνδεθούν με συσκευές που δεν υποστηρίζουν MLO, αλλά τέτοιες συσκευές δεν θα επωφεληθούν από διάφορα κέρδη απόδοσης που προσφέρει η MLO. Σε γενικές γραμμές, η αυξανόμενη ανάπτυξη του Wi-Fi 7 αποτελεί μεγάλη πρόκληση για τη διασφάλιση ότι οι παλαιότερες και νεότερες συσκευές λειτουργούν απρόσκοπτα από τους διαχειριστές δικτύου.
- Κατανομή εύρους ζώνης και “δικαιοσύνη”:** Σε ένα δίκτυο που αποτελείται από πολλές συσκευές, είναι πολύ σημαντικό το εύρος ζώνης να μοιράζεται δίκαια μεταξύ τους. Το MLO, εάν γίνει λάθος, θα μπορούσε να οδηγήσει σε περιορισμό του εύρους ζώνης από ορισμένες συσκευές, ενώ υποβάθμιση της απόδοσης συμβαίνει σε άλλες.

Χρήση περιπτώσεων λειτουργίας πολλαπλών συνδέσεων

- Οικιακά δίκτυα:** Το MLO μπορεί να συνδέσει όλες τις συσκευές σε ένα σύγχρονο έξυπνο σπίτι, το οποίο περιλαμβάνει έξυπνη τηλεόραση, κονσόλα παιχνιδιών και έξυπνες συσκευές που απαιτούν υψηλό εύρος ζώνης με αποτελεσματικότητα και χωρίς παρεμβολές.
- Επιχειρηματικά περιβάλλοντα:** Σε γραφεία ή αίθουσες συνεδριάσεων με πολλές συσκευές, το MLO είναι σε θέση να εκτελεί εφαρμογές υψηλής απόδοσης, όπως τηλεδιάσκεψη, κοινή χρήση αρχείων και πρόσβαση στο cloud χωρίς υπερφόρτωση του δικτύου.

- **Δημόσιοι Χώροι και Στάδια:** Το MLO μπορεί να είναι πολύ χρήσιμο σε στάδια, εμπορικά κέντρα και αεροδρόμια, όπου το Wi-Fi πρέπει να υποστηρίζει χιλιάδες συσκευές μέσω της εξισορρόπησης φορτίου σε πολλές ζώνες για να διασφαλίσει συνδέσεις και απόδοση υψηλής ποιότητας.
- **AR/VR και Gaming:** Οι εφαρμογές AR και VR απαιτούν χαμηλό λανθάνοντα χρόνο και υψηλή απόδοση. Με το MLO, αυτό καθίσταται απρόσκοπτα δυνατό, καθώς πολλαπλές διαδρομές δεδομένων μπορούν να εκτελεστούν ταυτόχρονα για την αποφυγή καταστάσεων καθυστέρησης.

Μεταξύ πολλών σημαντικών καινοτομιών Wi-Fi 7, το MLO βελτιώνει τη συνολική απόδοση του ασύρματου δικτύου. Επίσης, επιτρέπει την ταυτόχρονη χρήση πολλαπλών ζωνών συχνοτήτων για επικοινωνία, επιτρέποντας υψηλότερη απόδοση, χαμηλότερη καθυστέρηση και αυξημένη αξιοπιστία. Αν και υπάρχουν προκλήσεις στην εφαρμογή του, τα πλεονεκτήματα που προσφέρει σε περιβάλλοντα υψηλής ζήτησης είναι τεράστια. Το MLO, σε συνδυασμό με άλλες δυνατότητες Wi-Fi 7, όπως ευρύτερα κανάλια και διαμόρφωση υψηλότερης τάξης, τοποθετεί το Wi-Fi 7 στην κορυφαία αιχμή της τεχνολογίας ασύρματης δικτύωσης για να καλύψει τις συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις για εφαρμογές υψηλής ταχύτητας και χαμηλής καθυστέρησης, στους καταναλωτικούς και επιχειρηματικούς χώρους.

2.2.5 Multi Resource Unit Aggregation

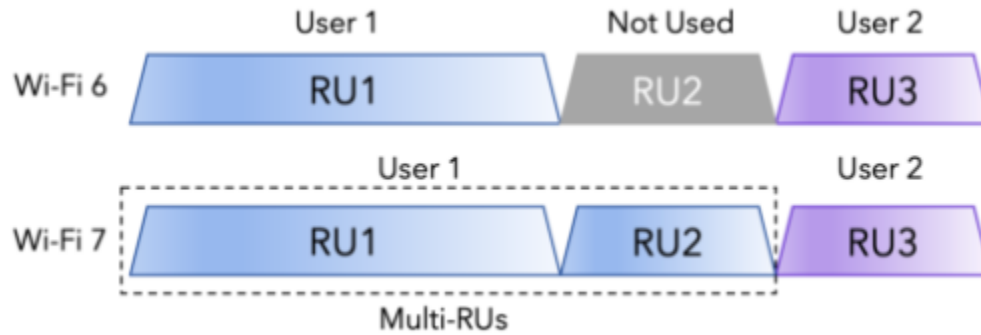
Το Wi-Fi 7 εισάγει τις καινοτόμες δυνατότητες του Multi Resource Unit Aggregation ή του MRU Aggregation για να βοηθήσει στη δημιουργία ασύρματης επικοινωνίας. Με βάση την βελτιωμένη τεχνολογία Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA, που εισήχθη στο Wi-Fi 6 και αναφέραμε και παραπάνω, το MRU Aggregation θα οδηγήσει την κατανομή και τη χρήση πόρων στο επόμενο βήμα για την αντιμετώπιση των προκλήσεων που σχετίζονται με περιβάλλοντα υψηλής πυκνότητας και κατακερματισμένα σενάρια φάσματος.

Τι είναι το MRU Aggregation:

Το Aggregation MRU επιτρέπει τη δυναμική ομαδοποίηση των μονάδων πόρων (RU - Resource Units), οι οποίες είναι υποδιαιρέσεις του εύρους ζώνης καναλιού που χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση δεδομένων. Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά συστήματα, το Wi-Fi 7 μπορεί να συγκεντρώσει πολλαπλές RU σε ένα μόνο μπλοκ μετάδοσης μέσα στο ίδιο πλαίσιο. Αυτές οι συγκεντρωτικές RU μπορεί να είναι είτε:

- **Συνεχείς:** Εκτείνεται σε ένα συνεχές εύρος συχνοτήτων.
- **Μη-Συνεχείς:** Διάσπαρτα σε διάφορα μέρη του φάσματος.

Αυτή η δυνατότητα διασφαλίζει ότι τα δίκτυα Wi-Fi 7 μπορούν να προσαρμοστούν σε κατακερματισμένη διαθεσιμότητα και παρεμβολές φάσματος, μεγιστοποιώντας τη χρήση των πόρων.



Εικόνα 15. Παράδειγμα MRU στο Wi-Fi 7 συγκριτικά με το Wi-Fi 6

Πηγή: Wi-Fi 7 (802.11be) Highlights
<https://wifivita.com/2023/08/01/wifi7-highlights/>

Χρήση και ευελιξία φάσματος

Ένα από τα βασικά οφέλη του MRU Aggregation είναι ότι βελτιώνει τη χρήση του φάσματος. Υπό πραγματικές συνθήκες, παρεμβολές και για ρυθμιστικούς λόγους, ένα κομμάτι του φάσματος παραμένει άχρηστο. Το MRU Aggregation μειώνει τέτοια απόβλητα μέσω της καλύτερης χρήσης ενός τμήματος του φάσματος από τη συσκευή.

Για παράδειγμα, το MRU Aggregation θα επιτρέψει σε συσκευές σε πολύ πυκνά αστικά περιβάλλοντα με επικαλυπτόμενα δίκτυα να έχουν πρόσβαση σε εύρος ζώνης τεμαχισμένο σε μη συνεχόμενα τμήματα του φάσματος. Αυτή η προσαρμοστικότητα διασφαλίζει ότι η χρήση του φάσματος θα είναι αποτελεσματική ακόμη και κάτω από τις πιο δύσκολες συνθήκες.

Οφέλη για διαφορετικές απαιτήσεις συσκευών

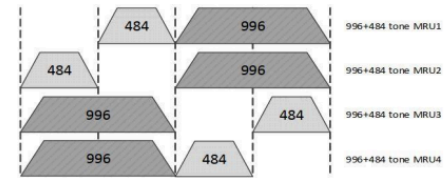
Τα δίκτυα Wi-Fi συχνά εξυπηρετούν έναν συνδυασμό συσκευών με διαφορετικές απαιτήσεις εύρους ζώνης:

- **Συσκευές υψηλής ζήτησης:** Οι συσκευές που χρησιμοποιούνται για εργασίες όπως η ροή βίντεο 4K ή οι μεταφορές μεγάλων αρχείων απαιτούν μεγάλο εύρος ζώνης. Το MRU Aggregation επιτρέπει σε τέτοιες συσκευές να συνδυάζουν πολλαπλές RU σε μεγαλύτερα μπλοκ, εξασφαλίζοντας βέλτιστη απόδοση.
- **Συσκευές χαμηλής ζήτησης:** Οι αισθητήρες IoT και οι συσκευές χαμηλής κατανάλωσης μπορούν να χρησιμοποιούν μικρότερες RU χωρίς να παρεμβαίνουν σε συσκευές υψηλής ζήτησης.

Αυτή η ευελιξία επιτρέπει στα δίκτυα Wi-Fi 7 να καλύψουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών χωρίς σπατάλη πόρων.

Multi-RU Support

- Resource unit (RU): a group of subcarriers as an allocation for transmission.
- In Wi-Fi 6, each non-AP STA can only be assigned with a single RU.
- While this constraint simplifies the allocation scheme, it brings several limitations.
 - Degrades the spectral efficiency when number of users is small.
 - Wastes bandwidth in preamble puncturing scenarios, where the only primary 20 MHz can be used if radar detected in the secondary 20 MHz.
 - Fails to exploit the frequency diversity.
- Wi-Fi 7 introduces Multi-RU support by allowing the allocation of multiple RUs to a single STA.
 - Allowed Multi-RU combinations for different BWs are defined.



Example: Allowed 996+484-tone MRUs in non-OFDMA 160 MHz EHT PPDU

Εικόνα 16. Υποστήριξη MRU στο Wi-Fi 7

Πηγή: Wi-Fi Unleashed: Wi-Fi 7, 6 GHz, and Beyond

(<https://www.intel.com/content/www/us/en/products/docs/wireless/wi-fi-technology-guide.html>)

Τεχνική Υλοποίηση

Η εφαρμογή MRU Aggregation στο Wi-Fi 7 αντιπροσωπεύει μια εξελιγμένη ανάπτυξη των επιπέδων PHY και MAC του ασύρματου προτύπου, όπου και τα δύο επίπεδα συνεργάζονται για να πραγματοποιήσουν μια τέτοια δυναμική και αποτελεσματική χρήση των πόρων του φάσματος, οι οποίοι μπορεί να είναι κατακερματισμένοι ή υποχρησιμοποιημένοι.

Βελτιώσεις φυσικής στρώσης (Physical Layer PHY)

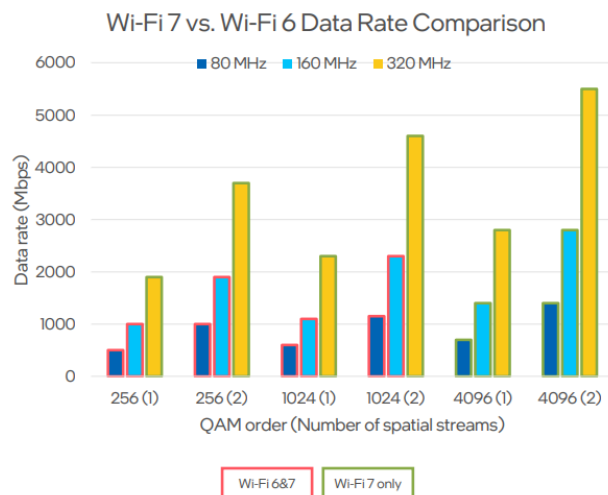
- Κατανομή δυναμικής μονάδας πόρων (Dynamic RU Allocation):
 - Το επίπεδο PHY του Wi-Fi-7 έχει αναπτυχθεί για δυναμική πολλαπλή κατανομή και συνάθροιση (aggregation) RU.
 - Κάθε RU έχει μια συγκεκριμένη μοναδική υποδιαίρεση του διαθέσιμου καναλιού, ενώ η συνάθροιση θα γίνει σε συνεχόμενα ή ακόμα και μη συνεχόμενα μπλοκ ενός φάσματος με βάση τη διαθεσιμότητά τους σε πραγματικό χρόνο.
- Υποστήριξη Σχεδίου Ανώτερης Διαμόρφωσης και Κωδικοποίησης (Higher Modulation and Coding Scheme Support - MCS):
 - Το Wi-Fi 7 διαθέτει 4096-QAM που απαιτεί ακριβή συντονισμό σε όλη τη συγκεντρωτική RU με υψηλή ποιότητα σήματος.
 - Αυτή η πολυπλοκότητα αντιμετωπίζεται από το επίπεδο PHY για την παροχή ισχυρών δεδομένων ακόμη και σε περιβάλλον επιρρεπές σε παρεμβολές ή με κακή ποιότητα σήματος.
- Διαχείριση κατακερματισμού καναλιών:
 - Το επίπεδο PHY παρέχει λειτουργίες σε κατακερματισμένα κανάλια, όπως η συγκέντρωση RU από χωριστά τμήματα ενός καναλιού 320 MHz.
 - Αυτό το είδος λειτουργικότητας καθίσταται εξαιρετικά χρήσιμο όταν οι ρυθμιστές επιβάλλουν περιορισμούς στο μέγιστο επιτρεπόμενο συνεχόμενο εύρος ζώνης λόγω της επικάλυψης των αναπτυσσόμενων δικτύων.

- Αποτελεσματική Συγκέντρωση Φορέων:
 - Το MRU Aggregation απαιτεί εξελιγμένες τεχνικές συνάθροισης φορέων για τη συγκέντρωση πολλών φορέων σε ένα κανάλι.
 - Αυτό απαιτεί συγχρονισμό του χρονισμού, της συχνότητας και της φάσης στις συγκεντρωτικές RU για τη διατήρηση υψηλής απόδοσης και χαμηλής καθυστέρησης.

Key PHY Enhancements for Wi-Fi 7

- Forward compatible preamble design: U-SIG
- Wider bandwidth: 320 MHz support
- Higher peak rate: 4096-QAM support and 16 spatial streams
- Enhanced resource allocation: Multiple resource units (RUs) allocation

	Wi-Fi 6	Wi-Fi 7
Max channel bandwidth	160 MHz	320 MHz
Highest modulation order	1024-QAM	4096-QAM
Max no. of spatial streams	8	8
Max data rate	~9.6 Gbps	~23 Gbps
Resource allocation	Single RU	Multi-RU



Εικόνα 17. Βελτιώσεις στο PHY Layer του Wi-Fi 7

Πηγή: Wi-Fi Unleashed: Wi-Fi 7, 6 GHz, and Beyond

(<https://www.intel.com/content/www/us/en/products/docs/wireless/wi-fi-technology-guide.html>)

Βελτιώσεις στο επίπεδο ελέγχου πρόσβασης μεσαίου επιπέδου (Medium Access Control Layer - MAC).

- Προηγμένοι αλγόριθμοι προγραμματισμού:
 - Το επίπεδο MAC εφαρμόζει προηγμένους αλγόριθμους προγραμματισμού για δυναμική εκχώρηση και συνάθροιση RU σε συσκευές με βάση τις ανάγκες τους σε εύρος ζώνης και τις συνθήκες δικτύου.
 - Λαμβάνει υπόψη τον προγραμματισμό σχετικά με τις παρεμβολές, την προτεραιότητα της συσκευής και τις απαιτήσεις κυκλοφορίας σε πραγματικό χρόνο.
- Συντονισμός για μη συνεχόμενη συγκέντρωση:
 - Σε περιπτώσεις όπου η συγκέντρωση πρέπει να γίνει σε μη συνεχόμενες RU, το MAC χειρίζεται τον συντονισμό μεταξύ των θραυσμάτων για να διατηρεί τη ροή των δεδομένων συνεχώς.
 - Αυτό περιλαμβάνει σηματοδότηση και συγχρονισμό μεταξύ AP και συσκευών πελάτη για τη διαπραγμάτευση και τη διαχείριση της συγκέντρωσης RU.
- Αποτελεσματική δομή πλαισίου:
 - Το MAC παρέχει μια βελτιωμένη δομή πλαισίου, η οποία φιλοξενεί τις

- συγκεντρωτικές RU.
- Αυτά τα πλαίσια περιλαμβάνουν μεταδεδομένα σχετικά με τις ακριβείς RU που έχουν εκχωρηθεί σε κάθε συσκευή και πώς συνδυάζονται για να διασφαλιστεί η συμβατότητα και η αποτελεσματικότητα.
- Συγκέντρωση πολλαπλών ζωνών:
 - Το MAC του Wi-Fi 7 επιτρέπει τη συγκέντρωση σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων, όπως 2,4 GHz, 5 GHz και 6 GHz.
 - Αυτή η δυνατότητα δίνει στο MRU Aggregation τη δυνατότητα να εκμεταλλεύεται πόρους φάσματος από διαφορετικές ζώνες, αυξάνοντας έτσι περαιτέρω την ευελιξία και την απόδοση.

Διαχείριση παρεμβολών

Το Wi-Fi 7 περιλαμβάνει τεχνικές μετριασμού παρεμβολών για περαιτέρω βελτίωση του MRU aggregation:

1. **Επιλογή δυναμικής συχνότητας:** Αυτή η δυνατότητα θα αποφύγει αυτόματα τμήματα του φάσματος που έχουν παρεμβολές και θα αλλάξει δυναμικά τις RU.
2. **Ήχος καναλιού:** Οι συγκεντρωτικές RU επιλέγονται με βάση τις συνθήκες του καναλιού σε πραγματικό χρόνο για να διασφαλιστεί η καλύτερη απόδοση.
3. **Beamforming:** Οι χωρικές ροές χρησιμοποιούνται για την εστίαση του σήματος και τη μείωση των παρεμβολών, βελτιώνοντας περαιτέρω την αποτελεσματικότητα των συγκεντρωτικών RU.

Απαιτήσεις υλικού

- Σημεία πρόσβασης υψηλής απόδοσης (APs):
 - Τα Access Points χρειάζονται νέα chipset για την υποστήριξη των υπολογιστικών απαιτήσεων της δυναμικής συνάθροισης RU, των λειτουργιών πολλαπλών ζωνών και του προηγμένου προγραμματισμού.
 - Αυτά τα AP θα απαιτούν επίσης ισχυρή ικανότητα επεξεργασίας για τη διαχείριση παρεμβολών και το συγχρονισμό των συγκεντρωτικών RU.
- Συμβατότητα συσκευών πελάτη:
 - Οι συσκευές πελάτη μετάδοσης θα υποστηρίζουν όλες τις προηγμένες δυνατότητες PHY και MAC του Wi-Fi 7, συμπεριλαμβανομένης της κατανόησης και της χρήσης συγκεντρωτικών RU.
 - Αυτό απαιτεί περαιτέρω σύγχρονα ραδιόφωνα ικανά να επιλέγουν δυναμικά RU και προηγμένες τεχνικές διαμόρφωσης.

Διαχείριση ροής δεδομένων

Ο συντονισμός μεταξύ των επιπέδων PHY και MAC διασφαλίζει την αποτελεσματική ροή δεδομένων στις συγκεντρωτικές RU:

- **Επίπεδο PHY:** Αυτό χειρίζεται την επεξεργασία σήματος χαμηλού επιπέδου, συμπεριλαμβανομένης της διαμόρφωσης, της κωδικοποίησης και της συνάθροισης φορέα.
- **Επίπεδο MAC:** Διαχειρίζεται εργασίες υψηλού επιπέδου, όπως ο προγραμματισμός κυκλοφορίας, η κατανομή RU και η συμβατότητα μεταξύ συσκευών με διαφορετικές ανάγκες εύρους ζώνης. Αυτό το layering διασφαλίζει ότι το MRU Aggregation λειτουργεί απρόσκοπτα για να παρέχει υψηλή απόδοση, χαμηλή καθυστέρηση και ισχυρή

απόδοση σε ένα ευρύ φάσμα σεναρίων.

Συνοπτικά, το MRU Aggregation αποτελεί ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά του Wi-Fi 7, το οποία επιτρέπει στα δίκτυα να αντιμετωπίσουν τη βελτιωμένη πολυπλοκότητα του σημερινού ασύρματου περιβάλλοντος. Το MRU Aggregation θα διασφαλίσει ότι τα συστήματα Wi-Fi 7 είναι αποτελεσματικά και αξιόπιστα, κάνοντας καλύτερη χρήση του φάσματος, προσαρμόζοντας τις συνθήκες κατακερματισμού των καναλιών και εξισορροπώντας τις διαφορετικές απαιτήσεις συσκευών. Η εφαρμογή του σε μεγαλύτερα πλάτη καναλιών ενισχύει περαιτέρω τις δυνατότητες του προτύπου και το καθιστά απαραίτητο για ασύρματες εφαρμογές επόμενης γενιάς.

2.2.6 Target Wake Time

Το TWT είναι ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά στα πρότυπα Wi-Fi. παρουσιάστηκε για πρώτη φορά στο Wi-Fi 6 και επεκτείνεται περαιτέρω στο Wi-Fi 7. Θα παίξει σημαντικό ρόλο στη βελτίωση της απόδοσης ενέργειας και της αποσυμφόρησης δικτύου και στην περαιτέρω υποστήριξη για συσκευές IoT. Το TWT υποστηρίζει έναν λεπτομερή έλεγχο της κατανάλωσης ενέργειας και της κατανομής πόρων δικτύου, επιτρέποντας στις συσκευές να προγραμματίζουν πότε ξυπνούν για να μεταδίδουν ή να λαμβάνουν δεδομένα.

Επισκόπηση της λειτουργίας TWT

Το Target Wake Time επιτρέπει στις συσκευές ενός δικτύου Wi-Fi να διαπραγματεύονται συγκεκριμένες ώρες με το Access Point για μετάδοση ή λήψη δεδομένων. Κάνει τα εξής:

- Μειώνει το χρόνο που το ραδιο-τσιπ μιας συσκευής βρίσκεται σε ενεργή κατάσταση, εξοικονομώντας έτσι ενέργεια.
- Ελαχιστοποιεί τις συγκρούσεις και τη συμφόρηση συντονίζοντας τη δραστηριότητα των συσκευών, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα υψηλής πυκνότητας.
- Βελτιώνει την υποστήριξη για εφαρμογές IoT όπου η ενεργειακή απόδοση είναι πολύ σημαντική.

Αυτό το κάνει καθορίζοντας τα διαστήματα αφύπνισης και ύπνου των συσκευών. Οι συσκευές διαπραγματεύονται αυτά τα διαστήματα με το AP, δημιουργώντας ένα "πρόγραμμα αφύπνισης" προσαρμοσμένο για τις ανάγκες μετάδοσης δεδομένων τους. Αυτό διασφαλίζει ότι οι συσκευές ενεργοποιούνται μόνο σε προκαθορισμένους χρόνους, μειώνοντας έτσι την περιττή κατανάλωση ενέργειας.

Βελτιώσεις στο Wi-Fi 7

Το Wi-Fi 7 επεκτείνει τον μηχανισμό TWT με διάφορες βελτιώσεις για να ανταποκριθεί στην αυξανόμενη πολυπλοκότητα των σημερινών ασύρματων δικτύων. Οι κύριες βελτιώσεις περιλαμβάνουν:

- Δυναμικός προγραμματισμός TWT:
 - Το Wi-Fi 7 επιτρέπει πιο δυναμικό και προσαρμοστικό προγραμματισμό των διαστημάτων TWT, επιτρέποντας στις συσκευές να προσαρμόζουν δυναμικά τους χρόνους αφύπνισης με βάση τις μεταβαλλόμενες συνθήκες δικτύου ή τις

- απαιτήσεις εφαρμογών.
- Για παράδειγμα, οι συσκευές ροής βίντεο μπορούν να αυξήσουν τη συχνότητα αφύπνισης κατά τη ροή υψηλής ταχύτητας bit και να τη μειώσουν κατά τις περιόδους αδράνειας.
- Group TWT:
 - Το Wi-Fi 7 εισάγει το Group TWT, το οποίο επιτρέπει σε πολλές συσκευές να μοιράζονται ένα κοινό πρόγραμμα TWT.
 - Αυτή η δυνατότητα είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε σενάρια IoT όπου εκατοντάδες συσκευές μπορεί να συγχρονίσουν τους χρόνους αφύπνισης για να μειώσουν το κόστος και να είναι πιο αποτελεσματικές για την αποδοτικότητα.
- Ενισχυμένη διαχείριση καθυστέρησης:
 - Ο μηχανισμός TWT στο Wi-Fi 7 έχει σχεδιαστεί έτσι για να περιορίζει τον λανθάνοντα χρόνο προσφέροντας διαστήματα αφύπνισης βέλτιστα για τέτοιες εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο.
 - Συσκευές που βασίζονται σε επικοινωνία χαμηλής καθυστέρησης, για παράδειγμα, ακουστικά AR/VR ή ακόμα και κονσόλες παιχνιδιών, θα διαπραγματεύονται συχνότερα τις ώρες αφύπνισης για συσκευές.
- Ενσωμάτωση Λειτουργίας πολλαπλών συνδέσμων (MLO):
 - Το TWT για Wi-Fi 7 υποστηρίζει λειτουργία πολλαπλών συνδέσμων. Επομένως, μια συσκευή θα μπορεί να συντονίζει τους χρόνους αφύπνισης με άλλες συσκευές σε πολλές ζώνες συχνοτήτων.
 - Αυτό εξασφαλίζει την ίδια απόδοση και ενεργειακή απόδοση ακόμη και σε πυκνά και πολύπλοκα δίκτυα πολλαπλών ζωνών.

Τεχνική υλοποίηση του TWT στο Wi-Fi 7

Διαπραγμάτευση διαστήματος αφύπνισης

Η λειτουργία του TWT ξεκινά με τη διαπραγμάτευση της πολιτικής ύπνου/αφύπνισης μεταξύ του AP και της συσκευής πελάτη:

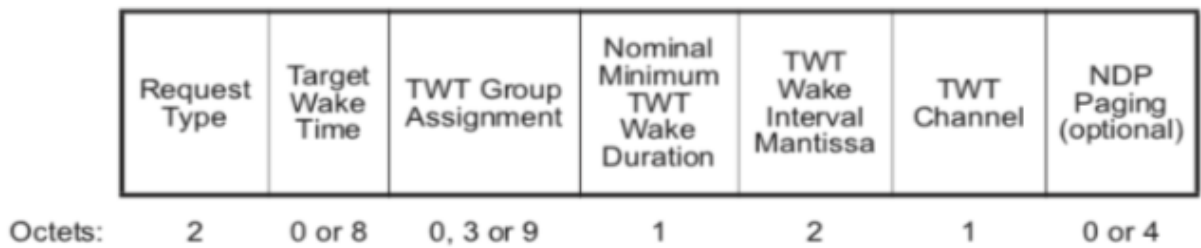
- Το AP υποδεικνύει τους διαθέσιμους χρόνους αφύπνισης με ένα πρόγραμμα TWT.
- Η συσκευή ζητά ένα διάστημα αφύπνισης με βάση τις απαιτήσεις της εφαρμογής και τους στόχους της για εξοικονόμηση ενέργειας.
- Το AP επιβεβαιώνει το χρονοδιάγραμμα και τα δύο μέρη συγχρονίζονται με αυτήν τη συμφωνία.

Αυτή η διαπραγμάτευση διαμεσολαβείται από το επίπεδο Medium Access Control (MAC) για συνέπεια με τις συνθήκες δικτύου και τις δυνατότητες της συσκευής.

Μορφές πλαισίων (Frame Formats)

Το Wi-Fi 7 υποστηρίζει ορισμένες μορφές πλαισίου για τη διαχείριση του TWT:

- TWT Setup Frame: Καθορίζει το πρόγραμμα αφύπνισης μεταξύ του AP και της συσκευής.
- TWT Teardown Frame: Τερματίζει ή προσαρμόζει τη συμφωνία TWT εάν αλλάξουν οι συνθήκες.
- TWT Information Elements (IE): Ενσωματωμένα σε πλαίσια διαχείρισης, παρέχοντας λεπτομέρειες σχετικά με τις δυνατότητες και τα χρονοδιαγράμματα TWT.

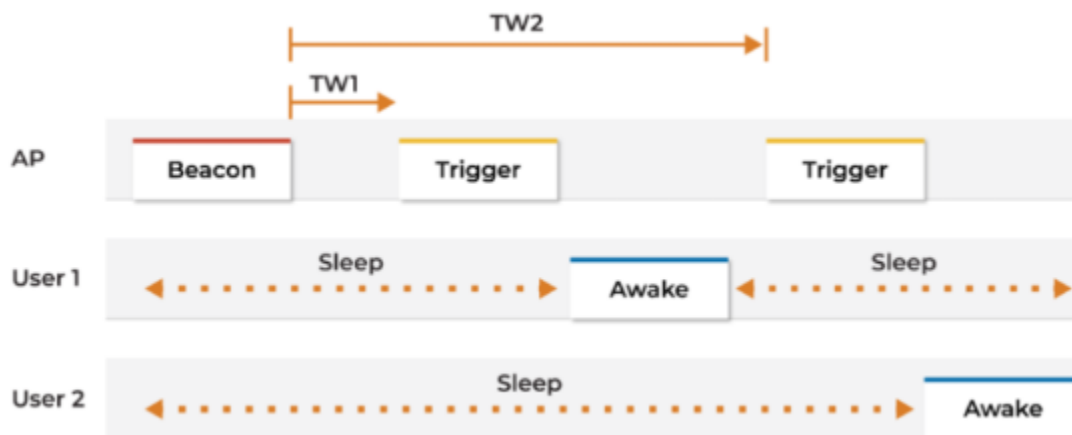


Εικόνα 18. TWT Request Frame Structure

Πηγή: Target Wake Time (TWT) Power Save Test with Managed Client
(<https://aletheatech.com/target-wake-time-twt-power-save-test-with-managed-client/>)

Περίοδοι σέρβις TWT

Κατά τη διάρκεια μιας περιόδου σέρβις TWT, η συσκευή ξυπνά για πολύ μικρό χρονικό διάστημα και παραμένει ενεργή για αποστολή ή λήψη δεδομένων, μετά την οποία η συσκευή επιστρέφει στον ύπνο της πολύ χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας. Αυτός είναι ένας τρόπος για να ελαχιστοποιήσετε τη χρήση ενέργειας με την έγκαιρη μετάδοση δεδομένων.



Εικόνα 19. TWT Operation: Συντονισμένοι κύκλοι ύπνου και αφύπνισης για συσκευές

Πηγή: Target Wake Time (TWT) Power Save Test with Managed Client
(<https://aletheatech.com/target-wake-time-twt-power-save-test-with-managed-client/>)

Συντονισμός πολλαπλών ζωνών

Η λειτουργία πολλαπλών συνδέσμων του Wi-Fi 7 επιτρέπει στις συσκευές να διαπραγματεύονται χρονοδιαγράμματα TWT σε πολλές ζώνες συχνοτήτων, συμπεριλαμβανομένων των 2,4 GHz, 5 GHz και 6 GHz. Αυτό διασφαλίζει ότι οι συσκευές χρησιμοποιούν μια λιγότερο συνωστισμένη ζώνη για τις προγραμματισμένες μεταδόσεις τους, διασφαλίζοντας περαιτέρω απόδοση και απόδοση.

Εφαρμογές TWT

Οι βασικές εφαρμογές του TWT είναι οι εξής:

1. **Δίκτυα IoT:** Οι συσκευές IoT, όπως οι αισθητήρες και οι ενεργοποιητές, λειτουργούν γενικά με μπαταρία και στέλνουν μικρές ποσότητες δεδομένων κατά διαστήματα. Το TWT επιτρέπει σε τέτοιες συσκευές να μένουν τον περισσότερο χρόνο σε κατάσταση

ύπνου χαμηλής κατανάλωσης, ξυπνώντας μόνο σε προγραμματισμένες ώρες για μετάδοση ή λήψη δεδομένων. Αυτό θα οδηγήσει σε τεράστια παράταση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας και θα είναι ο βασικός παράγοντας για τα οικοσυστήματα IoT.

2. **Περιβάλλοντα Υψηλής Πυκνότητας:** Το TWT διευκολύνει τη συμφόρηση δικτύου σε περιβάλλοντα με υψηλή πυκνότητα συνδεδεμένων συσκευών, όπως στάδια ή εταιρικά δίκτυα. Αυτό επιτρέπει στον συντονισμό των συσκευών να μην έχουν χρόνους αφύπνισης την ίδια στιγμή, διασφαλίζοντας ότι το φάσμα χρησιμοποιείται αποτελεσματικά χωρίς πολλές συγκρούσεις.
3. **Εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο:** Τέτοιες εφαρμογές που απαιτούν χαμηλό λανθάνοντα χρόνο περιλαμβάνουν AR, VR και διαδικτυακά παιχνίδια. Το TWT επιτρέπει σε τέτοιες συσκευές να διαπραγματεύονται διαστήματα αφύπνισης που μπορούν να ικανοποιήσουν τις πολύ αυστηρές απαιτήσεις καθυστέρησης τέτοιων συσκευών για απρόσκοπτη εμπειρία χρήστη.

Συνοπτικά, το Target Wake Time όχι μόνο συμβάλλει στη βελτίωση της απόδοσης ενέργειας, αλλά βοηθά επίσης στον μετριασμό της συμφόρησης του δικτύου για να φιλοξενήσει ένα εκτεταμένο σύνολο εφαρμογών από το IoT έως τα παιχνίδια σε πραγματικό χρόνο. Το Wi-Fi 7 ενισχύει περαιτέρω τον μηχανισμό TWT εισάγοντας λειτουργίες όπως δυναμικός προγραμματισμός, ομαδικό TWT και συντονισμός πολλαπλών ζωνών. Αυτά τα χαρακτηριστικά εγγυώνται ότι τα δίκτυα Wi-Fi 7 θα είναι όχι μόνο υψηλής απόδοσης αλλά και ενεργειακά αποδοτικά για να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις ενός σύγχρονου ασύρματου οικοσυστήματος.

3. Σύγκριση με Προηγούμενα Πρωτόκολλα

3.1 Throughput και Data Rates

Το Wi-Fi 7 είναι πολύ ανώτερο στο χειρισμό σεναρίων πυκνού δικτύου και στην παροχή υψηλότερων ρυθμών δεδομένων, συμπεριλαμβανομένων σοβαρών αναβαθμίσεων. Στην περίπτωση περιβαλλόντων υψηλής πυκνότητας όπως στάδια, γραφεία επιχειρήσεων ή δημόσια hotspot, είναι εμφανή τα ελαττώματα των προηγούμενων πρωτοκόλλων. Το Wi-Fi 5 δεν χειριζόταν αποτελεσματικά πολλές συνδέσεις, παρόλο που παρείχε υψηλές ταχύτητες σε μεμονωμένους χρήστες. Το Wi-Fi 6 το έλυσε εν μέρει με την εισαγωγή τεχνολογιών όπως η uplink MU-MIMO και OFDMA που επέτρεψαν την καλύτερη κατανομή των πόρων μεταξύ των συσκευών. Το Wi-Fi 7 το ανεβάζει μια βαθμίδα ψηλότερα με την εισαγωγή της λειτουργίας Multi-Link και του βελτιωμένου OFDMA με συνάθροιση μονάδων πολλαπλών πόρων. Αυτές οι βελτιώσεις επιτρέπουν στο Wi-Fi 7 να χειρίζεται πολλούς χρήστες και συσκευές με πολύ καλύτερη απόδοση, εξασφαλίζοντας έτσι ελάχιστο λανθάνοντα χρόνο και υψηλότερες αποδόσεις ακόμη και στα πιο πολυσύχναστα περιβάλλοντα.

Ένα άλλο επαναστατικό χαρακτηριστικό που εισάγει το Wi-Fi 7 είναι τα κανάλια 320 MHz. Το εύρος ζώνης του καναλιού διπλασιάζεται από τα 160 MHz που υποστηρίζονταν στο Wi-Fi 6, διπλασιάζοντας τους πιθανούς ρυθμούς δεδομένων. Έχει μεγάλη σημασία στον τομέα των εφαρμογών που χρειάζεται επικοινωνία εξαιρετικά υψηλής ταχύτητας, για παράδειγμα, ροή βίντεο 8K, εικονική πραγματικότητα και επαυξημένη πραγματικότητα. Επιπλέον, το Wi-Fi 7 εισάγει τη διαμόρφωση 4096-QAM, αυξάνοντας περαιτέρω τη διεκπεραίωση δεδομένων ανά σύμβολο κατά 20% σε σύγκριση με το 1024-QAM που χρησιμοποιείται στο Wi-Fi 6. Το πρόβλημα, φυσικά, είναι ότι το 4096-QAM απαιτεί καλές συνθήκες σήματος να λειτουργεί σωστά, αλλά αυτό είναι μια πολύ καλή ώθηση, ειδικά για συσκευές που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση από το σημείο πρόσβασης.

Πίνακας 7. Συγκριτικός πίνακας Throughput και Data Rate

Feature	Wi-Fi 5 (802.11ac)	Wi-Fi 6 (802.11ax)	Wi-Fi 7 (802.11be)
Max Theoretical Data Rate	6.9 Gbps	9.6 Gbps	46 Gbps
Max Channel Bandwidth	160 MHz	160 MHz	320 MHz
Modulation	256-QAM	1024-QAM	4096-QAM
Max Spatial Streams	8	8	16
Frequency Bands	5 GHz	2.4, 5 GHz	2.4, 5, 6 GHz

3.2 Latency

Η χρονική καθυστέρηση ή η καθυστέρηση μεταξύ των δεδομένων που αποστέλλονται και λαμβάνονται καθορίζουν την απόδοση σε οποιοδήποτε πρωτόκολλο ασύρματης επικοινωνίας. Συγκεκριμένα, θα επηρεάσει εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο: τηλεδιάσκεψη, διαδικτυακά παιχνίδια, ακόμη και βιομηχανικούς αυτοματισμούς. Σε αυτό το πλαίσιο, το Wi-Fi συμβαδίζει με τις βελτιώσεις, από γενιά σε γενιά, για να παρέχει ακόμα καλύτερους χρόνους απόκρισης. Το Wi-Fi 7 σηματοδοτεί ένα σημαντικό άλμα από αυτή την άποψη, φέρνοντας προηγμένες λειτουργίες που ελαχιστοποιούν την καθυστέρηση πολύ πέρα από αυτό που ήταν δυνατό με τους προκατόχους του.

Το Wi-Fi 5 (802.11ac), ενώ πέτυχε έναν εντυπωσιακό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, είχε επικεντρωθεί κυρίως στη βελτίωση της απόδοσης και δεν είχε πραγματικά βελτιώσει την καθυστέρηση σε τόσο πολύπλοκα περιβάλλοντα. Επομένως, στην περίπτωση υψηλής πυκνότητας χρήστη ή πολλαπλών συσκευών που διεκδικούν εύρος ζώνης, ο λανθάνοντας μπορεί να αποτελέσει ανησυχία. Αυτός ο περιορισμός άρχισε να γίνεται αισθητός όλο και περισσότερο καθώς τα διαδικτυακά παιχνίδια και οι εφαρμογές απομακρυσμένης εργασίας κέρδιζαν δυναμική.

Το Wi-Fi 6 εισήγαγε το πρότυπο 802.11ax, το οποίο αντιμετώπιζε προβλήματα καθυστέρησης με το OFDMA και το TWT. Με το OFDMA, το κανάλι θα μπορούσε να υποδιαιρεθεί σε μικρότερα υποκανάλια, επιτρέποντας την ταυτόχρονη μετάδοση δεδομένων σε πολλαπλές συσκευές, μειώνοντας έτσι τη διαμάχη και τις καθυστερήσεις. Το TWT μείωσε περαιτέρω την καθυστέρηση προγραμματίζοντας χρόνους αφύπνισης της συσκευής για να ελαχιστοποιήσει τις συγκρούσεις και να εξασφαλίσει πιο αποτελεσματική επικοινωνία. Ωστόσο, ακόμη και με αυτές τις βελτιώσεις, η απόδοση για περιπτώσεις χρήσης εξαιρετικά χαμηλού λανθάνοντος χρόνου όπως AR, VR και αυτόνομα συστήματα παρέμεινε πολύ δεσμευμένη.

Το Wi-Fi 7, ή 802.11be, μεταφέρει τη μείωση του λανθάνοντος χρόνου στο επόμενο επίπεδο με λειτουργίες όπως το MLO και το RTWT. Το MLO επιτρέπει στις συσκευές να λειτουργούν σε πολλές ζώνες συχνοτήτων και κανάλια ταυτόχρονα για ταχύτερη και πιο αξιόπιστη παράδοση δεδομένων. Το RTWT επεκτείνει το TWT παρέχοντας ειδικούς χρόνους αφύπνισης για κρίσιμες εφαρμογές με ελάχιστες παρεμβολές και διαμάχες. Συνδυάστε όλα αυτά μαζί και υπό τις καλύτερες συνθήκες, το Wi-Fi 7 μπορεί να υπερηφανεύεται για καθυστερήσεις έως και 1 χιλιοστό του δευτερολέπτου, αποτελώντας έτσι την τεχνολογία που αλλάζει το παιχνίδι για εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο και υψηλού εύρους ζώνης.

Πίνακας 8. Συγκριτικός πίνακας χρονικής καθυστέρησης (Latency)

Feature/Metric	Wi-Fi 5 (802.11ac)	Wi-Fi 6 (802.11ax)	Wi-Fi 7 (802.11be)
Typical Latency (ms)	~20-30	~10-15	~1-5
Key Latency Features	Beamforming	OFDMA, TWT	MLO, RTWT
Performance in Dense Networks	Moderate	Good	Excellent
Real-Time Application Suitability	Limited	Moderate	High

3.3 Spectrum Utilization

Η χρήση του φάσματος αποτελεί καθοριστικός παράγοντας για το πόσο αποτελεσματικό και αποδοτικό είναι ένα πρότυπο ασύρματης επικοινωνίας. Το φάσμα είναι το εύρος των διαθέσιμων συχνοτήτων για ασύρματη μετάδοση δεδομένων και η αποτελεσματική χρήση του επηρεάζει άμεσα τη χωρητικότητα του δικτύου, τη διαχείριση παρεμβολών και τη συνολική απόδοση. Τα πρωτόκολλα Wi-Fi βελτιώνονται συνεχώς για την καλύτερη χρήση του διαθέσιμου φάσματος. Κάθε γενιά εισάγει νέες τεχνικές για να την κάνει πιο αποτελεσματική και να επιτύχει μεγαλύτερη απόδοση. Το Wi-Fi 7 βασίζεται στις βελτιώσεις που έκαναν το Wi-Fi 6 και προηγούμενα πρότυπα, προσφέροντας καινοτόμες δυνατότητες για τη βελτιστοποίηση της χρήσης του φάσματος για τις σύγχρονες απαιτήσεις συνδεσιμότητας.

Το Wi-Fi 5 (802.11ac) χρησιμοποιούσε κυρίως τη ζώνη των 5 GHz, η οποία παρείχε καλύτερη απόδοση και μειωμένες παρεμβολές σε σύγκριση με την υπερπλήρη ζώνη των 2,4 GHz. Ωστόσο, αυτή η εξάρτηση από μια ενιαία ζώνη συχνοτήτων περιορίσε την κλιμάκωση της σε περιβάλλοντα υψηλής πυκνότητας. Επιπλέον, το Wi-Fi 5 δεν είχε προηγμένους μηχανισμούς για τη δυναμική κατανομή των πόρων του φάσματος, γεγονός που οδήγησε σε μη βέλτιστη απόδοση σε συμφορημένα δίκτυα.

Το Wi-Fi 6, γνωστό και ως 802.11ax, ήρθε και βελτίωσε σημαντικά τα πράγματα λειτουργώντας τόσο στις ζώνες των 2,4 GHz όσο και στα 5 GHz. Η εισαγωγή της Πολλαπλής Πρόσβασης Ορθογώνιας Διαίρεσης Συχνότητας (OFDMA) επέτρεψε την καλύτερη χρήση των υποκαναλιών συχνότητας, επιτρέποντας την ταυτόχρονη επικοινωνία με πολλαπλές συσκευές. Αυτό το χαρακτηριστικό μείωσε την καθυστέρηση και βελτίωσε περαιτέρω την απόδοση του φάσματος σε περιβάλλοντα όπου ήταν συνδεδεμένες πολλές συσκευές. Ωστόσο, το Wi-Fi 6 δεν μπόρεσε να αξιοποιήσει πρόσθετο φάσμα, περιορίζοντας την κλιμάκωση του καθώς η πυκνότητα των συσκευών και οι απαιτήσεις δεδομένων συνέχισαν να αυξάνονται.

Το Wi-Fi 7 (802.11be) εισάγει νέους τρόπους χρήσης του φάσματος, επιτρέποντας ένα ακόμη μεγαλύτερο εύρος ζωνών συχνοτήτων, συμπεριλαμβανομένου του φάσματος 6 GHz που εισήχθη με το Wi-Fi 6E. Αυτό επεκτείνει σημαντικά το διαθέσιμο φάσμα, προσφέροντας έως και 1.200 MHz επιπλέον εύρους ζώνης. Το Wi-Fi 7 εισάγει επίσης προηγμένες λειτουργίες όπως η λειτουργία πολλαπλών συνδέσμων και η συγκέντρωση μονάδων πολλαπλών πόρων, επιτρέποντας περαιτέρω βελτίωση στη δυναμική χρήση του διαθέσιμου φάσματος. Ενώ το MLO επιτρέπει τη λειτουργία μιας συσκευής σε πολλές ζώνες και κανάλια ταυτόχρονα, το MRU Aggregation βελτιστοποιεί τη χρήση των πόρων συχνότητας σε ένα κανάλι. Αυτά τα χαρακτηριστικά μαζί διασφαλίζουν ότι το Wi-Fi 7 επιτυγχάνει πρωτοφανή επίπεδα απόδοσης φάσματος. Αξιοποιώντας τη ζώνη των 6 GHz, επεκτείνοντας το εύρος ζώνης του καναλιού, το Wi-Fi 7 μεγιστοποιεί την απόδοση των διαθέσιμων πόρων φάσματος.

Πίνακας 9. Συγκριτικός πίνακας χρήσης φάσματος

Feature/Metric	Wi-Fi 5 (802.11ac)	Wi-Fi 6 (802.11ax)	Wi-Fi 7 (802.11be)
Frequency Bands	5 GHz only	2.4 GHz, 5 GHz	2.4 GHz, 5 GHz, 6 GHz
Maximum Channel Bandwidth	160 MHz	160 MHz	320 MHz
Spectrum Efficiency	Moderate	High (via OFDMA)	Very High (via MLO, MRU Aggregation)
Interference Management	Limited	Improved (via BSS Coloring)	Advanced (via MLO and Enhanced OFDMA)
Real-World Scalability	Moderate	High	Exceptional

3.4 Bandwidth και MIMO (Multiple-Input Multiple-Output)

Η εξέλιξη του προτύπου Wi-Fi χαρακτηρίστηκε από την αδιάκοπη βελτίωση του εύρους ζώνης και την εισαγωγή προηγμένης τεχνολογίας MIMO. Τόσο το εύρος ζώνης όσο και το προηγμένο MIMO είναι οι δύο κύριες αιτίες για τη χωρητικότητα, την αξιοπιστία και την ταχύτητα του ασύρματου δικτύου. Το Wi-Fi 7 εισάγει μια επαναστατική αναβάθμιση στο εύρος ζώνης και το MIMO, τοποθετώντας το σε μια εντελώς διαφορετική κατηγορία από οποιεσδήποτε άλλες προηγούμενες εκδόσεις για να σηματοδοτήσει μετασχηματιστικές αυξήσεις στην απόδοση συνδεσιμότητας.

Το εύρος ζώνης είναι ίσως ένας από τους πιο κρίσιμους παράγοντες που καθορίζουν τον δυνητικό ρυθμό δεδομένων και την απόδοση των δικτύων Wi-Fi. Το Wi-Fi 5 (802.11ac) ήταν ικανό να υποστηρίξει κανάλια πλάτους έως 160 MHz, ενώ αυτό ήταν ένα μεγάλο άλμα σε σχέση με τα προηγούμενα πρότυπα. Ωστόσο, τέτοιοι περιορισμοί μόνο στη ζώνη των 5 GHz μείωσαν την ικανότητα να εκμεταλλευτεί κανείς πλήρως αυτό σε πραγματικές καταστάσεις, ειδικά σε πολυσύχναστες περιοχές όπου υπάρχουν παρεμβολές.

Το Wi-Fi 6 (802.11ax) διατήρησε το ίδιο μέγιστο πλάτος καναλιού των 160 MHz και εφάρμοσε νέες τεχνικές όπως η ορθογώνια συχνότητα-διαίρεση πολλαπλής πρόσβασης (OFDMA) και η χωρική επαναχρησιμοποίηση για καλύτερη χρήση του διαθέσιμου φάσματος. Ακόμα κι έτσι, το Wi-Fi 6 εξακολουθεί να εξαρτάται από τις ζώνες 2,4 GHz και 5 GHz για τη λειτουργία του, πράγμα που σημαίνει ότι οι εν λόγω περιορισμοί σχετικά με την κορυφαία απόδοση σε περιβάλλοντα υψηλής πυκνότητας εξακολουθούν να είναι σχετικοί.

Το Wi-Fi 7 (802.11be) επεκτείνει το μέγιστο πλάτος καναλιού σε άνευ προηγουμένου 320 MHz, διπλασιάζοντας ουσιαστικά τη χωρητικότητα του Wi-Fi 6. Επιπλέον, η συμπερίληψη της ζώνης των 6 GHz προσφέρει ένα τεράστιο, σχετικά χωρίς παρεμβολές φάσμα για υψηλές εφαρμογές απόδοσης. Αυτός ο συνδυασμός επιτρέπει στο Wi-Fi 7 να προσφέρει δραματικά αυξημένους ρυθμούς δεδομένων και μειωμένο λανθάνοντα χρόνο, καθιστώντας το ιδανικό για εργασίες έντασης εύρους ζώνης, όπως ροή 8K, εικονική πραγματικότητα και μεγάλης κλίμακας βιομηχανικές αναπτύξεις IoT.

Η τεχνολογία MIMO είναι η χρήση πολλαπλών κεραιών τόσο στον πομπό όσο και στον δέκτη για την ταυτόχρονη αποστολή και λήψη ροών δεδομένων. Αυτό αυξάνει τη χωρητικότητα, την αξιοπιστία και την αποτελεσματικότητα του ασύρματου δικτύου.

Το Wi-Fi 5 εισήγαγε την έννοια του MU-MIMO, ή MIMO πολλαπλών χρηστών, που επιτρέπει την επικοινωνία με πολλές συσκευές ταυτόχρονα. Ωστόσο, το MU-MIMO στο Wi-Fi 5 περιοριζόταν στην κατεύθυνση κατερχόμενης ζεύξης, που σημαίνει ότι μπορούσε να στείλει δεδομένα μόνο σε πολλές συσκευές ταυτόχρονα, αλλά όχι να τα λάβει με τον ίδιο τρόπο.

Το Wi-Fi 6 επέκτεινε το MU-MIMO σε μεταδόσεις ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης, ώστε να μπορεί να μιλά σε περισσότερες συσκευές ταυτόχρονα και προς τις δύο κατευθύνσεις. Επιπλέον, το Wi-Fi 6 αύξησε τον μέγιστο αριθμό χωρικών ροών από 8 σε 12, ενισχύοντας περαιτέρω τη χωρητικότητα και την αποτελεσματικότητα του δικτύου.

Το Wi-Fi 7 προωθεί περαιτέρω την τεχνολογία MIMO, με υποστήριξη έως και 16 χωρικών ροών. Αυτό θα επιτρέψει δραστικά υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων και καλύτερη χωρητικότητα για περιβάλλοντα πολλών χρηστών. Επιπλέον, το Wi-Fi 7 περιλαμβάνει βελτιώσεις στον τομέα της διαμόρφωσης δέσμης (beamforming) για καλύτερη εστίαση σήματος και μείωση των παρεμβολών. Αυτές οι βελτιώσεις καθιστούν το Wi-Fi 7 ιδιαίτερα κατάλληλο για σενάρια που απαιτούν υψηλή αξιοπιστία και χωρητικότητα, όπως έξυπνα σπίτια, δίκτυα επιχειρήσεων και βιομηχανικούς αυτοματισμούς.

Πίνακας 10. Συγκριτικός πίνακας εύρους ζώνης και MIMO

Feature/Metric	Wi-Fi 5 (802.11ac)	Wi-Fi 6 (802.11ax)	Wi-Fi 7 (802.11be)
Maximum Channel Bandwidth	160 MHz	160 MHz	320 MHz
Frequency Bands	5 GHz	2.4 GHz, 5 GHz	2.4 GHz, 5 GHz, 6 GHz
Maximum Spatial Streams	8	12	16
MIMO Directionality	Downlink Only	Uplink & Downlink	Uplink & Downlink
Beamforming Efficiency	Moderate	High	Very High

3.5 Ενεργειακή αποδοτικότητα (Energy Efficiency)

Ένας από τους πιο κρίσιμους τομείς ανάπτυξης τον τελευταίο καιρό, ειδικά λαμβάνοντας υπόψη το σύγχρονο πλαίσιο του κόσμου που συνδέεται όλο και περισσότερο, είναι η ενεργειακή απόδοση. Ενώ οι συνδεδεμένες συσκευές συνεχίζουν να αυξάνονται καθημερινά, η ανάγκη για ασύρματες τεχνολογίες που μειώνουν την κατανάλωση ενέργειας χωρίς να διακυβεύονται τα πρότυπα υψηλών επιδόσεων έχει γίνει τρομερή.

Το Wi-Fi 5 (802.11ac) ήταν μια αναβάθμιση, και ήταν σίγουρα ένα κβαντικό άλμα τόσο όσον αφορά την απόδοση όσο και την κάλυψη. Λειτουργώντας στη ζώνη των 5 GHz για να επιτρέψει μεγαλύτερες ταχύτητες σε σύγκριση με την προηγούμενη γενιά Wi-Fi, Wi-Fi 4 (802.11n), χρησιμοποίησε ευρύτερα κανάλια έως και 160 MHz για να αυξήσει τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Ωστόσο, το Wi-Fi 5 δεν επικεντρώθηκε στην ενεργειακή απόδοση τόσο όσο οι επόμενες γενιές.

Ο βασικός μηχανισμός εξοικονόμησης ενέργειας στο πρότυπο Wi-Fi 5 ήταν το PSM, το οποίο επέτρεπε σε μια συσκευή να βυθίζεται σε λειτουργία χαμηλής κατανάλωσης όταν δεν στέλνει ενεργά δεδομένα μέσω του δικτύου. Αν και ήταν μια καλή προσθήκη σε σύγκριση με τα προηγούμενα πρότυπα, το εύρος της δυνατότητας ήταν μάλλον περιορισμένο. Επιπλέον, το Wi-Fi 5 υποστήριζε την τεχνολογία MU-MIMO όπου το σημείο πρόσβασης μπορεί να εξυπηρετεί πολλές συσκευές ταυτόχρονα και έτσι μειώνει το χρόνο που θα παραμείνει ενεργοποιημένη η καθεμία. Αυτό, με τη σειρά του, είχε το συμπληρωματικό αποτέλεσμα της εξοικονόμησης ενέργειας με τη μείωση του χρόνου αναμονής των συσκευών είτε για μετάδοση είτε για λήψη. Ενώ αυτά τα χαρακτηριστικά προσέφεραν κάποια ενεργειακή απόδοση, οι δυνατότητες ενεργειακής απόδοσης του Wi-Fi 5 ήταν σχετικά βασικές σε σύγκριση με μεταγενέστερες επαναλήψεις.

Το Wi-Fi 6, χτισμένο από τον προκάτοχό του, το Wi-Fi 5, με πολλά χαρακτηριστικά για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης. Μεταξύ των σημαντικότερων βελτιώσεων είναι η εισαγωγή του Target Wake Time. Στο TWT, η συσκευή μπορεί να προγραμματίσει πότε ξυπνάει για να στείλει ή να λάβει δεδομένα, αποφεύγοντας έτσι την ανάγκη να διατηρηθούν ενεργά και να καταναλώνουν ενέργεια για να παραμένουν λειτουργικά σε περιόδους αδράνειας. Αυτό μπορεί να επεκτείνει σημαντικά τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας σε κινητές συσκευές και συσκευές IoT, επιτρέποντας στις συσκευές να κοιμούνται για μεγαλύτερες περιόδους. Εκτός από το TWT, το Wi-Fi 6 εισήγαγε επίσης το OFDMA, το οποίο είναι μια διαίρεση καναλιών σε μικρότερα υποκανάλια, επιτρέποντας έτσι την πιο αποτελεσματική χρήση του διαθέσιμου φάσματος. Αυτό μειώνει τον χρόνο που αφιερώνουν οι συσκευές σε αναμονή για πρόσβαση στο κανάλι, μειώνοντας έτσι την κατανάλωση ενέργειας. Η βελτιωμένη τεχνολογία MU-MIMO, που υποστηρίζει τώρα τη μετάδοση κατερχόμενης και ανοδικής ζεύξης για έως και 8 συσκευές ταυτόχρονα, παρείχε καλύτερη ενεργειακή απόδοση μειώνοντας το συνολικό χρόνο που οι συσκευές έμειναν ενεργές.

Το Wi-Fi 6 βελτίωσε σημαντικά τη διαχείριση ενέργειας προκειμένου να βελτιστοποιήσει τον τρόπο επικοινωνίας των συσκευών με το δίκτυο. Τα περισσότερα από αυτά, ειδικά το TWT και το OFDMA, αντιμετώπιζαν άμεσα ζητήματα κατανάλωσης ενέργειας, καθιστώντας έτσι το Wi-Fi 6 πιο αποδοτικό από πλευράς ενέργειας για σύγχρονα ασύρματα δίκτυα, ιδιαίτερα σε σενάρια πολλαπλών συσκευών.

Οι πιο σημαντικές καινοτομίες στο Wi-Fi 7 είναι η καλύτερη κωδικοποίηση δεδομένων για ταχύτερη μετάδοση δεδομένων. Αυτό βελτιώνει όχι μόνο τη συνολική απόδοση αλλά και την μείωση της ενέργειας που χρησιμοποιείται στη διαδικασία μετάδοσης δεδομένων μειώνοντας τον χρόνο που οι συσκευές συμμετέχουν ενεργά στην επικοινωνία.

Το Wi-Fi 7 υποστηρίζει εύρος ζώνης καναλιού 320 MHz, το οποίο είναι διπλάσιο από το μέγιστο πλάτος που υποστηρίζεται από το Wi-Fi 6. Με μεγαλύτερα κανάλια, μπορούν να μετακινηθούν περισσότερα δεδομένα σε λιγότερο χρόνο. Ως εκ τούτου, οι συσκευές μπορούν να κάνουν τις εργασίες τους πιο γρήγορα και στη συνέχεια να περνούν περισσότερο χρόνο σε κατάσταση αδράνειας, κάτι που εξοικονομεί ενέργεια. Μια άλλη βασική καινοτομία το MLO (Multi Link Operation) επιτρέπει στις συσκευές να χρησιμοποιούν έως και τρεις ζώνες συχνοτήτων ταυτόχρονα: 2,4 GHz, 5 GHz και 6 GHz. Αυτό θα βελτιώσει την απόδοση του δικτύου κατανέμοντας την κυκλοφορία πιο αποτελεσματικά, μειώνοντας τη συμφόρηση και μειώνοντας την κατανάλωση ενέργειας που σχετίζεται με καθυστερήσεις και αναμεταδόσεις.

Επιπλέον, το Wi-Fi 7 ενισχύει περαιτέρω το TWT στο Wi-Fi 6, προσφέροντας ακόμη πιο λεπτή ευκρίνεια στον έλεγχο του χρόνου αφύπνισης και μετάδοσης. Αυτό ελαχιστοποιεί περαιτέρω την κατανάλωση ενέργειας σε αδράνεια, ειδικά σε συσκευές IoT και κινητές εφαρμογές όπου η διάρκεια ζωής της μπαταρίας είναι ουσιαστική.

Συνολικά, το Wi-Fi 7 εισάγει ένα σύνολο νέων χαρακτηριστικών που στοχεύουν στο να κάνουν τα ασύρματα δίκτυα πιο αποδοτικά από πλευράς ενέργειας χωρίς να διακυβεύεται η απόδοσή τους. Η εστίαση σε ταχύτερη μετάδοση, ευρύτερα κανάλια και έξυπνους τρόπους κατανομής πόρων σημαίνει ότι θα χρησιμοποιεί λιγότερη ενέργεια, ακόμη και σε πολύ απαιτητικά σενάρια.

Πίνακας 11. Συγκριτικός πίνακας ενεργειακής απόδοσης

Feature/Metric	(802.11ac)	Wi-Fi 6 (802.11ax)	Wi-Fi 7 (802.11be)
Target Wake Time (TWT)	Not available	Available (Improves battery life by scheduling wake-ups)	Enhanced TWT (Further optimization of wake-up scheduling)
Power Save Mode (PSM)	Basic Power Save Mode	Improved Power Save Mechanism (TWT, more efficient idle time management)	Advanced Power Saving (more granular control, efficient idle state)
MU-MIMO (Multi-User MIMO)	4x4 (Downlink only)	8x8 (Downlink & Uplink)	Further Enhanced (Higher Efficiency, greater device support)
OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)	Not available	Available (More efficient spectrum use by splitting channels)	Improved (More efficient resource allocation, especially in dense environments)
Channel Bandwidth	20, 40, 80, 160 MHz	20, 40, 80, 160 MHz	20, 40, 80, 160, 320 MHz
Multi-Link Operation (MLO)	Not available	Not available	Available (Efficient use of multiple frequency bands, reduces power consumption)
Extended High Throughput (EHT)	Not available	Not available	Available (Reduces time spent on transmission, improving energy efficiency)
Efficiency in High-Density Networks	Moderate (Limited to MU-MIMO and PSM)	High (OFDMA, MU-MIMO, TWT)	Very High (OFDMA, EHT, MLO, Enhanced TWT)
Battery Life Extension	Moderate impact on battery life	Significant battery life improvement	Enhanced battery life (faster transmission and return to low-power state)
Overall Energy Efficiency	Moderate (limited energy-saving features)	High (Introduced key mechanisms like TWT, OFDMA)	Very High (Introduced advanced features like EHT, MLO, wider bandwidth channels)

3.6 Κάλυψη και Αξιοπιστία Σήματος

Η πρόοδος των τεχνολογιών Wi-Fi εστιάζεται σταθερά στη βελτίωση της συνδεσιμότητας για ένα ευρύ φάσμα περιπτώσεων χρήσης, από αστικά περιβάλλοντα υψηλής πυκνότητας έως έξυπνα σπίτια και βιομηχανικές εφαρμογές.. Η ακτίνα, η ισχύς και η αξιοπιστία του σήματος είναι σημαντικά χαρακτηριστικά που καθορίζουν την εμπειρία του χρήστη. Αυτά καθορίζουν πόσο καλά οι συσκευές παραμένουν συνδεδεμένες, ειδικά σε μεγαλύτερες αποστάσεις ή σε περιοχές με πολλές παρεμβολές.

Το Wi-Fi 5 ήταν μια τεράστια βελτίωση από το Wi-Fi 4, φέρνοντας σημαντικά μεγαλύτερες ταχύτητες, ειδικά χρησιμοποιώντας τη ζώνη συχνοτήτων των 5 GHz. Στην πραγματικότητα, η εξάρτηση από αυτό το συγκρότημα έφερε και αρκετές προκλήσεις. Αν και αυτή η ζώνη παρέχει ταχύτερους ρυθμούς δεδομένων, το εύρος σήματος είναι μικρότερο και τα σήματα δεν είναι τόσο καλά στη διείσδυση σε τοίχους και δάπεδα.

Το Wi-Fi 5 ενίσχυσε την ισχύ του σήματος χρησιμοποιώντας τεχνολογία διαμόρφωσης δέσμης (beamforming), η οποία εστίασε το ασύρματο σήμα προς ορισμένες συσκευές αντί να μεταδίδει το σήμα προς όλες τις κατευθύνσεις. Αυτό βελτίωσε σημαντικά την αξιοπιστία του σήματος εντός του αποτελεσματικού εύρους του για συσκευές όπως έξυπνες τηλεοράσεις και επιτραπέζιοι υπολογιστές που δεν μετακινούνται σχεδόν καθόλου. Ωστόσο, το Wi-Fi 5 δεν υποστήριζε προηγμένες δυνατότητες μετριασμού παρεμβολών, καθιστώντας το λιγότερο αξιόπιστο σε περιβάλλοντα με πολλά επικαλυπτόμενα σήματα.

Το Wi-Fi 6 διέθετε πολλαπλές λειτουργίες που αντιμετωπίζουν τους περιορισμούς του Wi-Fi 5 όσον αφορά την αξιοπιστία και την εμβέλεια του σήματος του. Αν και βασίζεται επίσης κυρίως στη ζώνη των 5 GHz, το Wi-Fi 6 πρόσθεσε υποστήριξη για τη ζώνη των 2,4 GHz, η οποία διαθέτει μεγαλύτερη εμβέλεια με χαμηλότερες ταχύτητες. Αυτή η προσέγγιση διπλής ζώνης μπορεί να κρατήσει την ακτίνα ενός σήματος ισχυρότερη για καλύτερη κάλυψη σε μεγαλύτερους χώρους ή με φυσικά εμπόδια.

Αργότερα, με την εισαγωγή τεχνολογιών όπως η ορθογώνια διαίρεση συχνότητας πολλαπλής πρόσβασης και ο χρωματισμός βασικών συνόλων υπηρεσιών, το σήμα έγινε ακόμη πιο αξιόπιστο. Το OFDMA επιτρέπει σε πολλές συσκευές να χρησιμοποιούν αποτελεσματικά ένα κανάλι συχνότητας. Έτσι, υπάρχει λιγότερη συμφόρηση και η ισχύς του σήματος παραμένει σταθερή σε περιβάλλοντα υψηλής πυκνότητας. Το BSS Coloring ελαχιστοποιεί τις παρεμβολές από κοντινά δίκτυα, διασφαλίζοντας έτσι πιο σταθερές και αξιόπιστες συνδέσεις.

Το Wi-Fi 6 εισήγαγε επίσης μια καλύτερη μορφή διαμόρφωσης δέσμης, που σημαίνει πιο ακριβές και ισχυρότερο σήμα απευθείας στη συσκευή, επιμηκύνοντας έτσι την πραγματική περιοχή λειτουργίας και την αξιοπιστία. Λόγω αυτής της καινοτομίας, το Wi-Fi 6 ήταν πολύ κατάλληλο για περιοχές που απαιτούσαν σταθερά σήματα με ισχύ.

Το Wi-Fi 7 βασίζεται στις βελτιώσεις που έγιναν στο Wi-Fi 6 με την προσθήκη νέων χαρακτηριστικών, βελτιώνοντας σημαντικά την ακτίνα σήματος, την ισχύ και την αξιοπιστία. Μερικές από τις πιο αξιοσημείωτες βελτιώσεις περιλαμβάνουν το MLO, το οποίο επιτρέπει στις συσκευές να συνδέονται σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων-2,4 GHz, 5 GHz και 6 GHz

ταυτόχρονα. Αυτό σημαίνει καλύτερη αξιοπιστία, επειδή η συσκευή μπορεί να μεταβεί δυναμικά σε μια λιγότερο απασχολημένη ζώνη ή να χρησιμοποιεί πολλές μπάντες ταυτόχρονα για ανώτερη απόδοση.

Το Wi-Fi 7 υποστηρίζει εύρος ζώνης καναλιού 320 MHz, ενώ το Wi-Fi 6 υποστηρίζει μόνο 160 MHz. Το ενισχυμένο πλάτος καναλιού δημιουργεί μια πολύ ισχυρότερη και πιο σταθερή σύνδεση σε ευρύτερες περιοχές. Επιπλέον, η εισαγωγή του 4K QAM αυξάνει την ισχύ του σήματος, επιτρέποντάς του να μεταφέρει περισσότερα δεδομένα στο ίδιο εύρος ζώνης. Κατά συνέπεια, αυτό παρέχει ισχυρότερες συνδέσεις σε μεγαλύτερες αποστάσεις, ειδικά σε περιοχές με κακό σήμα.

Η διαμόρφωση δέσμης και η διαχείριση παρεμβολών στο Wi-Fi 7 ανεβάζουν περαιτέρω τον πήχη όσον αφορά την αξιοπιστία, ειδικά σε εφαρμογές υψηλής πυκνότητας ανταγωνιστικών δικτύων. Το Wi-Fi 7 είναι καλύτερο καθώς χρησιμοποιεί επίσης ισχυρότερους αλγόριθμους διόρθωσης σφαλμάτων που μειώνουν τις πιθανότητες διακοπής σύνδεσης. Αυτά τα χαρακτηριστικά τοποθετούν συλλογικά το Wi-Fi 7 ως το πιο αξιόπιστο και ισχυρό ασύρματο πρότυπο μέχρι σήμερα, καλύπτοντας τις απαιτήσεις ενός όλο και πιο συνδεδεμένου κόσμου.

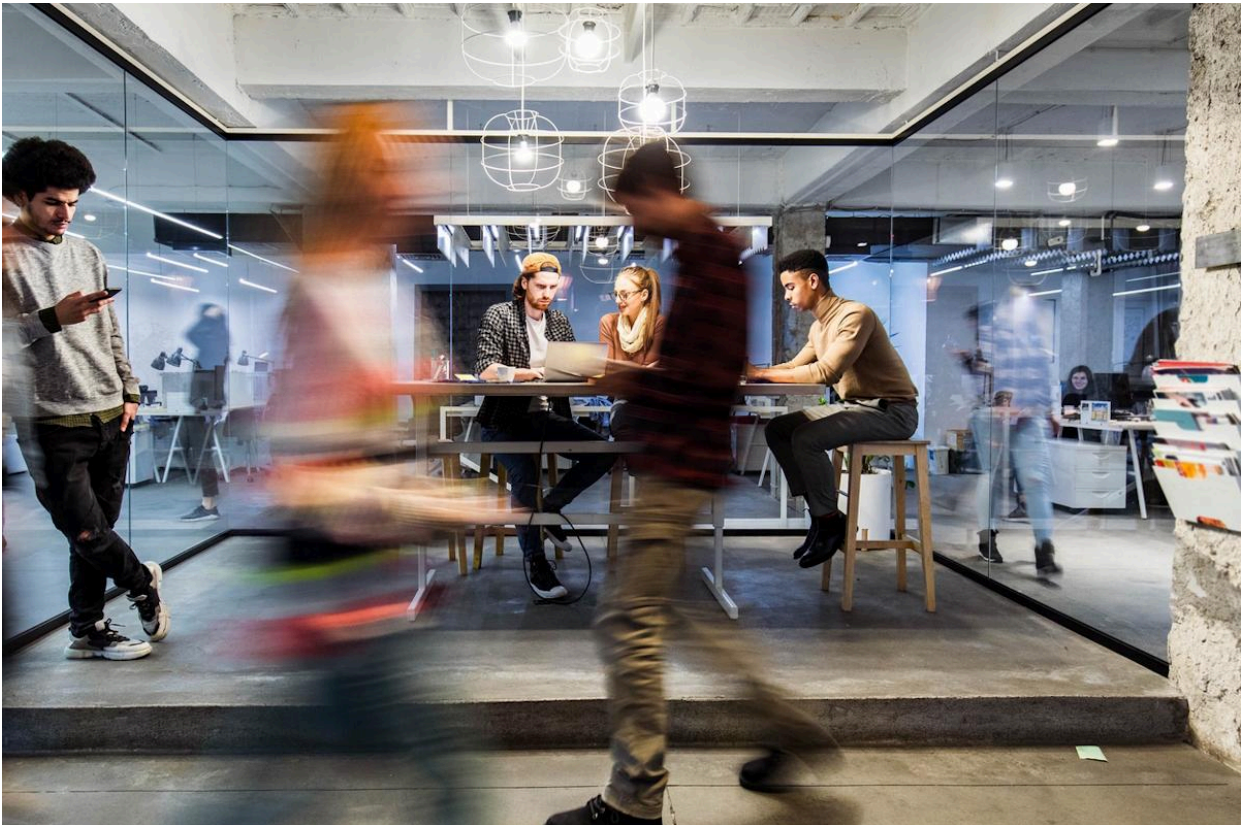
Πίνακας 12. Συγκριτικός πίνακας ακτίνα, ισχύς και αξιοπιστία σήματος

Feature/Metric	Wi-Fi 5 (802.11ac)	Wi-Fi 6 (802.11ax)	Wi-Fi 7 (802.11be)
Frequency Bands	5 GHz only	2.4 GHz and 5 GHz	2.4 GHz, 5 GHz, and 6 GHz
Beamforming	Basic	Improved (more precise targeting)	Advanced (better range and precision)
OFDMA	Not available	Available (reduces congestion)	Enhanced (more efficient spectrum use)
BSS Coloring	Not available	Available (reduces interference)	Enhanced (better interference mitigation)
Channel Bandwidth	Up to 160 MHz	Up to 160 MHz	Up to 320 MHz
Multi-Link Operation (MLO)	Not available	Not available	Available (simultaneous multi-band use)
QAM Modulation	256-QAM	1024-QAM	4K-QAM
Error Correction	Limited	Improved	Advanced (enhanced reliability)
Signal Radius and Coverage	Moderate (5 GHz limitations)	Improved (dual-band support)	Excellent (tri-band support, MLO, wider channels)
Reliability in High-Density Areas	Moderate	High (OFDMA, BSS Coloring)	Very High (MLO, advanced interference management)

4. Περιπτώσεις Χρήσης και Εφαρμογές του Wi-Fi 7

Το Wi-Fi 7 εισάγει πολλές προηγμένες λειτουργίες, όπως αναλύσαμε παραπάνω, εύρος ζώνης καναλιού 320 MHz, 16 χωρικές ροές, λειτουργία πολλαπλών συνδέσμων (MLO), βελτιωμένη διαμόρφωση (4096-QAM), συνάθροιση μονάδων πολλαπλών πόρων (MRU) και χρόνος αφύπνισης στόχου (TWT) που επηρεάζουν βαθιά τη χρήση του σε διάφορους τομείς. Παρακάτω ακολουθεί μια λεπτομερής ανάλυση του τρόπου με τον οποίο αυτά τα χαρακτηριστικά μεταμορφώνουν τη συνδεσιμότητα σε επιχειρηματικά δίκτυα, έξυπνα σπίτια, παιχνίδια, ροή και βιομηχανικό IoT.

4.1 Δίκτυα επιχειρήσεων



Εικόνα 20. Building business growth with WiFi 7

Πηγή: Building business growth with WiFi 7

(<https://www.business-reporter.co.uk/improving-business-performance/building-business-growth-with-wifi-7>)

Το Wi-Fi 7 επαναστατεί στο επιχειρηματικό δίκτυο, καθώς προσπαθεί να ανταποκριθεί στις συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις ταχύτητας, αξιοπιστίας και ασφάλειας στους σημερινούς χώρους εργασίας. Διαθέτει θεωρητικές μέγιστες ταχύτητες έως και 40 Gbps-τέσσερις φορές μεγαλύτερη από την ταχύτητα του Wi-Fi 6E-και υποστηρίζει κανάλια 320 MHz για να διπλασιάσει το εύρος ζώνης που είναι διαθέσιμο στις συσκευές. Αυτή η σημαντική αύξηση της ταχύτητας και της χωρητικότητας διασφαλίζει ότι τέτοιες εφαρμογές έντασης εύρους ζώνης όπως η τηλεδιάσκεψη, το cloud computing και οι εφαρμογές AR/VR να εκτελούνται χωρίς προβλήματα για περαιτέρω βελτίωση της παραγωγικότητας και της συνεργασίας.

Τα βασικά χαρακτηριστικά του Wi-Fi 7 περιλαμβάνουν το MLO ή το Multi-Link Operation, όπου

οι συσκευές θα συνδέονται σε πολλές ζώνες συχνοτήτων ταυτόχρονα. Αυτό επιτρέπει την ώθηση όχι μόνο στη διεκπεραίωση δεδομένων αλλά και στην αξιοπιστία του δικτύου παρέχοντας εναλλακτικές διαδρομές για τη μετάδοση δεδομένων και μειώνοντας την πιθανότητα παρεμβολών και διακοπής συνδέσεων. Σε ένα πολυάσχολο περιβάλλον γραφείου όπου η συνδεσιμότητα δεν μπορεί να διακοπεί ούτε για ένα χιλιοστό του δευτερολέπτου, το MLO διασφαλίζει ότι οι κρίσιμες επιχειρηματικές εφαρμογές διατηρούνται ομαλά και χωρίς περικοπές.

Το Wi-Fi 7 κάνει μεγάλα βήματα όσον αφορά την ασφάλεια. Εφαρμόζει ασφάλεια WPA3 στη ζώνη των 6 GHz, ενισχύοντας τους μηχανισμούς κρυπτογράφησης και ελέγχου ταυτότητας σε σύγκριση με τα προηγούμενα πρότυπα. Αυτό θα ενισχύσει την ασφάλεια των συσκευών για εκείνες τις επιχειρηματικές επιχειρήσεις που ασχολούνται με κρίσιμες πληροφορίες με μεγαλύτερη πρόληψη από πιθανές επιθέσεις στον κυβερνοχώρο.

Η υιοθέτηση του Wi-Fi 7 παρέχει έτσι μια μεγάλη ευκαιρία σε κάθε επιχείρηση να επανεξετάσει την υποδομή ασύρματου δικτύου της. Η ανάπτυξη ενός συστήματος πλέγματος με το πιο πρόσφατο Wi-Fi 7 σε μεσαίου μεγέθους και μεγάλα γραφεία, πανεπιστημιούπολεις και πολυώροφους χώρους μπορεί να αφαιρέσει νεκρές ζώνες, ενσωματώνοντας έτσι απρόσκοπτα ταχύτητες gigabit σε όλο τον χώρο εργασίας. Αυτό επιτρέπει στις επιχειρηματικές ομάδες να εκτελούν αδιάλειπτα δραστηριότητες τηλεδιάσκεψης, ροής, ηλεκτρονικού εμπορίου και όλες τις άλλες τέτοιες ζωτικής σημασίας επιχειρηματικές δραστηριότητες ταυτόχρονα χωρίς κανένα εμπόδιο.

Με κάθε σοβαρότητα, οι δυνατότητες Wi-Fi 7 αποτελούν μια λύση που είναι μεταμορφωτική και αντίστοιχα ικανοποιητική με τις αναδυόμενες ανάγκες του σημερινού επιχειρηματικού δικτύου. Με τη βελτίωση της ταχύτητας, της αξιοπιστίας και της ασφάλειας, αυτό δημιουργεί μια κατάλληλη βάση πάνω στην οποία οι επιχειρήσεις μπορούν να χτίσουν μια ραχοκοκαλιά συνδεσιμότητας για να επιτρέψουν την ανάπτυξη και την καινοτομία στον ψηφιακό και συνδεδεμένο κόσμο.

4.2 Έξυπνα σπίτια και IoT

Το Wi-Fi 7 εισάγει ένα εντελώς νέο ξεκίνημα στα έξυπνα σπίτια και στα οικοσυστήματα IoT αντιμετωπίζοντας κρίσιμες προκλήσεις που αντιμετωπίζουν, όπως η πυκνότητα των συσκευών, η απόκριση σε πραγματικό χρόνο και η απόδοση ενέργειας. Αυτή είναι η εποχή που, από τους έξυπνους οικιακούς θερμοστάτες και τα φώτα μέχρι τα εξελιγμένα συστήματα οικιακής ασφάλειας και τους προσωπικούς βοηθούς, ο αριθμός των συνδεδεμένων συσκευών στα σπίτια έχει αυξηθεί εκθετικά, και ως εκ τούτου απαιτείται ένα δίκτυο που μπορεί να χειριστεί τις ταυτόχρονες συνδέσεις με ευκολία. Το Wi-Fi 7 είναι σε καλύτερη θέση για να ανταποκρίνεται σε αυτές τις απαιτήσεις με άνευ προηγουμένου τεχνολογικές εξελίξεις.

Βελτιωμένη πυκνότητα συσκευών και εκχώρηση εύρους ζώνης

Η μεγαλύτερη πρόκληση για τα οικοσυστήματα IoT είναι ο συνεχώς αυξανόμενος αριθμός συσκευών που ανταγωνίζονται για εύρος ζώνης στο ίδιο περιβάλλον. Το Wi-Fi 7 θα υποστηρίξει εύρη ζώνης καναλιών έως και 320 MHz, διπλασιάζοντας τον χώρο συχνοτήτων σε σύγκριση με το Wi-Fi 6E. Αυτό βελτιώνει σημαντικά τη συμφόρηση δικτύου σε σπίτια όπου λειτουργούν δεκάδες συσκευές ταυτόχρονα: έξυπνες τηλεοράσεις που μεταδίδουν περιεχόμενο 8K, βοηθοί φωνής και κάμερες ασφαλείας συνυπάρχουν χωρίς επιβραδύνσεις ή διακοπές.

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας είναι η λειτουργία Multi-Link, η οποία επιτρέπει στη συσκευή να χρησιμοποιεί πολλές ζώνες συχνοτήτων ταυτόχρονα. Για παράδειγμα, μια έξυπνη κάμερα θα μπορούσε να στείλει βίντεο υψηλής ευκρίνειας στη ζώνη των 6 GHz ενώ στέλνει αποκρίσεις ελέγχου και εντολών στη ζώνη των 5 GHz με αμελητέα καθυστέρηση για οποιαδήποτε από τις δραστηριότητες. Αυτή η πτυχή είναι πολύ σημαντική σε εφαρμογές όπου εμπλέκεται η ευαισθησία του χρόνου, όπως οι ζωντανές ροές ασφαλείας ή ο απομακρυσμένος έλεγχος συσκευών.

Χαμηλή καθυστέρηση για εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο

Οι συσκευές IoT, συμπεριλαμβανομένων των έξυπνων κατοικιών, πρέπει να έχουν χαμηλή καθυστέρηση. Το Wi-Fi 7 εισάγει τα TWT και RTWT ειδικά για να ελαχιστοποιήσει τον λανθάνοντα χρόνο ενώ είναι πολύ αποδοτικό από πλευράς ενέργειας. Επιταχύνει τις αποκρίσεις από κλειδαριές θυρών, αισθητήρες κίνησης ή βοηθούς φωνής σε μια έξυπνη πόρτα για να εξασφαλίσει άψογη αλληλεπίδραση με τέτοια gadget. Η περαιτέρω βελτίωση με το RTWT στο Wi-Fi 7 προσφέρει την ευκαιρία για ιεράρχηση κρίσιμων συσκευών ή εργασιών και διασφαλίζει ότι οι κρίσιμες λειτουργίες σε πραγματικό χρόνο μπορούν να λειτουργούν χωρίς διακοπή.

Ενεργειακή απόδοση και διαχείριση μπαταριών

Οι βελτιώσεις στο TWT στο Wi-Fi 7 μπορούν να επιτύχουν πολύ μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση, για παράδειγμα, σε έξυπνες οικιακές συσκευές, με αισθητήρες ή κάμερες που

αναπτύσσονται σε μπαταρίες, οι οποίες απαιτούν πολύ χρόνο για να προσφέρουν μεγαλύτερη άνεση και δυνατότητα συντήρησης. Για παράδειγμα, στην περίπτωση τέτοιων συσκευών, το TWT εγγυάται την αφύπνιση των συσκευών μόνο όπου χρειάζεται, εξοικονομώντας ενέργεια. Επομένως, από μια ευρύτερη περιβαλλοντική έννοια, αυτό καθιστά τις αναπτύξεις IoT πολύ πιο πράσινες και λιγότερο δαπανηρές μακροπρόθεσμα.

Βελτιωμένη κάλυψη με βελτιωμένη σταθερότητα δικτύου.

Η υιοθέτηση του Wi-Fi 7 σε έξυπνα σπίτια θα έχει καλύτερη κάλυψη και σταθερότητα με το βελτιωμένο OFDMA. Στο Wi-Fi 7, το OFDMA έχει βελτιωθεί περαιτέρω για να κατανέμει αποτελεσματικά τους πόρους συχνότητας σε ένα πλήθος συσκευών και να διασφαλίζει ότι ελαχιστοποιούνται τα σημεία συμφόρησης που προκύπτουν από συσκευές υψηλής πυκνότητας. Αυτό θα διασφαλίσει ότι τα έξυπνα οικιακά συστήματα - από τον ήχο πολλών δωματίων έως τα χειριστήρια κλιματισμού - λειτουργούν χωρίς υποβάθμιση στην απόδοση.

Τα δίκτυα πλέγματος που οδηγούνται από το Wi-Fi 7 ενισχύουν περαιτέρω την κάλυψη μεγάλων κατοικιών ή πολυώροφων διαμερισμάτων εξαλείφοντας τις νεκρές ζώνες και διατηρώντας σταθερές ταχύτητες σε επίπεδο gigabit σε όλη τη διάρκεια. Ένα παράδειγμα είναι ότι τα έξυπνα συστήματα φωτισμού διασκορπισμένα σε διάφορα δωμάτια ή οι κάμερες παρακολούθησης εξωτερικού χώρου χρειάζονται αδιάλειπτη συνδεσιμότητα.

Επεκτασιμότητα IoT και Προηγμένες Εφαρμογές

Η επεκτασιμότητα του Wi-Fi 7 προσφέρεται στο διαρκώς αναπτυσσόμενο οικοσύστημα συσκευών και εφαρμογών IoT, συμπεριλαμβανομένων περιπτώσεων προηγμένης χρήσης όπως συνδεδεμένες συσκευές κουζίνας και έξυπνα δίκτυα ενέργειας, σε συστήματα που βασίζονται σε AR για οικιακή ψυχαγωγία. Για παράδειγμα, ας πάρουμε ένα συνδεδεμένο ψυγείο που μπορεί να αξιοποιήσει τις δυνατότητες χαμηλής καθυστέρησης και υψηλού εύρους ζώνης του Wi-Fi 7 για να ανανεώσει το απόθεμά του σε πραγματικό χρόνο, ενώ συγχρονίζεται με τις διαδικτυακές πλατφόρμες αγορών, ακόμη και να δείχνει ζωντανές ροές για το τι υπάρχει μέσα σε αυτό.

Ασφάλεια δικτύου IoT

Οι βελτιωμένες δυνατότητες ασφαλείας στο νέο Wi-Fi 7 με ιδιαίτερα υποχρεωτική χρήση WPA3 στη ζώνη των 6 GHz αντιμετωπίζουν τις ανησυχίες σχετικά με την ευπάθεια του IoT. Τα περισσότερα από τα έξυπνα σπίτια περιλαμβάνουν μια σειρά από παλαιού τύπου καθώς και σύγχρονες συσκευές, που οδηγούν σε πιθανά σημεία θραύσης εντός των δικτύων. Το WPA3 διασφαλίζει την ευαισθησία δεδομένων, είτε σχετίζεται με οικιακές κάμερες είτε με φορητή συσκευή που υποδεικνύει την κατάσταση της υγείας κάποιου, και διατηρείται ασφαλής έναντι μη εξουσιοδοτημένης προσβασιμότητας. Επίσης, το Wi-Fi 7 επιτρέπει προηγμένες τεχνικές ελέγχου ταυτότητας που δημιουργούν ένα πρόσθετο φράγμα προστασίας από απειλές στον κυβερνοχώρο.

Μελλοντικά οικοσυστήματα IoT

Ενώ το οικοσύστημα IoT αναπτύσσεται ολοένα και περισσότερο, το Wi-Fi 7 παρέχει ένα

τεχνολογικό θεμέλιο για μελλοντικές εφαρμογές στον έξυπνο οικιακό αυτοματισμό με τεχνητή νοημοσύνη και την ενσωμάτωση με εξωτερικά δίκτυα 5G. Διασφαλίζει ότι τα έξυπνα σπίτια είναι συμβατά με τις επερχόμενες τεχνολογίες για την ελαχιστοποίηση των συχνών αλλαγών στις υποδομές.

4.3 Παιχνίδια και Streaming(Ροή)

Το Wi-Fi 7 είναι η εξέλιξη που αλλάζει το παιχνίδι σε εφαρμογές για παιχνίδια και ροή, με ασυναγώνιστη απόδοση που καθοδηγείται από την αυξημένη ταχύτητα, τη χαμηλότερη καθυστέρηση και τη βελτιωμένη αξιοπιστία. Τα διαδικτυακά παιχνίδια για πολλούς παίκτες, τα παιχνίδια cloud και η ροή περιεχομένου υψηλής ευκρίνειας αυξάνονται με εκθετική πρόοδο. Το Wi-Fi 7 βρίσκεται στην καλύτερη θέση για να οδηγήσει την επόμενη γενιά διαδραστικής ψυχαγωγίας αντιμετωπίζοντας ορισμένες μοναδικές προκλήσεις εφαρμογών.

Υψηλότερες ταχύτητες και περιεχόμενο εξαιρετικά υψηλής ευκρίνειας

Θεωρητικά, το Wi-Fi 7 μπορεί να υπερηφανεύεται για ταχύτητες έως και 40 Gbps, τέσσερις φορές υψηλότερες από αυτές που θα μπορούσε να υποστηρίξει το Wi-Fi 6E, διπλασιάζοντας το εύρος ζώνης του καναλιού στα 320 MHz και χρησιμοποιώντας διαμόρφωση 4096-QAM υψηλότερης τάξης. Σε αυτήν την περίπτωση, θα υπάρχει αναπαραγωγή βίντεο χωρίς καθυστέρηση 8K, ακόμη και 16K, χωρίς αποθήκευση στην προσωρινή μνήμη κατά τη διάρκεια τέτοιων περιπτώσεων όταν πολλές συσκευές έχουν πρόσβαση στο δίκτυο μαζί σε ένα νοικοκυριό.

Με αυτούς τους υψηλούς ρυθμούς δεδομένων, οι παίκτες μπορούν να κατεβάζουν και να ενημερώνουν τα παιχνίδια τους πολύ πιο γρήγορα, επιτρέποντας στους παίκτες να συνεχίσουν αμέσως με το νεότερο περιεχόμενο. Αυτή η αύξηση της ταχύτητας βοηθά επίσης πλατφόρμες ροής όπως το Twitch, όπου οι παίκτες μπορούν να κάνουν streaming σε υψηλότερες αναλύσεις και ρυθμούς καρέ ζωντανά χωρίς buffer.

Εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση για ανταγωνιστικά παιχνίδια

Η καθυστέρηση(ring) είναι το κλειδί για τους παίκτες σε ανταγωνιστικά esports ή online multiplayer. Το Wi-Fi 7 εισάγει το MLO που συμβάλλει ουσιαστικά στην περαιτέρω βελτίωση της καθυστέρησης. Θα μπορεί να αφήσει διάφορες ζώνες συχνοτήτων να χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα από συσκευές, έτσι ώστε να υπάρχει μικρό εμπόδιο στην καθυστέρηση πακέτων, με βελτιωμένο χρόνο αντίδρασης και αίσθηση παιχνιδιού πολύ καλύτερα από ποτέ.

Επιπλέον, το TWT και το RTWT συμβάλλουν περαιτέρω στη μείωση του λανθάνοντος χρόνου βελτιστοποιώντας το πρόγραμμα αφύπνισης των συσκευών. Εξασφαλίζοντας ότι οι συσκευές παιχνιδιών έχουν πρόσβαση κατά προτεραιότητα στο δίκτυο, λειτουργίες όπως αυτές διασφαλίζουν ότι η επικοινωνία με τους διακομιστές παιχνιδιών μπορεί να είναι σχεδόν στιγμιαία. Καθώς το gaming cloud απαιτεί ανταπόκριση, δεδομένου του παράγοντα

λανθάνοντος χρόνου, είναι δυνατή η εύρυθμη αλληλεπίδραση στο Wi-Fi 7. Ως εκ τούτου, αυτή η τεχνολογία είναι ένας ενεργοποιητής για υπηρεσίες όπως το NVIDIA GeForce NOW, το Xbox Cloud Gaming και το Google Stadia.

Πιο ομαλή ροή και παιχνίδια στο σπίτι

Η συμφόρηση δικτύου συνήθως οδηγεί σε πτώση καρέ, προσωρινή αποθήκευση ή αποσυνδέσεις σε εφαρμογές ροής και παιχνιδιών. Η λειτουργία MRU Aggregation του Wi-Fi 7 παρέχει βελτιωμένη κατανομή πόρων για τη διασφάλιση συνεπούς απόδοσης δικτύου ακόμη και σε πυκνά περιβάλλοντα. Για παράδειγμα, όταν πολλά μέλη της οικογένειας μεταδίδουν περιεχόμενο βίντεο ή παιχνίδι στο διαδίκτυο ταυτόχρονα, το Wi-Fi 7 προσαρμόζει δυναμικά τους πόρους για να διατηρήσει τη σταθερότητα για όλους τους χρήστες.

Επίσης, το βελτιωμένο Wi-Fi 7 OFDMA παρέχει αυξημένη ευαισθησία στο επίπεδο δευτερεύοντος φορέα, επιτρέποντας μικρότερη συμφόρηση. Ειδικά για Netflix, Disney+, υπηρεσίες ροής όπου η ευχέρεια αναπαραγωγής βίντεο είναι το κλειδί στην ποιότητα HD.

Επεκτασιμότητα σε νοικοκυριά πολλαπλών συσκευών

Σήμερα, πολλά σπίτια χρησιμοποιούν πολλαπλές συσκευές που συνδέονται σε διαδικτυακά παιχνίδια και ροή ταυτόχρονα. Το Wi-Fi 7 αύξησε τη χωρητικότητά του και τον αριθμό των χωρικών ροών που υποστηρίζουν έως και 16. Έτσι, οι κονσόλες παιχνιδιών, οι έξυπνες τηλεοράσεις, τα κινητά και οι υπολογιστές μπορούν να λειτουργούν μαζί σε ένα δίκτυο χωρίς διακοπή στην απόδοση. Για παράδειγμα, στην περίπτωση μιας ζωντανής ροής αθλητικών ροών 4K σε μια έξυπνη τηλεόραση, μιας συνεδρίας παιχνιδιού cloud σε φορητό υπολογιστή και πολλαπλών περιόδων παιχνιδιού σε μια κονσόλα, όλα συμβαίνουν ταυτόχρονα χωρίς διακοπή.

Υποστήριξη για αναδυόμενες τεχνολογίες

Το Wi-Fi 7 ανοίγει έναν εντελώς νέο κόσμο στις προκύπτουσες τεχνολογίες στα παιχνίδια και τη ροή. Οι εφαρμογές AR και VR, που απαιτούν εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση και υψηλούς ρυθμούς δεδομένων, θα επωφεληθούν σημαντικά από την τεχνολογία. Το Wi-Fi 7 παρέχει εύρος ζώνης για ασύρματη ροή καθηλωτικών εμπειριών σε υψηλές αναλύσεις και ρυθμούς καρέ για παίκτες VR. Ομοίως, οι υπηρεσίες που προσφέρουν περιεχόμενο διαδραστικής ζωντανής ροής μπορούν να αξιοποιήσουν τις δυνατότητες του Wi-Fi 7 για την παροχή βίντεο χαμηλής καθυστέρησης, υψηλής ευκρίνειας με ενσωματωμένη συνομιλία και αλληλεπιδράσεις σε πραγματικό χρόνο.

Βελτιωμένη ασφάλεια στα παιχνίδια και τη ροή

Το Wi-Fi 7 σκληραίνει την ασφάλεια του δικτύου επιβάλλοντας την κρυπτογράφηση WPA3 στη ζώνη των 6 GHz. Για τους παίκτες και τους streamers, αυτό σημαίνει ότι τα ευαίσθητα δεδομένα, όπως τα διαπιστευτήρια λογαριασμού, οι λεπτομέρειες πληρωμών και οι αγορές εντός παιχνιδιού, θα είναι ασφαλή από κυβερνοεπιθέσεις. Επιπλέον, επιτρέπει στις συσκευές παιχνιδιών και ροής να διαθέτουν προηγμένους μηχανισμούς ελέγχου ταυτότητας για τη μείωση των πιθανοτήτων μη εξουσιοδοτημένης πρόσβασης σε λογαριασμούς ή περιεχόμενο.

Πώς θα είναι τα παιχνίδια και η ροή με το Wi-Fi 7

Το Wi-Fi 7 σίγουρα θα βελτιώσει την τρέχουσα αναπαραγωγή και ροή παιχνιδιών, αλλά προσφέρει επίσης φανταστικές νέες δυνατότητες. Οι υπηρεσίες τυχερών παιχνιδιών Cloud θα είναι σε θέση να επεκτείνουν τις υπηρεσίες τους, προσφέροντας ακόμη και γραφικά υψηλής ποιότητας και ανταπόκριση παιχνιδιού σε απομακρυσμένες περιοχές. Οι πλατφόρμες ροής θα μπορούσαν να καινοτομήσουν με βίντεο 360 μοιρών, διαδραστικές λειτουργίες και υψηλότερες αναλύσεις. Καθώς η ψυχαγωγία γίνεται όλο και πιο ψηφιακή και καθηλωτική, το Wi-Fi 7 είναι η ραχοκοκαλιά για μια τέτοια ανάπτυξη για να εξασφαλίσει την απαιτούμενη ταχύτητα, σταθερότητα και ασφάλεια για ευρεία υιοθέτηση.

4.4 Βιομηχανικό IoT και Αυτοματισμοί

Το Wi-Fi 7 πρόκειται να φέρει επανάσταση στον χώρο του βιομηχανικού IoT και του Αυτοματισμού με πολύ μεγαλύτερες ταχύτητες, αξιοπιστία και αποτελεσματικότητα στην κατασκευή και το εφοδιαστικό δίκτυο(logistics), μεταξύ άλλων βιομηχανιών ζωτικής σημασίας. Αυτή η τεχνολογία επόμενης γενιάς αντιμετωπίζει μια σειρά από προκλήσεις που έχουν αντιμετωπίσει βιομηχανικές ρυθμίσεις, όπως η επικοινωνία χαμηλής καθυστέρησης, η σταθερότητα του δικτύου και η επεκτασιμότητα, επομένως αναπόσπαστο μέρος για το μέλλον των έξυπνων εργοστασίων και του αυτοματισμού.

Βελτίωση του βιομηχανικού IoT με Wi-Fi 7

Το IoT διαθέτει ένα τεράστιο οικοσύστημα συνδεδεμένων συσκευών, αισθητήρων, ενεργοποιητών και μηχανών, που επικοινωνούν συνεχώς μεταξύ τους, ανταλλάσσοντας δεδομένα. Το Wi-Fi 7, με υψηλότερη απόδοση, καλύτερη φασματική απόδοση και μεγαλύτερη χωρητικότητα συσκευής, είναι ιδανικό για τη διαχείριση του όγκου δεδομένων που προέρχονται από τέτοιες συσκευές.

Με θεωρητική μέγιστη ταχύτητα έως και 40 Gbps, το Wi-Fi 7 παρέχει ανταλλαγή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο μεταξύ συσκευών στο εργοστάσιο που θα επιτρέψουν προηγμένες αναλύσεις και λήψη αποφάσεων. Επιπλέον, η βελτιωμένη φασματική απόδοση μέσω του MLO και της Συνάθροισης Μονάδων πολλαπλών πόρων(MRU) σημαίνει συνεχή απόδοση σε περιβάλλοντα υψηλής πυκνότητας συσκευών, όπως έξυπνες αποθήκες και γραμμές παραγωγής.

Εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση για εφαρμογές ευαίσθητες στο χρόνο

Η εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση είναι ζωτικής σημασίας στον βιομηχανικό αυτοματισμό για τη διατήρηση της ακρίβειας και την αποφυγή δαπανηρών σφαλμάτων. Το MLO του Wi-Fi 7 μειώνει τον λανθάνοντα χρόνο επιτρέποντας την ταυτόχρονη μετάδοση δεδομένων μέσω πολλαπλών συνδέσεων, διασφαλίζοντας γρήγορη και αξιόπιστη επικοινωνία. Αυτή η δυνατότητα είναι κρίσιμη για εφαρμογές δικτύωσης ευαίσθητες στο χρόνο, όπως ο ρομποτικός έλεγχος ή η επικοινωνία M2M, για την επίτευξη ντετερμινιστικών επιδόσεων.

To Target Wake Time και η προηγμένη παραλλαγή του, Restricted Target Wake Time, διαδραματίζουν επίσης σημαντικό ρόλο στη μείωση της καθυστέρησης και στη βελτιστοποίηση της ισχύος για βιομηχανικές συσκευές. Το TWT επιτρέπει στις συσκευές να προγραμματίζουν αποτελεσματικά τις επικοινωνίες τους, ενώ το RTWT διασφαλίζει ότι οι κρίσιμες βιομηχανικές εφαρμογές λαμβάνουν προτεραιότητα πρόσβασης στους πόρους του δικτύου.

Επεκτασιμότητα για σύνθετα βιομηχανικά δίκτυα

Το Wi-Fi 7 υποστηρίζει έως και 16 χωρικές ροές, μια δυνατότητα που δίνει στο Wi-Fi την απαραίτητη επεκτασιμότητα σε εκτεταμένη βιομηχανική δικτύωση IoT. Μέσα στα έξυπνα εργοστάσια με εκατοντάδες και χιλιάδες αισθητήρες και μηχανήματα συνδεδεμένα μεταξύ τους, το Wi-Fi 7 επιτρέπει την απρόσκοπτη επικοινωνία και απώλεια απόδοσης μεταξύ όλων αυτών των συσκευών.

Το Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) έχει βελτιωθεί περαιτέρω στο Wi-Fi 7 για την αποτελεσματική διανομή δευτερευουσών εταιρειών σε πολλές συσκευές. Αυτό μειώνει τη διαμάχη και επιτρέπει ακόμη και στις βιομηχανικές εφαρμογές με μεγαλύτερη ένταση εύρους ζώνης, όπως η συντήρηση που βασίζεται σε AR ή ο ποιοτικός έλεγχος βάσει τεχνητής νοημοσύνης, να εκτελούνται χωρίς παρεμβολές.

Ανθεκτικότητα σε σκληρά βιομηχανικά περιβάλλοντα

Οι περιβαλλοντικές συνθήκες είναι επίσης συνήθως πολύ σκληρές σε ένα βιομηχανικό περιβάλλον, το οποίο περιλαμβάνει ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές από μηχανήματα, ακραίες θερμοκρασίες και φυσικά εμπόδια. Σε τέτοια σενάρια, το υψηλότερο φάσμα συχνοτήτων του Wi-Fi 7 - για παράδειγμα, η χρήση της ζώνης των 6 GHz προσφέρει καθαρότερα κανάλια και λιγότερες παρεμβολές. Η προηγμένη διαμόρφωση δέσμης, σε συνδυασμό με τη χρήση της διαμόρφωσης 4096-QAM, προσφέρει καλύτερη ποιότητα και αξιοπιστία σήματος ακόμη και κάτω από δύσκολες περιβαλλοντικές συνθήκες.

Παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο και προγνωστική συντήρηση

Το Wi-Fi 7, επομένως, υποστηρίζει παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο και προγνωστική συντήρηση για το Industry 4.0. Οι αισθητήρες που συνδέονται με το Wi-Fi 7 μπορούν να στέλνουν συνεχώς δεδομένα υψηλής ανάλυσης σχετικά με την απόδοση του μηχανήματος στον χειριστή για να εντοπίσουν ανωμαλίες και να προγραμματίσουν τη συντήρηση πριν συμβεί οποιαδήποτε βλάβη, μειώνοντας έτσι το χρόνο διακοπής λειτουργίας και βελτιώνοντας τη συνολική απόδοση.

Για παράδειγμα, το Wi-Fi 7, που αναπτύσσεται σε μια γραμμή συναρμολόγησης, μπορεί να μεταδίδει συνεχώς ροές βίντεο και δεδομένα αισθητήρων σε αναλυτικά στοιχεία που βασίζονται σε AI, τα οποία μπορούν να εντοπίσουν ελαττώματα ή αναποτελεσματικότητα σε πραγματικό χρόνο. Οι υψηλοί ρυθμοί δεδομένων και ο χαμηλός λανθάνων χρόνος διασφαλίζονται επομένως από το Wi-Fi 7 για την απρόσκοπτη λειτουργία αυτών των συστημάτων και την παροχή έγκαιρων ενεργών πληροφοριών.

Υποστήριξη Αυτόνομων Συστημάτων

Από τα αυτόνομα ρομπότ μέχρι τα drones, τα αυτόνομα συστήματα βρίσκουν εφαρμογές που αποτελούν αναπόσπαστο μέρος του αυτοματισμού στη βιομηχανία. Το Wi-Fi 7 παρέχει σε ένα

τέτοιο σύστημα την ταχύτητα και την αξιοπιστία που απαιτείται. Τα AGV(Autonomous guided vehicles - αυτόνομα οχήματα οδηγοί) εντός των αποθηκών μπορούν να χρησιμοποιήσουν το Wi-Fi 7 για να εξασφαλίσουν έγκαιρη ανταλλαγή δεδομένων με κεντρικά συστήματα ελέγχου σχετικά με την πλοήγηση και τον συντονισμό.

Ομοίως, τα drones που χρησιμοποιούνται για τη διαχείριση αποθεμάτων ή την επιθεώρηση μπορούν να χρησιμοποιήσουν το εκτεταμένο εύρος και τη χαμηλή καθυστέρηση του Wi-Fi 7 για να επιτρέψουν τη ροή βίντεο υψηλής ποιότητας και τις εισόδους στιγμιαίου ελέγχου.

Διευκόλυνση του Edge Computing στη Βιομηχανία

Το Wi-Fi 7 επιτρέπει τον υπολογισμό άκρων(edge computing), μια τοπολογία όπου η επεξεργασία δεδομένων εκτελείται πιο κοντά στις συσκευές και τις πηγές που δημιουργούν τέτοια δεδομένα, παρά σε ένα κεντρικό κέντρο δεδομένων. Αυτό μειώνει σημαντικά τις απαιτήσεις καθυστέρησης και εύρους ζώνης, καθιστώντας την τεχνολογία κατάλληλη για βιομηχανικές εφαρμογές IoT. Το Wi-Fi 7 θα επιτρέψει επίσης σε έξυπνους αισθητήρες και συσκευές να επεξεργάζονται δεδομένα τοπικά και να στέλνουν μόνο τις κρίσιμες πληροφορίες σε πλατφόρμες cloud, βελτιστοποιώντας τους πόρους δικτύου και οδηγώντας σε ταχύτερη λήψη αποφάσεων.

Προετοιμασία για μελλοντικές βιομηχανικές καινοτομίες

Το Wi-Fi 7 είναι μια άλλη προσθήκη στις αναδυόμενες τεχνολογίες όπως 5G, AI, blockchain και που συνεισφέρει σημαντικά στην εφαρμογή τους. Έτσι, προσφέρει υψηλή ταχύτητα με χαμηλό λανθάνοντα χρόνο για να αναπτυχθεί σε μελλοντικές εφαρμογές: ψηφιακά δίδυμα ή εικονικά δίδυμα που χρησιμοποιούνται για προσομοίωση φυσικού συστήματος.

Το Wi-Fi 7 θέτει επίσης τα θεμέλια για την ανάπτυξη προηγμένης ρομποτικής, καθηλωτικών εφαρμογών AR/VR για εκπαίδευση και απομακρυσμένη υποστήριξη και διασυνδεδεμένων οικοσυστημάτων που οδηγούν στην αποτελεσματικότητα και τη βιωσιμότητα στις βιομηχανικές διαδικασίες.

5. Προκλήσεις και Περιορισμοί του Wi-Fi 7

5.1 Απαιτήσεις σε υποδομές και υλικό

Το Wi-Fi 7 υπόσχεται μεγάλες βελτιώσεις στην ασύρματη τεχνολογία, αλλά τέτοια οφέλη έχουν το κόστος των σημαντικών απαιτήσεων υποδομής και υλικού, που προκαλούν την υιοθέτηση σε ευρεία κλίμακα. Αυτές οι απαιτήσεις φθάνουν σε κατασκευαστές δικτύων, επιχειρήσεις και μεμονωμένους χρήστες θέτοντας οικονομικά και υλικοτεχνικά εμπόδια με τον δικό τους τρόπο.

Μετάβαση σε νέο υλικό

Το Wi-Fi 7 απαιτεί τη χρήση νέου υλικού προκειμένου να πραγματοποιηθούν οι πλήρεις δυνατότητές του. Λειτουργίες όπως το εύρος ζώνης καναλιού 320 MHz, η λειτουργία πολλαπλών συνδέσμων και η διαμόρφωση 4K QAM δεν θα είναι δυνατές με δρομολογητές, σημεία πρόσβασης και προσαρμογείς δικτύου που έχουν σχεδιαστεί για Wi-Fi 6 ή παλαιότερο. Για τους χρήστες, θα πρέπει να αγοράσουν νέες συσκευές πλήρως συμβατές με το Wi-Fi 7, συμπεριλαμβανομένων δρομολογητών υψηλής απόδοσης, συσκευών πελατών όπως smartphone και φορητούς υπολογιστές και άλλου πρόσθετου υλικού για επιχειρήσεις, όπως διακόπτες (switches).

Για τις επιχειρήσεις, αυτή η μετάβαση μπορεί να είναι αρκετά δύσκολη. Η αναβάθμιση δικτύων υποδομής μεγάλης κλίμακας σε γραφεία επιχειρήσεων, πανεπιστημιακές ή εργοστάσια παραγωγής απαιτεί αντικατάσταση μεγάλων κομματιών υλικού. Ως εκ τούτου, οι αρχικές επενδύσεις θα είναι πολύ υψηλές. Επιπλέον, η εγκατάσταση και η διαμόρφωση νέου εξοπλισμού απαιτούν εξειδικευμένους τεχνικούς, γεγονός που περιπλέκει περαιτέρω τη μετάβαση.

Αναβαθμίσεις κορμού δικτύου

Με τις υψηλές ταχύτητες που πρόκειται να φέρει το Wi-Fi 7 - να ξεπεράσει τα 40 Gbps υπό ιδανικές συνθήκες - φυσικά θα δημιουργήσει μεγάλες απαιτήσεις στον ενσύρματο κορμό των δικτύων. Για παράδειγμα, ένας δρομολογητής Wi-Fi 7 πλήρους χωρητικότητας θα απαιτούσε σύνδεση Ethernet πολλών gigabit για να αποφευχθούν τα σημεία συμφόρησης. Επομένως, θα απαιτηθεί αναβάθμιση από το παραδοσιακό gigabit Ethernet σε πρότυπα Ethernet 2,5G, 5G ή ακόμα και 10G.

Αυτό περιλαμβάνει την ενημέρωση των καλωδίων Ethernet, των μεταγωγέων δικτύου και άλλων στοιχείων υποδομής στις επιχειρήσεις για την προσαρμογή του Wi-Fi 7. Αυτές οι αντικαταστάσεις είναι δαπανηρές και απαιτούν πολύ χρόνο, επομένως αποτελούν εμπόδιο για κάθε οργανισμό που θα ήθελε να μεταβεί στο νέο πρότυπο. Στα οικιακά δίκτυα, οι χρήστες μπορεί να χρειαστεί να αντικαταστήσουν παλιά καλώδια ή μόντεμ για να έχουν πλήρη οφέλη από το Wi-Fi 7.

Απαιτήσεις ισχύος και ψύξης

Οι πιο προηγμένες συσκευές Wi-Fi 7, με λειτουργίες όπως πολλαπλές κεραίες για 16 χωρικές ροές και βελτιωμένη επεξεργασία για τη διαχείριση της λειτουργίας Multi-Link, θα είναι πιο απαιτητικές για ενέργεια. Αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει σε υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας όταν αυτές οι συσκευές αναπτύσσονται σε μεγάλη κλίμακα, όπως σε εταιρικά γραφεία ή κέντρα δεδομένων.

Επιπλέον, η αυξημένη ισχύς επεξεργασίας από τους δρομολογητές Wi-Fi 7 και τα σημεία πρόσβασης θα μπορούσε επίσης να αυξήσει τις θερμοκρασίες, απαιτώντας έτσι καλύτερους μηχανισμούς ψύξης. Για τις επιχειρήσεις, αυτό μπορεί να σημαίνει επανασχεδιασμό των δωματίων διακομιστή ή επένδυση σε καλύτερη υποδομή ψύξης για τη στέγαση του νέου υλικού.

Προκλήσεις ανάπτυξης σε πυκνά περιβάλλοντα

Ενώ το νέο διευρυμένο φάσμα και οι προηγμένες λειτουργίες του Wi-Fi 7 υποτίθεται ότι λειτουργούν ακόμη καλύτερα σε πυκνά περιβάλλοντα, η ανάπτυξη και η διαμόρφωση της απαραίτητης υποδομής για την αξιοποίηση αυτών των δυνατοτήτων εισάγει τις δικές της προκλήσεις. Θα απαιτηθεί προσεκτικός σχεδιασμός της τοποθέτησης του σημείου πρόσβασης και της διαχείρισης παρεμβολών μεταξύ συσκευών που λειτουργούν σε επικαλυπτόμενες συχνότητες σε αστικές περιοχές, στάδια, αεροδρόμια και άλλες τοποθεσίες υψηλής πυκνότητας.

Επιπλέον, στις περισσότερες χώρες, το νέο φάσμα 6 GHz που συνοδεύει το Wi-Fi 7 απαιτεί ρυθμιστική έγκριση. Η αδυναμία άμεσης χρήσης της ζώνης των 6 GHz σε τοποθεσίες όπου δεν είναι έτοιμη σημαίνει ότι το Wi-Fi 7 δεν μπορεί να αξιοποιήσει πλήρως τις δυνατότητές του, μειώνοντας έτσι κάθε επιχειρηματικό λόγο για επένδυση στην τεχνολογία.

Περιορισμένη διαθεσιμότητα συμβατών συσκευών Wi-Fi 7

Επί του παρόντος, οι συσκευές που υποστηρίζουν Wi-Fi 7 δεν είναι πολύ διαδεδομένες στην αγορά. Οι κατασκευαστικές εταιρείες εξακολουθούν να βρίσκονται στη διαδικασία ανάπτυξης και δοκιμών προϊόντων που συμμορφώνονται με το πρότυπο, το οποίο μπορεί να απαιτήσει από τους πρώιμους χρήστες να πληρώσουν υψηλότερο κόστος για την κορυφαία τεχνολογία. Για τους καταναλωτές, οι εξαιρετικά λίγες συσκευές που υποστηρίζουν Wi-Fi 7 θα μπορούσαν να καθυστερήσουν την εφαρμογή του νέου προτύπου, καθώς οι χρήστες περιμένουν πιο προσιτές και αξιόπιστες επιλογές για να βγουν στην αγορά.

Οικονομικές Επιπτώσεις

Το κύριο μέλημα της αναβάθμισης σε Wi-Fi 7 είναι επίσης το κόστος. Για τους οικιακούς χρήστες, η αγορά νέου δρομολογητή και συσκευών που υποστηρίζουν Wi-Fi 7 δεν θα δικαιολογηθεί εάν αυτό που διαθέτουν μπορεί να καλύψει επαρκώς τις ανάγκες τους. Οι επιχειρήσεις βρίσκονται σε ακόμη πιο δύσκολη οικονομικά κατάσταση, καθώς περιλαμβάνει την αναβάθμιση δικτύων μεγάλης κλίμακας, την εκπαίδευση του προσωπικού πληροφορικής και τη διαχείριση του χρόνου διακοπής λειτουργίας που σχετίζεται με την ανάπτυξη νέου υλικού.

Περιβαλλοντικές Θεωρήσεις

Επιπλέον, η ευρεία υιοθέτηση του Wi-Fi 7 θα έρθει με τη γενική σπατάλη παλιού εξοπλισμού, που αποτελεί ήδη περιβαλλοντικό πρόβλημα. Πολλά ηλεκτρονικά απόβλητα θα δημιουργηθούν από ξεπερασμένους δρομολογητές, προσαρμογείς και άλλες συσκευές που μπορεί να γίνουν ασύμβατες με το Wi-Fi 7. Αυτό πρέπει να αντιμετωπιστεί υπεύθυνα για να μειωθεί το περιβαλλοντικό του αποτύπωμα.

5.2 Συμβατότητα με παλαιότερες συσκευές

Ένα από τα πιο σημαντικά ερωτήματα που πρέπει να απαντήσει το Wi-Fi 7 αφορά τη συμβατότητά του με παλαιότερες συσκευές-προκλήσεις που αντιμετωπίζουν εξίσου όχι μόνο οικιακούς χρήστες αλλά και επιχειρήσεις μέσω αναβαθμίσεων δικτύου. Αν και η συμβατότητα προς τα πίσω ήταν πάντα ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά πώλησης του Wi-Fi, ο τρόπος διασφάλισης της απρόσκοπτης διαλειτουργικότητας μεταξύ του Wi-Fi 7 και των παλαιούχων συσκευών θέτει πολλές τεχνικές, υλικοτεχνικές προκλήσεις και προκλήσεις που σχετίζονται με την απόδοση.

Συμβατότητα προς τα πίσω στα πρότυπα Wi-Fi

Το Wi-Fi 7 θα είναι συμβατό με προηγούμενα πρότυπα, όπως ενδεικτικά το Wi-Fi 6, το Wi-Fi 5 και οι προηγούμενες γενιές τους. Αυτό σημαίνει ότι οι συσκευές που υποστηρίζουν αυτά τα παλαιότερα πρωτόκολλα μπορούν επίσης να συνδεθούν στα δίκτυα του Wi-Fi 7. Σε κάθε περίπτωση, η συμβατότητα έχει το κόστος της απόδοσης. Για παράδειγμα, παλαιότερες συσκευές που δεν μπορούν να υποστηρίξουν τις βελτιωμένες δυνατότητες του Wi-Fi 7, όπως το εύρος ζώνης καναλιού 320 MHz, η λειτουργία πολλαπλών συνδέσμων και η διαμόρφωση 4K QAM, θα λειτουργούν μόνο χρησιμοποιώντας τις δυνατότητες των αντίστοιχων προτύπων τους.

Ως εκ τούτου, αυτό δημιουργεί μια ασύμμετρη εμπειρία δικτύου, όπου οι προηγμένες δυνατότητες του Wi-Fi 7 χρησιμοποιούνται ελάχιστα σε περιβάλλοντα μεικτών συσκευών. Ένας δρομολογητής Wi-Fi 7, για παράδειγμα, θα πρέπει να μειώσει την απόδοσή του για να φιλοξενήσει παλαιότερες συσκευές, αναιρώντας πιθανώς τα οφέλη που προκύπτουν από μια αναβάθμιση.

Συμφόρηση απόδοσης

Το Wi-Fi 7 θα πνιγεί από τις παλαιού τύπου συσκευές. Για παράδειγμα, παλαιότερες συσκευές που λειτουργούν σε μικρότερα εύρη ζώνης καναλιών ή χαμηλότερα σχήματα διαμόρφωσης μπορούν να επιβραδύνουν το δίκτυο αναγκάζοντας τον δρομολογητή να κατανέμει αναποτελεσματικά πόρους. Αυτό είναι ιδιαίτερα προβληματικό σε περιβάλλοντα υψηλής πυκνότητας όπου η συνύπαρξη συσκευών παλαιού τύπου και Wi-Fi 7 αυξάνει την πιθανότητα παρεμβολών και μειώνει τη συνολική απόδοση δικτύου.

Η πρόκληση συνύπαρξης επεκτείνεται σε χαρακτηριστικά όπως το MLO, το οποίο είναι θεμελιώδες για το Wi-Fi 7 στην ικανότητά του να συγκεντρώνει πολλαπλές ζώνες συχνοτήτων. Επειδή οι παλαιότερες συσκευές δεν μπορούν να χρησιμοποιήσουν το MLO, ένα δίκτυο πρέπει να υποστηρίζει συσκευές μίας σύνδεσης και, για πελάτες Wi-Fi 7, να διαχειρίζεται συνδέσμους σε πολλαπλούς. Αυτό καθιστά τα πράγματα πιο περίπλοκα όσον αφορά τη διαχείριση του

δικτύου και μπορεί να μειώσει την απόδοση για αυτές τις νεότερες συσκευές από το βέλτιστο δυνατό.

Περιορισμοί ζώνης φάσματος και συχνότητας

Το Wi-Fi 7 προσθέτει υποστήριξη στη ζώνη των 6 GHz, παρέχοντας ευρύτερο φάσμα με μειωμένες παρεμβολές. Ωστόσο, οι περισσότερες συσκευές παλαιού τύπου εξαρτώνται μόνο από ζώνες 2,4 GHz και 5 GHz. Η επιβολή συμβατότητας προς τα πίσω συνεπάγεται ότι τα δίκτυα Wi-Fi 7 πρέπει να εκτελούνται πάνω από εκείνες τις παλαιότερες συχνότητες που μπορεί να έχουν ήδη συμπληρωθεί σε συγκεκριμένα περιβάλλοντα. Αυτό αναιρεί ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα του Wi-Fi 7, καθώς μπορεί να προσφέρει καλύτερη απόδοση στη σχετικά ακατάστατη ζώνη συχνοτήτων των 6 GHz.

Περιορισμοί υλικού και υλικολογισμικού

Δεδομένης της έλλειψης ενημερώσεων στο υλικολογισμικό για τη βελτιστοποίησή του, μπορεί επίσης να είναι αδύνατο για παλαιότερες συσκευές να υποστηρίξουν Wi-Fi 7. Αυτό ισχύει πολύ, ειδικά για εκείνες τις συσκευές που δεν συντηρούνται πλέον από τους κατασκευαστές τους. Ως αποτέλεσμα, η συνδεσιμότητα για τέτοιες συσκευές, η υποβάθμιση της απόδοσης ή η αδυναμία λειτουργίας συγκεκριμένων λειτουργιών στο Wi-Fi 7 θα αντιμετωπιστούν.

Επιπλέον, οι παλαιότεροι δρομολογητές και τα σημεία πρόσβασης δεν διαθέτουν την ισχύ επεξεργασίας ή τη μνήμη για να χειριστούν τις προηγμένες δυνατότητες διαχείρισης κίνησης του Wi-Fi 7, όπως το βελτιωμένο OFDMA ή το MU-MIMO υψηλότερης τάξης. Αυτό καθιστά δύσκολο για τα δίκτυα μικτών συσκευών να επιτύχουν τη χαμηλή καθυστέρηση, την υψηλή απόδοση και την απρόσκοπτη συνδεσιμότητα που υπόσχεται το Wi-Fi 7.

Πρακτικές προκλήσεις για τις επιχειρήσεις

Πιο κρίσιμο, η πρόκληση για το Wi-Fi 7 είναι η διασύνδεση με τις εγκατεστημένες παλαιότερες συσκευές εντός των επιχειρήσεων. Οι περισσότεροι οργανισμοί έχουν μια πληθώρα συσκευών παλαιού τύπου ενσωματωμένες στις λειτουργίες τους, όπως συσκευές ανάγνωσης barcode, έλεγχος βιομηχανικών εγκαταστάσεων ή ακόμα και αισθητήρες IoT. Η αλλαγή αυτών των συσκευών με τις εκδόσεις τους που είναι συμβατές με το Wi-Fi 7 θα είναι δαπανηρή και ενοχλητική.

Επιπλέον, η μετάβαση στο Wi-Fi 7 εμπλέκει την εταιρεία σε βαθύ σχεδιασμό και δοκιμή του δικτύου για να εγγυηθεί ότι οι παλαιού τύπου συσκευές της θα υπάρχουν με νεότερο υλικό χωρίς να προκαλούνται διακοπές. Οι εκτενείς δοκιμές, οι ρυθμίσεις παραμέτρων και η βελτιστοποίηση απαιτούν πολλή δουλειά και ως εκ τούτου καθυστερούν την υιοθέτηση του Wi-Fi 7.

Εκπαίδευση και μετάβαση χρηστών

Αυτό θα μπορούσε να είναι ένας πολύ μπερδεμένος παράγοντας για τους οικιακούς χρήστες. Οι περισσότεροι καταναλωτές δεν κατανοούν πλήρως τι θα συνεπάγεται πραγματικά η αναβάθμιση σε Wi-Fi 7 και μπορεί να περιμένουν απρόσκοπτες βελτιώσεις απόδοσης ακόμη και σε παλαιότερες συσκευές. Η εκπαίδευση των χρηστών σχετικά με τους περιορισμούς της συμβατότητας προς τα πίσω και τα οφέλη της αναβάθμισης των συσκευών τους είναι το κλειδί για μια απρόσκοπτη μετάβαση.

5.3 Προβλήματα ασφάλειας και προστασίας δεδομένων

Ενώ το Wi-Fi 7 υπόσχεται απaráμιλλη ταχύτητα, αποτελεσματικότητα και συνδεσιμότητα, εισάγει επίσης νέες ανησυχίες για την ασφάλεια και προκλήσεις για τη διασφάλιση ισχυρής προστασίας δεδομένων. Με προηγμένες δυνατότητες όπως η λειτουργία πολλαπλών συνδέσμων και η αυξημένη χρήση του φάσματος των 6 GHz, το Wi-Fi 7 παρουσιάζει μια εξελισσόμενη επιφάνεια επίθεσης που απαιτεί αυξημένη προσοχή στα μέτρα ασφαλείας. Αυτό το υποκεφάλαιο διερευνά τα τρωτά σημεία και τις στρατηγικές που σχετίζονται με την προστασία δεδομένων και την ασφάλεια δικτύου στο Wi-Fi 7.

Επέκταση Επιφάνειας Επίθεσης

Σε σύγκριση με τον προκατόχο του, το Wi-Fi 7 εισάγει πολλά νέα χαρακτηριστικά - υψηλότερο εύρος ζώνης, MLO και συγκεντρωτικές μονάδες πόρων - που θα βελτιώσουν την απόδοση και, ταυτόχρονα, θα παρέχουν περισσότερα σημεία εισόδου σε πιθανούς εισβολείς. Για παράδειγμα, το MLO θα επιτρέπει στις συσκευές να μεταδίδουν και να λαμβάνουν δεδομένα σε πολλές ζώνες ταυτόχρονα. Αν και αυτό βελτιώνει την αποτελεσματικότητα του δικτύου, αυξάνει επίσης την πολυπλοκότητα της ασφάλειας των επικοινωνιών σε πολλαπλές συνδέσεις. Εάν ένας από αυτούς τους συνδέσμους παραβιαστεί, θα μπορούσε να θέσει σε κίνδυνο ολόκληρη τη σύνδεση.

Επιπλέον, η προσθήκη της ζώνης των 6 GHz ανοίγει άλλες διαστάσεις για πιθανούς κινδύνους ασφαλείας. Ενώ αυτή η ζώνη απολαμβάνει λιγότερες παρεμβολές και συμφόρηση, η σχετική καινοτομία της σημαίνει ότι τα υπάρχοντα εργαλεία και πρακτικές στη σφαίρα ασφαλείας δεν ανταποκρίνονται ακόμη στις πλήρεις απαιτήσεις πιθανών τρωτών σημείων που είναι ιδιαίτερα χαρακτηριστικά αυτού του φάσματος.

Τρωτά σημεία σε πρωτόκολλα παλαιού τύπου

Θεωρητικά, η συμβατότητα προς τα πίσω είναι και ευλογία και κατάρα του προτύπου Wi-Fi. Τα δίκτυα Wi-Fi 7 θα πρέπει να φιλοξενούν παλαιότερες συσκευές που ενδέχεται να εξακολουθούν να χρησιμοποιούν αρχαιωμένα πρωτόκολλα ασφαλείας όπως το WPA2, το οποίο είναι ευάλωτο σε μεθόδους KRACK και brute force. Ενώ το Wi-Fi 7 θα ενθαρρύνει τη χρήση του WPA3 για καλύτερη ασφάλεια, η εφαρμογή του σε όλες τις συσκευές που είναι συνδεδεμένες στο δίκτυο ενδέχεται να μην είναι πλήρως στεγανή, αφήνοντας πιθανά κενά που ενδέχεται να εκμεταλλευτούν οι κακόβουλοι χρήστες.

Κίνδυνοι της ενσωμάτωσης IoT

Οι προηγμένες δυνατότητες του Wi-Fi 7 είναι ιδιαίτερα περιζήτητες, ειδικά από συσκευές IoT σε έξυπνα σπίτια και βιομηχανίες. Ωστόσο, οι περισσότερες συσκευές IoT δεν διαθέτουν προηγμένες ενσωματωμένες λειτουργίες ασφαλείας για προστασία από μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση, παραβιάσεις δεδομένων ή ανάπτυξη botnets. Το Wi-Fi 7 επεκτείνει περαιτέρω αυτήν την ευπάθεια λόγω της υποστήριξης συσκευών υψηλής πυκνότητας, καθιστώντας την ισχυρή τμηματοποίηση δικτύου και την ασφάλεια σε επίπεδο συσκευής απολύτως αναγκαία.

Προβλήματα απορρήτου δεδομένων

Οι αυξημένοι ρυθμοί δεδομένων και η απόδοση του Wi-Fi 7 μεταφράζονται επίσης σε περισσότερα δεδομένα μέσω του δικτύου, εγείροντας έτσι μια σειρά ζητημάτων σχετικά με το απόρρητο των δεδομένων. Τα ανεπαρκώς ασφαλή δίκτυα θα μπορούσαν να έχουν ως αποτέλεσμα την υποκλοπή ευαίσθητων πληροφοριών, ειδικά σε δημόσιο ή επιχειρηματικό περιβάλλον. Βελτιωμένες λειτουργίες όπως η διαμόρφωση 4K QAM και το MLO θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν για την πιο αποτελεσματική παρακολούθηση μεγάλου όγκου δεδομένων, εάν δεν εφαρμοστούν ισχυρά πρωτόκολλα κρυπτογράφησης.

Ενισχυμένα μέτρα ασφαλείας

Για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων, το Wi-Fi 7 εφαρμόζει το πρωτόκολλο ασφαλείας WPA3 που προσφέρει βελτιωμένη πρόληψη από επιθέσεις ωμής βίας και διασφάλιση του απορρήτου των ευαίσθητων δεδομένων. Οι δυνατότητες του WPA3 περιλαμβάνουν ταυτόχρονο έλεγχο ταυτότητας ίσων (SAE) που αποτρέπει τις επιθέσεις λεξικών, κρυπτογραφώντας κάθε ροή δεδομένων για βελτιωμένο απόρρητο.

Μια άλλη κρίσιμη βελτίωση που έγινε στην ασφάλεια του Wi-Fi 7 περιλαμβάνει τη χρήση προστατευμένων πλαισίων διαχείρισης. Το PMF προσφέρει βελτιωμένη ασφάλεια στα ήδη κρίσιμα πλαίσια διαχείρισης Wi-Fi, αλλά συμβατικά ήταν ένα από τα κύρια σημεία επίθεσης, όπως η πλαστογράφηση και η υποκλοπή.

Προκλήσεις στα Επιχειρηματικά και Δημόσια Δίκτυα

Η κατάσταση είναι ακόμη χειρότερη για τις εταιρικές αναπτύξεις Wi-Fi 7, καθώς τα δίκτυά τους είναι συνήθως πολύ μεγάλης κλίμακας και τα περιβάλλοντα συσκευών ποικίλλουν πολύ. Τα δημόσια σημεία πρόσβασης Wi-Fi, για τα οποία το Wi-Fi 7 υψηλής απόδοσης μπορεί να προσφέρει τις απαραίτητες ενισχύσεις, πρέπει να εφαρμοστούν με ταυτόχρονη άμβλυνση των κινδύνων που σχετίζονται με τα ανοιχτά δίκτυα. Ακόμη και το WPA3 είναι ευάλωτο σε επιθέσεις από άνθρωπο στη μέση και σε αδιάστατα σημεία πρόσβασης σε δημόσια δίκτυα.

Επιπλέον, οι επιχειρήσεις και οι πάροχοι δημόσιων δικτύων αντιμετωπίζουν επίσης πρόκληση για την ασφάλεια των συνδέσεων MLO και την επιβολή μιας συνεπούς πολιτικής δικτύου σε όλες τις συνδέσεις.

Εξισορρόπηση ασφάλειας με απόδοση

Ενώ το Wi-Fi 7 εισάγει προηγμένες λειτουργίες που βελτιώνουν περαιτέρω την απόδοση, πολλά από τα ίδια στοιχεία μπορούν να περιπλέξουν τον τρόπο με τον οποίο μπορεί να εφαρμοστεί η ασφάλεια. Αυτό συμβαίνει με την υψηλότερη ταχύτητα και τη χαμηλή καθυστέρηση στο Wi-Fi 7, γεγονός που καθιστά ακόμη πιο δύσκολο τον εντοπισμό και τον μετριασμό των απειλών σε πραγματικό χρόνο. Οι διαχειριστές πρέπει να βρουν μια ισορροπία μεταξύ της ισχυρής ασφάλειας και των απαιτήσεων για βέλτιστη απόδοση δικτύου.

Μελλοντικές Θεωρήσεις

Ειδικότερα, αυτό θα περιλαμβάνει προηγμένες λύσεις ασφάλειας έναντι των μοναδικών προκλήσεων που αναμένεται να δημιουργήσει το Wi-Fi 7 καθώς αυξάνεται η υιοθέτησή του. Αυτό θα μπορούσε να περιλαμβάνει τη χρήση τεχνητής νοημοσύνης στον εντοπισμό απειλών

σε πραγματικό χρόνο, τις αρχιτεκτονικές δικτύων μηδενικής εμπιστοσύνης για τη μείωση του αντίκτυπου μιας παραβίασης και τη διαρκή βελτίωση των τεχνολογιών κρυπτογράφησης.

6. Το Μέλλον της Ασύρματης Δικτύωσης πέρα από το Wi-Fi 7

6.1 Συνδυασμός με 5G/6G δίκτυα

Η επόμενη εποχή της ασύρματης δικτύωσης θα οριστεί από τη σύγκλιση προηγμένων τεχνολογιών, με το Wi-Fi 7 να αναμένεται να παίξει κεντρικό ρόλο στη συμπλήρωση των δικτύων 5G και αργότερα το 6G. Η συγχώνευση του Wi-Fi 7 με το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας συνεχίζει να κινείται απρόσκοπτα σε συνδεσιμότητα υψηλής απόδοσης μέσω διαφορετικών περιβαλλόντων. Αυτή η ενότητα θα εξετάσει τις συνέργειες μεταξύ των δικτύων Wi-Fi 7 και 5G/6G και τις δυνατότητές τους να αλλάξουν το παιχνίδι σε καταναλωτικές, επιχειρήσεις και βιομηχανικές εφαρμογές.

Συμπληρωματικά πλεονεκτήματα του Wi-Fi και των δικτύων κινητής τηλεφωνίας

Παραδοσιακά, υπάρχει ένας ευρέως αναγνωρισμένος καταμερισμός εργασίας μεταξύ Wi-Fi και δικτύων κινητής τηλεφωνίας, όπου το Wi-Fi έχει διαπρέψει σε τοπικά, υψηλού εύρους ζώνης περιβάλλοντα, όπως εκείνα μέσα στα σπίτια και γραφεία, ενώ η κινητή τηλεφωνία κυριαρχεί στη συνδεσιμότητα ευρείας περιοχής. Η ενοποίηση Wi-Fi 7 με 5G και 6G ενσωματώνει μια συμπληρωματικότητα που αντιλαμβάνεται τα οφέλη από το συνδυασμό των τεχνολογιών για την κάλυψη των απαιτήσεων για απρόσκοπτη, υψηλής ποιότητας συνδεσιμότητα.

Το Wi-Fi 7 θα είναι μια αποτελεσματική λύση για δικτύωση εσωτερικών χώρων και πυκνών περιοχών λόγω της υψηλής απόδοσης, του χαμηλού λανθάνοντος χρόνου και της δυνατότητας πολλαπλών συνδέσεων. Από την άλλη πλευρά, το 5G θα παρέχει πανταχού παρούσα εξωτερική κάλυψη και θα εγγυάται συνδεσιμότητα σε σενάρια κινητής τηλεφωνίας. Καταληκτικά, το 6G θα εισαγάγει ασύγκριτες ταχύτητες και ακόμη πιο προηγμένες δυνατότητες, όπως καθυστέρηση δευτερολέπτου και χρήση φάσματος terahertz, ανοίγοντας ακόμη περισσότερες δυνατότητες για συνεργασία μεταξύ αυτών των τεχνολογιών.

Συγκλίνουσες περιπτώσεις χρήσης

Η σύγκλιση του Wi-Fi 7 και του 5G/6G θα επιτρέψει εφαρμογές που απαιτούν άφρονη μεταβίβαση μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού χώρου. Εφαρμογές όπως οι έξυπνες πόλεις επωφελούνται από αυτές τις συμπληρωματικές τεχνολογίες για να έχουν κοινή χρήση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο μεταξύ συσκευών IoT, συνδεδεμένων οχημάτων και δημόσιας υποδομής. Οι επιχειρήσεις μπορούν να αναπτύξουν υβριδικά δίκτυα όπου το Wi-Fi 7 παρέχει συνδεσιμότητα γραφείου υψηλής απόδοσης και το 5G/6G διασφαλίζει την επικοινωνία για τους εργαζόμενους που εργάζονται εξ αποστάσεως.

Άλλες πολύ σημαντικές περιπτώσεις χρήσης είναι οι εφαρμογές AR/VR, όπου μια απρόσκοπτη μετάβαση μεταξύ Wi-Fi και δικτύων κινητής τηλεφωνίας θα εξασφαλίσει μια αδιάκοπη, καθηλωτική εμπειρία. Ομοίως, η βελτιωμένη κάλυψη, η αξιοπιστία και η απόδοση που ενεργοποιούνται από τον συνδυασμό Wi-Fi 7 με 5G/6G θα αποδειχθούν πολύ χρήσιμες σε περιβάλλοντα IoT.

Προηγμένες τεχνολογίες που επιτρέπουν τη σύγκλιση

Η σύγκλιση από αυτή την άποψη του Wi-Fi 7 και των δικτύων κινητής τηλεφωνίας καθίσταται δυνατή μέσω της συγχώνευσης μιας πληθώρας προηγμένων τεχνολογιών, συμπεριλαμβανομένου του διαχωρισμού δικτύου και του υπολογισμού αιχμής πολλαπλής πρόσβασης.

Network Slicing: Ο τεμαχισμός δικτύου βασικά επιτρέπει στους χειριστές να έχουν εικονικά, ανεξάρτητα δίκτυα σε μία φυσική υποδομή. Επιτρέπει σε διαφορετικές εφαρμογές να απολαμβάνουν προσαρμοσμένο εύρος ζώνης, καθυστέρηση και αξιοπιστία με βάση τις ανάγκες τους. Για παράδειγμα, ένα κομμάτι βιομηχανικού αυτοματισμού θα μπορούσε να χρησιμοποιήσει 5G/6G για κάλυψη ευρείας περιοχής, ενώ παράλληλα αξιοποιούσε το Wi-Fi 7 για επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο μεταξύ των μηχανών εντός των εργοστασίων.

Υπολογισμός άκρων πολλαπλής πρόσβασης (Multi-Access Edge Computing): Το MEC θα επιτρέψει τη χαμηλή καθυστέρηση για την επεξεργασία δεδομένων στην άκρη του δικτύου, μειώνοντας την ανάγκη μεταφοράς δεδομένων σε κεντρικούς διακομιστές. Αυτό είναι πολύ χρήσιμο σε ένα περιβάλλον όπου λειτουργούν τόσο το Wi-Fi 7 όσο και τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, για παράδειγμα, ένα αυτόνομο όχημα ή μια έξυπνη υποδομή πόλης.

Προκλήσεις στην ένταξη

Ωστόσο, υπάρχουν δυσκολίες στην πλήρη ενοποίηση των δικτύων Wi-Fi-7 και 5G/6G λόγω των επιπλοκών διαλειτουργικότητας που προκύπτουν από την εργασία σε διαφορετικά πρωτόκολλα και πρότυπα, εξ ου και η ανάγκη για την κατασκευή ενός ενοποιητικού πλαισίου όπου η επικοινωνία μεταξύ Wi-Fi και κινητής τηλεφωνίας θα πραγματοποιούνταν εύκολα.

Μια άλλη πρόκληση είναι η κατανάλωση ενέργειας για ίση κατανομή πόρων. Οι συσκευές στο υβριδικό δίκτυο πρέπει να εναλλάσσονται δυναμικά μεταξύ Wi-Fi και κινητής τηλεφωνίας και αντίστροφα, βάσει πολλών συνθηκών όπως το φόρτο δικτύου, η ισχύς σήματος και οι ανάγκες εφαρμογής, που απαιτούν εξελιγμένους αλγόριθμους και μηχανισμούς λήψης αποφάσεων.

Μελλοντικές Προοπτικές

Στο μέλλον, ο συνδυασμός Wi-Fi 7 και 6G μπορεί να επεκτείνει τα σύνορα του 6G. Για παράδειγμα, το 6G θα βασίζεται στο φάσμα terahertz για εξαιρετικά υψηλούς ρυθμούς δεδομένων και καθυστέρηση κάτω του χιλιοστού του δευτερολέπτου. Ένας περαιτέρω συνδυασμός αυτού του είδους με τις λειτουργίες πολλαπλών συνδέσεων του Wi-Fi 7 και τη βελτιωμένη χρήση του φάσματος θα ανοίξει δρόμους για πραγματικά μεταμορφωτικές εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένων των ολογραφικών επικοινωνιών σε πραγματικό χρόνο και της πλήρους αυτονομίας.

6.2 Ενσωμάτωση με AI και Machine Learning

Η Τεχνητή Νοημοσύνη και το Machine Learning αλλάζει σχεδόν κάθε κλάδο, και το ίδιο ισχύει και για την ασύρματη δικτύωση. Η τεχνητή νοημοσύνη και το ML θα είναι ένας από τους κύριους παράγοντες για τη βελτιστοποίηση της διαχείρισης δικτύου, τη βελτίωση της ασφάλειας, ακόμη και τα προσαρμοστικά ασύρματα περιβάλλοντα, καθώς το Wi-Fi 7 θέτει τα θεμέλια για εξαιρετικά υψηλές επιδόσεις και προηγμένες λειτουργίες. Αυτό το υποκεφάλαιο εξετάζει πώς οι τεχνολογίες AI και ML αναμένεται να επηρεάσουν το μέλλον του Wi-Fi και των ασύρματων δικτύων πέρα από το Wi-Fi 7, προσφέροντας απaráμιλλη αποτελεσματικότητα και δυνατότητες.

AI και ML στη βελτιστοποίηση δικτύου

Το AI και το ML έχουν τεράστιες δυνατότητες να φέρουν επανάσταση στη διαχείριση και βελτιστοποίηση ασύρματων δικτύων. Τα σημερινά ασύρματα συστήματα βασίζονται σε μεγάλο βαθμό σε προκαθορισμένες παραμέτρους και χειροκίνητη διαμόρφωση, η οποία μπορεί να μην λειτουργεί αποτελεσματικά σε δυναμικά περιβάλλοντα. Ωστόσο, οι αλγόριθμοι AI και ML αναλύουν τεράστια δεδομένα σε πραγματικό χρόνο και λαμβάνουν έξυπνες αποφάσεις για την αποτελεσματικότητα του δικτύου.

Οι προηγμένες δυνατότητες του Wi-Fi 7, όπως το MLO και η συγκέντρωση μονάδων πολλαπλών πόρων, φέρνουν πολλές προκλήσεις βελτιστοποίησης που δύσκολα μπορούν να χειριστούν οι παραδοσιακές μέθοδοι. Οι λύσεις που βασίζονται στο AI εκτελούν δυναμικά κατανομή πόρων, βελτιστοποιούν τη χρήση του φάσματος και διαχειρίζονται λειτουργίες πολλαπλών συνδέσμων για την καλύτερη δυνατή εμπειρία χρήστη. Για παράδειγμα, η τεχνητή νοημοσύνη μπορεί να προβλέψει τη συμφόρηση σε ορισμένες ζώνες συχνότητων και να επαναδιαμορφώσει τις συνδέσεις για να ελαχιστοποιήσει τις παρεμβολές και τον λανθάνοντα χρόνο.

Προληπτική Συντήρηση και Προληπτική Διαχείριση

Οι αλγόριθμοι AI και ML υπερέχουν στην προγνωστική ανάλυση, η οποία μπορεί να διαδραματίσει ζωτικό ρόλο στην ασύρματη δικτύωση. Παρακολουθώντας τις μετρήσεις απόδοσης του δικτύου και προσδιορίζοντας μοτίβα, η τεχνητή νοημοσύνη μπορεί να προβλέψει πιθανές αποτυχίες ή υποβάθμιση της απόδοσης πριν συμβούν. Αυτό επιτρέπει στους διαχειριστές δικτύου να λαμβάνουν προληπτικά μέτρα, μειώνοντας το χρόνο διακοπής λειτουργίας και διασφαλίζοντας σταθερή απόδοση.

Για παράδειγμα, σε περιβάλλοντα όπου το Wi-Fi 7 υποστηρίζει συνδεσιμότητα υψηλής πυκνότητας, η τεχνητή νοημοσύνη θα μπορεί να προσδιορίσει ποια συσκευή ή σημείο πρόσβασης είναι πιθανό να αντιμετωπίσει προβλήματα και να προτείνει αλλαγές διαμόρφωσης ή τοποθέτησης. Ομοίως, τα διαγνωστικά με τεχνητή νοημοσύνη μπορούν να βοηθήσουν στην ταχύτερη επίλυση σύνθετων ζητημάτων σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους αντιμετώπισης προβλημάτων.

Βελτιωμένη ασφάλεια και ανίχνευση απειλών

Η ασφάλεια είναι μία από τις δυνατότητες για οποιοδήποτε ασύρματο δίκτυο, και έτσι, με το βελτιωμένο Wi-Fi 7, ενισχύεται η ανάγκη για ασφάλεια. Η τεχνητή νοημοσύνη και η ML θα συμμετάσχουν σε μεγάλο βαθμό στον εντοπισμό και την απόκριση απειλών σε πραγματικό χρόνο για να διατηρηθούν τα δίκτυα ασφαλή από τον δυναμικό κόσμο του κυβερνοχώρου.

Τα συστήματα που λειτουργούν με τεχνητή νοημοσύνη μπορούν να αναλύσουν το μοτίβο της κυκλοφορίας του δικτύου για να εντοπίσουν ανωμαλίες που μπορεί να είναι ενδεικτικές μη εξουσιοδοτημένης πρόσβασης, κακόβουλου λογισμικού ή άλλων κακόβουλων δραστηριοτήτων. Για παράδειγμα, οι αλγόριθμοι τεχνητής νοημοσύνης μπορούν να αναγνωρίσουν ασυνήθιστη συμπεριφορά της συσκευής -όπως η αποστολή υπερβολικών μεταδόσεων δεδομένων ή η προσπάθεια σύνδεσης σε ύποπτες διευθύνσεις IP- και να προβούν αυτόματα σε διορθωτικές ενέργειες.

Η ασφάλεια που βασίζεται στο AI θα είναι ζωτικής σημασίας στα δίκτυα Wi-Fi 7, καθώς αναμένεται να υποστηρίξουν πυκνά περιβάλλοντα IoT. Τα μοντέλα ML μαθαίνουν συνεχώς από νέα δεδομένα απειλών, εξελίσσονται με εξελισσόμενα διανύσματα επίθεσης και ελαχιστοποιούν την ευπάθεια.

Προσαρμοστική δικτύωση και επίγνωση του πλαισίου

Ένας από τους τρέσαντες τομείς εφαρμογών που έχει γίνει τόσο υποσχόμενος με τη χρήση της τεχνητής νοημοσύνης και της ML σχετίζεται με την ανάπτυξη προσαρμοστικών ασύρματων δικτύων με επίγνωση του περιβάλλοντος. Τέτοια δίκτυα μπορεί να προσαρμόσουν δυναμικά τη συμπεριφορά τους ώστε να ταιριάζουν καλύτερα στις ανάγκες των χρηστών, στις περιβαλλοντικές συνθήκες και στις απαιτήσεις εφαρμογών.

Για παράδειγμα, η τεχνητή νοημοσύνη σε ένα έξυπνο σπίτι Wi-Fi 7 θα καταναίμει το εύρος ζώνης ροής για βίντεο 4K και θα διατηρεί χαμηλή καθυστέρηση για συσκευές IoT, όπως κάμερες ασφαλείας. Στη βιομηχανική χρήση, η τεχνητή νοημοσύνη μπορεί να επεξεργαστεί παραμέτρους δικτύου για να καλύψει τις απαιτήσεις κρίσιμων για την αποστολή εφαρμογών, είτε πρόκειται για ρομποτικό αυτοματισμό είτε για ανάλυση σε πραγματικό χρόνο.

Ενεργειακή απόδοση με γνώμονα την τεχνητή νοημοσύνη

Η ενεργειακή απόδοση έχει αποκτήσει μεγάλη δυναμική στην ασύρματη δικτύωση, ειδικά με τον πολλαπλασιασμό των συσκευών IoT. Το AI και το ML μπορούν να παίξουν πολύ σημαντικό ρόλο στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας στα δίκτυα Wi-Fi 7.

Αναλύοντας μοτίβα χρήσης, η τεχνητή νοημοσύνη μπορεί να εφαρμόσει λειτουργίες όπως προσαρμοστική διαχείριση ενέργειας, διασφαλίζοντας ότι οι συσκευές και τα σημεία πρόσβασης λειτουργούν μόνο όταν χρειάζεται. TWT-μια δυνατότητα στο Wi-Fi 7 που έχει ήδη σχεδιαστεί για να μειώνει την κατανάλωση ενέργειας- θα συμπληρωθεί περαιτέρω από αλγόριθμους AI που προβλέπουν τη δραστηριότητα της συσκευής και βελτιστοποιούν τους κύκλους ύπνου/αφύπνισης.

Ο δρόμος προς τα πλήρως αυτόνομα δίκτυα

Ο απώτερος στόχος της ενσωμάτωσης AI και ML στην ασύρματη δικτύωση, φυσικά, είναι τα πλήρως αυτόνομα δίκτυα. Αυτά τα αυτο-οργανωμένα, αυτοθεραπευόμενα δίκτυα μπορούν να διαχειριστούν τον εαυτό τους με ελάχιστη ανθρώπινη παρέμβαση, εξασφαλίζοντας βέλτιστη απόδοση και αξιοπιστία.

Στο πλαίσιο του Wi-Fi 7 και μελλοντικά, τα αυτόνομα δίκτυα θα έχουν τις εξής δυνατότητες:

- Αυτόματη προσαρμογή στις μεταβαλλόμενες συνθήκες δικτύου.
- Ανίχνευση και μετριάσμο απειλών σε πραγματικό χρόνο.
- Βελτιστοποίηση πολλαπλών συνδέσμων και χρήσης φάσματος χωρίς χειροκίνητη είσοδο.
- Η εκμάθηση από εμπειρίες μέσω ιστορικών δεδομένων για τη βελτίωση οποιασδήποτε μελλοντικής απόδοσης θα μπορούσε να γίνει εύκολα.

Προκλήσεις και ζητήματα

Ενώ η συμπερίληψη της τεχνητής νοημοσύνης και της ML στην ασύρματη δικτύωση έχει τεράστιες δυνατότητες, ακολουθούν επίσης ορισμένες προκλήσεις. Η εκπαίδευση μοντέλων ML απαιτεί μεγάλα σύνολα δεδομένων και αυτό μπορεί να έχει επιπτώσεις στην προστασία του απορρήτου για καταναλωτικά περιβάλλοντα. Ως εκ τούτου, η χρήση της τεχνητής νοημοσύνης με διαφάνεια και ηθική στη διαχείριση δικτύου είναι σημαντική.

Επιπλέον, η υπολογιστικά έντονη μηχανική εκμάθηση μπορεί να περιλαμβάνει υψηλότερες καταναλώσεις ενέργειας και σχετικό υλικό. Υπάρχει μελλοντική εργασία που θα επικεντρωθεί στον τρόπο με τον οποίο αυτοί οι παράγοντες θα εξισορροπηθούν καλύτερα με τις συνολικές βελτιώσεις απόδοσης που έχουν επιτευχθεί.

Συμπεράσματα

Το Wi-Fi 7 είναι ένα τεράστιο άλμα στον ασύρματο κόσμο, θέτοντας σημεία αναφοράς όσον αφορά την ταχύτητα, την αποτελεσματικότητα και την προσαρμοστικότητα. Σε αυτήν την πτυχιακή εργασία μιλήσαμε για τα πρωτοποριακά χαρακτηριστικά του, την τεχνική πρόοδο, τις επιπτώσεις σε διαφορετικά πεδία και τις προκλήσεις τις οποίες αντιμετωπίζει επίσης το Wi-Fi 7 για το μέλλον.

Από τις τεχνικές ρίζες του, το Wi-Fi 7 έρχεται με μια σειρά από καινοτομίες: βελτιωμένα εύρη ζώνης καναλιών έως και 320 MHz, λειτουργία πολλαπλών συνδέσμων, συνάντηση μονάδων πολλαπλών πόρων και διαμόρφωση 4K-QAM υψηλότερης τάξης που αυξάνει συνολικά την απόδοση, μειώνει λανθάνουσα κατάσταση και βελτιστοποίηση της χρήσης του φάσματος. Πρόκειται για εξελίξεις που ανταποκρίνονται όχι μόνο στις αυξανόμενες απαιτήσεις για ταχύτερη, πιο αξιόπιστη συνδεσιμότητα αλλά και επιτρέπουν την απρόσκοπτη λειτουργία σε περιβάλλοντα με αυξανόμενη συμφόρηση. Η υιοθέτηση προηγμένων χαρακτηριστικών όπως το Target Wake Time-TWT υπογραμμίζει περαιτέρω την αποτελεσματικότητά του, ειδικά σε εφαρμογές IoT ευαίσθητες στην ενέργεια, επομένως είναι ιδανικό για την τρέχουσα εποχή συνδεδεμένων συσκευών. Οι συγκριτικές αναλύσεις με τα προηγούμενα πρότυπα Wi-Fi υπογραμμίζουν ορισμένα εκπληκτικά επιτεύγματα που μπόρεσε να επιτύχει το Wi-Fi 7. Η απόδοση, η μείωση της καθυστέρησης, η χρήση του φάσματος και η διαχείριση εύρους ζώνης ξεπερνούν τις προηγούμενες γενιές και έτσι ανεβάζουν τον πήχη ψηλά για τις τεχνολογίες ραδιοεπικοινωνιών.

Σε πραγματικές υλοποιήσεις, το Wi-Fi 7 παρουσιάζει μια ολόκληρη σειρά ευελιξίας. Ενισχύοντας εξαιρετικά πυκνά εταιρικά δίκτυα με σχεδόν αμελητέα παρεμβολή στην ομαλή λειτουργία έξυπνων κατοικιών και όλων των τύπων συσκευών IoT, ξεχωρίζει για να επιτρέψει την καινοτομία σε διάφορους κλάδους. Παρέχει στα παιχνίδια και το streaming εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση και παροχή περιεχομένου υψηλής ανάλυσης. Ο ρόλος του στο Βιομηχανικό IoT/Αυτοματισμό θα φέρει επανάσταση στην κατασκευή και τα logistics με ανταπόκριση σε πραγματικό χρόνο, σε συνδυασμό με την ενίσχυση της αξιοπιστίας.

Το Wi-Fi 7 βέβαια δεν έρχεται χωρίς προκλήσεις, αν και αποτελεί πρόοδο στις τεχνολογίες. Οι απαιτήσεις υποδομής και υλικού στο Wi-Fi 7 χρειάζονται σημαντικές επενδύσεις και τεχνολογικές προόδους. Η συμβατότητα προς τα πίσω με προηγούμενες συσκευές εισάγει ένα σύνολο περιορισμών. Αυτό ανοίγει μεγαλύτερες ευπάθειες σε τυχόν κακόβουλους χρήστες και, κατά συνέπεια, απαιτεί πολύ ισχυρότερες μεθοδολογίες κρυπτογράφησης, συμπεριλαμβανομένων μηχανισμών για την ανίχνευση απειλών σε πραγματικό χρόνο.

Αν σκεφτεί κανείς το τρέχον Wi-Fi 7, ενσωματωμένο με ανερχόμενες τεχνολογίες όπως δίκτυα 5G/6G, AI και ML, τότε το μέλλον της ασύρματης επικοινωνίας θα φαινόταν εκπληκτικό. Τέτοιες ενσωματώσεις επιτρέπουν ένα πλήρως αυτόνομο και προσαρμοστικό δίκτυο που είναι αυτοβελτιστοποιούμενο, εξαιρετικά ασφαλές και προβλέψιμο από άποψη συντήρησης, εξελίσσοντας έτσι τα όρια της συνδεσιμότητας περαιτέρω.

Το Wi-Fi 7 αποτελεί απόδειξη της ταχείας εξέλιξης της ασύρματης τεχνολογίας. Όχι μόνο επιλύει τις ελλείψεις των προηγούμενων πρωτοκόλλων, αλλά επίσης θέτει το θεμέλιο για την επόμενη γενιά ευφυών δικτύων υψηλής απόδοσης. Ο μετασχηματιστικός ρόλος του θα γίνει αισθητός σε διάφορους τομείς, από τα σπίτια έως τις βιομηχανίες, αυξάνοντας την αποτελεσματικότητα, την παραγωγικότητα και την καινοτομία. Καθώς προχωράμε σε αυτή τη νέα εποχή συνδεσιμότητας, οι δυνατότητες είναι ατελείωτες και το Wi-Fi 7 είναι βέβαιο ότι θα είναι ένας από τους ακρογωνιαίους λίθους στη διαμόρφωση των ασύρματων δικτύων του αύριο.

Βιβλιογραφία

- Wi-Fi 101 — Wi-Fi Origins and History
<https://evanmccann.net/blog/wifi-101/origins-and-history>
- The History of Wifi <https://evenetworks.no/en/wi-fi-history/>
- The Wi-Fi Evolution By: Jaidev Sharma, Director, Applications Engineering, Wireless Communication Business Unit
<https://www.gorvo.com/resources/d/gorvo-the-wi-fi-evolution-white-paper>
- The Evolution of Wi-Fi Technologies: Wi-Fi 7 (802.11be) [Arrow.com on Wi-Fi 7](#)
- The Evolution of WiFi: Introducing WiFi 7 [Netgear Evolution of Wi-Fi](#)
- What Is Wi-Fi 7? Here's Everything You Need to Know [WIRED Wi-Fi 7 Overview](#)
- Anritsu Corporation. (n.d.). *Key Technologies for IEEE 802.11be (Wi-Fi 7) White Paper*.
<https://dl.cdn-anritsu.com/zh-tw/test-measurement/files/Brochures-Datasheets-Catalogs/White-Paper/wi-fi7-er1100.pdf>
- Arista Networks. (n.d.). *Arista Wi-Fi 7: A Leap Towards Time-Sensitive Networking*.
<https://www.arista.com/assets/data/pdf/Whitepapers/Arista-Wi-Fi-7-White-Paper.pdf>
- MathWorks. (n.d.). *Overview of Wi-Fi 7 (IEEE 802.11be)*.
<https://www.mathworks.com/help/wlan/ug/overview-of-wifi-7-or-ieee-802-11-be.html>
- Qualcomm Wi-Fi 7 White Paper: "Next-Generation Wireless Technology" -
<https://www.qualcomm.com/research/wi-fi-7>
- TechTarget. (n.d.). *What is Wi-Fi 7 (802.11be)? The ultimate guide*.
<https://www.techtarget.com/searchnetworking/definition/Wi-Fi-7>
- Keysight Technologies. (n.d.). *Everything You Need to Know About Wi-Fi 7*.
<https://www.keysight.com/us/en/assets/7124-1010/white-papers/Everything-You-Need-to-Know-About-Wi-Fi-7.pdf>
- Wi-Fi Alliance. (n.d.). *Papers*. <https://www.wi-fi.org/discover-wi-fi/papers>
- IEEE 802.11 Working Group. (n.d.). *IEEE 802.11, The Working Group Setting the Standards for Wireless LANs*. <https://www.ieee802.org/11/>
- Spirent Communications. (n.d.). *Navigating Wi-Fi 7 - Next Gen Advancements*.
<https://www.spirent.com/assets/white-paper-navigating-wi-fi-7>
- Zyxel Networks. (n.d.). *Understanding the benefits of WiFi 7*.
https://www.zyxel.com/sites/zyxel/files/library/assets/solutions/wifi7/Zyxel_Networks_WiFi_7_White_Paper.pdf
- Extreme Networks: "Wi-Fi 7 and the Evolution of Channel Bandwidth"
<https://www.extremenetworks.com/resources/blogs/wi-fi-7-bandwidth-evolution>
- Intel Technical Overview of Wi-Fi 7 Spatial Streams -
<https://www.intel.com/content/www/us/en/wireless-networking/wi-fi-7.html>
- "The Benefits of 4096-QAM Modulation in Wi-Fi 7" - <https://arxiv.org/pdf/2201.04509.pdf>
- Texas Instruments: "Higher QAM Modulation in Wi-Fi 7" -
<https://www.ti.com/lit/an/slyt890/slyt890.pdf>
- IEEE Standards Association .IEEE 802.11be: Enhancements for Extremely High Throughput (EHT). <https://standards.ieee.org/ieee/802.11be/7516/>
- Cisco Meraki. Wi-Fi 7 (802.11be) Technical Guide.
https://documentation.meraki.com/MR/Wi-Fi_Basics_and_Best_Practices/Wi-Fi_7_%28802.11be%29_Technical_Guide
- Aruba Networks. Wi-Fi 7 Reference Card.
<https://www.arubanetworks.com/assets/infographic/Wi-Fi-7-Reference-Card.pdf>
- Mouser Electronics. Wi-Fi 7: The Next-Level Standard, detailing spatial streams, channel bandwidth, and technical advancements.

- <https://www.mouser.com/applications/wifi-7-next-level-standard/>
- ON Semiconductor. Wi-Fi 7: More Than Just Extremely High Throughput, including technical details on spatial streams. <https://www.onsemi.cn/company/news-media/blog/innovation/en-us/wi-fi-7-more-than-just-extremely-high-throughput>
- Broadcom. Information on how Broadcom's Wi-Fi 7 chipsets support Multi-Link Operation for higher throughput and better network performance. <https://www.broadcom.com/company/newsroom/press-releases?filtr=multi-link>
- TechRadar. A comprehensive article that discusses the performance improvements and technical capabilities of Wi-Fi 7, particularly Multi-Link Operation. <https://www.techradar.com/news/wifi-7-whats-new-and-why-you-should-care>
- Alethea Tech Blog on Wi-Fi 7. <https://aletheatech.com/blog-wi-fi-7-latency-mlo/>
- Qualcomm Blog on OFDMA Enhancements - <https://www.qualcomm.com/research/wi-fi-7-ofdma>
- Texas Instruments White Paper: "Target Wake Time in Wi-Fi 7" - <https://www.ti.com/lit/wp/swry019a/swry019a.pdf>
- Cisco Blog: "Wi-Fi 7 Power-Saving Features and TWT" - <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/enterprise-networks/wi-fi-6e/white-paper-c11-743788.html>
- Cio.com Article - Wi-Fi 7 and the Next Generation of Wireless - <https://www.cio.com/article/wi-fi-7-guide.html>
- "Wi-Fi 7: What's New and What's Next" by Network World. <https://www.networkworld.com/>
- Building business growth with WiFi 7 - <https://www.business-reporter.co.uk/improving-business-performance/building-business-growth-with-wifi-7>
- IEEE Xplore. (2023). IEEE 802.11be: A Review on Wi-Fi 7 Use Cases. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9596344>
- Wi-Fi Alliance. (2023). *Wi-Fi 7: Advanced Connectivity for the Next Generation*. <https://www.wi-fi.org/beacon/the-beacon/wi-fi-7-advanced-connectivity-for-the-next-generation>
- EEWeb. (2023). *Exploring Wi-Fi 7 New Capabilities and Applications*. <https://www.eeweb.com/exploring-wi-fi-7-new-capabilities-and-applications/>
- IEEE Xplore. (2020). *IEEE 802.11be Wi-Fi 7: New Challenges and Opportunities*. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9152055>
- ResearchGate. (2023). *Introduction to Wi-Fi 7: A Review of History, Applications, Challenges, Economical Impact, and Research Development*. https://www.researchgate.net/publication/384400619_Introduction_to_Wi-Fi_7_A_Review_of_History_Applications_Challenges_Economical_Impact_and_Research_Development/fulltext/66f78241f599e0392fa9304f/Introduction-to-Wi-Fi-7-A-Review-of-History-Applications-Challenges-Economical-Impact-and-Research-Development.pdf
- Telecoms.com. (2023). *The Technology Behind Wi-Fi 7 and its Testing Challenges*. <https://www.telecoms.com/wifi/the-technology-behind-wi-fi-7-and-its-testing-challenges>
- Help Net Security. (2024). *Wi-Fi 7's Mission-Critical Role in Enterprise, Industrial Networking*. <https://www.helpnetsecurity.com/2024/01/02/tiago-rodriques-wireless-broadband-alliance-wi-fi-7-networks/>
- NI.com. (2023). *Wi-Fi 7: Increased Speed and Data Rates Mean More Test Challenges*. <https://www.ni.com/en/perspectives/wi-fi-7-increased-speed-and-data-rates-mean-more-test-challenges.html>
- Electronics Maker. (2023). *Testing Wi-Fi 7 for High-Performance Use Cases*. <https://electronicsmaker.com/testing-wi-fi-7-for-high-performance-use-cases>

- The Verge. (2024). *Eero's New Product Takes Wi-Fi Beyond Your Walls*.
<https://www.theverge.com/2024/10/23/24277515/eero-outdoor-7-wifi-outdoor-access-point-price-release-date-specs>
- USI Global. (2023). What is Wi-Fi 7? Everything You Need to Know About the Future of Wireless Connectivity.
<https://www.usiglobal.com/en/blog/wifi7-future-of-wireless-connectivity>
- Wi-Fi and cellular: A pragmatic perspective to convergence (Analyst Angle)
<https://www.rcrwireless.com/20241220/5g/wi-fi-convergence>
- Benefits of 5G and Wi-Fi: superior indoor connectivity
<https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/5g-and-wi-fi-path-toward-superior-indoor-connectivity>